

PROYECTO DE FIN DE CARRERA
DE INGENIERÍA ELÉCTRICA

enCuadro

Aplicación de realidad aumentada y navegación para museos sobre dispositivos móviles

DOCUMENTACIÓN FINAL AÑO 2012

Tutor:
Juan Cardelino

Integrantes:

Juan Braun

juanibraun@gmail.com

Martín Etchart

mrtn.etchart@gmail.com

Pablo Flores

pablolofloresguridi@gmail.com

Mauricio González

mgonzaleznappa@gmail.com

Índice general

Índice general	1
1. Introducción	7
2. Alcance del proyecto	10
2.1. Introducción	10
2.2. Objetivos del proyecto	10
2.3. Estado del arte	11
2.4. Explicación global de la aplicación	12
2.4.1. Navegación	12
2.4.2. Identificación de obras	12
2.4.3. Realidad Aumentada	13
2.5. Sobre el documento	14
3. Hardware y Software	15
3.1. Introducción	15
3.2. Hardware	15
3.2.1. Elección de plataforma	15
3.2.2. Comparación de plataformas con iOS: iPhone, iPad, iPod Touch	16
3.3. Desarrollo de Software	17
3.3.1. Objective-C	18
3.3.2. Lenguaje C	18
3.4. Resumen	19
4. Navegación e Identificación	20
4.1. Introducción	20
4.2. Navegación	20
4.2.1. Distintos métodos de Navegación.	20
4.2.2. Navegación con GPS	20
4.2.3. Navegación con <i>access points</i>	20
4.2.4. Navegación con códigos QR	21
4.3. Técnicas de identificación	23
4.3.1. SIFT	24
4.4. Resumen	27
5. Detección	28
5.1. Introducción	28
5.2. Bordes y esquinas	28

5.2.1. Detector de bordes de Canny	29
5.2.2. Detector de bordes y esquinas de Harris	32
5.3. Líneas y segmentos de línea	34
5.3.1. Detector de líneas de Hough	35
5.3.2. Detector de segmentos de línea: LSD	36
5.3.3. Detector de segmentos de línea: EDLines	37
5.3.4. Ejemplos de interés	37
5.3.5. Detector de segmentos de línea y arcos: ORT	38
5.4. Resumen	40
6. Marcadores	42
6.1. Introducción	42
6.2. Sistemas basados en marcadores planos	42
6.2.1. ARToolKit	43
6.2.2. ARTag	44
6.3. Marcador QR	44
6.3.1. Estructura del marcador	44
6.3.2. Diseño	45
6.3.3. Parámetros de diseño	46
6.3.4. Diseño utilizado	48
6.4. Detección	48
6.4.1. Detección de segmentos de línea	48
6.4.2. Filtrado y agrupamiento de segmentos	48
6.4.3. Determinación de correspondencias	51
6.4.4. Detección robusta	53
6.5. Comentarios sobre la implementación de los algoritmos	55
6.6. Resultados de Benchmark	56
6.6.1. Elección de parámetros para Benchamark	56
6.6.2. Límite en profundidad: Eje z	58
6.6.3. Límite en rotación: Eje x	59
6.6.4. Límite en rotación: Eje y	60
6.7. Resumen	61
7. LSD: “Line Segment Detection”	62
7.1. Introducción	62
7.2. <i>Line-support regions</i>	62
7.3. Aproximación de las regiones por rectángulos	63
7.4. Validación de segmentos	64
7.5. Refinamiento de los candidatos	65
7.6. Optimización del algoritmo para tiempo real	66
7.6.1. Filtro Gaussiano	66
7.6.2. <i>Level-line angles</i>	68
7.6.3. Refinamiento y mejora de los candidatos	68
7.6.4. Algoritmo en precisión simple	68
7.6.5. Resultados	69
7.7. Resumen	71

8. Modelo de cámara y estimación de pose monocular	73
8.1. Introducción	73
8.2. Modelo de cámara <i>pin-hole</i>	73
8.2.1. Fundamentos y definiciones	74
8.2.2. Matriz de proyección	75
8.3. Distorsión introducida por las lentes	78
8.4. Métodos para la calibración de cámara	78
8.5. Calibración de cámaras utilizadas	81
8.5.1. Calibración <i>iPod Touch 4^{ta} generación</i>	81
8.5.2. Calibración <i>iPhone 4</i>	81
8.5.3. Calibración <i>iPad 2</i>	81
8.6. Problema de estimación de pose	82
8.6.1. <i>DLT</i> (<i>Direct Linear Transform</i>)	82
8.6.2. <i>PnP</i> (<i>Perspective-n-Point</i>)	83
8.6.3. RANSAC(<i>RANdom SAMple Consensus</i>)	83
8.6.4. POSIT	84
8.7. Representación de la pose de la cámara	85
8.7.1. Representación matricial	85
8.7.2. Ángulos de Euler	85
8.7.3. Cuaternios	88
8.8. Resumen	89
9. POSIT: <i>POS</i> with <i>ITerations</i>	90
9.1. Introducción	90
9.2. POSIT clásico	90
9.2.1. Notación	90
9.2.2. SOP: <i>Scaled Orthographic Projection</i>	92
9.2.3. Ecuaciones para calcular la proyección perspectiva	92
9.2.4. Algoritmo	93
9.2.5. POSIT para puntos coplanares	94
9.3. SoftPOSIT	97
9.3.1. Modern POSIT	98
9.3.2. Cálculo de pose sin correspondencias	100
9.3.3. Matriz de asignación	101
9.3.4. Implementación	101
9.4. POSIT moderno para puntos coplanares	102
9.5. Resultados	103
9.5.1. Error en pose	103
9.5.2. Error de reproyección	108
9.6. Resumen	111
10. Filtrado de Kalman para estimación de pose	112
10.1. Introducción	112
10.2. Filtro de Kalman	112
10.3. Kalman para suavizado	113
10.4. Kalman con sensores	114
10.5. Resultados	114
10.6. Resumen	115

11. Rendering en iOS: ISGL3D	116
11.1. Introducción	116
11.2. Conceptos básicos de ISGL3D	117
11.3. FOV y ejes de ISGL3D	118
11.4. Primitivas de ISGL3D	119
11.5. Importación de modelos a ISGL3D.	121
11.6. Luz en ISGL3D	124
11.7. Método - <i>(void) tick:(float)dt</i>	124
11.8. ISGL3D en la aplicación	125
11.9. Resumen	125
12. Casos de Uso	126
12.1. Introducción	126
12.2. Caso de uso “interactividad”	126
12.2.1. Comentarios sobre el caso de uso	126
12.2.2. Detalles constructivos	128
12.3. Caso de uso “video”	129
12.3.1. Comentarios sobre el caso de uso	129
12.3.2. Detalles constructivos	130
12.3.3. <i>CGAffineTransform</i> y <i>CATransform3D</i>	131
12.3.4. Resolución de Homografía	132
12.4. Caso de uso “modelos”	133
12.4.1. Comentarios sobre el caso de uso	133
12.4.2. Detalles constructivos	134
12.5. Resumen	134
13. Implementación	135
13.1. Introducción	135
13.2. Diagrama global de la aplicación	135
13.2.1. NavigationViewController	137
13.2.2. InicioViewController	138
13.2.3. UITableViewControllers	139
13.2.4. ReaderSampleViewController	140
13.2.5. ImagenServerViewController	140
13.2.6. ObraCompletaViewController	142
13.2.7. VistaViewController	142
13.2.8. DrawSign	144
13.2.9. TouchVista	145
13.2.10. Realidad Aumentada en ISGL3D	145
13.3. El QR en la aplicación	147
13.4. Servidor	147
13.4.1. Creando el servidor	148
13.5. SIFT	149
13.6. Resumen y comentarios sobre la implementación	149
14. Conclusiones y trabajo a futuro	151
14.1. Introducción	151
14.2. Conclusiones generales	151
14.3. Conclusiones específicas	152

14.3.1. Detección de características	152
14.3.2. Estimación de pose	152
14.3.3. Una solución alternativa: SLAM	153
14.3.4. Demás bloques	153
14.4. Trabajo a futuro	153
14.4.1. Sobre el servidor	153
14.4.2. Sobre la realidad aumentada	154
14.4.3. Sobre la plataforma	154
A. Herramientas	155
A.1. Herramientas de Benchmark	155
A.1.1. Generación de imágenes sintéticas: Blender	155
A.1.2. Ejecución Batch: Matlab	161
A.1.3. Resumen	162
A.2. Herramientas de Hardware y Software de Apple Inc.	163
A.2.1. <i>SoC</i> , CPU y GPU de plataformas Apple Inc.	163
A.2.2. Sistemas Operativos	164
A.2.3. Objective-C	164
A.2.4. Xcode: Herramientas y Librerías	165
A.3. Herramientas de Productividad	172
A.3.1. GIT	172
A.3.2. GoogleCode	172
A.3.3. Github	172
B. Costos	173
B.1. Introducción	173
B.2. Tiempos	173
B.3. Costos de investigación más desarrollo	173
B.4. Otros costos	174
B.5. Costos totales	174
B.6. Resumen	174
Bibliografía	175

Queremos agradecer especialmente a nuestras familias y amigos, a Magela, Amanda, Sofía y Mayra; por el apoyo y la paciencia durante estos años de carrera.

A Juan Cardelino nuestro tutor, por la disposición, la sinceridad, los consejos y esfuerzo para poder llevar adelante este proyecto.

A Rafael Grompone por sus consejos en la optimización de LSD y a Pablo Musé por su ayuda con el filtrado de Kalman. A Fernando Foglino por facilitarnos y permitirnos utilizar su modelo de Artigas. A Mariana Gutiérrez y Felipe Llodrá de DoIT developers, por sus recomendaciones.

Al Museo de Arte Precolombino e Indígena (MAPI) y su Director Facundo de Almeida por estar abierto a propuestas innovadoras y a trabajar en conjunto. A Magdalena Muttoni del MAPI, tanto por atendernos en el museo como por su compromiso posterior para aportar contenidos.

A las comunidades de Software Libre y de Código Abierto, en particular a la comunidad de Acceso Abierto e Investigación Reproducible: IPOL.

Nos gustaría también agradecer al Museo Nacional de Artes Visuales (MNAV) y al Museo Blanes. Al Programa de Apoyo a la Investigación Estudiantil (PAIE) de la Comisión Sectorial de Investigación Científica (CSIC) por el apoyo económico para adquirir herramientas de desarrollo.

CAPÍTULO 1

Introducción

Debido a la creciente disponibilidad de las plataformas móviles y el gran poder de procesamiento con el que cuentan, el número de aplicaciones móviles ha crecido de manera significativa en los últimos años. Dichas plataformas cuentan con sistemas de adquisición de audio, video y una variedad de sensores como por ejemplo acelerómetro y giroscopio, lo que las transforma en sistemas ideales para desarrollar aplicaciones de procesamiento multimedia.

Por otro lado, desde hace algunos años varios museos de distintas partes del mundo han comenzado a considerar este tipo de dispositivos, y otras tantas tecnologías, como una alternativa muy interesante para brindar un valor agregado al usuario. Proyecciones de imágenes y videos, recorridos interactivos y aplicaciones de *realidad aumentada* son tan sólo algunos de los ejemplos. Sin embargo, esta es un área muy reciente y en la que todavía queda un camino muy largo por recorrer.

El presente proyecto busca desarrollar sobre ciertos dispositivos móviles en particular, un recorrido interactivo para un museo, con realidad aumentada. Se espera de esta manera, contribuir al desarrollo de herramientas que fomenten contenidos educativos y artísticos, generando así un marco para poner la tecnología al servicio de la cultura y la sociedad. Así entonces, se estableció contacto con dos museos de Montevideo, el “Museo Nacional de Artes Visuales” (MNAV) y el “Museo de Arte Precolombino e Indígena” (MAPI). Se espera basar el prototipo final de la aplicación en obras, piezas arqueológicas o mapas informativos, pertenecientes a estos dos museos.

Probablemente, la realidad aumentada sea el mayor atractivo del proyecto por ser un área que se encuentra en pleno desarrollo y que todo el tiempo recibe ideas innovadoras y muy interesantes, lo que la hace por demás apasionante. Vale la pena entonces dar una definición para la misma:

La realidad aumentada (AR del inglés Augmented Reality) es un término que denota la visión de un entorno físico del mundo real, cuyos elementos se combinan con elementos virtuales generados por computadora, para la creación de una realidad mixta en tiempo real.

Cuando se genera una imagen por medio de realidad aumentada, conviven en ella elementos reales con elementos virtuales. Es básicamente un juego de percepciones. En la Figura 1.1 se muestra un ejemplo de realidad aumentada desarrollado durante este proyecto. Se puede ver en ella, un cubo virtual sobre la esquina superior izquierda de “Hombre de Vitruvio” de Leonardo da Vinci, de manera coherente con la posición del dispositivo respecto de la obra. Si en esta figura tan sólo se viera a través del dispositivo, cualquiera podría pensar que el cubo es real y que efectivamente forma parte de la escena. Eso es lo que busca la realidad aumentada.

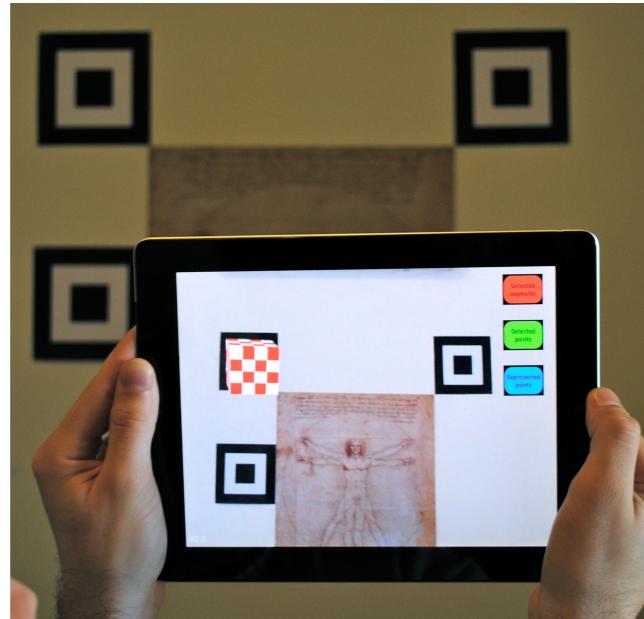


Figura 1.1: Ejemplo de realidad aumentada. Se ubica un cubo virtual en la esquina superior izquierda de una réplica “Hombre de Vitruvio” de Leonardo da Vinci.

Para entender cómo se genera la realidad aumentada, primero hay que entender el llamado “problema directo”; esto es, cómo se proyecta una escena del mundo real en una cámara. En la Figura 1.2 se ve cuál es el proceso de captura de una imagen. Se comienza por el objeto que se quiere capturar (1), luego se ubica la cámara de manera de obtener la imagen deseada (2), finalmente se captura la imagen (3).

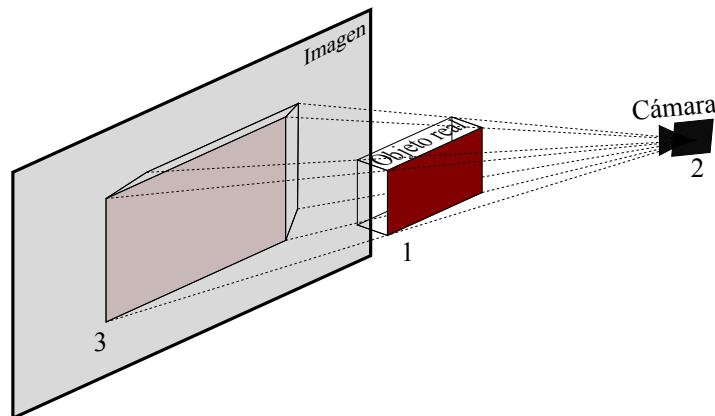


Figura 1.2: Problema directo: con la cámara ubicada en frente a un objeto, se obtiene una imagen del mismo.

Luego, la realidad aumentada requiere de la resolución del “problema inverso”, esto es, dado un objeto y una imagen del mismo, encontrar la posición exacta en la que estaba la cámara, respecto de un eje de coordenadas determinado, cuando se capturó esa imagen. En la Figura 1.3 se puede ver gráficamente este problema. Para un cierto objeto, se quiere encontrar la posición de la cámara en

el mundo (pose de la cámara) que proyecte sobre el plano imagen el rectángulo verde del medio, formado así la fotografía en cuestión. La pose que resuelve este problema es P_2 .

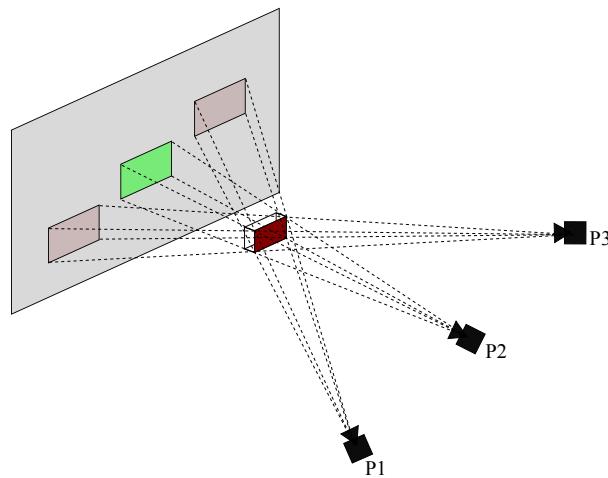


Figura 1.3: Problema inverso: calcular la posición exacta de la cámara, respecto de cierto sistema de coordenadas, dados un objeto y una imagen. En verde se ve la proyección del objeto que efectivamente forma la imagen.

Una vez conocida la pose de la cámara, se procede a introducir un objeto virtual en la escena; en este caso un hombre 3D muy simple. Ver Figura 1.4. Se obtiene así una fusión entre el mundo real y el virtual. Un caso particular de lo anterior es introducir objetos virtuales 2D. Por ejemplo, es posible proyectar un video sobre el plano imagen, también de manera consistente con la pose de la cámara.

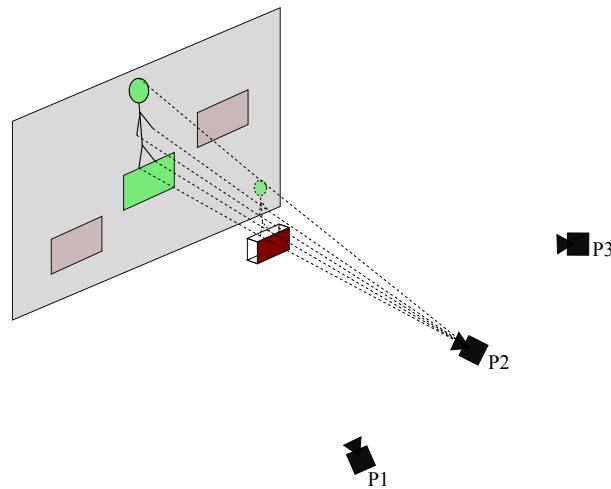


Figura 1.4: En líneas punteadas se ve el modelo a proyectar, en la imagen se tiene la composición de las proyecciones del objeto real y virtual.

A lo largo de la presente documentación se dará al lector un panorama de lo que fue el proyecto en su conjunto, haciendo hincapié en el estudio y la implementación de la realidad aumentada. Se espera que este proyecto sirva como iniciativa para futuros trabajos vinculados a esta rama de la ingeniería.

CAPÍTULO 2

Alcance del proyecto

2.1. Introducción

En el presente capítulo se establece el alcance del proyecto. Se plantean los objetivos tal y como fueron formulados originalmente y luego se los clasifica en las tres partes fundamentales del proyecto: *investigación*, *implementación* y *aplicación*. Estas son ponderadas en función de la importancia que tienen en el mismo, y por consiguiente la importancia que se les dio. Luego, se resume la estructura de la aplicación final, de manera de poder comprender a todo el proyecto en su conjunto. Finalmente se presenta un esquema del resto de la documentación donde se explican los elementos necesarios para desarrollar cada parte de dicha aplicación.

2.2. Objetivos del proyecto

El presente proyecto de fin de carrera tiene varios objetivos. En primer lugar se busca evaluar la capacidad de procesamiento de dispositivos móviles para aplicaciones de procesamiento de imágenes y estudiar el desempeño de diferentes algoritmos. Esto implica que se deben estudiar los diferentes dispositivos disponibles en el mercado. Por otro lado poder aplicar lo investigado para desarrollar una aplicación de realidad aumentada completa funcionando sobre un dispositivo móvil y en tiempo real. Finalmente se quiere utilizar dicha aplicación para abordar un problema real, el *recorrido interactivo con realidad aumentada* para museos.

Los objetivos anteriores pueden resumirse en las tres tareas fundamentales del proyecto, que se expresan a continuación:

1. **Investigación:** Comprensión de la arquitectura de las plataformas móviles y de sus plataformas de desarrollo, con el objetivo de implementar los distintos algoritmos y *software* en general en las mismas. Estudio de las diferentes maneras de lograr la realidad aumentada, elección de los algoritmos a utilizar y su comprensión, desarrollo de nuevos algoritmos y variantes de algoritmos existentes. Aprendizaje de herramientas en general.
2. **Implementación:** Integración de los distintos bloques para lograr la realidad aumentada. Implementación de bloques lógicos accesorios que faciliten la integración de los primeros. Validación de los algoritmos utilizados y desarrollados.
3. **Aplicación:** Implementación de una aplicación completa en la que el usuario ingrese al museo, se ubique dentro de él, se dirija a un cuadro, reciba información respecto del mismo y finalmente experimente la realidad aumentada sobre la obra.

Cada una de ellas se jerarquizó en función de la importancia que se les dio en el proyecto, así como también el tiempo que se les dedicó:

Frente de trabajo	Porcentaje
Investigación	50 %
Implementación	30 %
Aplicación	20 %

Lo que la tabla anterior intenta reflejar es que el foco principal del proyecto es la investigación, evaluación de algoritmos y su migración a plataformas móviles. La aplicación es un objetivo secundario que ayuda a validar los conceptos estudiados en las etapas de investigación e implementación.

2.3. Estado del arte

Para llevar a cabo los objetivos planteados es bueno tener un contexto del estado del arte en cuanto al desarrollo de aplicaciones de realidad aumentada. Existen en la actualidad múltiples kits de desarrollo comerciales para aplicaciones de realidad aumentada, en los que de manera sencilla, se logran este tipo de aplicaciones con desempeños muy buenos. Tal es el caso de *Metaio* [59], *Vuforia* [60], *String* [61] y *Aurasma* [63]. Por su parte, *Layar* [62], es también un kit de desarrollo para aplicaciones de realidad aumentada, pero se especializa en el agregado de contenido digital sólo sobre páginas impresas como revistas y catálogos. Ninguna de las herramientas anteriores es gratuita y tampoco *open source*. En la Figura 2.1 se muestra un ejemplo que incluye por defecto *Metaio* y otro que incluye *String*.

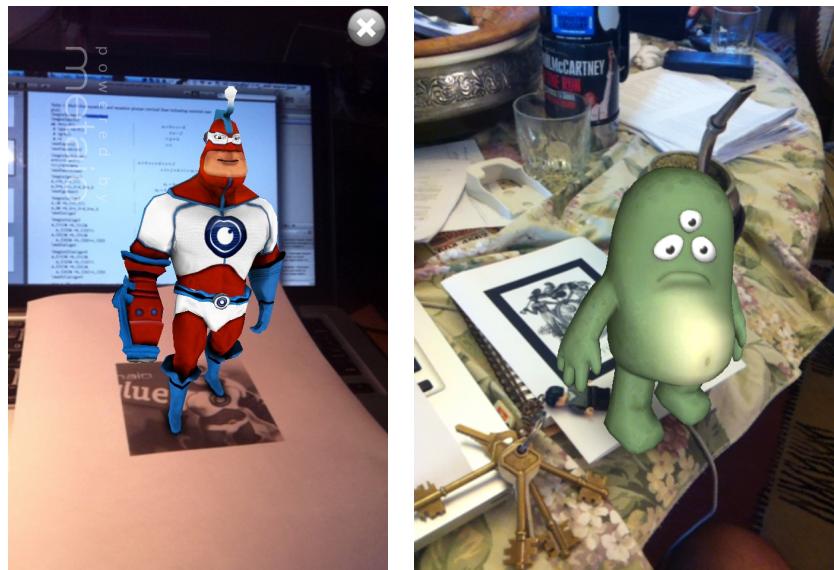


Figura 2.1: Izq.: Ejemplo de realidad aumentada que incluye por defecto el kit de desarrollo *Metaio*. Der.: Otro ejemplo de realidad aumentada incluido por *String*. En ambos casos debe notarse la coherencia lograda entre el mundo real y el mundo virtual. En la imagen de la derecha se tiene al personaje de *String* parado en una mesa por delante de un mate y encima de un llavero.

Si bien se probaron algunas de estas herramientas y se tomaron de ellas estándares en cuanto a la *performance* que una aplicación de realidad aumentada debe tener, **no es un objetivo** del proyecto

el desarrollo de aplicaciones de realidad aumentada con kits de desarrollo ya existentes. Se hace hincapié en la investigación de herramientas y adquisición de experiencia propia, con el objetivo de marcar una hoja de ruta para todo aquel que desee continuar la investigación con nuevas ideas y algoritmos. Todo el código generado en este proyecto, así como la documentación es *open source* y se puede bajar del repositorio git ubicado en: <https://github.com/encuadro/encuadro>.

Un último aspecto a destacar es que dentro del IIE hay poca experiencia en el área de realidad aumentada y en particular es la primera experiencia en plataformas móviles, por lo cual este proyecto tiene la importancia además de abrir el camino a nuevas generaciones que quieran abordar estos temas.

2.4. Explicación global de la aplicación

Si bien se dijo que la creación de la aplicación integral, correspondiente a un recorrido con realidad aumentada para muesos, corresponde tan sólo a un quinto del alcance total del proyecto; la visualización de la aplicación total es quizá la forma más sencilla de comprender el proyecto en su conjunto y ayuda a evaluar si el sistema desarrollado funciona de manera aceptable.

La aplicación se desglosa en tres grandes bloques que son resumidos individualmente en secciones subsiguientes:

- **Navegación**
- **Identificación de obras**
- **Realidad aumentada**

2.4.1. Navegación

La navegación es la ubicación del usuario dentro del museo, la importancia de este bloque reside en que permite brindar información contextual de donde se encuentra el usuario. Esta información podría ser una breve descripción de la sala en la que se encuentra o indicaciones para ir de un lugar a otro del museo, entre otras. Desde el punto de vista de la aplicación también es importante porque permite manejar un menor volumen de datos al momento de identificar las obras, debido a que sabe en qué sala se encuentra el usuario. Se estudiaron distintas alternativas para la navegación. La primera posibilidad analizada fue la utilización de tres o más *access points*, mediante los cuales, una vez mapeadas las características de las señales en cada uno de los puntos de las salas, se puede ubicar al usuario dentro de las mismas. Otra forma de navegación que se tuvo en cuenta fue la localización a través de la tecnología GPS. Sin embargo, se optó por utilizar códigos QR dada su amplia difusión, practicidad y facilidad de implementación. La discusión técnica que justifica estas elecciones se ve en el Capítulo 4.

2.4.2. Identificación de obras

Por identificación de obras se entiende al proceso mediante el cual la aplicación detecta frente a qué obra se encuentra el usuario para así entonces brindarle información de la misma, una audioguía y si fuera el caso la posibilidad de desplegar realidad aumentada sobre ella. La forma en la que se implementó este bloque fue mediante un algoritmo de detección de características de imágenes llamado SIFT. Es un algoritmo que se basa en el contenido de la imagen únicamente, por lo que

para identificar la obra no se necesita ningún tipo de marcador o agregado externo. Se verá en profundidad en el Capítulo 4.

2.4.3. Realidad Aumentada

El proceso mediante el cual se logra la realidad aumentada puede verse en el diagrama de bloques de la Figura 2.2.

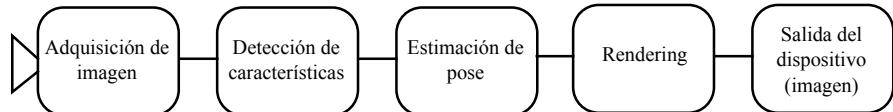


Figura 2.2: Diagrama de bloques del proceso mediante el cual se logra la realidad aumentada.

El primer bloque corresponde a la cámara que captura una imagen. En el segundo bloque dicha imagen es procesada con el objetivo de detectar en esta características. Estas características pueden ser segmentos, esquinas, descriptores. El tercer bloque corresponde a la estimación de pose, busca estimar en qué posición se encuentra la cámara respecto de cierto eje de coordenadas previamente definido y hacia dónde esta apunta. En el cuarto bloque con la información anterior, se debe poder *renderizar* una escena de manera consistente con la pose de la cámara, para así entonces lograr la salida del sistema, que será una imagen con la realidad aumentada incorporada.

Debe notarse que en ninguna etapa se mencionó ningún algoritmo en particular, ya sea para la detección de características como para la estimación de pose. Tampoco se menciona nada en particular para la etapa de rendereo. Esto se debe a que las etapas se concibieron de forma genérica, de manera ser libres de utilizar cualquier algoritmo de detección de características con cualquier algoritmo de estimación de pose. Las interfases entre los bloques están pensadas de forma de poder cambiar un bloque sin generar problemas en los demás bloques.

Para este proyecto se diseñó un marcador formado por tres grupos de cuadrados concéntricos, a partir del cual se extraen los segmentos necesarios para la estimación de la pose del dispositivo. El bloque de detección de características está compuesto por los bloques del diagrama de la Figura 2.3.

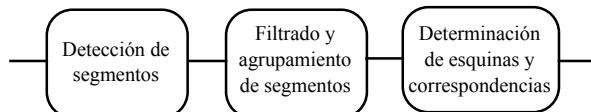


Figura 2.3: Diagrama de bloques de la detección de características utilizada en este proyecto.

En el diagrama de bloques de la Figura 2.3, primero se detectan idealmente todos los segmentos que hay en la imagen y luego se filtran tan sólo los pertenecientes al marcador antedicho y se agrupan por cuadrado. En el tercer bloque, se hallan las esquinas de estos cuadrados mediante la intersección de los segmentos. Finalmente estos puntos son ordenados de una manera predefinida. Detalles respecto de este proceso y sobre el marcador utilizado se ven en el Capítulo 6.

2.5. Sobre el documento

En lo que resta del documento se verán en detalle todos los aspectos técnicos referidos a los temas vistos en este capítulo. Se explica claramente la investigación realizada, los algoritmos utilizados, las herramientas aprendidas y en general, toda la experiencia adquirida a lo largo del proyecto. Se justifican claramente todas las decisiones que hubo que tomar y se comentará además, en cada caso, si estas fueron acertadas o no.

En el Capítulo 3 se comparan las plataformas móviles disponibles y se justifica la elección de una de ellas. Luego se ven más a fondo algunas características de la plataforma seleccionada y finalmente algunas herramientas genéricas requeridas para el desarrollo. En el Capítulo 4 se ven en detalle las soluciones técnicas para la navegación y la detección de la obra. El Capítulo 5 abarca los temas detección de características de las imágenes en general y se muestran ejemplos de interés para la aplicación final. Por otro lado en el Capítulo 6 se comentan detalles respecto de marcadores comúnmente utilizados en aplicaciones de realidad aumentada y se propone un diseño particular de marcador utilizado en este proyecto. Adicionalmente se desarrollan los algoritmos utilizado para la detección de este marcador basado en Detector de Segmentos de Línea: LSD.

Más adelante, en el Capítulo 7, se estudia a fondo el algoritmo de detección de segmentos en imágenes digitales llamado LSD, utilizado para la detección de segmentos representada en el primer bloque de la Figura 2.3 junto con resultados de la optimización para tiempo real realizada sobre el mismo. Luego, en el Capítulo 8, se plantea un modelo para la cámara utilizada para la captura y se introducen conceptos básicos para comprender cómo es el proceso de la estimación de la pose de la misma. El algoritmo utilizado en este proyecto para tal fin, POSIT ,se presenta en el Capítulo 9.

El Capítulo 10 presenta el filtro de *Kalman* y sus ecuaciones básicas. En el Capítulo 11 se introduce brevemente el concepto de *render* y se presenta la herramienta utilizada para realizar *renders* en la plataforma escogida. Luego, en el Capítulo 12, se presentan los distintos casos de uso implementados para probar integrar todos los bloques necesarios para la realidad aumentada en pequeñas aplicaciones individuales. Más adelante, en el Capítulo 13, se explican los detalles técnicos respecto de la aplicación completa, tal y como se define en la Sección 2.4.

Las herramientas utilizadas para analizar el desempeño y la validación de cada algoritmo se explican en el Anexo A.1. Finalmente, en el Anexo B, se analizan los costos económicos que tuvo el proyecto.

CAPÍTULO 3

Hardware y Software

3.1. Introducción

En el presente capítulo se introducen algunos conceptos básicos para el desarrollo sobre plataformas móviles. En particular se describe el *hardware* que fue utilizado, el lenguaje de programación y el entorno de desarrollo que permitieron incorporar procesamiento sobre los dispositivos. En lo que respecta al *hardware*, esto es todo lo que se comenta sobre el mismo y a nivel de *software* simplemente se introducen algunos conceptos básicos. En el Apéndice A se hace un desarrollo más extensivo de las características del *hardware* de Apple Inc., de los sistemas operativos que emplean, del lenguaje de programación y entorno de desarrollo así como del conjunto de librerías existentes escritas en Objective-C y su aplicación.

3.2. Hardware

3.2.1. Elección de plataforma

La elección de la plataforma para desarrollar fue una de las primeras decisiones que se tuvo que tomar más allá del proceso natural inicial de investigación del proyecto. Esto es debido a que existen muchos factores que se ven afectados en función de la plataforma que van desde el aprendizaje del lenguaje de programación y del entorno de desarrollo hasta la adquisición de plataformas y/o máquinas para desarrollar. Así entonces, las dos grandes posibilidades que se tenían al comienzo y que determinaban estos factores eran plataformas que tuvieran los sistemas operativos *Android* o *iOS* (en ningún momento se consideró desarrollar sobre plataformas con *Symbian* dado que está planificado que deje de tener soporte para 2016 y tampoco sobre plataformas con *Windows Phone* 8 dado que no había sido lanzado en el momento de la decisión). Uno de los aspectos desfavorables que se veía de trabajar sobre *Android* era la multiplicidad de plataformas existentes, de distintas características de procesamiento, cámara y sensores entre otras cosas con respecto a las plataformas que utilizan *iOS*. Por otra parte, luego de un proceso de investigación se vio que el conjunto de herramientas existentes y el estado de maduración del desarrollo de aplicaciones para *iOS* hacían de este sistema operativo un camino más seguro para comenzar en un área que era desconocida. *Android* es un sistema operativo que viene en pleno crecimiento y que a nivel masivo es una buena alternativa desarrollar en él, pero para los fines de investigación y de desarrollo de *software* que tenía el presente proyecto se vio que era mejor desarrollar sobre *iOS*, presente en plataformas de Apple.

Al trabajar con Apple entonces se cuenta con la ventaja de contar con pocas variantes en cuan-

to al *hardware* utilizado. Básicamente, existen tres familias de dispositivos en los que se puede desarrollar: *iPhone*, *iPad* y *iPod Touch*. Para cada familia existen distintos modelos que hacen que algunas características importantes como la capacidad de procesamiento, la resolución de cámara o el tamaño de la pantalla entre otras, puedan verse afectadas. A continuación se presenta brevemente cómo fue el surgimiento de cada uno de los dispositivos al mercado y se describen resumidamente las principales características.

3.2.2. Comparación de plataformas con iOS: iPhone, iPad, iPod Touch

Sin dudas el *iPhone* fue uno de los saltos más grandes en el mundo tecnológico en los últimos años. Logró llenar el hueco que los *PDAs* (*Personal Digital Assistant*) de la década de los 90 no habían sabido completar y comenzó a desplazar al invento que revolucionó el mercado de los contenidos de música, el *iPod*. Gracias a su pantalla táctil capacitiva de alta sensibilidad logró reunir todas las funcionalidades agregando solamente un gran botón y algunos extra para controlar volumen o desbloquear el dispositivo.

La primera generación del *iPhone* fue lanzada por Apple en Junio de 2007 en Estados Unidos, luego de una gran inversión de la operadora AT&T que exigía exclusividad de venta dentro de dicho país durante los siguientes cuatro años. La misma soportaba tecnología GSM cuatribanda y se lanzó en dos variantes de 4GB y 8GB de ROM. El segundo modelo lanzó como novedad el soporte de tecnología 3G cuatribanda y GPS asistido. Luego le siguieron el *iPhone 3GS*, *4*, *4S* y el *5*, siendo este último, la sexta y última generación disponible al momento de la redacción de este trabajo.

Por su parte, tanto el *iPad* como el *iPod Touch* también representaron un gran salto en el mundo de las plataformas y *Tablets*, agrandando las posibilidades de desarrollo y procesamiento. Como se dijo, de cada una de estas tres familias de dispositivos existen distintas versiones y modelos. Por eso, a continuación se muestra una tabla comparativa de determinadas características que son de interés a los efectos del presente proyecto.

	iPhone 4	iPhone 4s	iPod Touch 4G	iPad 2
ROM	8, 16 o 32 GB	16, 32 o 64 GB	8, 32 o 64 GB	16, 32 o 64 GB
RAM	512 MB	512 MB	256 MB	512 MB
SoC	Apple A4	Apple A5	Apple A4	Apple A5
CPU	1 GHz, ARM Cortex-A8	1 GHz, dual-core ARM Cortex-A9	800 MHz, ARM Cortex-A8	1 GHz dual-core ARM Cortex-A9
GPU	PowerVR SGX535 GPU	PowerVR SGX543MP2 (2-core) GPU	PowerVR SGX535 GPU	PowerVR SGX543MP2 (2-core) GPU
CÁMARA	Foto: 5.0 MP Video: 720p HD (30 fps)	Foto: 8.0 MP Video: 1080p HD (30 fps)	Foto: 0.7 MP Video: 720p HD (30 fps)	Foto: 0.7 MP Video: 720p HD (30 fps)
PANTALLA	Diagonal: 3.5" Pixels: 960x640 Densidad de Pixels: 326 ppi Multitáctil	Diagonal: 3.5" Pixels: 960x640 Densidad de Pixels: 326 ppi Multitáctil	Diagonal: 3.5" Pixels: 960x640 Densidad de Pixels: 326 ppi Multitáctil	Diagonal: 9.7" Pixels: 1024x768 Densidad de Pixels: 123 ppi Multitáctil
SENSORES	Girsóscopo de 3 ejes Acelerómetro Sensor de luz ambiente Sensor de proximidad	Girsóscopo de 3 ejes Acelerómetro Sensor de luz ambiente Sensor de proximidad	Girsóscopo de 3 ejes Acelerómetro Sensor de luz ambiente	Girsóscopo de 3 ejes Acelerómetro Sensor de luz

Tabla 3.1: Comparativa de algunas plataformas Apple. [44] [45] [46] [47]

Hay algunos comentarios respecto de la Tabla 3.1 que es bueno destacar. Es importante decir que se eligieron esos cuatro dispositivos, pues pareció de interés conocer al menos una plataforma de cada familia; y dentro de las mismas se eligieron las que fueron utilizadas para desarrollar.

Uno de los puntos a evaluar es el **SoC**, que refiere a *System on Chip* por sus siglas en inglés. “*System on Chip*” es un concepto de los sistemas embebidos que refiere a la integración de todo lo necesario para poder correr un sistema operativo, en un solo circuito integrado. En contraposición a un microcontrolador que es capaz de realizar procesamiento más básico y menos potente, con poca interacción de usuario y menor flexibilidad, un *SoC* refiere a la idea de tener todo lo necesario para desarrollar sobre la plataforma y poder hacer procesamiento sin tantas limitaciones. Básicamente cumplen funciones similares pero el *SoC* forma parte de una evolución de los microcontroladores, siendo de una complejidad mayor e integrado en un tamaño muy reducido buscando poco consumo y eficiencia de costos. Así entonces, un *SoC* puede estar conformado por un microcontrolador y hardware adicional como procesadores de señal y bloques de memoria [49].

En la Figura A.5 se ilustran los dos tipos de *SoC* de los dispositivos de la Tabla 3.1: Apple A4 y Apple A5. Algunos dispositivos que no figuran en la tabla como el *iPhone 5* o el *iPad 4* usan *SoCs* más recientes como el Apple A6 o Apple A6x respectivamente. La familia de *SoCs* Apple Ax, es la que la mencionada firma utiliza en todas sus plataformas, inclusive en el *Apple TV* y es manufacturada por Samsung. Estos *SoCs* se caracterizan por utilizar CPUs de arquitectura ARM, en su mayoría ARMv7 y GPUs de PowerVR de la línea SGX.

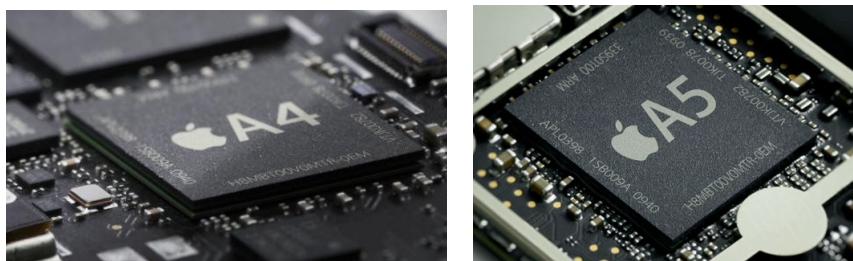


Figura 3.1: *System on Chip*: SoC.

3.3. Desarrollo de Software

Para poder desarrollar aplicaciones sobre dispositivos móviles de la firma Apple Inc. es necesario contar con computadoras que corran el sistema operativo **Mac OS X**. Esto puede ser llevado a cabo, ya sea adquiriendo plataformas de desarrollo de la mencionada firma o creando máquinas virtuales que corran dicho sistema operativo. Para la segunda opción (la más económica pero con ciertas dificultades de *performance*), es necesario que la computadora cuente con virtualización de *hardware*. Se comenzó trabajando de esta manera hasta el momento de adquirir plataformas de desarrollo que contaran con Mac OS X en forma nativa.

Una de las grandes innovaciones de estas plataformas móviles es el hecho de poder desarrollar aplicaciones y correrlas en el propio dispositivo (por supuesto también sucede lo mismo en el mundo Android). Para poder lograr esto, además de contar con una máquina que corra Mac OS X, es necesario contar con el “*Integrated Development Environment*” (IDE) apropiado llamado **Xcode**. Este entorno de desarrollo y su lenguaje, Objective-C, se explican en la Sección A.2.3.

3.3.1. Objective-C

El lenguaje que fue elegido por Apple Inc. para desarrollar sobre plataformas móviles es Objective-C. Este lenguaje fue desarrollado en la década de 1980 como un superconjunto de C orientado a objetos. Se trata entonces de una extensión del standard ANSI C que incorpora un modelo orientado a objetos basado en **Smalltalk** [53].

Este lenguaje cuenta con algunas particularidades en cuanto a la invocación de métodos (procedimientos) y algunas otras características que no van más allá de la sintaxis; como los métodos de clase y los métodos de instancia, como los métodos *get* y *set* para acceder y configurar atributos (propiedades) de los objetos, como la notación de *import* en lugar de *include* para quienes están acostumbrados a C, y así varios detalles más. Sin embargo, más allá de estas y otras diferencias y particularidades resulta un lenguaje relativamente ágil y dentro de todo sencillo de aprender para quien tiene ya un conocimiento de otros lenguajes orientados a objetos.

Sin embargo, los algoritmos desarrollados y utilizados en el proyecto para los módulos de detección de características, filtrado y agrupamiento de segmentos, determinación de correspondencias y estimación de pose; se encuentran escritos en lenguaje C y están autocontenido en el mismo código fuente sin la utilización de librerías externas para su funcionamiento. Se hace énfasis en que estos módulos constituyen el núcleo de la solución al problema de realidad aumentada planteado inicialmente.

Es directo incorporar código escrito en lenguaje C a Objective-C ya que como se dijo el primero está contenido en el segundo. Esto refuerza tanto la elección de la plataforma como del lenguaje ya que es posible sacar provecho de todas las funcionalidades y librerías de alto nivel proporcionadas por Objective-C y a la vez poder implementar algoritmos de bajo nivel en C.

La elección del lenguaje y la filosofía de desarrollo comentada anteriormente permite **portabilidad** en el uso de los mismos para aplicaciones más allá del proyecto y significó también un ejercicio de aprendizaje muy interesante.

3.3.2. Lenguaje C

Al comienzo del proyecto se realizó en curso breve de introducción al lenguaje C alojado en: <http://iie.fing.edu.uy/rosaluna/wiki/Ipol:main>. De este curso se abarcaron principalmente los siguientes temas:

- Módulo 1: Introducción al lenguaje C.
- Módulo 2: Punteros, arreglos y estructuras. Memoria dinámica.
- Módulo 3: Diseño de un filtro FIR.
- Módulo 4: Herramientas de programación.
 - Entornos de desarrollo: e.g. Netbeans.
 - Makefile: make.
 - Debugger: gdb/ddd.
 - Profiler: valgrind/kcachegrind.
 - Documentación: doxygen.

- Generación de makefiles multiplataforma: cmake.
- Módulo 5: Lenguaje C aplicado al procesamiento de imágenes.

La utilización del lenguaje C no es casual en este proyecto. Dicho lenguaje tiene varias ventajas sobre otros lenguajes posibles, en particular para procesamiento de imágenes. En primer lugar, al ser un lenguaje de bajo nivel el código y algoritmos desarrollados pueden ser optimizados hasta el detalle. Por otro lado, la disponibilidad de algoritmos y librerías existentes en C/C++ orientadas a procesamiento de imágenes es superior a la de otros lenguajes. Algunas librerías importantes son OpenCV, ITK e ImageMagik ya que son ampliamente utilizadas y cuentan con una gran comunidad de desarrolladores y/o de empresas que las respaldan. También existen repositorios públicos y comunidades como IPOL que se rigen bajo el modelo de Acceso Abierto e Investigación Reproducible y brindan documentación y desarrollos de algoritmos en C/C++ para procesamiento de imágenes.

Sin ir mas lejos, la implementación del algoritmo LSD utilizada en el presente proyecto, fue tomada de su publicación en IPOL, mientras que el autor de los artículos utilizados para la implementación del algoritmo de estimación de pose POSIT provee en su página el código fuente en C y en Matlab de algunas de las versiones del mismo.

3.4. Resumen

En resumen frente a los dos sistemas operativos más importantes para desarrollar se optó por elegir iOS y desarrollar en plataformas de Apple. Se conoce el poder de procesamiento de los *SoCs* que componen estas plataformas que integran CPU ARMv7 en varias versiones y GPU SGX con distintas capacidades. Se vio un análisis comparativo entre las tres familias de dispositivos, y dentro de las mismas, en detalle los modelos de plataformas que fueron utilizados. Se explicaron algunas características generales de desarrollar sobre plataformas con iOS, así como también del lenguaje de programación Objective-C, superconjunto de C y que es el utilizado para desarrollar en los dispositivos mencionados. En caso de querer profundizar sobre los distintos *frameworks* del SDK de iOS, herramientas de *debugging* y herramientas generales de desarrollo, se sugiere leer el Apéndice A.

CAPÍTULO 4

Navegación e Identificación

4.1. Introducción

Como se plantea en el Capítulo 2 las tres partes del recorrido son *Navegación*, *Identificación* y *Realidad aumentada*. En este capítulo se presentan las alternativas investigadas y finalmente implementadas para poder lograr un grado de completitud en la aplicación. Para el caso de las alternativas implementadas se aporta mayor detalle sobre la resolución.

4.2. Navegación

4.2.1. Distintos métodos de Navegación.

Como se comentó en el Capítulo 2, se estudiaron distintas alternativas para la navegación o localización en el interior del museo. Dentro de las más importantes se encuentra la navegación con *access points*, la navegación con GPS y la navegación con códigos QR. A continuación se explican algunos detalles de las mismas.

4.2.2. Navegación con GPS

La tecnología GPS (*Global Positioning System*) es altamente usada como sistema asesor para vehículos y sistemas de información geográfica y basa su funcionamiento en el procesamiento de señales RF. Algunas bibliografías afirman que su precisión supera los 3m en el 95 % de los casos [3]. La clave de este sistema de posicionamiento radica en que las señales de RF son ondas electromagnéticas y viajan a la velocidad de la luz. Entonces mediante el uso de tres satélites o más y osciladores que permitan medir tiempos con muy buena precisión, es posible estimar la posición de la que son recibidas las señales de RF. Sin embargo, resulta imposible utilizar esta tecnología en lugares cerrados o muy edificados. Se decidió entonces que esta no era la herramienta indicada para el problema de localización.

4.2.3. Navegación con *access points*

Existen otros sistemas de localización que están comenzando a utilizarse para ambientes cerrados y que utilizan algunas ideas del sistema GPS. A estos sistemas se los conoce como *Indoor Positioning System* o IPS y existen distintas variantes ya sea procesando señales RF, ondas sonoras o

luz. Una de las posibilidades es utilizar *GPS Indoor* pero esta opción resulta bastante cara. La localización interior con estándares IEEE 802.11 (WiFi), se obtiene mediante el procesamiento de señales RF y la idea es, una vez conocida la posición de los transmisores WiFi (*Access Points*) presentes en una sala, se miden las distintas señales recibidas por un dispositivo móvil (provenientes de cada uno de los APs). De esta manera, se logra ubicar al móvil dentro de la sala. Es posible utilizar diferentes medidas, como por ejemplo, la potencia de las señales recibidas, el tiempo de propagación de cada una de ellas o incluso sus ángulos de incidencia.

Debido a su gran complejidad, esta alternativa se descartó, ya que la idea no era centrar el proyecto en la navegación de interiores, sino usarla simplemente como una herramienta para la completitud de la aplicación final.

4.2.4. Navegación con códigos QR

4.2.4.1. ¿Cómo incorporarlos a la navegación?

La navegación con códigos QR quizá es bastante sencilla de implementar. Simplemente se tiene que tener un código QR ubicado en forma estratégica en cada zona con la que se quiere asociar y el usuario puede recorrer el museo libremente e ir decodificando los códigos en la medida que los ve.

4.2.4.2. Identificadores QR: una realidad cotidiana.

El uso de los identificadores QR (Quick Response), es cada vez más generalizado. Últimamente, debido al incremento significativo del uso de *smart devices*, el hecho de poder contar con una cámara, cierto poder de procesamiento y por lo general hasta una conexión móvil a internet, hace que sea cada vez más frecuente encontrar aplicaciones con el poder de reconocer QRs. Comenzaron utilizándose en la industria automotriz japonesa como una solución para el trazado en la línea de producción, pero su campo de aplicación se ha diversificado y hoy en día se pueden encontrar también como identificadores de entradas deportivas, tickets de avión, localización geográfica, vínculos a páginas web y en algunos casos también como tarjetas personales.

4.2.4.3. ¿Qué son los QR?

Los QRs, creados por la compañía japonesa *Denso Wave* en 1994 [72], son una extensión de los códigos de barra. Incorporan una segunda dimensión lo cual es una gran ventaja ya que pueden almacenar mucho más información y que puede ser accedida a gran velocidad. Existen distintos tipos de QR, con distintas capacidades de almacenamiento que dependen de la versión, el tipo de datos almacenados y del tipo de corrección de errores. En su versión 40 con detección de errores de nivel L, se pueden almacenar alrededor de 4300 caracteres alfanuméricos o 7000 dígitos (frente a los 20-30 dígitos del código de barras) lo cual lo hace muy flexible para cualquier tipo de aplicación de identificación.

En la Figura 4.1 se pueden ver las distintas partes que componen un QR, como por ejemplo el bloque de control, compuesto por las tres esquinas idénticas que dan información de la posición, la información de alineamiento y el patrón de sincronismo; así como también la indicación de versión, formato y la corrección de errores. Fuera de toda esa información, que podría verse como el encabezado, haciendo analogía con los paquetes de las redes de datos, se encuentran los datos propiamente dichos, que podrían verse como el cuerpo del paquete.

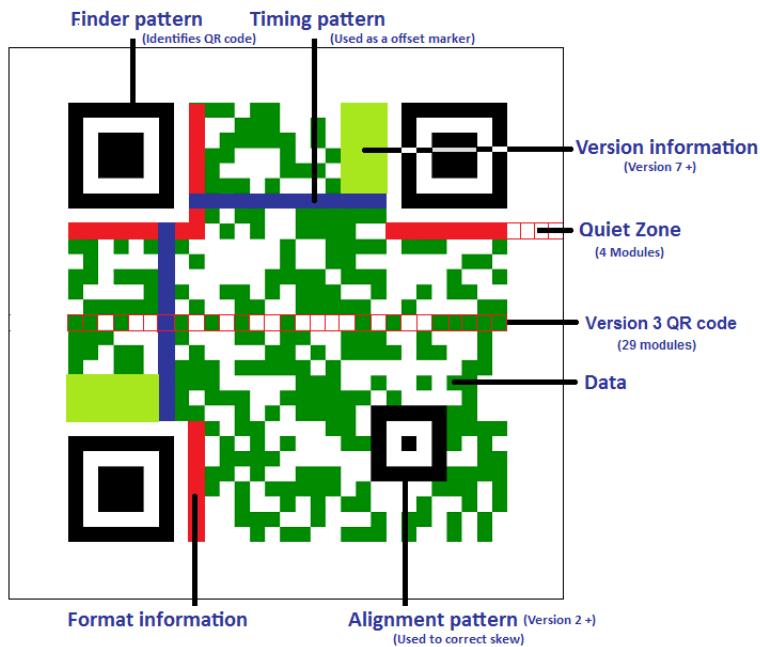


Figura 4.1: Las distintas componentes de un QR. Tomada de: [73].

4.2.4.4. Codificación y decodificación de códigos QR.

Es fácil darse cuenta que la codificación resulta mucho más sencilla que la decodificación. Para la codificación es necesario comprender el protocolo, las distintas variantes y el tipo de información que se pretende almacenar. Sin embargo, para la decodificación, además de tener que cumplir con lo anterior, es necesario contar con buenos sensores y ciertas condiciones de luminosidad y distancia que favorezcan a la cámara y se traduzcan en buenos resultados luego de la detección de errores. Si bien la plataforma es importante para lograr buenos resultados, dada una plataforma, existen variadas aplicaciones tanto para iOS como para Android que cuentan con performances bastante diferentes en función del algoritmo de procesamiento utilizado.

Debido a que el centro del presente proyecto no fue la codificación y decodificación de QRs, y que además ya existen distintas librerías que resuelven muy bien este problema, se optó por investigar varias de ellas e incorporar la más adecuada a la aplicación.

Entre todas las librerías que resuelven la decodificación, las librerías **ZXing** y **ZBar** [75] [76] son quizá las más destacadas, por su popularidad, simplicidad y buena documentación para la fácil implementación. ZXing, denominada así por “Zebra Crossing”, es una librería gratis y en código abierto desarrollada en java y que tiene implementaciones que están adaptadas para otros lenguajes como C++, Objetive-C y JRuby, entre otros.

Por su parte ZBar también tiene soporte sobre varios lenguajes y cuenta con un kit de desarrollo interesante para lograr fácilmente aplicaciones que integren el lector de QR. Luego de haber trabajado sobre el código de ejemplo que contiene la implementación de las clases principales para obtener un lector se optó por utilizar esta librería para los fines de la aplicación. En este código de ejemplo, al presionarse un botón da la posibilidad de escanear directamente y guardar el contenido del QR en una variable denominada *ZBarReaderControllerResults*. Esta variable luego se mapea en una *hash table* con el contenido en formato *NSDictionary*. De esta manera se accede fácilmente al contenido en formato legible y es fácil de hacer una lógica de comparación y búsqueda en una base de datos.

4.2.4.5. Expresiones artísticas con QRs.

La opción de usar los QR de una manera distinta ha comenzado a ser notoria en los últimos tiempos. Hay quienes desafían a la información *cruda de 1s y 0s* incorporando imágenes y modificando colores y contornos en los QR tradicionales para lograr un valor estético además del funcional. Véase en la Figura 4.2 un ejemplo de cómo puede lograrse el mismo resultado pero con el valor agregado de originalidad.

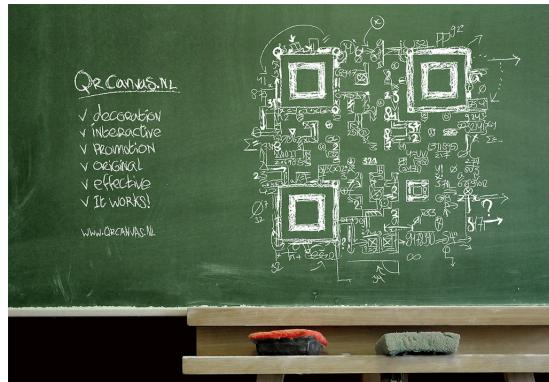


Figura 4.2: Ejemplo de un QRs creativos. Tomada de: [74].

4.3. Técnicas de identificación

Existen múltiples técnicas de identificación basadas en la extracción de características. En el Capítulo 5 se analizan variados algoritmos de extracción de características que tienen como fin la estimación de pose. En esta sección se presenta y desarrolla el algoritmo SIFT, que se basa en la extracción de características y permite generar descriptores que sirven como identificadores de una imagen. Por su parte este algoritmo también puede ser utilizado para la estimación de pose pero en el presente proyecto no se profundizó en este aspecto por lo que se desarrollará el enfoque de identificación.

4.3.1. SIFT

El algoritmo SIFT, acrónimo de “Scale Invariant Feature Transform”, es un algoritmo de visión artificial [27], [28], que se encarga de extraer características distintivas de las imágenes en escala de grises. Mediante estas, es posible luego reconocer dicha imagen dentro de una base de datos o incluso dentro de otra imagen mayor con otra cantidad de elementos en desorden. Estas características son invariantes a factores de escala, traslación, rotación y parcialmente invariantes a cambios de iluminación y afinidades. El algoritmo consta básicamente de cuatro pasos que se explicarán brevemente en secciones subsiguientes.

4.3.1.1. Detección de extremos en el espacio-escala.

Se busca encontrar dentro del *scale-space* (espacio-escala) de la imagen puntos característicos; invariantes a la traslación, el escalado y la rotación de la misma. Además esos puntos deben ser mínimamente afectados por el ruido y pequeñas distorsiones. Serán los puntos extremos (máximos o mínimos) obtenidos de las diferencias Gaussianas aplicadas al *scale-space* de la imagen. El *scale-space* de una imagen se define como una familia de imágenes $L(x, y, \sigma)$ que se obtienen de convolucionar un núcleo Gaussiano variable en su desviación estándar $G(x, y, \sigma)$ con una imagen de entrada $I(x, y)$:

$$L(x, y, \sigma) = G(x, y, \sigma) * I(x, y)$$

donde $*$ denota la convolución en x e y , y además:

$$G(x, y, \sigma) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} e^{-\frac{x^2+y^2}{2\sigma^2}}$$

Una imagen diferencia de Gaussianas, $D(x, y, \sigma)$, se define entonces de la siguiente manera:

$$D(x, y, \sigma) = L(x, y, k\sigma) - L(x, y, \sigma)$$

con k un factor multiplicativo constante.

Dado un valor inicial para σ , se le realiza a la imagen un número s de diferencias Gaussianas con la desviación estándar variando de manera creciente a lo largo de una octava (hasta obtener un $\sigma' = 2\sigma$). Para obtener s intervalos enteros dentro de dicha octava el valor de k en cada diferencia Gaussiana debe ser de $2^{\frac{1}{s}}$. Una vez calculadas las diferencias Gaussianas a lo largo de la octava, la imagen se submuestra tomando 1 de cada 2 píxeles en filas y columnas y se procede de la misma manera. La cantidad de octavas involucradas en el cálculo así como la cantidad de diferencias Gaussianas calculadas por octava son un parámetro a determinar. En la Figura 4.3 se puede ver lo anterior explicado gráficamente.

Una vez que se obtiene la “pirámide” de diferencia de Gaussianas anterior, se buscan para cada “piso” de la misma extremos locales quienes se transformarán en candidatos a puntos clave. Para una $D(x, y, \sigma)$ determinada y en una octava determinada, un punto (x_0, y_0) será un máximo (mínimo) relativo si es mayor (menor) a sus 8 puntos vecinos dentro de su nivel y a sus 9 puntos vecinos de cada uno de los niveles inferior y superior. Si el punto se encuentra en una $D(x, y, \sigma)$ de transición entre 2 octavas, se buscan los puntos vecinos correspondientes del nivel superior (inferior). Ver Figura 4.4.

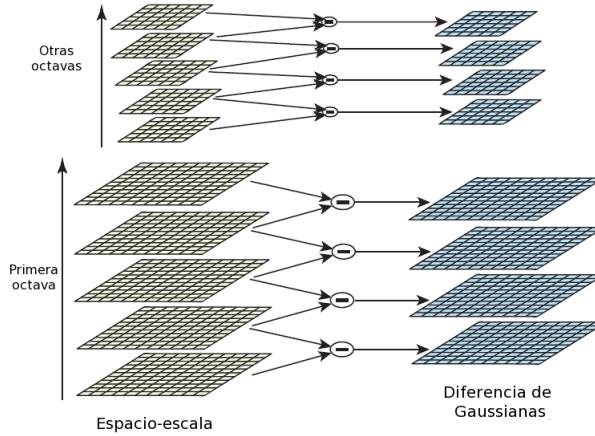


Figura 4.3: Para cada octava, la imagen original es convolucionada repetidamente con Gaussianas de desviación estándar variable para producir el *scale-space* de la izquierda. Imágenes adyacentes del *space-scale* son restadas para lograr la diferencia de Gaussianas de la derecha. Después de cada octava, la imagen borrosa es submuestreada por un factor de dos y el proceso se repite. Figura tomada de [27].

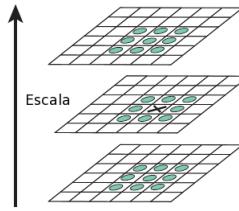


Figura 4.4: Máximos y mínimos de las imágenes diferencia de Gaussianas son obtenidos comparando cada píxeles con sus vecinos en la misma escala, y en las escalas adyacentes. Figura tomada de [27].

4.3.1.2. Localización exacta de puntos clave.

La búsqueda de extremos en las diferencias de Gaussianas produce múltiples candidatos entre los que se encuentran puntos con poco contraste; los cuales no son estables a cambios de iluminación y al ruido. Para quitarlos se procede de la siguiente manera.

Primero se realiza una expansión de Taylor de orden 2 entorno a cada extremo detectado (x_0, y_0, σ_0) :

$$D(\chi) = D + \frac{\partial D^T}{\partial \chi} \chi + \frac{1}{2} \chi^T \frac{\partial^2 D}{\partial \chi^2} \chi \quad (4.1)$$

donde D y sus derivadas son evaluadas siempre en el punto en cuestión y $\chi = (x, y, \sigma)^T$ es la posición relativa al mismo. Derivando la aproximación anterior e igualándola a cero se obtiene:

$$\bar{\chi} = -\frac{\partial^2 D^{-1}}{\partial \chi^2} \frac{\partial D}{\partial \chi} \quad (4.2)$$

Reemplazando (4.2) en (4.1) se obtiene el valor del máximo local:

$$D(\bar{\chi}) = D + \frac{1}{2} \frac{\partial D^T}{\partial \chi} \bar{\chi}$$

Finalmente, si $|D(\bar{\chi})| < 0,03$ el punto es eliminado de la lista de puntos clave; suponiendo que D toma valores entre 0 y 1.

Además de quitar aquellos puntos con poco contraste, hay que quitar a los puntos candidatos que pertenecen a una línea y no a una esquina. Para ello, sea H la matriz Hessiana de $D(x, y, \sigma)$ evaluada en un punto extremo de las diferencias de Gaussianas determinado (x_0, y_0, σ_0) , se estará en presencia de un borde (línea) si sus valores propios α y β son uno grande y el otro pequeño. Lo anterior es equivalente a trabajar con los siguientes resultados:

$$\text{Trazo}(H) = \frac{\partial^2 D}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 D}{\partial y^2} = \alpha + \beta$$

$$\text{Det}(H) = \frac{\partial^2 D}{\partial x^2} \times \frac{\partial^2 D}{\partial y^2} - \left(\frac{\partial^2 D}{\partial x \cdot \partial y} \right)^2 = \alpha \cdot \beta$$

Sea la $\alpha = r \cdot \beta$, la condición se reduce a:

$$\frac{\text{Trazo}(H)^2}{\text{Det}(H)} < \frac{(r+1)^2}{r}$$

Luego de varios experimentos, los autores proponen un umbral de $r = 10$. Véase que conforme aumenta la relación r entre ambos valores propios también lo hace la relación entre el cuadrado de la traza de la matriz Hessiana y su determinante.

4.3.1.3. Asignación de orientación.

Mediante la asignación de una orientación a cada punto de la imagen basada en características locales de la misma, los puntos clave pueden ser descriptos relativos a estas orientaciones y de esta manera lograr características invariantes a las rotaciones. Para cada punto clave obtenido $D(x_0, y_0, \sigma_0)$, se busca su imagen borrosa correspondiente en el espacio escala $L(x, y, \sigma_0)$ y se determina el módulo de su gradiente $m(x, y)$ y la fase del mismo $\theta(x, y)$ utilizando diferencias entre píxeles:

$$\begin{aligned} m(x, y) &= \sqrt{(\Delta L_x)^2 + (\Delta L_y)^2} \\ m(x, y) &= \sqrt{[L(x+1, y) - L(x-1, y)]^2 + [L(x, y+1) - L(x, y-1)]^2} \\ \theta(x, y) &= \tan^{-1} \left(\frac{\Delta L_y}{\Delta L_x} \right) \\ \theta(x, y) &= \tan^{-1} \left(\frac{L(x, y+1) - L(x, y-1)}{L(x+1, y) - L(x-1, y)} \right) \end{aligned}$$

Para determinar de una forma fiel la orientación de cada punto clave, ésta es determinada tomando en cuenta las direcciones de todos los puntos de la imagen dentro de cierto entorno al mismo. Se genera entonces un histograma de direcciones con valores que varían de a 10 grados, ponderado por el módulo del gradiente y una ventana Gaussiana circular centrada en el punto clave, de desviación estándar igual a 1.5 veces el valor del nivel del en cuestión. Cada máximo en el histograma corresponde a la dirección dominante en el gradiente local y será la asignada al punto clave. Si existen en el histograma otros máximos secundarios de valor mayor o igual al 80 % del máximo principal, estos serán utilizados para generar nuevos puntos clave con esa dirección. Sólo al 15 % de los puntos clave se les asigna más de una dirección.

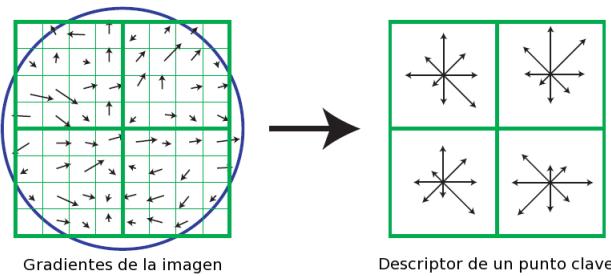


Figura 4.5: Izq.: La ventana Gaussiana pondera los valores de módulo y fase en la vecindad de los puntos de interés. Der.: los histogramas con 8 direcciones posibles realizados para cada subregión. Figura tomada de [27].

4.3.1.4. Descriptor de puntos clave.

Hasta el momento, se le ha asignado a cada punto clave una escala, una locación y una orientación. El siguiente paso es determinar para cada punto clave un descriptor relativamente invariante a cambios de iluminación y afinidades, basado en el entorno del mismo.

Una vez determinadas la magnitud y fase del gradiente entorno a un punto clave, una ventana Gaussiana centrada en este pondera los valores de módulo y fase de 4×4 subregiones cuadradas en la vecindad del mismo, cada una formada por 16 píxeles. Nuevamente se genera para cada subregión un histograma de 8 direcciones distintas. Se obtiene finalmente para cada punto clave un descriptor de $4 \times 4 \times 8 = 128$ valores.

En la Figura 4.5 se ve cómo se computan los descriptores para cada punto clave. En el ejemplo se utilizan únicamente $2 \times 2 = 4$ subregiones en vez de $4 \times 4 = 16$.

4.4. Resumen

La alternativa de utilizar códigos QR para identificar regiones del museo es una alternativa simple y que aprovecha la creciente popularidad de los mismos. Es una solución muy funcional que permite fácil y rápidamente al usuario ubicarse dentro del museo. Existe una gran variedad de librerías que permiten resolver este problema en distintos lenguajes. En particular ZBar provee de herramientas interesantes y sencillas de incorporar a aplicaciones.

Por su parte el algoritmo SIFT es un algoritmo muy rápido que resuelve el problema de la identificación de manera muy efectiva. Existe a su vez bastante documentación sobre el mismo así como código disponible en C lo que hace también de este algoritmo algo fácil de incorporar a una aplicación.

CAPÍTULO 5

Detección

5.1. Introducción

En este capítulo se trata con algunas de las herramientas y algoritmos de detección de características del tipo de primitivas geométricas como ser puntos, esquinas, bordes, líneas, segmentos de línea y arcos.

El objetivo principal es mostrar qué características se pueden detectar y determinar qué algoritmos son adecuados para su posterior utilización para la estimación de pose, tema que se desarrolla en los Capítulos 8 y en forma más específica en el Capítulo 9. El tipo de características elegidas para su detección en la aplicación final están fuertemente ligadas con el desempeño del algoritmo que realiza dicha detección. Existe un requerimiento de tiempo ya que la aplicación final se debe ejecutar en tiempo real. También se desea que la característica seleccionada ofrezca la posibilidad de ser procesada posteriormente mediante algoritmos relativamente simples.

Se busca que las características detectadas, asociadas a objetos o elementos presentes en la escena, presenten estabilidad en su ubicación frente a cambios en la pose. En forma más específica, si se tiene una esquina a detectar en una escena, por ejemplo de una mesa, la esquina puede ser detectada en imágenes o “fotos” de la mesa desde distintas posiciones y que en todos los casos la esquina detectada corresponde con la esquina de la mesa en la foto. También se busca que las características sean robustas frente a cambios en las condiciones en que se adquiere la imagen. Estas condiciones podrían ser iluminación, presencia de ruido, occlusiones, etc.

El capítulo comienza con la revisión de algunos detectores clásicos de bordes y esquinas como son Canny y Harris. Posteriormente se desarrollan algunos detectores de líneas, segmentos de línea y algunas estructuras más complejas, como el Método de la Transformada de Hough, LSD, EDLines y ORT. A lo largo de todo el capítulo se presentan resultados de estos algoritmos.

5.2. Bordes y esquinas

Los detectores de bordes, en particular los detectores de bordes tipo escalón son una parte esencial de muchos sistemas de visión. El proceso de detección de bordes cumple la función de simplificar drásticamente la cantidad de información a procesar conservando aspectos estructurales utilizables para establecer los límites de cierto objeto en la imagen [6].

Un **borde** se puede definir intuitivamente como un cambio brusco sobre una zona en la intensidad de una imagen. Más formalmente puede ser asociado a la búsqueda de discontinuidades y naturalmente su implementación está relacionada con la derivada primera de una imagen. En una imagen una derivada primera puede ser aproximada de distintas formas por un operador de gradien-

te como lo son los operadores de Sobel, Prewitt o Roberts por ejemplo[?]. Hay implementaciones de detección de bordes que toman en cuenta el *efecto rampa* y por lo tanto acuden a derivadas de segundo y tercer orden. El efecto rampa se muestra en la Figura 5.1 en donde se puede ver en lo que aparentemente ocurre una discontinuidad en la imagen si uno se acerca lo suficiente a la región, esta discontinuidad es en realidad continua.

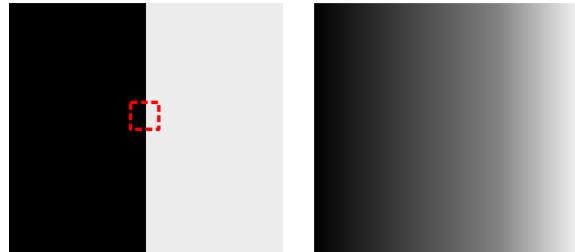


Figura 5.1: Efecto rampa. A la izquierda una imagen que presenta una discontinuidad. A la derecha una acercamiento en la región marcada en rojo.

5.2.1. Detector de bordes de Canny

El detector de bordes de Canny fue desarrollado en 1986 por John F. Canny [6] en el artículo “*A Computational Approach to Edge Detection*” con el objetivo de descubrir el algoritmo de detección de bordes óptimo. En esta sección se describe brevemente el algoritmo y se muestran algunos resultados de interés. La presentación de este algoritmo está inspirada principalmente en el artículo del detector de bordes de Canny de Wikipedia [41].

Las características buscadas por Canny para el detector de borde óptimo son:

- **Buena detección:** El algoritmo debe marcar todos los bordes reales en la imagen como sea posible.
- **Buena localización:** Los bordes marcados deben estar lo más cercanos posibles a los bordes reales en la imagen.
- **Respuesta mínima:** Dado un borde en la imagen este no debe ser marcado más de una vez y de ser posible la presencia de ruido no debe crear falsos bordes.

En la Figura 5.2(b) se muestra un ejemplo del detector de bordes de Canny para la imagen de Lena original 5.2(a).

El algoritmo consiste en cuatro etapas básicas las cuales se describen a continuación. A lo largo de estas etapas se ejemplifica mediante el uso del demo *online* de Canny en IPOL [40] para la imagen de Lena. Estos resultados intermedios se encuentran en la Figura 5.3.

- **Reducción de Ruido:** Debido a que el detector de bordes de Canny es sensible a la presencia de ruido en las imágenes se utiliza en una primera etapa un filtrado Gaussiano en donde se realiza la convolución de la imagen con un núcleo Gaussiano. El resultado da lugar a una imagen levemente borrosa como se puede observar en la Figura 5.3(a).
- **Gradiente de intensidad de la imagen:** De forma de detectar bordes en todas las direcciones posibles, respecto a vecinos inmediatos de un píxel, se utilizan cuatro filtros para detectar bordes en direcciones horizontal, vertical, y las dos direcciones diagonales. Un operador de



Figura 5.2: Detector de bordes de Canny para la imagen Lena con parámetros: $\sigma = 1,6$, $th_{lo} = 4,0$, $th_{hi} = 20,0$

detección de bordes, por ejemplo Roberts, Prewitt o Sobel, devuelve un valor para la derivada primera en la dirección horizontal (\mathbf{G}_x) y otro para la derivada primera en la dirección vertical (\mathbf{G}_y). En base a estos valores se puede obtener módulo y dirección del gradiente sobre cada píxel (Figura 5.3(b)).

$$\mathbf{G} = \sqrt{\mathbf{G}_x^2 + \mathbf{G}_y^2} \quad (5.1)$$

$$\Theta = \arctan\left(\frac{\mathbf{G}_y}{\mathbf{G}_x}\right) \quad (5.2)$$

Finalmente el ángulo de dirección del borde es redondeado a uno de los cuatro ángulos (0, 45, 90 o 135 grados).

- **Supresión de no-máximos:** Dados los estimadores del gradiente de la imagen se realiza una búsqueda para determinar si el módulo del gradiente asume un rol de máximo local. De esta etapa se obtiene un conjunto puntos en forma de imagen binaria llamados “*thin edges*” como se puede ver en la Figura 5.3(c). Estos proporcionan información de dirección para realizar el umbralizado con histéresis.

La búsqueda de máximos se realiza observando el ángulo del punto y el módulo de él y sus vecinos. Por ejemplo, si el ángulo del gradiente pertenece al conjunto de los de cero grados (el borde es vertical) se observa el módulo de sus vecinos horizontales. Si el módulo del gradiente del punto es mayor a los de estos entonces el punto asume un rol de máximo local. Los otros casos son análogos.

- **Umbrales con histéresis:** El umbralizado con histéresis requiere de dos umbrales, uno bajo y uno alto. El umbral alto asegura que se marcan bordes de los cuales se puede estar suficientemente seguros de que son borde (Figura 5.3(d)). Luego en base a los bordes correspondientes a umbrales altos se aplica el umbral bajo recorriendo los caminos de dirección obtenidos previamente. Una vez finalizado el proceso se tiene una imagen binaria en donde cada píxel es marcado como borde o no (Figura 5.3(e)).

El algoritmo consiste en una serie de parámetros que ya fueron mencionados pero que vale la pena resaltar. En primer lugar el parámetro σ , la desviación estandar del filtro Gaussiano utilizado

en la etapa de reducción de ruido. Este parámetro afecta notablemente el desempeño del algoritmo y debe ser ajustado según la aplicación ya que aporta un compromiso entre el detalle para bordes más fino y la cantidad de falsos bordes producto del ruido. Por otro lado en la etapa de umbralizado con histéresis se tienen dos parámetros más, los valores de los dos umbrales; alto y bajo. En estos dos parámetros residen los típicos problemas de los umbrales y no hay un enfoque genérico que lo solucione, si el umbral alto es muy alto se puede perder información importante y por otro lado si el umbral bajo es muy bajo se producirán más falsos bordes debido a ruido.

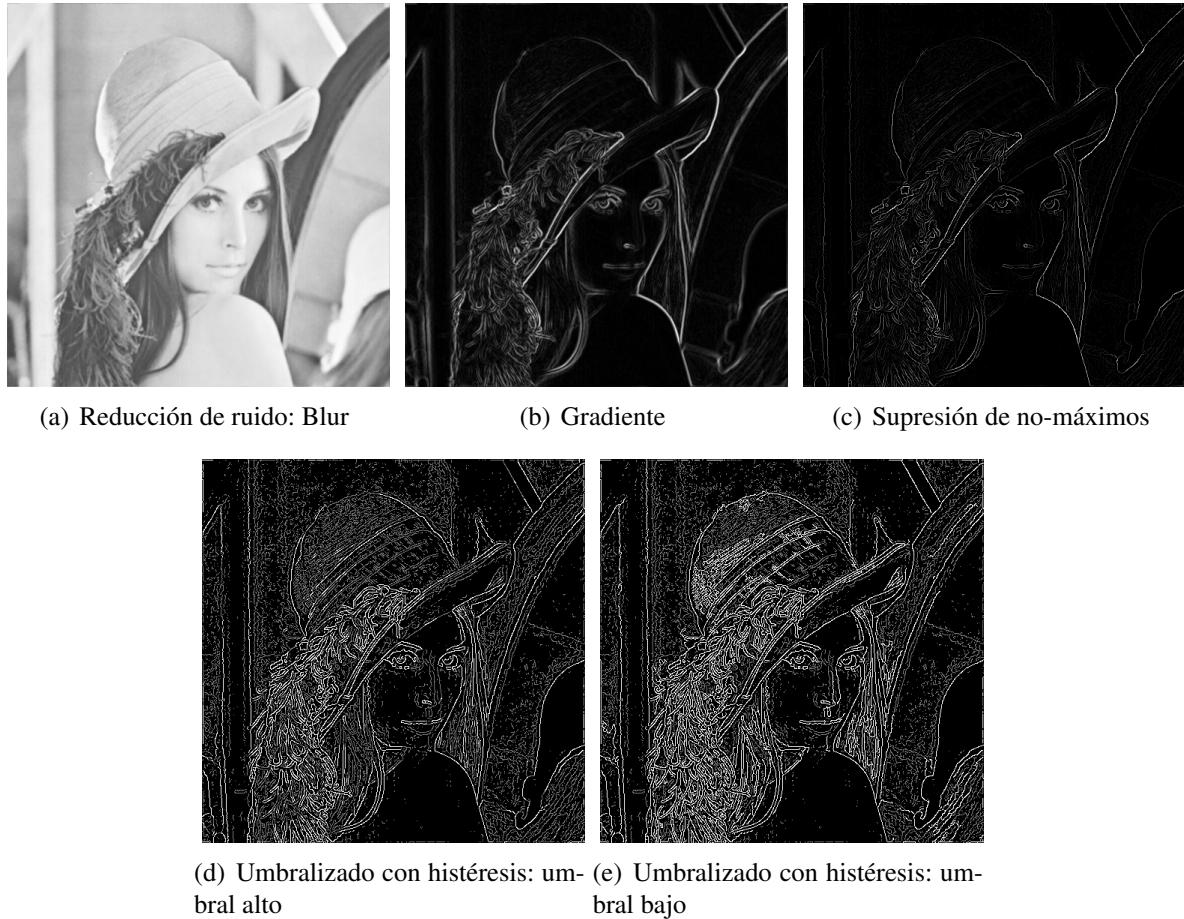


Figura 5.3: Resultados intermedios del detector de bordes de Canny para la imagen Lena con parámetros: $\sigma = 1,6$, $th_{lo} = 4,0$, $th_{hi} = 20,0$

5.2.1.1. Ejemplos de interés

En la Figura 5.4 se muestran distintos resultados de Canny para distinto valor de σ , utilizando como entrada una imagen conteniendo el marcador utilizado en el proyecto. Se puede ver que con $\sigma = 0,5$ la presencia de ruido afecta notablemente la detección produciendo una gran cantidad de falsos bordes. Para $\sigma = 1,4$ la detección es buena eliminando prácticamente todos los falsos bordes producto del ruido y conservando la información de borde real. Por otro lado para $\sigma = 6,0$ el *bluring* resulta en una detección de bordes muy reducida aunque preservando la información de bordes más significativos como los bordes del marcador los cuales son el interés principal en la aplicación. De todas formas se produce un efecto no deseado de “redondeo” de los bordes asociados al uso de un núcleo Gaussiano circular.

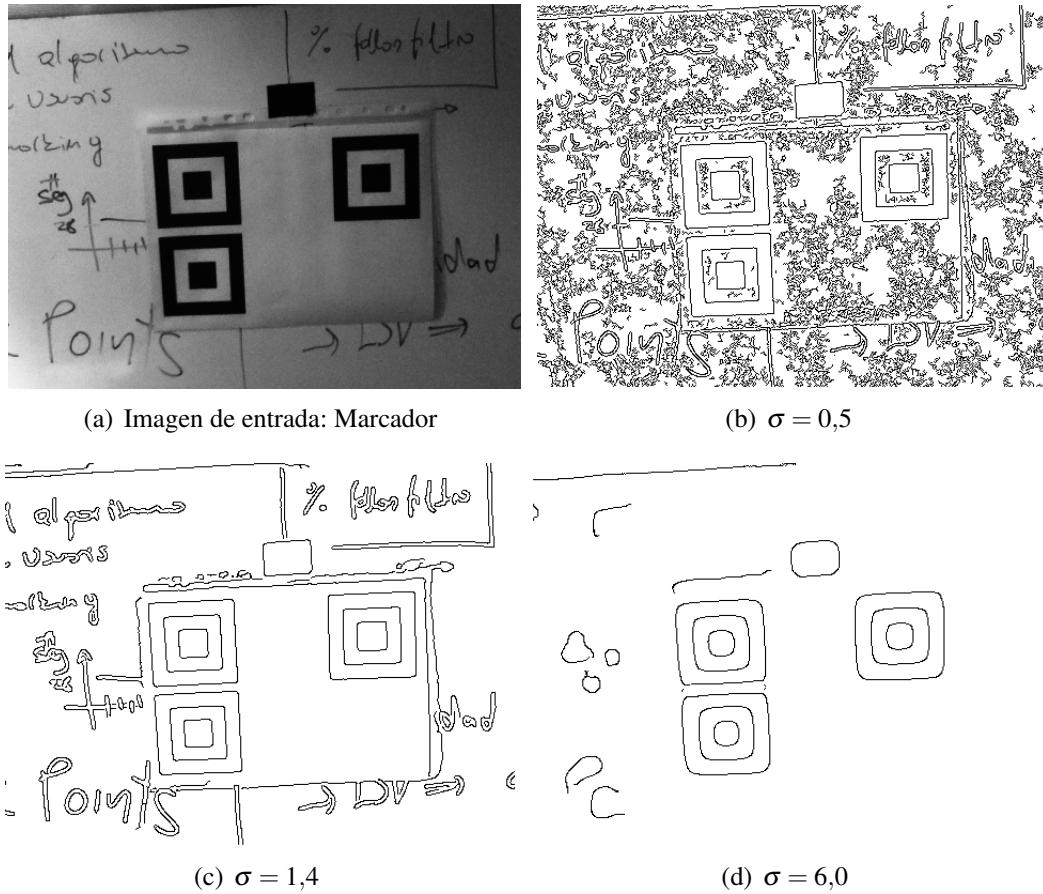


Figura 5.4: Resultados del detector de bordes de Canny variando el parámetro de reducción de ruido σ para una imagen de entrada conteniendo un marcador. $th_{lo} = 0,2$, $th_{hi} = 0,8$ (umbral normalizado)

5.2.2. Detector de bordes y esquinas de Harris

El detector de bordes y esquinas de Harris es un método desarrollado por Chris Harris et al. en 1988 en el artículo “*A combined corner and edge detector*”[20].

Si tomamos una imagen (I) en escala de grises y dos regiones solapadas de la misma que distan (x, y) en las direcciones i y j respectivamente, definidas por una ventana $w(u, v)$; la suma ponderada del cuadrado de las diferencias entre ambas regiones será:

$$E(x, y) = \sum_u \sum_v w(u, v) [I(u + x, v + y) - I(u, v)]^2$$

en donde $w_{u,v}$ es un núcleo Gaussiano para suavizar la respuesta. Si realizamos una expansión de Taylor de $I(u + x, v + y)$, obtenemos la siguiente aproximación:

$$I(u + x, v + y) \approx I(u, v) + I_x(u, v)x + I_y(u, v)y$$

Los gradientes de la imagen representados por I_x , I_y pueden ser aproximados por:

$$I_x = I * (-1, 0, 1) \quad I_y = I * (-1, 0, 1)^T.$$

Reemplazando entonces:

$$E(x, y) \approx \sum_u \sum_v w(u, v) [I_x(u, v)x + I_y(u, v)y]^2$$

o lo que es lo mismo:

$$E(x, y) = (x, y)A \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix}$$

siendo:

$$A = \begin{pmatrix} \langle I_x^2 \rangle & \langle I_x I_y \rangle \\ \langle I_x I_y \rangle & \langle I_y^2 \rangle \end{pmatrix}$$

donde los paréntesis angulares denotan el promediado ponderado que puede ser, como se explica anteriormente, Gaussiano.

Por construcción, es fácil ver que grandes variaciones en $E(x, y)$ ocasionadas por cambios en ambas direcciones (i, j) estarán indicando la existencia de una esquina, mientras que grandes variaciones en $E(x, y)$ ocasionadas por cambios en una sola de dirección indicarán la existencia de un borde. Es posible entonces limitar el estudio a la matriz A y sus valores propios.

Sean α y β los valores propios de A. Se concluye por lo anterior que si:

- Ambos valores propios son grandes: Se está en presencia de una esquina.
- Un valor propio es grande y el otro pequeño: Se está en presencia de un borde.
- Ambos valores propios son pequeños: Se está en presencia de una región “plana”.

En la Figura 5.5 se muestra la clasificación de la región correspondiente a la matriz A correspondiente a las tres zonas de arriba. Debido a que el cálculo de los valores propios de una matriz es un

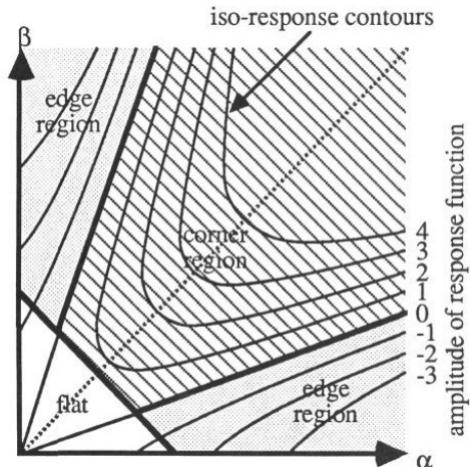


Figura 5.5: Clasificación de características según los valores propios. Tomada de [20].

proceso computacionalmente costoso, se define la función de respuesta R que depende únicamente de los valores propios α y β y almacena básicamente la misma información.

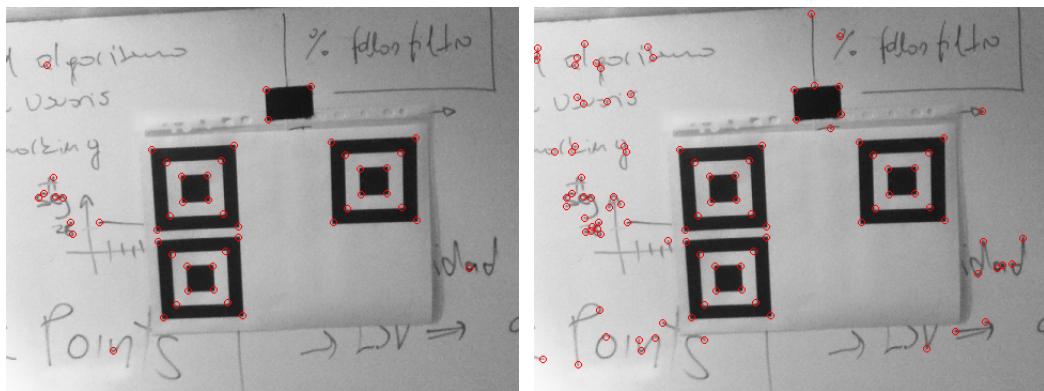
$$R = \alpha \cdot \beta - k \cdot (\alpha + \beta) = \text{Det}(A) - k \cdot \text{Tr}(A)$$

donde $\text{Det}(A)$ denota el determinante de la matriz A, $\text{Tr}(A)$ su traza y k es un parámetros de sensibilidad que normalmente pertenece al rango $[0,04 - 0,15]$. Por lo tanto se pueden clasificar los píxeles de la siguiente forma:

- $R \gg 0$: Se tiene una esquina.
- $R \ll 0$: Se tiene un borde.
- $R \approx 0$: Se tiene una región “plana”.

5.2.2.1. Ejemplos de interés

En la Figura 5.6 se muestran los resultados para el detector de Harris provisto por Matlab en la función `corner`. La misma tiene un parámetro modifiable asociado a la máxima cantidad de esquinas que se desean tener. Se puede ver que los resultados son buenos para ambos casos y parti-



(a) Harris para $n = 50$

(b) Harris para $n = 100$

cularmente buenos si se desean detectar las esquinas del marcador.

5.2.2.2. Aplicabilidad

Se pudo ver que el detector de Harris resultó en una detección razonable para el ejemplo tratado aunque su funcionamiento en general puede no ser tan bueno. Bajo otras condiciones menos controladas como para la detección de esquinas naturales, no generadas por la presencia de un marcador, puede ser inestable y poco robusto requiriendo de algún tipo de validación *a posteriori*.

Una desventaja importante que tiene la detección de características tipo esquinas es que si se desea saber qué esquinas se unen entre sí mediante los lados del marcador sin ambigüedad se debe obtener más información que permita conectarlas. Por lo tanto un buen complemento puede ser el gradiente o una detección de bordes. La detección de líneas o segmentos ya contiene esta información y por lo tanto parece más apropiada.

5.3. Líneas y segmentos de línea

Las líneas o segmentos de línea son elementos que contienen una estructura más definida en comparación con los bordes. Esta estructura definida produce a su vez que la detección de este tipo de elementos sea más estable y menos sensible al ruido que la detección de bordes o esquinas. Como se verá en a lo largo de la sección, los detectores de líneas que se presentan tienen en común que utilizan al inicio de la detección las herramientas de gradientes y operadores gradientes o directamente la detección de bordes en sí misma para realizar el objetivo de detección de líneas.

En esta sección se explican brevemente algunos detectores de líneas y segmentos de línea. En primer lugar se menciona un detector de líneas clásico y popular como es el detector de Hough y se explica su funcionamiento así como sus principales desventajas que hacen que este método sea descartado para su desarrollo en el proyecto. En segundo lugar se menciona y se hace referencia al capítulo en donde será tratado el detector de segmentos de línea, uno de los pilares principales de

este proyecto, el LSD. También se muestran otros detectores que fueron tomados en consideración pero por diferentes razones (explicadas en su secciones correspondientes) no fueron utilizados como son el ORT y EDLines.

5.3.1. Detector de líneas de Hough

El Método de la Transformada de Hough forma parte de una técnica de extracción de características con fuerte aplicación a detección de curvas y líneas.

Esta técnica consiste en tres pasos básicos. En primer lugar la imagen en niveles de gris es procesada por un detector de bordes devolviendo una máscara binaria en donde los puntos borde son marcados. En segundo lugar la Transformada de Hough es aplicada a la máscara de forma de detectar candidatos a líneas en forma de máximos locales. Esta transformada consiste en una representación paramétrica de formas geométricas. Para detección de líneas se utiliza la representación

$$r = x\cos(\theta) + y\sin(\theta) \quad (5.3)$$

en donde r representa la distancia entre la línea y el origen y θ es el ángulo del vector perpendicular a la recta desde el origen. Es posible asociar una recta al par de parámetros (r, θ) . El plano (r, θ) es el plano de Hough. Se determina en este plano para cada punto de la imagen una única sinusoidal en donde mediante su superposición se tendrá, para una serie de puntos alineados en la imagen, un punto de cruce de estas sinusoides dado por los parámetros (r, θ) . Mediante la búsqueda de máximos locales en el plano de Hough se tienen definidas líneas en la imagen.

Finalmente los segmentos son extraídos de las líneas detectadas utilizando umbrales sobre dos parámetros geométricos: el largo mínimo de un segmento y la distancia máxima permitida entre dos segmentos consecutivos.

La principal desventaja del método de la transformada de Hough para detección de líneas resulta ser el ajuste de parámetros. El detector de bordes contiene por lo menos un parámetro ajustable de tipo de sensibilidad, la Transformada de Hough estándar involucra usualmente cuatro parámetros. Uno asociado a la escala, un segundo asociado al compromiso entre falsos positivos y falsos negativos y los otros dos a la discretización de los parámetros r y θ , aunque estos últimos pueden ser asociados a la resolución de la imagen. Por otro lado están los dos parámetros asociados a la etapa de extracción de segmentos [18].

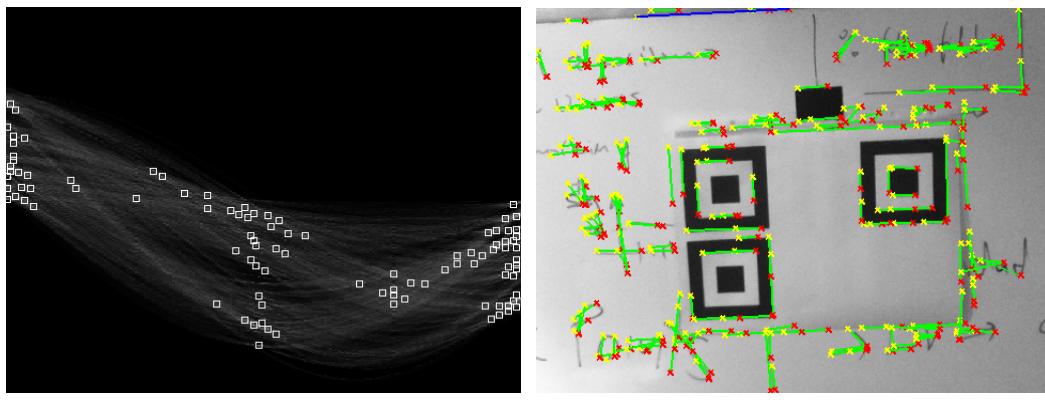
El ajuste de estos parámetros puede dar problemas y desafortunadamente no hay una regla general para realizar esto. Si el ajuste es correcto este método puede proveer muy buenos resultados pero en otro caso el desempeño se puede ver fuertemente afectado.

5.3.1.1. Ejemplos de interés

En la Figura 5.7 se muestran los resultados para el detector líneas mediante el Método de la Transformada de Hough implementado por Matlab mediante el uso de la función `houghlines`. El script utilizado se encuentra en el Centro de Documentación de Mathworks[64]. Del script proporcionado se realizaron algunos cambios, se cargó la ruta de la imagen de entrada, se eliminó la rotación a la imagen de entrada y se modificaron algunos parámetros. Los resultados mostrados representan los mejores casos para los distintos ajustes de parámetros probados. El tamaño mínimo de segmento se fijó en 15 y el máximo hueco entre segmentos a llenar en 8.

5.3.1.2. Aplicabilidad

Se comprobó la dificultad intrínseca del método asociada al ajuste de parámetros no pudiéndose obtener los resultados deseados en ningún caso.



(a) El plano de Hough

(b) Detección de líneas de Hough

Figura 5.7: Resultados para la detección de líneas por el Método de Hough para los parámetros: Tamaño mínimo de segmentos = 15, Máximo hueco = 8, Número de máximos = 100 y Threshold en houghpeaks = $\text{ceil}(0,05 * \max(H(:)))$

5.3.2. Detector de segmentos de línea: LSD

El algoritmo Line Segment Detector (LSD) es capaz de detectar segmentos de línea rectos y uno de los componentes principales en este proyecto. Debido a su importancia es que se le dedica el Capítulo 7 a su desarrollo.

5.3.2.1. Ejemplo de interés

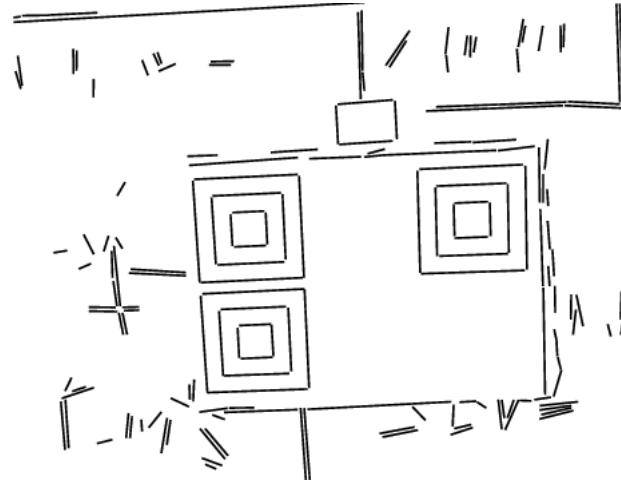


Figura 5.8: Resultados de LSD para la imagen del marcador.

En la Figura 5.8 se muestran los resultados del algoritmo LSD para la imagen del marcador. Este ejemplo fue realizado mediante el uso del demo *online* de IPOL para este algoritmo[42].

Se puede observar que el algoritmo logra detectar con éxito todas las estructuras de segmento de línea presentes en la imagen y en particular las que corresponden al marcador, los lados de los cuadriláteros.

El algoritmo produjo un número de 169 segmentos de línea detectados en un tiempo de ejecución de 130ms sobre el servidor que aloja la aplicación. La misma ejecución realizada en el marco de este proyecto sobre una PC con procesador Intel Core 2 Duo de 2Ghz tomó un tiempo de aproximadamente 40ms.

5.3.3. Detector de segmentos de línea: EDLines

EDLines[37] es un detector de segmentos de línea de tiempo lineal que provee resultados comparables con LSD. No requiere ajuste de parámetros y se ejecuta en tiempo real. En muchos aspectos es similar al LSD ya que utiliza validación de líneas mediante el principio de Helmholtz que permite controlar el número de falsos positivos. El algoritmo hace uso del rápido detector de bordes Edge Drawing (ED) [36] desarrollado por los mismos autores que provee una cadena de píxeles borde en forma contigua.

EDLines trabaja sobre imágenes en niveles de gris y consiste básicamente en tres etapas: detección de bordes seguido por extracción de segmentos y finalmente la validación de líneas. Se describen aquí cada una de estas etapas.

- **Detección de bordes:** La detección de bordes se realiza utilizando el algoritmo Edge Drawing el cual provee resultados rápidos y libres de artefactos de ruido.

El algoritmo se aplica a la imagen de entrada en niveles de gris. En primer lugar se le aplica un filtrado para remoción de ruido y suavizar la imagen. A continuación se calcula el gradiente, módulo y dirección, en cada pixel de la imagen suavizada. En tercer lugar se calculan un conjunto de píxeles llamados *anchors* que corresponden a puntos con alta probabilidad de ser borde. Por último se conectan estos *anchors* mediante un proceso de dibujado de bordes entre ellos basándose en el valor del módulo y dirección del gradiente previamente calculado. Este es en cierto sentido un proceso similar a los juegos de dibujo para niños.

- **Extracción de segmentos de línea:** El objetivo de esta etapa es el de “partir” la cadena contigua de píxeles obtenida mediante el detector de bordes en uno o más segmentos de línea rectos. Básicamente lo que se hace es recorrer la secuencia de píxeles e ir ajustando líneas a los píxeles utilizando el método de ajuste de líneas por mínimos cuadrados hasta que el error excede cierto umbral. En el momento en que se excede ese umbral se genera un nuevo segmento de línea y así recursivamente se recorren todos los píxeles de la cadena.

- **Validación de líneas:** El método de validación de segmentos de línea está basado en el principio de Helmholtz el cual postula que para que una estructura sea perceptualmente significativa, la esperanza de que la misma (agrupado o Gestalt) ocurra de casualidad debe ser muy baja. Este es un enfoque *a contrario* en donde los objetos son detectados como *outliers* sobre el modelo de fondo. En esta etapa se logra eliminar los falsos positivos controlando el número de falsas alarmas. Este enfoque en particular es el propuesto originalmente por LSD y se explica también en el Capítulo 7.

Si la aplicación lo permite, esta validación puede ser eliminada o sustituida por otra, por ejemplo por un umbral de largo máximo de segmentos, acelerando aún más el algoritmo EDLines. En LSD esta etapa está integrada con la etapa de detección de segmentos para cada iteración aunque podría ser desacoplada en cierta medida. De todas formas EDLines presenta esa ventaja de modularidad frente a LSD que puede llegar a ser útil.

5.3.4. Ejemplos de interés

En la Figura 5.9(a) se muestra la imagen de entrada junto con los segmentos detectados por EDLines para la imagen del marcador. En la Figura 5.9(b) se muestra únicamente los segmentos de salida de EDLines numerados. El tiempo de ejecución declarado para esta imagen por la aplicación *online* es de 30ms en su servidor pero alega que para una PC Intel con CPU de 2Ghz el mismo sería de 10ms. Suponiendo una detección en el tiempo declarado para una PC este sería dos veces

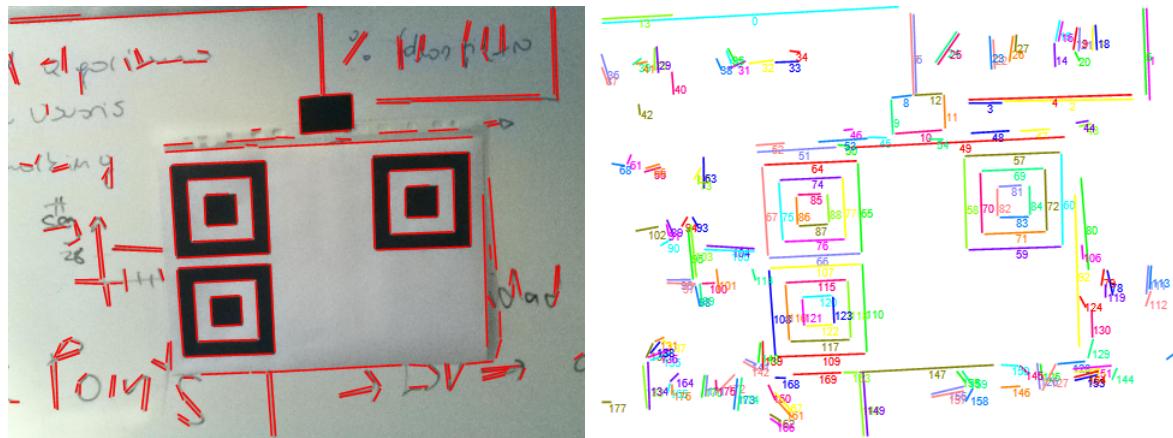


Figura 5.9: Resultados de EDLINES para la imagen del marcador

más veloz que el de LSD para la misma imagen. Se detectaron 178 segmentos y se puede ver que los resultados son muy similares a los que produce LSD que detecta 169 segmentos para la misma imagen (Figura 5.8).

5.3.4.1. Aplicabilidad

El algoritmo EDLines se encuentra disponible para descarga como una librería compilada para Windows o Linux. También se puede probar en forma de demo *online* desde la página web del laboratorio Computer Vision & Pattern Recognition de la Universidad de Anadolu de Turquía en donde también explica en forma resumida su funcionamiento[67].

El código fuente por su parte no está disponible para la descarga de ningún tipo en contraste con el LSD. Esto es un factor determinante para la utilización del algoritmo en el proyecto ya que se tiene que poder compilar para la plataforma de desarrollo utilizada, en este caso sería para el sistema operativo iOS. Una implementación del algoritmo en lenguaje C/C++ no fue considerada como parte del alcance de este proyecto pero sí puede ser considerada como trabajo a futuro si se desea seguir con el enfoque de segmentos de línea para detección.

5.3.5. Detector de segmentos de línea y arcos: ORT

El Object Recognition Toolkit (ORT) provee una serie de herramientas para la detección de segmentos de línea, arcos y también puntos e incluso estructuras más complejas como polígonos. El código está disponible para su descarga en la página del curso “CSE 576 Computer Vision” de la University of Washington de Estados Unidos de América[65] como también desde un repositorio SVN público se puede encontrar otra distribución del código con documentación incluída[66].

El ORT consiste en un número de herramientas para ejecución en cascada desde consola de comandos que resultan en la detección de las características deseadas. Cada una de las herramientas corresponde a un algoritmo, estos son **Fex**[1], **Lpeg**[13] e **Ipeg**.

A continuación se explican algunas de ellas.

- **Chainpix**: produce una lista de píxeles encadenados desde una imagen binaria que es salida de un detector de bordes tipo Canny. Se ejecuta mediante

```
chainpix < blocks.canny.pgm > blocks.cpx
```

en donde `blocks.canny.pgm` es la imagen binaria salida de Canny y `blocks.cpx` la lista de píxeles encadenados en un formato predefinido.

- **Fex:** convierte la lista de píxeles encadenados en segmentos de línea rectos y arcos circulares. Su ejecución se realiza mediante:

```
fex < blocks.cpx > blocks.fex
```

y tiene como salida `blocks.fex`.

- **Lpeg:** realiza un agrupado de bajo nivel sobre los segmentos producidos por Fex hacia pares de líneas paralelas y varios tipos de junturas. Tiene ciertos parámetros opcionales como el *mínimo largo de línea, máximo ángulo tolerable entre dos líneas paralelas y un nivel de calidad mínimo*. Se ejecuta como:

```
lpeg < blocks.fex > blocks.lpg
```

en donde la salida se escribe en `blocks.lpg`.

- **Ipeg:** realiza un agrupado de nivel medio sobre los conjuntos producidos por Lpeg hacia agrupaciones en tipo de ternas, esquinas y polígonos. Al igual que Lpeg tiene parámetros opcionales para producir únicamente el tipo de agrupaciones de salida deseadas. Se ejecuta como:

```
ipeg < blocks.lpg > blocks.ipg
```

en donde la salida se escribe en `blocks.ipg`.

- **Ort2Image:** toma la salida de Fex, Lpeg o Ipeg y realiza el dibujado de segmentos de línea rectos y segmentos de arco produciendo una imagen de salida en formato PGM.

5.3.5.1. Ejemplos de interés

En la Figura 5.10 se muestran los resultados de las diferentes herramientas del ORT. Se utiliza como entrada el resultado del detector bordes de Canny para la imagen de la Figura 5.4 para $\sigma = 1,4$ ya que fue el valor que demostró mejores resultados entre las pruebas realizadas. Se puede observar que la salida de Fex logra capturar en buena forma los segmentos de línea correspondientes al marcador aunque alguno de ellos en forma “quebrada”. También se pueden ver los segmentos de arco detectados, otro de los elementos de este algoritmo. Lpeg logra eliminar una buena parte de los segmentos dejando sólo aquellos que son en algún sentido paralelos entre sí. Por su parte Ipeg no produce ningún cambio sobre los resultados de Lpeg. En otras pruebas realizadas tampoco se lograron los resultados deseados para este algoritmo aún utilizando los parámetros opcionales. Un estudio más detallado del funcionamiento de esta herramienta en particular queda pendiente ya que resulta interesante para la aplicación.

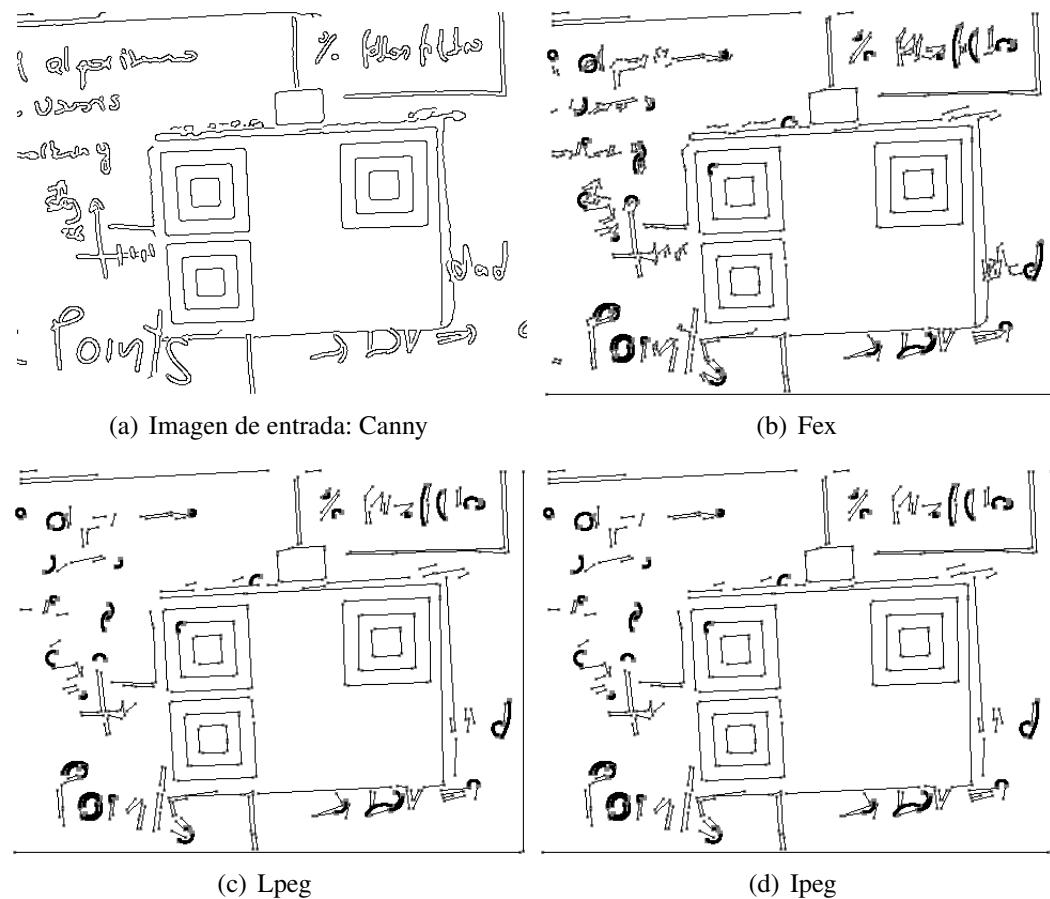


Figura 5.10: Resultados del Object Recognition Toolkit (ORT) para una imagen de entrada salida de Canny.

5.3.5.2. Aplicabilidad

El código fuente de estas herramientas está disponible para la descarga pero este genera un conjunto de programas ejecutables para consola de comandos. Su aplicación para el proyecto no es directa ya que se debería portar a una interfaz compatible con nuestra aplicación. Por otro lado mediante algunas pruebas realizadas sobre este algoritmo los tiempos de ejecución total no resultaron suficientemente buenos para cumplir los requerimientos de tiempo real. También se debe notar que aunque se obtuvieron resultados razonables para las herramientas Fex y Lpeg no fue así para Ipeg que aporta un interés adicional para la aplicación.

Un estudio más detallado del código fuente y la posibilidad de reutilizarlo dentro del marco de la aplicación queda como trabajo a futuro ya que ORT provee algunas herramientas interesantes y de más alto nivel que el detector de segmentos elegido LSD.

5.4. Resumen

En este capítulo se introdujo el tema de detección de características orientado a primitivas. Se hizo énfasis en el tipo de características de esquinas, bordes, líneas y segmentos de línea recorriendo algunos algoritmos de detección clásicos y otros más actuales. Se realizó mediante el uso de un mismo ejemplo conteniendo un marcador algunas de las propiedades que interesan al proyecto concluyendo que el uso de segmentos de línea es el más apropiado por la naturaleza del marcador elegido. Se observó que todos los algoritmos de líneas y segmentos de línea analizados tienen en co-

mún la utilización de algún tipo de detección de bordes o gradientes asociados a bordes al comienzo de la detección. Se compararon los detectores de segmentos de línea obteniendo buenos resultados para los tres presentados, LSD, EDLines y ORT; eligiendo por diferentes razones LSD. A lo largo del análisis se establecieron pautas para realizar como trabajo a futuro en cuanto a los detectores de segmentos de línea, si es que se desea continuar con esta línea de trabajo.

CAPÍTULO 6

Marcadores

6.1. Introducción

La inclusión de *marcadores* en la escena ayuda al problema de extracción de características y por lo tanto al problema de estimación de pose [26]. Estos por construcción son elementos que presentan una detección estable en la imagen para el tipo de característica que se desea extraer así como medidas fácilmente utilizables para la estimación de la pose.

Los marcadores planos se pueden obtener mediante la construcción en una geometría coplanar de una serie de primitivas identificables como esquinas, segmentos o líneas. Un único marcador plano puede contener por si solo todas las seis restricciones espaciales necesarias para definir un marco de coordenadas asociado a su pose.

Como se explica en el Capítulo 8 el problema de estimación de pose requiere de una serie de correspondencias $\mathbf{M}_i \leftrightarrow \mathbf{m}_i$ entre puntos 3D en la escena en coordenadas del mundo y puntos en la imagen.

En el primer lugar se explican brevemente algunos de los sistemas de Realidad Aumentada más populares basados en marcadores planos. En segundo lugar se propone el diseño de un marcador específico para la aplicación a este proyecto y se desarrollan las soluciones a los algoritmos de detección de dicho marcador mostrando algunos resultados parciales en el proceso. Por último se muestran algunos resultados de Benchmark para establecer límites para la detección.

6.2. Sistemas basados en marcadores planos

Existen muchos sistemas de visión basados en *marcadores planos* con aplicación en Realidad Aumentada y Navegación. Algunos de ellos son *ARToolKit* [25], *ARTag* [14] y *ARToolKitPlus* [33] utilizados para Realidad Aumentada. A continuación se realiza una breve descripción del funcionamiento general de los mismos.

Los sistemas basados en marcadores planos utilizan típicamente marcadores bitonales. Esto permite reducir la sensibilidad a las condiciones de luz de la escena y a las configuraciones de la cámara por lo que no hay necesidad de identificar tonos de grises y la regla de decisión para cada píxel puede ser reducida, en la versión más simple, a un umbral o *threshold* [24]. El diseño de los marcadores depende en gran medida de la aplicación. En la figura 6.1 se muestran algunos marcadores planos para aplicaciones de Realidad Aumentada en donde cada uno de ellos provee suficientes puntos para permitir el cálculo de pose tridimensional y adicionalmente contienen cierta información en su interior para permitir su identificación.

Es importante que los marcadores puedan ser localizados en un campo de visión amplio para

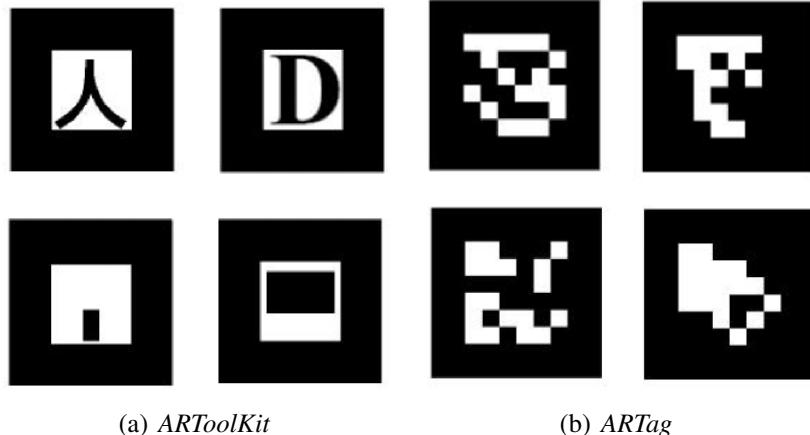


Figura 6.1: Cuatro ejemplos de marcadores para los sistemas de Realidad Aumentada indicados. Figura tomada de [14].

permitir la correcta detección bajo la distorsión asociada a la transformación proyectiva que lleva el marcador en el mundo real al plano de imagen. Por otro lado, si los marcadores contienen información en su interior, esta no debe ser muy densa para permitir la recuperación de la misma a mayor distancia. Típicamente, esta información es solo una identificación entre marcadores de un mismo sistema por lo que la información es poca y esto no es un problema.

Estos sistemas contienen ciertos puntos característicos con los que se realiza el cálculo de pose. En general su contorno es basado en un cuadrilátero y se utilizan las cuatro esquinas del contorno del marcador para realizar el cálculo.

Si se utiliza un único marcador la cantidad de puntos necesarios para la estimación de pose resultan ser pocos lo que puede ser una desventaja en cuanto a la precisión del algoritmo de estimación de pose. Esto se puede mejorar construyendo un marcador más complejo compuesto de una serie de marcadores y mediante la identificación de los mismos asignar los puntos correspondientes para la estimación de pose.

6.2.1. ARToolKit

ARToolKit es un muy popular sistema de marcadores planos para Realidad Aumentada e Interacción Hombre-Computador. Su popularidad reside ser de los primeros proyectos en utilizar la Realidad Aumentada en dispositivos móviles y también debido a que es un proyecto de código abierto.

Los marcadores bitonales consisten en un cuadrado con borde negro y un patrón en el interior. La primer etapa del proceso de reconocimiento consisten en detectar los bordes negros. Esto se realiza buscando grupos conexos de píxeles (*blobs*) que están por debajo de un determinado umbral. Posteriormente se extrae el contorno de cada grupo, esos grupos que están rodeados por cuatro líneas rectas son marcados como marcadores potenciales. Las cuatro esquinas de cada marcador potencial son utilizados para calcular la homografía y así remover la distorsión perspectiva. Con el marcador en una vista canónica, se procede a identificar el patrón interno muestreando en una grilla, de por lo general 16×16 o 32×32 , los valores de gris. Con esto se construye un vector característico y se compara por correlación con una librería de vectores de características logrando la identificación del mismo.

Este sistema tiene algunas desventajas o “puntos débiles”. En primer lugar la detección es basada en un umbral por lo que las condiciones de iluminación pueden afectar fuertemente la efectividad

de la misma. Dado que el código esta disponible este se puede modificar para realizar *threshold* local o adaptivo por ejemplo. Otras desventajas están relacionadas con el proceso de identificación del marcador frente a la librería.

6.2.2. ARTag

ARTag es otro sistema de marcadores planos para Realidad Aumentada e Interacción Hombre-Computador que surge como una evolución de ciertos aspectos de *ARToolKit*. Los marcadores son también bitonales y basados en un borde negro. En contraste con el *ARToolKit* este sistema utiliza un enfoque basado en bordes por lo que es más robusto a condiciones de iluminación. Los bordes son unidos en segmentos que a su vez se unen en cuadriláteros. Al igual que con *ARToolKit* con las esquinas se calcula la homografía y se muestra en el interior del marcador pero con una grilla de 6×6 .

El sistema puede lidiar con condiciones de iluminación cambiantes, occlusiones y segmentos partidos hasta cierto punto. Otra mejora notable con respecto a *ARToolKit* reside en el sistema de identificación de marcadores. El proceso de identificación de los marcadores entre sí es a su vez más veloz y robusto que el de *ARToolKit*.

6.3. Marcador QR

El enfoque elegido para la detección de características utilizando marcadores parte del trabajo de fin de curso denominado Autoposicionamiento 3D de *Matías Tailanián y Santiago Paternain* para el curso *Tratamiento de imágenes por computadora* de Facultad de Ingeniería, Universidad de la República[31]. La elección se basa principalmente en los buenos resultados obtenidos para dicho trabajo con un enfoque relativamente simple. El trabajo desarrolla, entre otras cosas, un diseño de marcador y un sistema de detección de marcadores basado en el detector de segmentos LSD [18] por su buena *performance*.

El marcador utilizado está basado en la estructura de detección incluida en los códigos *QR* y se muestra en la Figura 6.2. Éste consiste en tres grupos idénticos de tres cuadrados concéntricos superpuestos en “capas”. La primer capa contiene el cuadrado negro de mayor tamaño, en la segunda capa se ubica el cuadrado mediano en color blanco y en la última capa un cuadrado negro pequeño. De esta forma se logra un fuerte contraste en los lados de cada uno de los cuadrados facilitando la detección de bordes o líneas. El resultado de una detección de líneas para esta configuración produce para cada cuadrado la detección de sus lados. A diferencia de los códigos *QR* la disposición espacial de los grupos de cuadrados es distinta para evitar ambigüedades en la identificación de los mismos entre sí.

6.3.1. Estructura del marcador

A continuación se presentan algunas definiciones de las estructuras básicas que componen el marcador propuesto. Estas son de utilidad para el diseño y forman un flujo natural y escalable para el desarrollo del algoritmo de determinación de correspondencias.

Los elementos más básicos en la estructura son los *segmentos* los cuales consisten en un par de puntos en la imagen, $\mathbf{p} = (p_x, p_y)$ y $\mathbf{q} = (q_x, q_y)$. Estos *segmentos* forman lo que son los lados del *cuadrilátero*, el próximo elemento estructural del marcador.

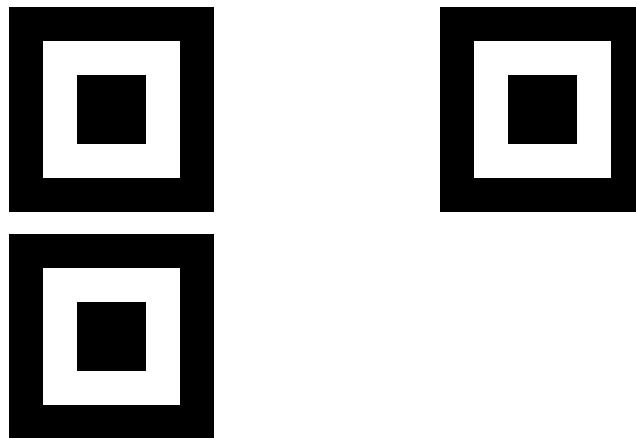


Figura 6.2: Marcador propuesto basado en la estructura de detección de códigos QR.

Un *cuadrilátero* o *quadrilateral* en inglés, al que se le denomina Ql , está determinado por cuatro segmentos conexos y distintos entre sí. El cuadrilátero tiene dos propiedades notables; el *centro* definido como el punto medio entre sus cuatro vértices y el *perímetro* definido como la suma de el largo de sus cuatro lados. Los *vértices* de un cuadrilátero se determinan mediante la intersección, en sentido amplio, de dos segmentos contiguos. Es decir, si s_1 es contiguo a s_2 dadas las recta r_1 que pasa por los puntos $(\mathbf{p}_1, \mathbf{q}_1)$ del segmento s_1 y la recta r_2 que pasa por los puntos $(\mathbf{p}_2, \mathbf{q}_2)$ del segmento s_2 , se determina el vértice correspondiente como la intersección $r_1 \cap r_2$.

A un *conjunto de cuadriláteros* o *quadrilateral set* se le denomina $QlSet$ y se construye a partir de M cuadriláteros, con $M > 1$. Los cuadriláteros comparten un mismo centro pero se diferencian en un factor de escala. A partir de dichos cuadriláteros se construye un lista ordenada $(Ql[0], Ql[1], \dots, Ql[M - 1])$ en donde el orden viene dado por el valor de perímetro de cada Ql . Se define el *centro del grupo de cuadriláteros*, \mathbf{c}_i , como el promedio de los centros de cada Ql de la lista ordenada.

Finalmente el *marcador QR* está constituido por N conjuntos de cuadriláteros dispuestos en una geometría particular. Esta geometría permite la determinación de un sistema de coordenadas; un origen y dos ejes a utilizar. Se tiene una lista ordenada $(QlSet[0], QlSet[1], \dots, QlSet[N - 1])$ en donde el orden se puede determinar mediante la disposición espacial de los mismos o a partir de hipótesis razonables.

Un marcador proveerá un numero de $4 \times M \times N$ vértices y por lo tanto la misma cantidad de puntos para proveer las correspondencias $\mathbf{M}_i \leftrightarrow \mathbf{m}_i$ al algoritmo de estimación de pose. De esta forma se tienen una cantidad de puntos superior a los que se podrían tener utilizando uno de los marcadores de los sistemas como *ARToolKit* a un costo de detección relativamente bajo. Por otro lado se podría agregar algún patrón para la identificación de marcadores en la esquina que completa el rectángulo en donde no hay $QlSet$ como se realizó en el trabajo Autoposicionamiento 3D [31].

6.3.2. Diseño

En base a las estructuras previamente definidas es que se describe el diseño del marcador. Como ya se explicó se toma un marcador tipo QR basado en cuadriláteros y más específicamente en tres conjuntos de tres cuadrados dispuestos en como se muestra en la figura 6.2.

Los tres cuadriláteros correspondientes a un mismo conjunto de cuadriláteros tienen idéntica alineación e idéntico centro. Los diferencia un factor de escala, esto es, $Ql[0]$ tiene lado l mientras que $Ql[1]$ y $Ql[2]$ tienen lado $2l$ y $3l$ respectivamente. Esto se puede ver en la figura 6.3. Adicionalmente se define un sistema de coordenadas con centro en el centro del $QlSet$ y ejes definidos como x horizontal a la derecha e y vertical hacia abajo. Esta convención en las direcciones de los ejes es muy utilizada en el área de Procesamiento de Imágenes para definir las direcciones de los ejes de una imagen. Definido el sistema de coordenadas se puede fijar un orden a los vértices v_{j_1} de cada cuadrilátero $Ql[j]$ como,

$$\begin{aligned} v_{j_0} &= (a/2, a/2) & v_{j_2} &= (-a/2, -a/2) \\ v_{j_1} &= (a/2, -a/2) & v_{j_3} &= (-a/2, a/2) \end{aligned}$$

con $a = (j + 1) \times l$. El orden aquí explicado se puede ver también junto con el sistema de coordenadas en la figura 6.4.

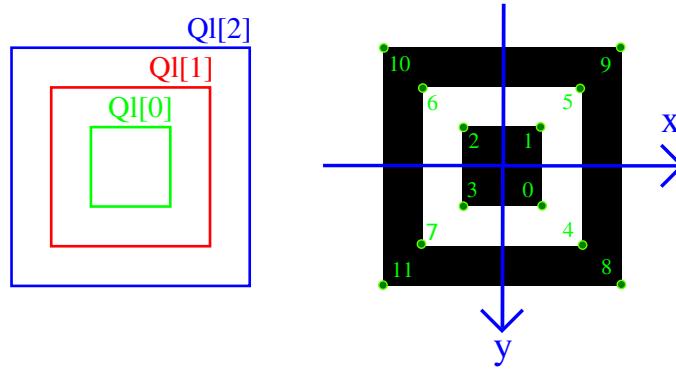


Figura 6.3: Detalle de un $QlSet$. A la izquierda se muestra el resultado de la detección de un $QlSet$ y el orden interno de sus cuadriláteros y a la derecha el orden de los vértices respecto al sistema de coordenadas local.

Un detalle del marcador completo se muestra en la figura 6.4 en donde se define el conjunto i de cuadriláteros concéntricos como el $QlSet[i]$ y se definen los respectivos centros de cada uno de ellos como \mathbf{c}_i . El sistema de coordenadas del marcador QR tiene centro en el centro del $QlSet[0]$ y ejes de coordenadas idénticos al definido para cada Ql . Se tiene además que los ejes de coordenadas pueden ser obtenidos mediante los vectores normalizados,

$$\mathbf{x} = \frac{\mathbf{c}_1 - \mathbf{c}_0}{\|\mathbf{c}_1 - \mathbf{c}_0\|} \quad \mathbf{y} = \frac{\mathbf{c}_2 - \mathbf{c}_0}{\|\mathbf{c}_2 - \mathbf{c}_0\|} \quad (6.1)$$

La disposición de los $QlSet$ es tal que la distancia indicada d_{01} definida como la norma del vector entre los centros \mathbf{c}_1 y \mathbf{c}_0 es significativamente mayor que la distancia d_{02} definida como la norma del vector entre los centros \mathbf{c}_2 y \mathbf{c}_1 . Esto es, $d_{01} \gg d_{02}$. Este criterio facilita la identificación de los $QlSet$ entre sí basados únicamente en la posición de sus centros y es explicado en la sección de determinación de correspondencias (Sección 6.4.3).

6.3.3. Parámetros de diseño

Provisto el diseño del marcador descrito, quedan definidos ciertos parámetros **estructurales** que fueron tomados fijos a lo largo del proyecto pero que podrían ser cambiados para trabajos futuros asociados. Estos parámetros son:

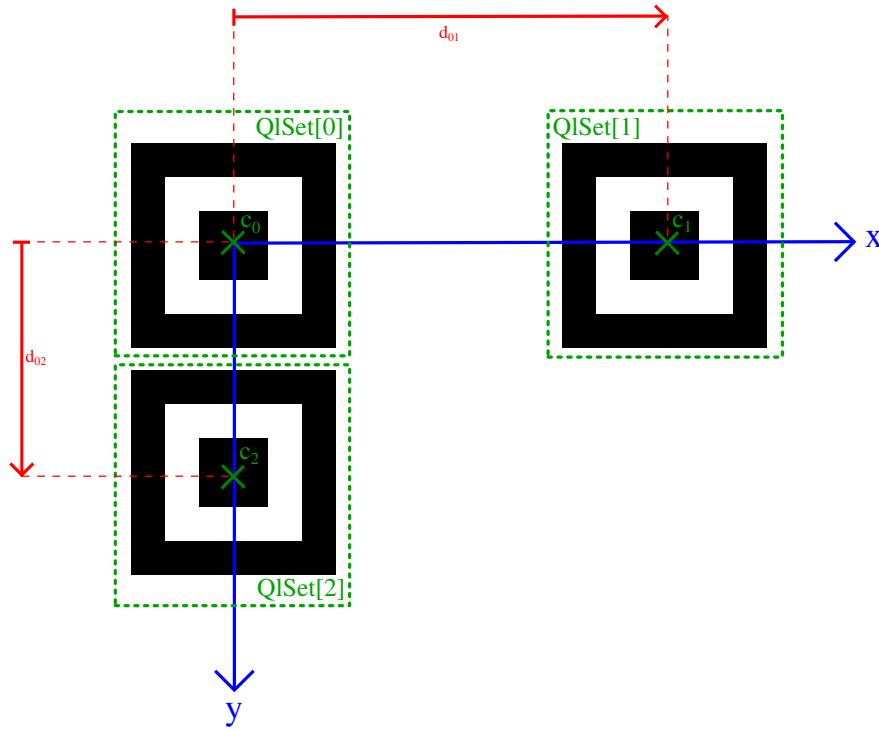


Figura 6.4: Detalle del marcador propuesto formando un sistema de coordenadas.

- M: cantidad de conjuntos de cuadriláteros.
- N: cantidad de cuadriláteros por conjuntos de cuadriláteros.
- Geometría: geometría de los cuadriláteros (Ql).
- Disposición: disposición espacial de los conjuntos de cuadriláteros ($QlSet$).

El criterio de elección de M y N parte del diseño los códigos QR como ya fue explicado. La detección por segmentos de línea resulta una cantidad de $3 \times QlSet$'s conteniendo $3 \times Ql$'s cada uno. Bajo esta elección de parámetros se tienen 36 segmentos y vértices. Se tiene entonces un número de puntos característicos razonable para la estimación de pose.

La elección de *cuadrados* como parámetro de geometría se basa en la necesidad de tener igual resolución en los dos ejes del marcador. De esta forma se asegura una distancia límite en donde, en un caso ideal enfrentado al marcador, la detección de segmentos de línea falla simultáneamente en los segmentos verticales como en los horizontales. De otra forma se tendría una dirección que limita más que la otra desaprovechando resolución.

La disposición espacial de los conjuntos de cuadriláteros esta en primer lugar limitada a un plano y en segundo lugar es tal que se puede definir ejes de coordenadas ortogonales mediante los centros como se muestra en la Figura 6.4.

Por otro lado se tiene otro juego de parámetros **dinámicos** que concluyen con el diseño del marcador. Estos parámetros conservan la estructura intrínseca del marcador permitiendo versatilidad en la aplicación y sin la necesidad de modificación alguna de los algoritmos desarrollados. Estos son:

- d_{ij} : distancia entre los centros $QlSet[j]$ con $QlSet[i]$.
- l : lado del cuadrilátero más pequeño ($Ql[0]$) de los $QlSet$.

En este caso se debe cumplir siempre la condición impuesta previamente en donde $d_{01} \gg d_{02}$. De otra forma se deberán realizar ciertas hipótesis no genéricas o se deberá aumentar ligeramente la complejidad del algoritmo para la identificación del marcador.

6.3.4. Diseño utilizado

Diseño de Test: Durante el desarrollo e implementación de los algoritmos de detección e identificación de los vértices del marcador se trabajó con determinados parámetros de diseño de dimensiones apropiadas para posibilitar el traslado y las pruebas domésticas.

- $l = 30mm$
- $d_{01} = 190mm$
- $d_{02} = 100mm$

6.4. Detección

La etapa de detección del marcador se puede separar en tres grandes bloques:

- Detección de segmentos de línea.
- Filtrado y agrupamiento de segmentos.
- Determinación de correspondencias.

En esta sección se muestran algunos resultados para la detección de segmentos de línea por LSD y se centra en profundidad en los algoritmos desarrollados durante el proyecto para el filtrado de segmentos y determinación de correspondencias.

6.4.1. Detección de segmentos de línea

La detección de segmentos de línea se realiza mediante el uso del algoritmo LSD el cual se detalla en el Capítulo 7. En forma resumida, dicho algoritmo toma como entrada una imagen en escala de grises de tamaño $W \times H$ y devuelve una lista de segmentos en forma de pares de puntos de origen y destino.

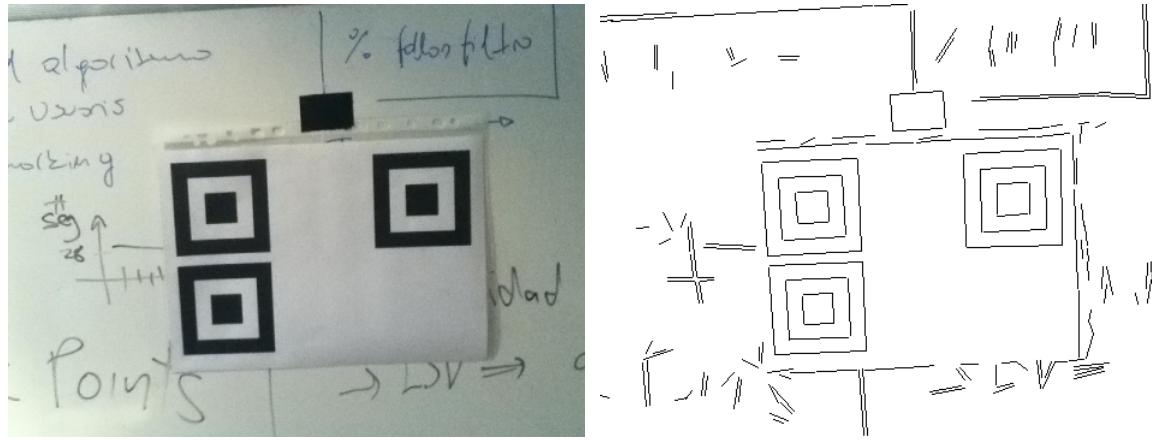
En la Figura 6.5 se muestra un resultado para la detección de segmentos de línea por LSD.

6.4.2. Filtrado y agrupamiento de segmentos

El filtrado y agrupamiento de segmentos consiste en la búsqueda de conjuntos de cuatro segmentos conexos en la lista de segmentos de línea detectados por LSD. Los conjuntos de segmentos conexos encontrados se devuelven en una lista en el mismo formato a la de LSD pero agrupados de a cuatro. A continuación se realiza una breve descripción del algoritmo de filtrado de segmentos implementado.

Se parte de una lista de m segmentos de línea,

$$\mathbf{L} = (\mathbf{s}_0 \quad \mathbf{s}_1 \quad \dots \quad \mathbf{s}_{m-1})^t \quad (6.2)$$



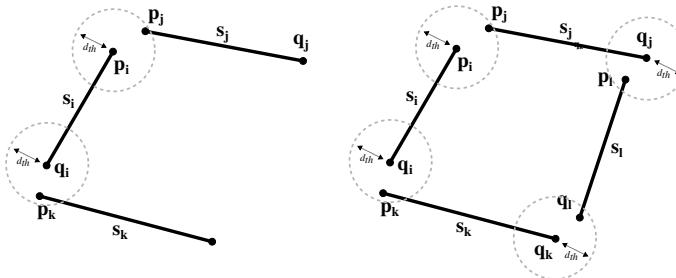
(a) Entrada: imagen conteniendo al marcador

(b) Salida: segmentos de línea detectados por LSD

Figura 6.5: Resultados del algoritmo de detección de segmentos de línea LSD.

y se recorre en i en busca de segmentos vecinos. La estrategia utilizada consiste en buscar, para el i -ésimo segmento s_i , dos segmentos vecinos. En una primera etapa s_j y en una segunda etapa s_k , de forma que se forme una “U” como se muestra en la Figura 6.6. La tercera etapa de búsqueda consiste en completar ese conjunto con un cuarto segmento s_l que cierre la “U”.

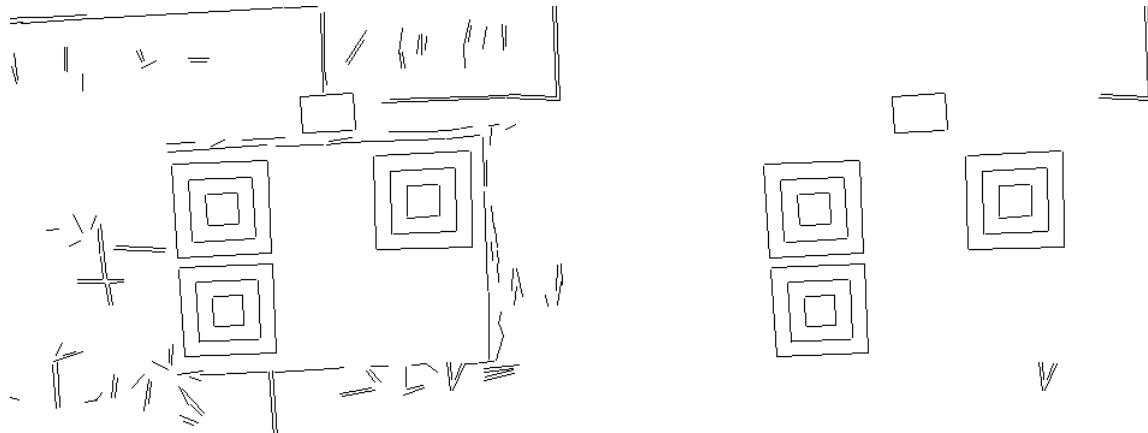
Dos segmentos s_i y s_j son vecinos si se cumple que la distancia euclídea entre puntos, d_{ij} , es menor a un cierto umbral para alguna de las combinaciones $\mathbf{p}_i \leftrightarrow \mathbf{p}_j$, $\mathbf{q}_i \leftrightarrow \mathbf{q}_j$, $\mathbf{p}_i \leftrightarrow \mathbf{q}_j$ o $\mathbf{q}_i \leftrightarrow \mathbf{p}_j$. En la primera etapa de la búsqueda se testean todas las posibilidades mientras que en la segunda etapa se testean solo los puntos del segmento que no fueron utilizados. Por ejemplo, si se encontró la correspondencia $\mathbf{p}_i \leftrightarrow \mathbf{p}_j$ se busca el k -ésimo segmento s_k que cumple que la distancia euclidiana d_{ij} es menor a cierto umbral para alguna de las combinaciones $\mathbf{q}_i \leftrightarrow \mathbf{p}_k$ y $\mathbf{q}_i \leftrightarrow \mathbf{q}_k$. En la tercera etapa la chequeo se realiza de forma aún más restringida probando para el segmento s_l correspondencia simultánea entre sus puntos y solamente un punto cada uno de los segmentos s_j y s_k .

Figura 6.6: Conjunto de cuadriláteros conexos. A la izquierda la primera y segunda etapa del filtrado completadas para el segmento s_i en donde se busca una “U”. A la derecha la última etapa en donde se cierra la “U” con el segmento s_l .

Una vez encontrado el conjunto de cuatro segmentos conexos estos se marcan como utilizados, se guardan en una lista de salida y se continúa con el segmento $i + 1$ hasta recorrer los m segmentos de la lista de entrada. De esta forma se obtiene una lista de salida S de n segmentos en donde n es por construcción múltiplo de cuatro.

En la Figura 6.7 se muestran los resultados obtenidos para el algoritmo tomando como entrada la lista de segmentos de LSD. Se puede ver que los lados de los cuadrados del marcador son detec-

tados correctamente pero también hay otras detecciones presentes. Por ejemplo el rectángulo negro correspondiente a un trozo de cinta negra que sostiene el marcador (ver Figura 6.5(a)). También sobreviven otro tipo de elementos indeseados que se explican a continuación.



(a) Entrada: segmentos de línea detectados por LSD (b) Salida: segmentos de línea filtrados y agrupados

Figura 6.7: Resultados del algoritmo de filtrado y agrupamiento de segmentos de línea.

El algoritmo descrito es simple y provee resultados aceptables en general pero es propenso a tanto a detectar *falsos positivos* como al *sobre-filtrado* algunos conjuntos.

La detección de falsos positivos se puede atribuir principalmente a la condición de vecindad utilizada en donde un caso como el que se muestra en la Figura 6.8 de un conjunto de segmentos paralelos cercanos y de tamaño similar “sobrevive” al filtrado de segmentos. De forma de evitar estos falsos positivos, se podría considerar implementar una condición de vecindad que tome en cuenta el punto de intersección entre los segmentos y la distancia de este punto a los puntos p , q más cercanos de cada segmento. Como se explicará en la Sección 6.4.3, debido a que el algoritmo de determinación de correspondencias realiza la intersección entre estos segmentos se puede chequear alguna condición sobre los segmentos o su intersección y en ese momento filtrar estos casos.

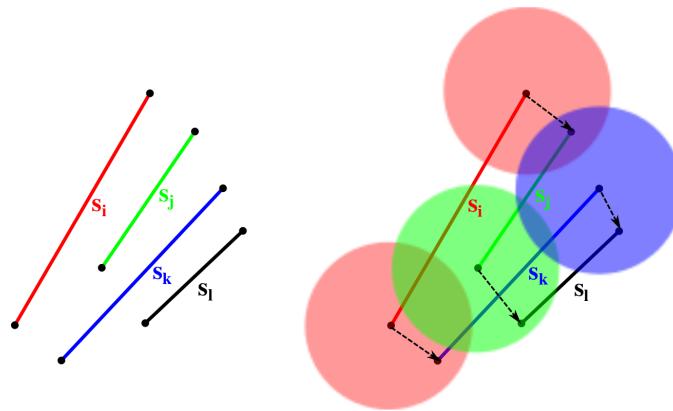


Figura 6.8: Posible configuración de segmentos paralelos que “sobreviven” al filtrado. A la izquierda el grupo de segmentos, a la derecha se muestra como se desarrolla el filtrado de s_i .

El sobre-filtrado de segmentos tiende a ocurrir cuando no se cumple la condición de distancia entre segmentos vecinos cuando visualmente si lo son. Se debe principalmente a que se utiliza para el filtrado un valor de d_{th} fijo que conduce a buenos resultados para la aplicación pero en ciertas circunstancias produce este problema. Esta medida de distancia se podría tomar relativa al largo del

los segmentos a *testear* de forma de generalizar el valor pero se debería analizar un poco más en detalle la posible implementación para que resulte en buenos resultados y no introduzca otra clase de errores.

El algoritmo de filtrado y agrupamiento de segmentos es sensible respecto a la elección del parámetro d_{th} . Si este parámetro está por debajo del valor óptimo la *performance* del algoritmo se verá afectada fuertemente, pues se corre el riesgo de sobre filtrar y no proporcionar suficientes segmentos para la correcta determinación de correspondencias. Por el contrario, si el parámetro está por encima del valor óptimo, el filtrado tiende a proveer falsos positivos, aunque este caso no llega a ser tan crítico como el primero para la aplicación. A modo de ejemplo, para una imagen de tamaño 480×320 con el marcador ocupando entre un 25 % y un 80 % el valor del parámetro que da mejores resultados es aproximadamente de 6 o 7 píxeles.

6.4.3. Determinación de correspondencias

Se detalla a continuación el algoritmo de determinación de correspondencias a partir de grupos de cuatro segmentos de línea conexos. Para ese algoritmo se hace uso de los elementos estructurales del marcador vistos en la Sección 6.3.1, de forma de desarrollar un algoritmo modular, escalable y simple.

Se toma como entrada la lista de segmentos filtrados y agrupados

$$\mathbf{S} = (\mathbf{s}_0 \ \mathbf{s}_1 \ \dots \ \mathbf{s}_i \ \mathbf{s}_{i+1} \ \mathbf{s}_{i+2} \ \mathbf{s}_{i+3} \ \dots \ \mathbf{s}_{n-1})^t \quad (6.3)$$

en donde cada segmento se compone de un punto inicial \mathbf{p}_i y un punto final \mathbf{q}_i , $\mathbf{s}_i = (\mathbf{p}_i, \mathbf{q}_i)$, con n múltiplo de cuatro. Si i también lo es, entonces el sub-conjunto, $\mathbf{S}_i = (\mathbf{s}_i \ \mathbf{s}_{i+1} \ \mathbf{s}_{i+2} \ \mathbf{s}_{i+3})^t$, corresponde a un conjunto de cuatro segmentos de línea conexos.

Para cada sub-conjunto \mathbf{S}_i se intersectan entre sí los segmentos obteniendo una lista de cuatro vértices, $\mathbf{V}_i = (\mathbf{v}_i \ \mathbf{v}_{i+1} \ \mathbf{v}_{i+2} \ \mathbf{v}_{i+3})^t$. Si \mathbf{r}_i es la recta que pasa por los puntos \mathbf{p}_i y \mathbf{q}_i del segmento \mathbf{s}_i , la lista de vértices se obtiene como sigue,

$$\begin{aligned} \mathbf{v}_i &= \mathbf{r}_i \cap \mathbf{r}_{i+1} \\ \mathbf{v}_{i+1} &= \mathbf{r}_i \cap \mathbf{r}_{i+2} \\ \mathbf{v}_{i+2} &= \mathbf{r}_{i+3} \cap \mathbf{r}_{i+2} \\ \mathbf{v}_{i+3} &= \mathbf{r}_{i+3} \cap \mathbf{r}_{i+1} \end{aligned}$$

resultando en dos posibles configuraciones de vértices. Las dos configuraciones se muestran en la Figura 6.9 en donde una de ellas tiene sentido horario y la otra antihorario partiendo de v_i .

Posterior a la intersección se realiza un chequeo sobre el valor de las coordenadas de los vértices. Si alguno de ellos se encuentra fuera de los límites de la imagen, el conjunto de cuatro segmentos es marcado como inválido. Este chequeo resulta en el filtrado de “falsos cuadriláteros” corrigiendo un defecto del filtrado de segmentos, como por ejemplo un grupo de segmentos paralelos cercanos como ya se explicó.

Para cada uno de los conjuntos de vértices se construye con ellos un elemento cuadrilátero que se almacena en una lista de cuadriláteros

$$QlList = (Ql[0] \ Ql[1] \ \dots \ Ql[i] \ \dots \ Ql[\frac{n}{4}])^t$$

A partir de esa lista de cuadriláteros, se buscan grupos de tres cuadriláteros $QlSet$ que “compartan” un mismo centro. Para esto se recorre ordenadamente la lista en i buscando para cada cuadrilátero dos cuadriláteros j y k que cumplan que la distancia entre sus centros y el del i -ésimo

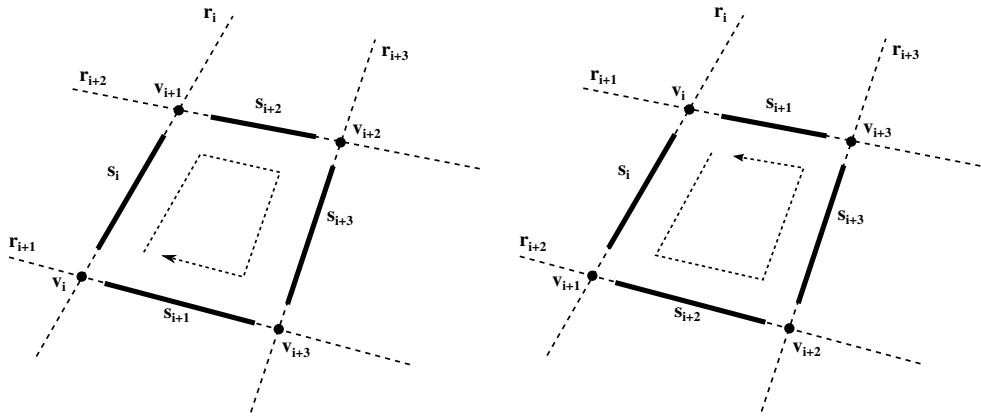


Figura 6.9: Posibles configuraciones de vértices posterior a la intersección de conjuntos de segmentos pertenecientes a un cuadrilátero.

cuadrilátero sea menor a cierto umbral c_{th} ,

$$d_{ij} = \|\mathbf{c}_i - \mathbf{c}_j\| < c_{th}, \quad d_{ik} = \|\mathbf{c}_i - \mathbf{c}_k\| < c_{th}. \quad (6.4)$$

Estos cuadriláteros se marcan en la lista como utilizados con ellos se forma el l -ésimo $QlSet$ ordenándolos según su perímetro, de menor a mayor como

$$QlSet[l] = (Ql[0] \quad Ql[1] \quad Ql[2])$$

con $l = (0, 1, 2)$. Esta búsqueda se realiza hasta encontrar un total de tres $QlSet$ completos de forma de obtener un marcador completo, esto es, detectando todos los cuadriláteros que lo componen.

Una vez obtenida la lista de tres $QlSet$,

$$QlSetList = (QlSet[0] \quad QlSet[1] \quad QlSet[2])$$

ésta se ordena de forma que su disposición espacial se corresponda con la del marcador QR. Para esto se calculan las distancias entre los centros de cada $QlSet$ y se toma el índice i como el índice que produce el vector de menor distancia, $\mathbf{u}_i = \mathbf{c}_{i+1} - \mathbf{c}_i$. En este punto es importante que la condición de distancia entre los centros de los $QlSet$ se cumpla, $d_{10} \gg d_{20}$, para una simple identificación. Bajo una transformación proyectiva del marcador, es posible que esta relación se modifique e incluso que deje de valer, pero imponiendo la condición “mucho mayor” se asegura que el algoritmo funciona correctamente para condiciones razonables. Esto es, para proyecciones o poses que se encuentran dentro de las hipótesis de uso de la aplicación.

Una vez seleccionado el vector \mathbf{u}_i , se tienen obtiene el juego de vectores $(\mathbf{u}_i, \mathbf{u}_{i+1}, \mathbf{u}_{i+2})$ como se muestra en la figura 6.10.

Existen solo dos posibles configuraciones para estos vectores por lo que se utiliza este conocimiento para ordenar los $QlSet$ de la lista realizando el producto vectorial, aumentando la dimensión de los vectores $\hat{\mathbf{u}}_i$ y $\hat{\mathbf{u}}_{i+1}$ con coordenada $z = 0$,

$$\mathbf{b} = \hat{\mathbf{u}}_i \times \hat{\mathbf{u}}_{i+1}.$$

Si el vector \mathbf{b} tiene valor en la coordenada z positivo se ordena como,

$$\begin{aligned} QlSet[0] &\leftarrow QlSet[i] \\ QlSet[1] &\leftarrow QlSet[i+2] \\ QlSet[2] &\leftarrow QlSet[i+1] \end{aligned}$$

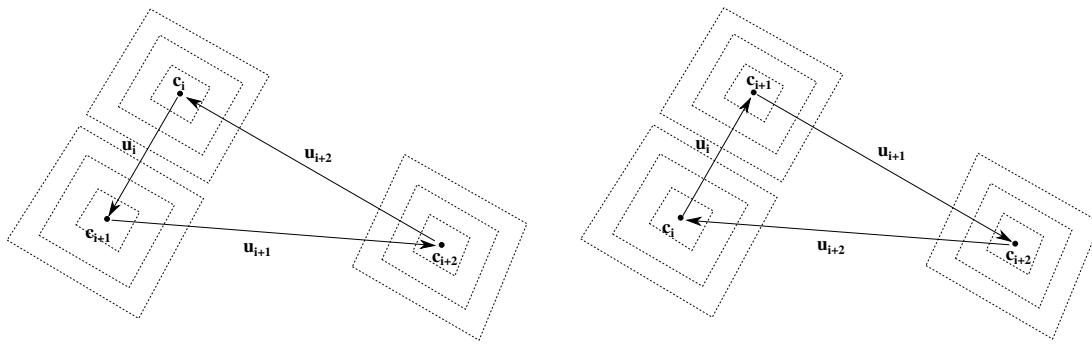


Figura 6.10: Vértices de cada Ql ordenados respecto al signo de sus proyecciones contra el sistema de coordenadas local a cada $QlSet$.

o de lo contrario se ordena como,

$$\begin{aligned} QlSet[0] &\leftarrow QlSet[i + 1] \\ QlSet[1] &\leftarrow QlSet[i + 2] \\ QlSet[2] &\leftarrow QlSet[i] \end{aligned}$$

Por ultimo se construye un marcador QR que contiene la lista de tres $QlSet$ ordenados según lo indicado permitiendo la definición de un centro de coordenadas como el centro c_0 del $QlSet[0]$ y ejes de coordenadas definidos en la Ecuación 6.1. Los ejes de este sistema de coordenadas permiten, para cada Ql de cada $QlSet$, proyectar los vértices sobre el sistema de coordenadas local al $QlSet$ y según su signo ordenarlos como se muestra en la Figura 6.11. De esta forma, recorriendo

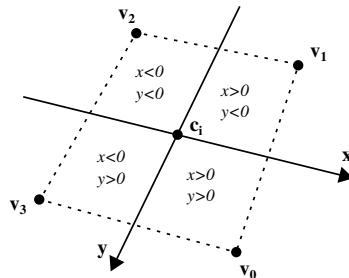


Figura 6.11: Posibles configuraciones de centros resultan en la orientación de los vectores u_{i+k} .

ordenadamente los elementos del marcador, se ordenan los vértices de cada Ql del marcador.

Por último, a partir del marcador ordenado, se extrae una lista de vértices que se corresponde con la lista de vértices del marcador en coordenadas del mundo. Este recorrido se realiza en el siguiente orden,

Se determinan las correspondencias $\mathbf{M}_i \leftrightarrow \mathbf{m}_i$ necesarias para la estimación de pose las cuales se muestran en la Figura 6.12. Se puede ver que el algoritmo de determinación de correspondencias funciona correctamente por lo que los “falsos” cuadriláteros que sobreviven al filtrado de segmentos no son un problema.

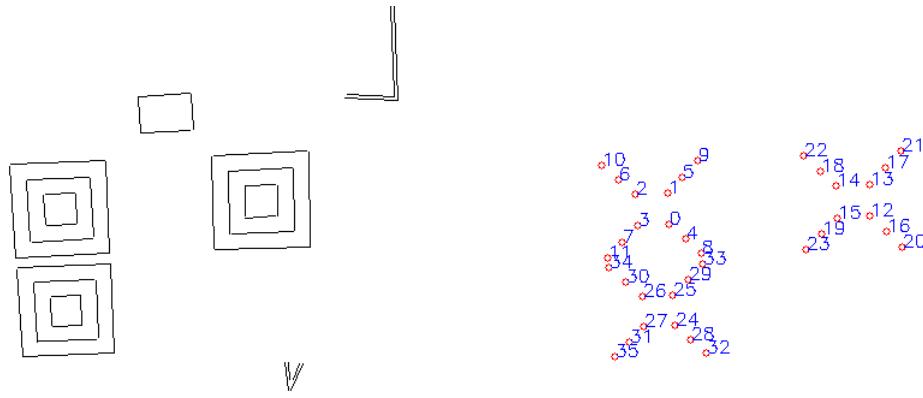
6.4.4. Detección robusta

El algoritmo descripto al momento requiere que dentro de la lista de segmentos filtrados se encuentren todos los segmentos que componen el marcador pero este requerimiento representa un

```

for  $i = (0, 1, 2)$  do
    for  $j = (0, 1, 2)$  do
        for  $k = (0, 1, 2, 3)$  do
            So obtiene el punto vértice:  $\mathbf{p} = QlSet[i] \rightarrow Ql[j] \rightarrow v[k]$ ;
            Se agrega a la lista de correspondencias  $\mathbf{m}_l \leftarrow \mathbf{p}$ ;
            Se incrementa  $l$ ;
        end
    end
end

```



(a) Entrada: segmentos de línea filtrados y agrupados (b) Salida: puntos vértices ordenados.

Figura 6.12: Resultados del algoritmo de determinación de correspondencias.

problema importante en cuanto a el desempeño del algoritmo. En caso de que esto no se cumpla no es posible proporcionar las correspondencias necesarias para la estimación de pose y no se tendrá una pose válida para ese cuadro o *frame* para la aplicación. En aplicaciones en tiempo real en donde el procesamiento de la imagen es la mayor limitante, la fluidez visual dada por el *frame rate* se ve notablemente perjudicada resultando en que el sistema sea incómodo e incluso inutilizable. Es por esto que en esta sección se desarrolla la extensión del algoritmo de determinación de correspondencias para una cantidad menor de segmentos detectados y filtrados que resulta en una mejora sustancial en la cantidad de *frames* en los cuales es posible determinar correspondencias y obtener así una pose válida.

Se busca una determinación de correspondencias más robusta pero manteniendo las esencia del algoritmo desarrollado. Por esto se tienen dos aspectos a tomar en cuenta; la detección de *QlSet*'s se realiza basada en la búsqueda de cuadriláteros concéntricos por lo que se debe contar con un mínimo de dos cuadriláteros por *QlSet* para permitir la diferenciación entre un conjunto de segmentos filtrados debido a que pertenecen al marcador y a otro conjunto que no pertenece pero si cumple con las condiciones, por ejemplo podría ser el marco de una obra o cualquier elemento en la escena que forme un cuadrilátero. Esto fija un límite de no menos de 24 segmentos necesarios para el funcionamiento. El otro aspecto a tomar en cuenta se refiere a la forma en que se ordenan los *Ql*'s dentro de cada *QlSet*. Como ya se explicó el orden se basa en la medida del perímetro de los *Ql*'s ordenando de menor a mayor por lo que será necesario contar con, al menos, un *QlSet* completo de forma de tener una referencia a la hora de identificar los *QlSet*'s incompletos hallados. Por lo tanto la extensión del algoritmo permite una correcta identificación de los vértices del marcador con un número mayor o igual a 28 segmentos.

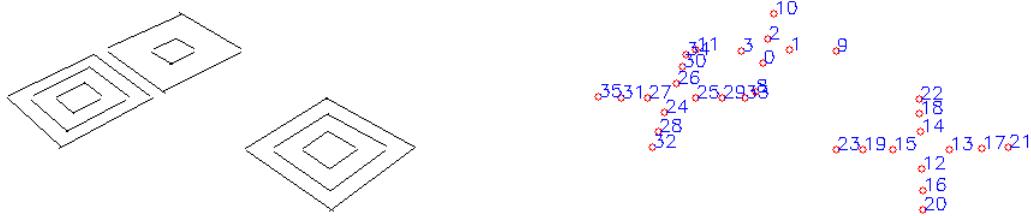
La implementación de esta extensión del algoritmo se realizó manteniendo la estructura básica descrita anteriormente y se detalla aquí solamente los agregados realizados.

Al realizar la búsqueda de conjuntos de cuadriláteros concéntricos se buscan en primer lugar los $QlSet$'s completos y luego en caso de que estos no lleguen a ser tres, se intenta completar buscando $QlSet$'s incompletos o sea conjuntos de dos cuadriláteros que comparten un mismo centro. Estos se agrupan en una lista de la misma forma en que se describió anteriormente pero dejando el tercer cuadrilátero, $Ql[2]$, marcado como inválido.

Una vez completada la lista de tres $QlSet$, con al menos uno de ellos detectado completo, se ordenan en primer lugar los $QlSet$ completos y de ellos se extrae una lista de perímetros promedio. Esta lista de perímetros promedio se utiliza para el ordenamiento de los $QlSet$ incompletos comparando con los perímetros de los $Ql[0]$ y $Ql[1]$ de cada $QlSet$. El $Ql[2]$ previamente marcado como inválido se posiciona por descarte en la posición que corresponda.

Al momento de proporcionar la lista de vértices ordenados \mathbf{m}_i y correspondientes con los del modelo \mathbf{M}_i , se introducen valores inválidos para los Ql 's marcados como inválidos. Por último se realiza un recorte de las dos listas de puntos en base a estos valores inválidos, se recorre la lista de puntos en la imagen \mathbf{m}_i y se extraen de la lista de puntos en la imagen y de los puntos del modelo los puntos inválidos obteniendo un juego de al menos 28 correspondencias $\mathbf{m}'_i \leftrightarrow \mathbf{M}'_i$ para el algoritmo de estimación de pose.

En la Figura 6.13(a) se muestran imágenes en la que falla el filtrado de segmentos para uno de los cuadriláteros mientras que en la figura 6.13(b) se puede ver como el algoritmo de determinación de correspondencias provee 32 correspondencias ordenadas correctamente, diferenciando en el $QlSet$ incompleto los vértices.



(a) Entrada: segmentos de línea filtrados y agrupados

(b) Salida: puntos vértices ordenados.

Figura 6.13: Resultados del algoritmo de determinación de correspondencias robusto para una falla en el filtrado de segmentos.

6.5. Comentarios sobre la implementación de los algoritmos

El algoritmo de filtrado y agrupamiento se implementó en los archivos `segments.c` y `segments.h` mientras que el de determinación de correspondencias se implementó en los archivos `marker.c` y `marker.h`.

El entorno de desarrollo (IDE) utilizado para la implementación fue Eclipse CDT para C/C++: <http://www.eclipse.org/cdt/> en un proyecto que utiliza un *Makefile* para la compilación por lo que se podría utilizar otro entorno en caso de ser necesario.

Adicionalmente de forma de facilitar la tareas de interfaz como el abrir/capturar, el guardado/-despliegue de imágenes o video así como el dibujado de segmentos y puntos sobre las imágenes se utiliza la librería OpenCV. Se aclara que esta interfaz no está de ninguna forma integrada con los algoritmos desarrollados pero fue de gran utilidad para la implementación de los mismos. Su utilización esta intrínsecamente ligada a la librería OpenCV pero esta es una muy popular librería multiflatforma para procesamiento de imágenes.

6.6. Resultados de Benchmark

En esta sección se presentan algunos resultados de *Benchmark* para los algoritmos de asociados a la detección del marcador diseñado. En particular se estudian los límites para la detección de segmentos mediante LSD y el filtrado y agrupamiento de los mismos para juegos de imágenes sintéticas generadas utilizando las herramientas explicadas en el Anexo A.1.

Se analizan los casos que presentaron limitaciones más significativas como, la profundidad máxima del marcador respecto al eje *z*, la rotación máxima permitida sobre el eje *x* y lo mismo para la rotación sobre el eje *y*. Mediante este análisis se obtienen cotas *pseudo-teóricas* para establecer las limitaciones prácticas de uso de los algoritmos.

6.6.1. Elección de parámetros para Benchmark

Para la evaluación de los algoritmos se utilizaron algunos parámetros de Benchmark fijos y otros modificables llevando a una elección definitiva de parámetros.

Un juego de parámetros fue tomado fijo y se refiere a la cámara utilizada.

- *width × height*: Tamaño de imagen tomado 480×360 .
- *fov*: Campo visual referido al ancho tomado $46,46^\circ$
- *centro*: Centro de la cámara siempre ubicado en el medio de la imagen.

A lo largo de las diferentes pruebas realizadas se probaron modificar algunos parámetros para ver como estos afectaban los resultados. Los parámetros modificables son:

- *d_{th}*: Distancia del threshold de filtrado de segmentos.
- *s*: Escala del LSD.
- *width × height*: Tamaño de imagen.

Los valores que toman estos parámetros para las pruebas finales que corresponden con las que se muestran:

- $d_{th} = 5px$
- $s = 0,5$

- $width \times height = 480 \times 360px$

La elección de estos parámetros fue **definitiva** para las pruebas de Benchmark a lo largo de todo el documento. Por más información sobre las herramientas de Benchmark y los parámetros ajustables para la generación de imágenes sintéticas referirse al Anexo A.1.

6.6.2. Límite en profundidad: Eje z

Para realizar las pruebas del límite de profundidad del marcador se generó un juego de imágenes (*Caso 1*) en las cuales el marcador se ubica enfrentado a la cámara con el centro del mismo coincidente con el centro óptico de la cámara y por lo tanto en el centro de la imagen. Se utilizan profundidades que varían desde $z = 600mm$ hasta $z = 2100mm$ de a $1mm$.

Se puede ver en la Figura 6.14 los casos límite sobre el cual el LSD no provee resultados satisfactorios y también el caso límite inmediatamente anterior a la falla del filtrado de segmentos. Se puede concluir que para el caso de profundidad el detector de segmentos LSD limita primero a una distancia de $z = 1575mm$.

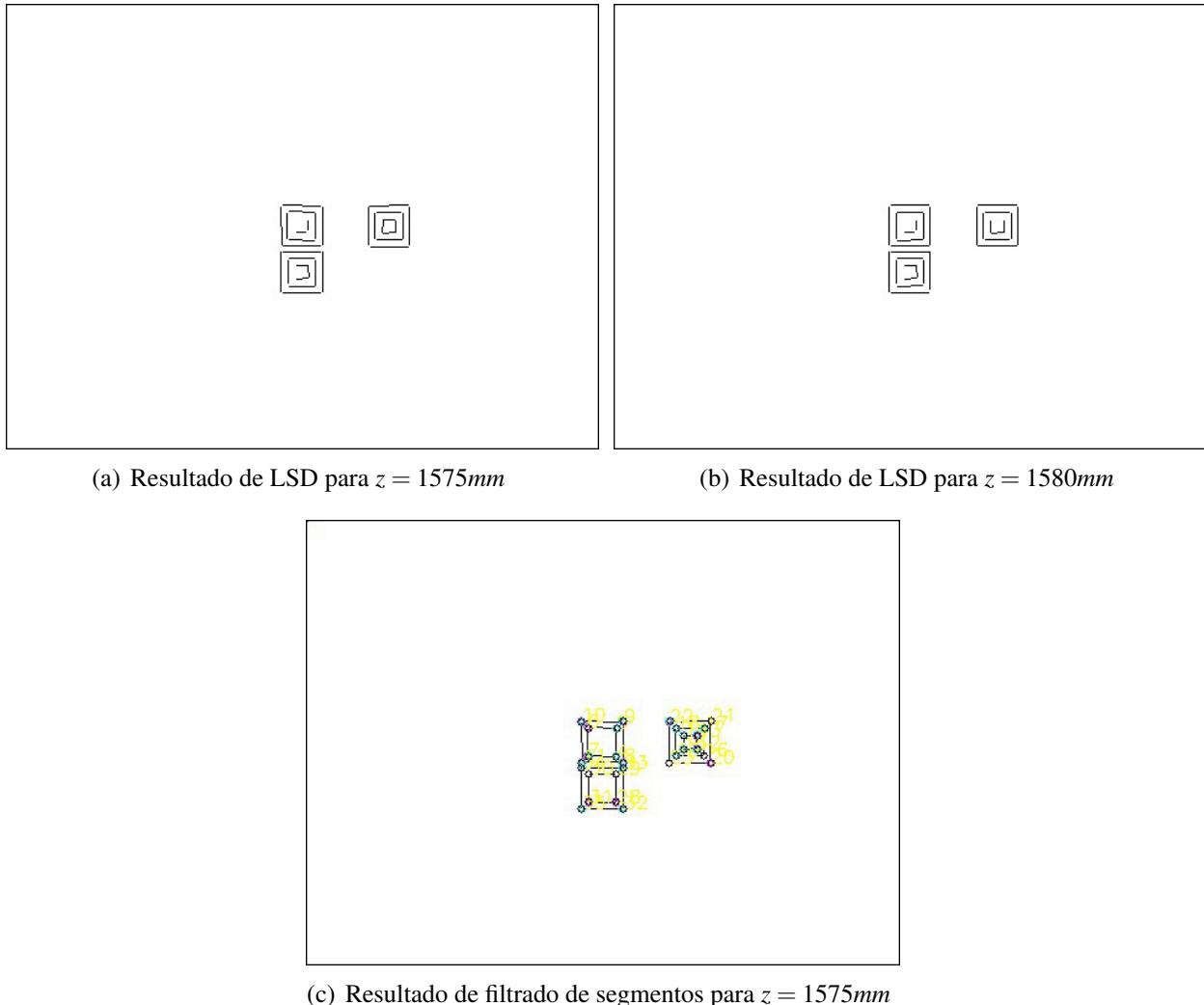


Figura 6.14: Límites para la profundidad máxima en el eje z del marcador.

6.6.3. Límite en rotación: Eje x

Para las pruebas del límite de rotación sobre el eje x del marcador se generó un juego de imágenes (*Caso 3*) en las cuales el marcador se ubica a una distancia fija de $z = 1000mm$ con el centro del mismo coincidente con el centro óptico de la cámara y por lo tanto en el centro de la imagen. Sobre esta traslación se varía la rotación en el eje x de a 2° desde $r_x = -60^\circ$ hasta $r_x = 60^\circ$.

Se puede ver en las Figuras 6.15(a) y 6.15(b) los casos de límite negativos y positivos respectivamente en los cuales el LSD falla. Debido a la simetría del marcador limitan primero las rotaciones negativas. Por otro lado en las Figuras 6.15(c) y 6.15(d) se observan los casos de límite negativos y positivos respectivamente inmediatamente anteriores a la falla del filtrado de segmentos. Se puede concluir que para las rotaciones sobre el eje x limita LSD ya que el filtrado de segmentos funciona correctamente para casos inmediatamente anteriores.

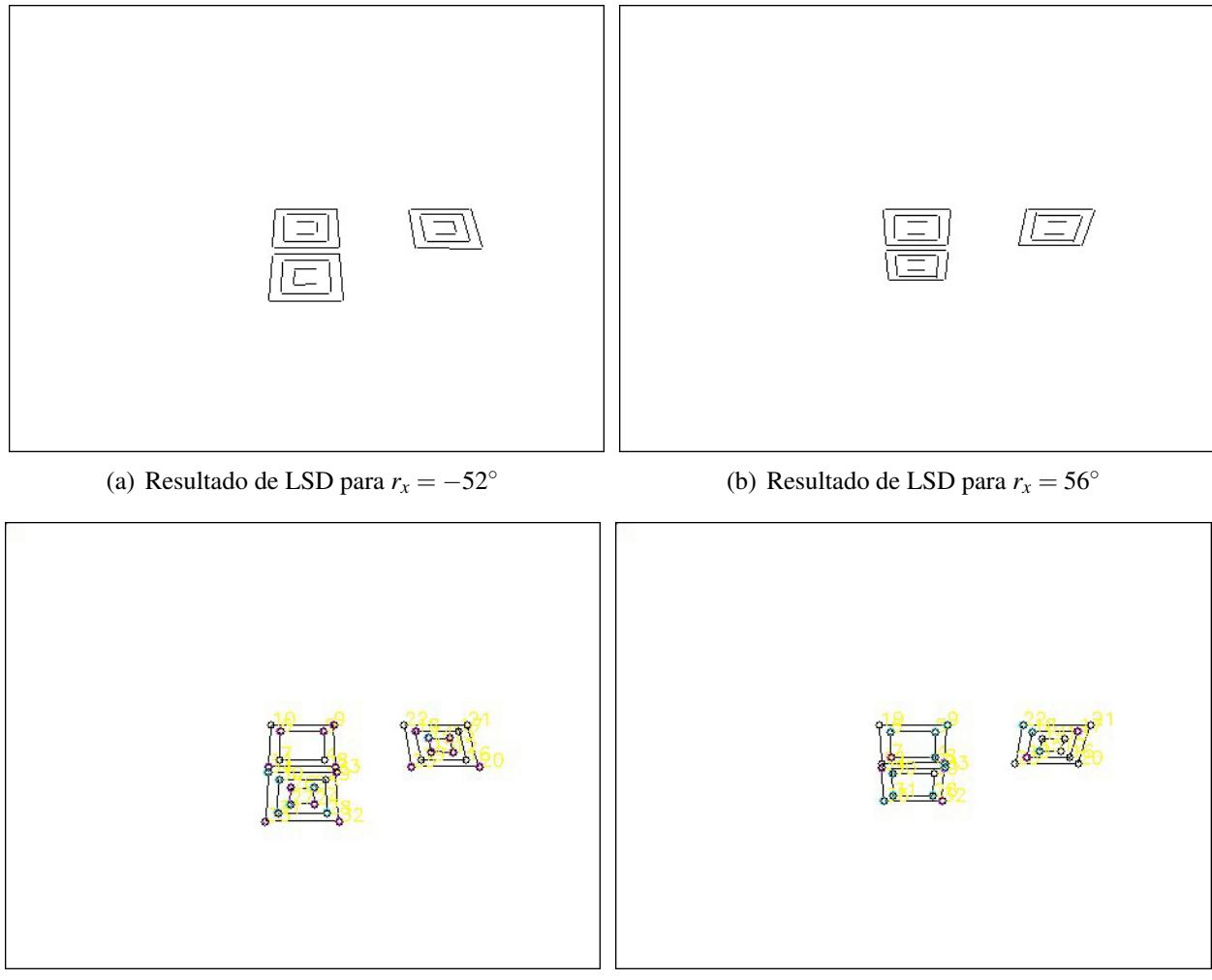


Figura 6.15: Límites para la rotación máxima y mínima sobre el eje x .

6.6.4. Límite en rotación: Eje y

Análogamente con la rotación sobre el eje x para las pruebas del límite de rotación sobre el eje y del marcador se generó un juego de imágenes (*Caso 4*) en las cuales el marcador se ubica a una distancia fija de $z = 1000mm$ con el centro del mismo coincidente con el centro óptico de la cámara y por lo tanto en el centro de la imagen. Sobre esta translación se varía la rotación en el eje y de a 2° desde $r_y = -60^\circ$ hasta $r_y = 60^\circ$.

Se puede ver en las Figuras 6.16(a) y 6.16(b) los casos de límite negativos y positivos respectivamente en los cuales el LSD falla. Al igual que el caso anterior, debido a la asimetría del marcador limitan primero las rotaciones negativas. Por otro lado en las Figuras 6.16(c) y 6.16(d) se observan los casos de límite negativos y positivos respectivamente inmediatamente anteriores a la falla del filtrado de segmentos. Este caso es distinto al anterior en el sentido que el filtrado se segmentos es quien limita la aplicación para los valores límite y en particular LSD no limita para ningún caso positivo de los utilizados.

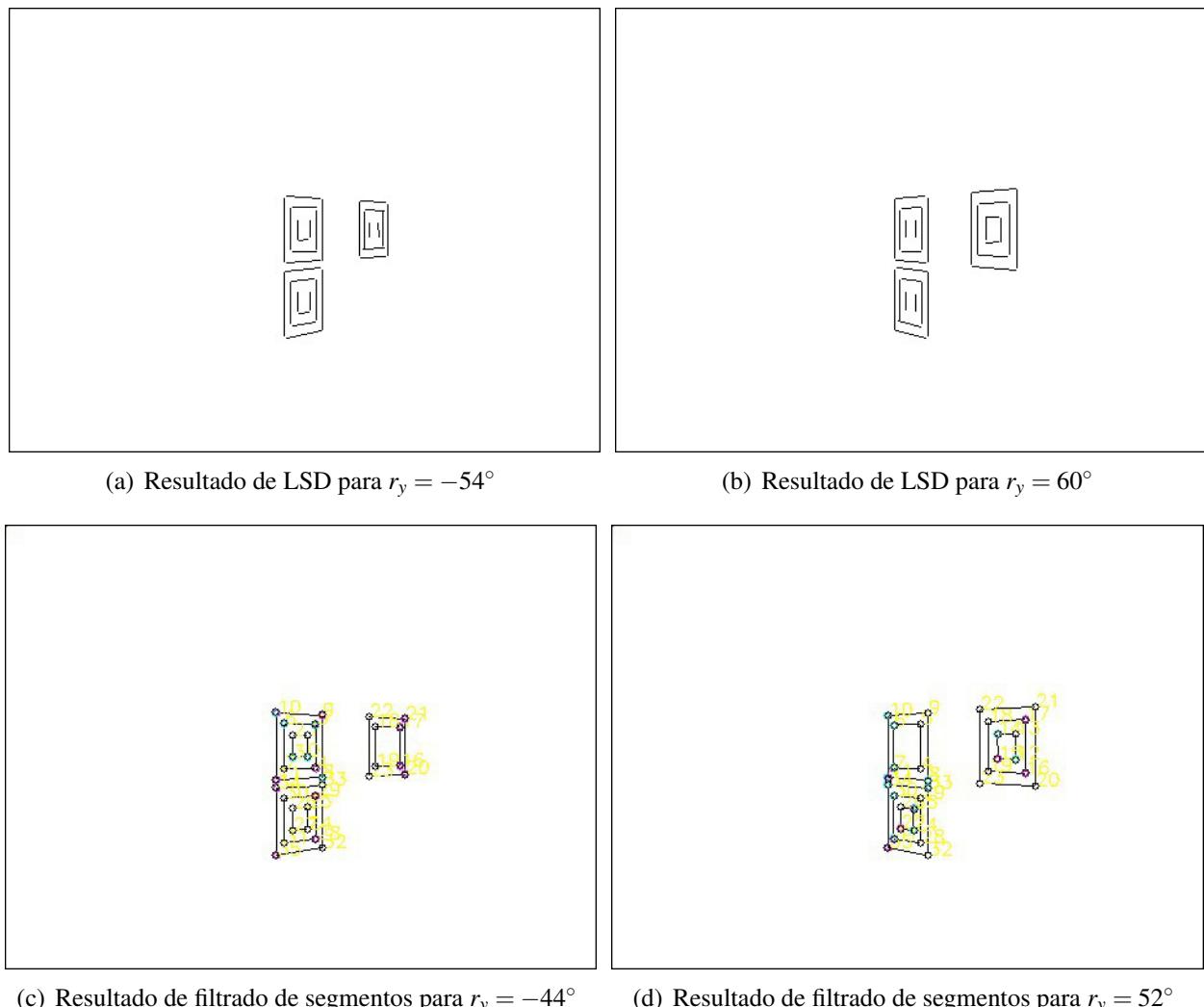


Figura 6.16: Límites para la rotación máxima y mínima sobre el eje y .

Las pruebas para los límites se resumen en la Tabla 6.1.

	Límite inferior	Límite superior	Limita
Profundidad z	—	1575mm	LSD
Rotación en x	-50°	54°	LSD
Rotación en y	-44°	52°	Filtrado

Tabla 6.1: Resumen de límites impuestos por los algoritmos de filtrado de segmentos y LSD para imágenes sintéticas.

6.7. Resumen

En este capítulo se comentaron algunos sistemas de Realidad Aumentada basados en marcadores planos como ARToolKit y ARTag. Se desarrolló el diseño del Marcador QR utilizado para el proyecto y se definieron juegos de parámetros que permiten flexibilidad en la aplicación de los mismos. Se desarrollaron los algoritmos para detección de los marcadores diseñados basados en un esquema de, en primer lugar, filtrado y agrupamiento de segmentos y en segundo lugar determinación de correspondencias de sus esquinas. Se vió que algunos de los parámetros de diseño del marcador pueden ser modificados sin necesidad de modificar los algoritmos desarrollados. Finalmente se obtuvieron resultados de benchmark para los algoritmos de LSD y filtrado de segmentos mediante el uso de imágenes sintéticas generadas con las herramientas de Benchmark. Se establecieron límites *pseudo-teóricos* para la profundidad del marcador, las rotaciones respecto al eje x y respecto al eje y . Es importante destacar que estos límites son cotas raramente alcanzables por la aplicación final ya que se utilizaron para eso imágenes sintéticas sin ningún tipo de ruido, cambios de iluminación ni distorsión de cámara.

CAPÍTULO 7

LSD: “Line Segment Detection”

7.1. Introducción

LSD es un algoritmo de detección de segmentos publicado recientemente [17]. Es temporalmente lineal, tiene precisión inferior a un píxel y no requiere de un ajuste previo de parámetros, como casi todos los demás algoritmos de idéntica función. Puede ser considerado el estado del arte en cuanto a detección de segmentos en imágenes digitales. Como cualquier otro algoritmo de detección de segmentos, LSD basa su estudio en la búsqueda de contornos angostos dentro de la imagen. Estos son regiones en donde el nivel de brillo de la imagen cambia notoriamente entre píxeles vecinos, lo cual puede ser detectado mediante el módulo del gradiente de la misma.

Se genera en primer lugar, un campo de orientaciones asociadas a cada uno de los píxeles denominado por los autores *level-line orientation field*. Dicho campo se obtiene de calcular las orientaciones ortogonales a los ángulos asociados al gradiente de la imagen. Luego, LSD puede verse como una composición de tres pasos:

- (1) División de la imagen en las llamadas *line-support regions*, que son grupos conexos de píxeles con idéntica orientación, a menos de cierta tolerancia.
- (2) Búsqueda del segmento que mejor aproxime cada *line-support region*: aproximación de las regiones por rectángulos.
- (3) Validación o no de cada segmento detectado en el punto anterior.

Los puntos (1) y (2) están basados en el algoritmo de detección de segmentos de Burns, Hanson y Riseman [5], y el punto (3) es una adaptación del método *a contrario* de Desolneux, Moisan y Morel [12].

En el presente capítulo se estudiará a fondo el algoritmo y se presentarán y justificarán algunos cambios que hubo que hacerle a la implementación del mismo con la que se contaba, versión 1.6 descargada de [42], para mejorar su desempeño en el tiempo real.

7.2. *Line-support regions*

El primer paso de LSD es el dividir la imagen en regiones conexas de píxeles con igual orientación, a menos de cierta tolerancia τ , llamadas *line-support regions*. El método para realizar tal división es del tipo “*region growing*”; cada región comienza por un píxel y cierto ángulo asociado,

que en este caso coincide con el de este primer píxel. Luego, se testeán sus ocho vecinos y los que cuenten con un ángulo similar al de la región son incluídos en la misma. En cada iteración el ángulo asociado a la región es calculado como el promedio de las orientaciones de cada píxel dentro de la *line-support region*; la iteración termina cuando ya no se pueden agregar más píxeles a la misma.

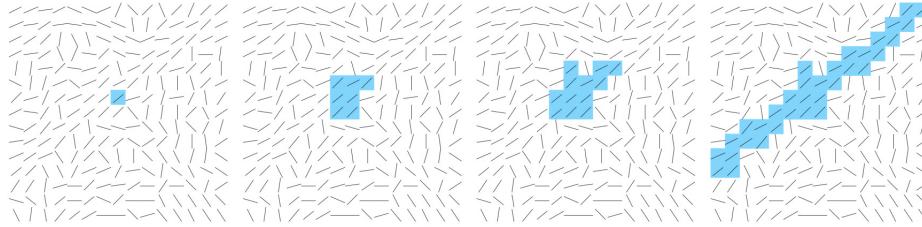


Figura 7.1: Proceso de crecimiento de una región. El ángulo asociado cada píxel de la imagen está representado por los pequeños segmentos y los píxeles coloreados representan la formación de la región. Tomada de [17].

Los píxeles agregados a una región son marcados de manera que no vuelvan a ser testeados. Para mejorar el desempeño del algoritmo, las regiones comienzan a evaluarse por los píxeles con gradientes de mayor amplitud ya que estos representan mejor los bordes.

Existen algunos casos puntuales en los que el proceso de búsqueda de *line-support regions* puede arrojar errores. Por ejemplo, cuando se tienen dos segmentos que se juntan y que son colineales a no ser por la tolerancia τ descripta anteriormente, se detectarán ambos segmentos como uno solo; ver Figura 7.2. Este potencial problema es heredado del algoritmo de Burns, Hanson y Riseman.

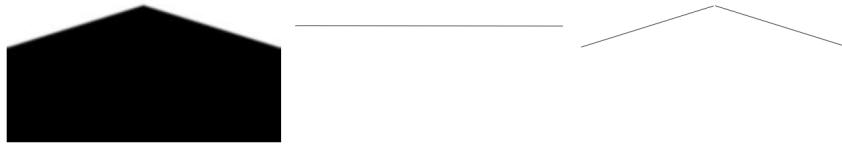


Figura 7.2: Potencial problema heredado del algoritmo de Burns, Hanson y Riseman. Izq.: Imagen original. Ctro.: Segmento detectado. Der.: Segmentos que deberían haberse detectado. Tomada de [17].

Sin embargo, LSD plantea un método para solucionar este tipo de problemas. Durante el proceso de crecimiento de las regiones, también se realiza la aproximación rectangular a dicha región (paso (2) de los tres definidos anteriormente); y si menos de cierto porcentaje umbral de los píxeles dentro del rectángulo corresponden a la *line-support region*, lo que se tiene no es un segmento. Se detiene entonces el crecimiento de la región.

7.3. Aproximación de las regiones por rectángulos

Cada *line-support region* debe ser asociada a un segmento. Cada segmento será determinado por su centro, su dirección, su anchura y su longitud. A diferencia de lo que pudiese resultar intuitivo, la dirección asociada al segmento no se corresponde con la asociada a la región (el promedio de las direcciones de cada uno de los píxeles). Sin embargo, se elige el centro del segmento como el centro de masa de la región y su dirección como el eje de inercia principal de la misma; la magnitud del gradiente asociado a cada píxel hace las veces de masa. La idea detrás de este método es que

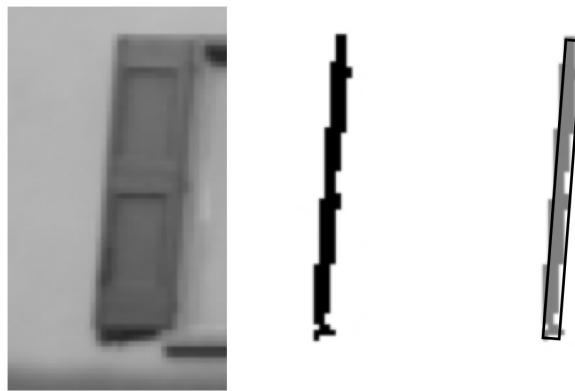


Figura 7.3: Búsqueda del segmento que mejor aproxime cada *line-support region*: aproximación de una región por un rectángulo. Izq.: Imagen original. Ctro.: Una de las regiones computadas. Der.: Aproximación rectangular que cubre el 99 % de la masa de la región. Tomada de [17].

los píxeles con un gradiente mayor en módulo, tienen una mayor probabilidad de corresponder a un borde. La anchura y la longitud del segmento son elegidos de manera de cubrir el 99 % de la masa de la región.

7.4. Validación de segmentos

La validación de los segmentos previamente detectados se plantea como un método de test de hipótesis. Se utiliza un modelo *a contrario*. El término *a contrario* viene del latín y significa “al revés” o “de forma opuesta”. En procesamiento de imágenes, el principio para la detección *a contrario* define, en primer lugar, un modelo llamado “*a priori*” para el caso genérico en el que no haya nada que detectar. Entonces la detección de un evento en particular sólo se dará cuando la cantidad de ocurrencias de dicho evento en el modelo *a priori* sea lo suficientemente baja. Nótese la aparición de cierto valor umbral a ajustar.

Para el caso de LSD, dada una imagen de ruido blanco y Gaussiano, se sabe que cualquier tipo de estructura detectada sobre la misma será casual. En rigor, se sabe que para cualquier imagen de este tipo, su *level-line orientation field* toma, para cada píxel, valores independientes y uniformemente distribuidos entre $[0, 2\pi]$. Dado entonces un segmento en la imagen analizada, se estudia la probabilidad de que dicha detección se dé en la imagen de ruido, y si ésta es lo suficientemente baja, el segmento se considerará válido, de lo contrario se considerará que se está bajo la hipótesis H_0 : un conjunto aleatorio de píxeles que casualmente se alinearon de manera de detectar un segmento.

Para estudiar la probabilidad de ocurrencia de una cierta detección en la imagen de ruido, se deben tomar en cuenta todos los rectángulos potenciales dentro de la misma. Dada una imagen $N \times N$, habrán N^4 orientaciones posibles para los segmentos, N^2 puntos de inicio y N^2 puntos de fin. Si se consideran N posibles valores para la anchura de los rectángulos, se obtienen N^5 posibles segmentos. Por su parte, dado cierto rectángulo r , detectado en la imagen x , se denota $k(r, x)$ a la cantidad de píxeles alineados dentro del mismo. Se define además un valor llamado *Number of False Alarms* (NFA) que está fuertemente relacionado con la probabilidad de detectar al rectángulo en cuestión en la imagen de ruido X :

$$NFA(r, x) = N^5 \cdot P_{H_0}[k(r, X) \geq k(r, x)]$$

véase que el valor se logra al multiplicar la probabilidad de que un segmento de la imagen de ruido, de tamaño igual a r , tenga un número mayor o igual de píxeles alineados que éste, por la cantidad potencial de segmentos N^5 . Cuanto menor sea el número NFA, más significativo será el segmento detectado r ; pues tendrá una probabilidad de aparición menor en una imagen sin estructuras. De esta manera, se descartará H_0 , o lo que es lo mismo, se aceptará el segmento detectado como válido, si y sólo si:

$$NFA(r) \leq \varepsilon$$

donde empíricamente $\varepsilon = 1$ para todos los casos.

Si se toma en cuenta que cada píxel de la imagen ruidosa toma un valor independiente de los demás, se concluye que también lo harán su gradiente y su *level-line orientation field*. De esta manera, dada una orientación aleatoria cualquiera, la probabilidad de que uno de los píxeles de la imagen cuente con dicha orientación, a menos de la ya mencionada tolerancia τ , será:

$$p = \frac{\tau}{\pi}$$

además, se puede modelar la probabilidad de que cierto rectángulo en la imagen ruidosa, con cualquier orientación, formado por $n(r)$ píxeles, cuente con al menos $k(r)$ de ellos alineados, como una distribución binomial:

$$P_{H_0}[k(r, X) \geq k(r, x)] = B(n(r), k(r), p).$$

Finalmente, el valor *Number of False Alarms* será calculado para cada segmento detectado en la imagen analizada de la siguiente manera:

$$NFA(r, x) = N^5 \cdot B(n(r), k(r), p);$$

si dicho valor es menor o igual a $\varepsilon = 1$, el segmento se tomará como válido; de lo contrario se descartará.

7.5. Refinamiento de los candidatos

Por lo que se vió hasta el momento, la mejor aproximación rectangular a una *line-support region* es la que obtenga un valor NFA menor. Para los segmentos que no son validados, se prueban algunas variaciones a la aproximación original con el objetivo de disminuir su valor NFA y así entonces validarlos. Esta claro que este paso no es significativo para segmentos largos y bien definidos, ya que estos serán validados en la primera inspección; sin embargo, ayuda a detectar segmentos más pequeños y algo ruidosos.

Lo que se hace es probar distintos valores para la anchura del segmento y para sus posiciones laterales, ya que estas son los parámetros peor estimados en la aproximación rectangular, pero tienen un efecto muy grande a la hora de validar los segmentos. Es que un error de un píxel en el ancho de un segmento, puede agregar una gran cantidad de píxeles no alineados a este (tantos como el largo del segmento), y esto se ve reflejado en un valor mayor de NFA y puede llevar a una no detección.

Otro método para el refinamiento de los candidatos es la disminución de la tolerancia τ . Si los puntos dentro del rectángulo efectivamente corresponden a un segmento, aunque la tolerancia disminuya, se computará prácticamente misma cantidad de segmentos alineados; y con una probabilidad menor de ocurrencia ($\frac{\tau}{\pi}$), el valor NFA obtenido será menor. Los nuevos valores testeados de tolerancia son: $\frac{\tau}{2}, \frac{\tau}{4}, \frac{\tau}{8}, \frac{\tau}{16}$ y $\frac{\tau}{32}$. El nuevo valor NFA asociado al segmento será el menor de todos

los calculados.

7.6. Optimización del algoritmo para tiempo real

Que un algoritmo de procesamiento de imágenes digitales sea temporalmente lineal significa que su tiempo de ejecución crece linealmente con el tamaño de la imagen en cuestión. Estos algoritmos son los mejores para el procesamiento de imágenes en tiempo real. Si bien, como se explicó con anterioridad, los autores de LSD afirman que este es temporalmente lineal; la implementación con la que se cuenta no fue pensada para ser ejecutada en tiempo real. Así entonces, para poder aumentar la tasa de cuadros por segundo total de la aplicación, hubo que realizar algunos cambios mínimos en el código, siempre buscando que estos alteren lo menos posible el desempeño del algoritmo. Se trabajó sobre ciertos bloques en particular.

7.6.1. Filtro Gaussiano

Antes de procesar la imagen con el algoritmo tal y como se vió en secciones anteriores, la misma es filtrada con un filtro Gaussiano. Se busca en primer lugar, disminuir el tamaño de la imagen de entrada con el objetivo de disminuir el volumen de información procesada. Además, al difuminar la imagen, se conservan únicamente los bordes más pronunciados. Para este proyecto en particular, se escogió la escala del submuestreo fija en 0,5, un poco más adelante en la corriente sección se explicará por qué.

Como la función Gaussiana 2D es separable, el filtrado de la imagen se hace en dos pasos, primero a lo ancho y luego a lo largo. Se utiliza el núcleo Gaussiano de una dimensión normalizado de la Figura 7.4.

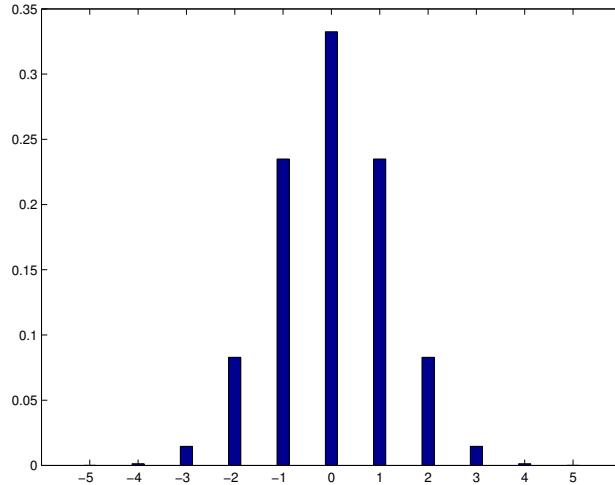


Figura 7.4: Núcleo Gaussiano utilizado por LSD. $\sigma = 1,2$.

De esta manera, se crea una imagen auxiliar vacía y escalada en x pero no en y , y se recorre asignándole a cada píxel en x su valor correspondiente, obtenido del promedio del píxel $\frac{x}{escala}$ en la

imagen original y sus vecinos, todos ponderados por el núcleo Gaussiano centrado en $\frac{x}{escala}$. Luego se crea otra imagen, pero esta vez escalada tanto en x como en y , y se recorre asignándole a cada píxel en y su valor correspondiente, obtenido del promedio del píxel $\frac{y}{escala}$ en la imagen auxiliar y sus vecinos, todos ponderados por el núcleo Gaussiano centrado en $\frac{y}{escala}$. En la Figura 7.5 se muestra la relación entre las imágenes.

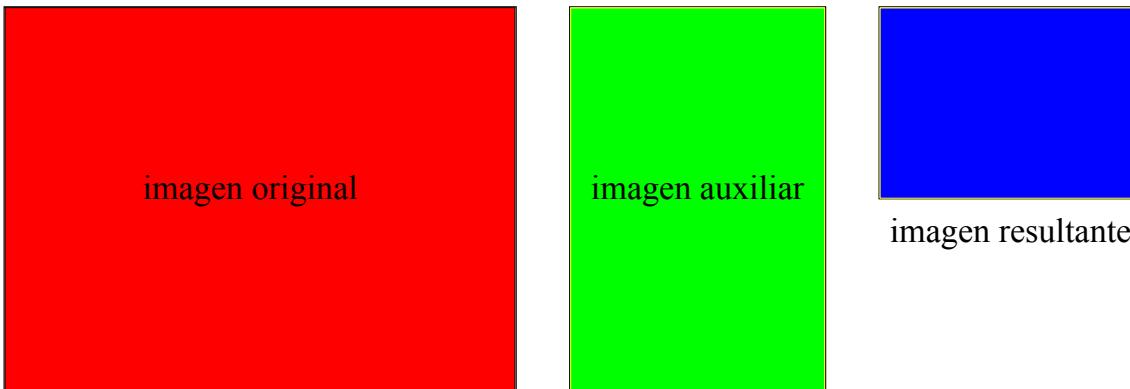


Figura 7.5: Relación entre las imágenes en consideradas en el filtro Gaussiano. Escala: 0,5.

Véase que cuando en el submuestreo $\frac{1}{escala}$ no es un entero, el centro del núcleo Gaussiano no siempre debe caer justo sobre un píxel en particular en la imagen original, sino que debe hacerlo entre dos de ellos. Lo que se hace entonces es mover $\pm 0,5$ píxeles al centro del núcleo en cada asignación de los píxeles en las imágenes escaladas; de manera de que la ponderación en el promediado de los píxeles de la imagen original (y luego la auxiliar) sea la debida. Aunque esta operación le agrega precisión al algoritmo, también le agrega un gran costo computacional, ya que lo que se hace es crear un nuevo núcleo Gaussiano en cada caso. En particular, para una imagen escalada de 240×180 píxeles (dimensiones efectivamente utilizadas en este proyecto), debido al filtrado en dos pasos, el núcleo Gaussiano se crea y se destruye $86400 + 43200 = 129600$ veces.

Se decidió redondear la escala de submuestreo en 0,5, ya que los valores utilizados empíricamente hasta el momento rondaban este valor, y se concluyó que para dicha escala, el núcleo Gaussiano debía permanecer constante, siempre centrado en su sexta muestra (ver Figura 7.4); por lo que se lo quitó de la iteración y actualmente se crea una sola vez al ingresar la imagen al filtro. Es importante destacar que esta optimización es transparente para el algoritmo si y sólo si $\frac{1}{escala} = n$, donde n es un entero.

Otro cambio que se le realizó al filtrado Gaussiano fue la supresión de las condiciones de borde. Cuando se filtra cualquier imagen con un filtro con memoria, algo importante a tener en cuenta son las condiciones de borde, ya que para el procesamiento de los extremos de la imagen, estos filtros requieren de píxeles que están fuera de sus límites. Algunas de las soluciones a este problema son periodizar la imagen, simetrizarla o hasta asumir el valor 0 para los píxeles que estén fuera de esta. La opción escogida por LSD es la simetrización. Demás está decir que este proceso requiere de cierto costo computacional extra, por lo que se lo decidió suprimir. Este costo computacional extra se debe a que el algoritmo encargado del filtrado debe estar en cada bucle preguntándose si es necesario contar con el valor de algún píxel fuera de los límites de la imagen, y en ese caso asignarle a dicho píxel el valor de su correspondiente simétrico, con eje de simetría el borde de la imagen más próximo. Actualmente, la imagen escalada no es computada en sus píxeles terminales; estos son 3 al inicio de cada línea o columna y 2 al final de cada una de ellas, irrelevantes en el tamaño total de

la imagen y también, por ser un filtro FIR (“Finite Impulse Response”), en el resultado del filtrado en general. Ver Figura 7.6.

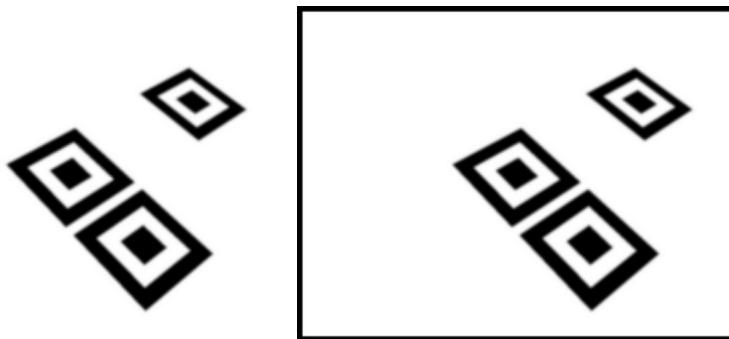


Figura 7.6: Imagen artificial del marcador trasladado y rotado, filtrada con el filtro Gaussiano. Izq.: Filtro Original. Der.: Filtro sin las condiciones de borde.

7.6.2. *Level-line angles*

La función *ll_angles* es quien calcula el gradiente de la imagen previamente filtrada para luego obtener el llamado *level-line orientation field*, en donde más tarde se hallarán los candidatos a segmentos. Lo que se hizo en esta función fué limitar el cálculo del gradiente a los píxeles donde la imagen escalada haya sido efectivamente computada. De esta manera se ahorra procesamiento innecesario, además de no detectarse las líneas negras en el contorno de la imagen (Figura 7.6), que de no ser así se detectarían.

7.6.3. Refinamiento y mejora de los candidatos

Se vió en la explicación del algoritmo el problema de que si hubiesen dos o más segmentos que formen entre ellos ángulos menores o iguales al valor umbral τ , estos serían detectados como uno único, heredado del algoritmo de Burns, Hanson y Riseman; y se explicó cómo, mediante un refinamiento de los segmentos, LSD soluciona este problema. Se vió además que luego de la validación o no de los segmentos previamente detectados, se realiza una mejora de los mismos para intentar que los no validados a causa de una mala estimación rectangular, sí puedan serlo.

Como en este proyecto en particular se trabaja con marcadores formados por cuadrados concéntricos, de bordes bien marcados y que forman ángulos rectos entre sí, el refinamiento y la mejora de los candidatos no es algo que afecte la detección de los mismos; y por consiguiente se suprimieron ambos bloques. Como era de esperarse, dichas supresiones no significaron un cambio considerable en el algoritmo desde el punto de vista del desempeño ni del tiempo de ejecución cuando tan sólo se enfoca al marcador. Sin embargo, si las imágenes capturadas cuentan con muchos segmentos (imágenes naturales genéricas), se ve que la detección de los mismos es menos precisa que la del algoritmo original, pero que los tiempos de procesamiento son notablemente inferiores.

7.6.4. Algoritmo en precisión simple

Originalmente, LSD fue implementado en precisión doble o *double* (en general 64 bits por valor). Sin embargo, el *iPad 2* (dispositivo para el cual se optimizó el algoritmo), cuenta con un

procesador *ARM Cortex-A9*, cuyo bus de datos es de 32 bits. Se decidió entonces probar cambiar al algoritmo a precisión simple o *float* (32 bits por valor) y los resultados fueron realmente buenos. No sólo el algoritmo bajó su tiempo de ejecución, sino que además no existen cambios notorios en el desempeño del mismo.

7.6.5. Resultados

7.6.5.1. Filtro Gaussiano



Figura 7.7: Imagen sintética del marcador trasladado y rotado.

Se analizaron los tiempos promedio para la ejecución del filtro Gaussiano original y del optimizado, ambos con precisión doble y simple. La imagen de prueba fue la de la Figura 7.7; sépase que por cómo es el algoritmo, el contenido de la imagen es independiente del tiempo de procesamiento en cualquiera de los casos, por lo que basta con una única imagen de prueba para sacar conclusiones respecto del desempeño del mismo. Los valores relevantes del experimento se muestran en las Tablas 7.1 y 7.2:

- **Precisión doble (*double*)**

	Filtro original	Filtro optimizado
Tamaño de imagen de entrada	480×360	480×360
Escala	0,5	0,5
Tamaño de imagen de salida	240×180	240×180
Segmentos detectados	36	36
Tiempo medio de procesamiento	36ms	29ms

Tabla 7.1: Comparación entre los tiempos de ejecución del filtro Gaussiano optimizado y el original. Ambos con precisión doble.

- **Precisión simple (*float*)**

7.6.5.2. Line Segment Detection

Se analizaron los tiempos conjuntos para la ejecución de LSD más el filtro Gaussiano, los originales y los optimizados, ambos con precisión doble y simple. Se probaron ambos bloques juntos ya que el algoritmo original está implementado con éstos integrados. Las imágenes de prueba fueron la del marcador sintético (Figura 7.7) y *zebras.png* mostrada en la Figura 7.8. Los valores relevantes de los experimentos se muestran en las Tablas 7.3, 7.4, 7.5 y 7.6.

- **Precisión doble (*double*)**

	Filtro original	Filtro optimizado
Tamaño de imagen de entrada	480×360	480×360
Escala	0,5	0,5
Tamaño de imagen de salida	240×180	240×180
Segmentos detectados	36	36
Tiempo medio de procesamiento	28ms	20ms

Tabla 7.2: Comparación entre los tiempos de ejecución del filtro Gaussiano optimizado y el original. Ambos con precisión simple.



Figura 7.8: Imagen *zebras.png*.

	Algoritmo original	Algoritmo optimizado
Imagen utilizada	marcador sintético	marcador sintético
Tamaño de imagen de entrada	480×360	480×360
Escala	0,5	0,5
Tamaño de imagen de salida	240×180	240×180
Segmentos detectados	36	36
Tiempo medio de procesamiento	55,4ms	48ms

Tabla 7.3: Comparación entre los tiempos de ejecución del filtro Gaussiano más LSD optimizados y los originales, para la imagen 7.7. En todos los casos con precisión doble.

	Algoritmo original	Algoritmo optimizado
Imagen utilizada	<i>zebras.png</i>	<i>zebras.png</i>
Tamaño de imagen de entrada	480×360	480×360
Escala	0,5	0,5
Tamaño de imagen de salida	240×180	240×180
Segmentos detectados	251	179
Tiempo medio de procesamiento	179,7ms	94,4ms

Tabla 7.4: Comparación entre los tiempos de ejecución del filtro Gaussiano más LSD optimizados y los originales, para la imagen 7.8. En todos los casos con precisión doble.

- **Precisión simple (*float*)**

	Algoritmo original	Algoritmo optimizado
Imagen utilizada	marcador sintético	marcador sintético
Tamaño de imagen de entrada	480×360	480×360
Escala	0,5	0,5
Tamaño de imagen de salida	240×180	240×180
Segmentos detectados	36	36
Tiempo medio de procesamiento	47,8ms	38,8ms

Tabla 7.5: Comparación entre los tiempos de ejecución del filtro Gaussiano más LSD optimizados y los originales, para la imagen 7.7. En todos los casos con precisión simple.

	Algoritmo original	Algoritmo optimizado
Imagen utilizada	<i>zebras.png</i>	<i>zebras.png</i>
Tamaño de imagen de entrada	480×360	480×360
Escala	0,5	0,5
Tamaño de imagen de salida	240×180	240×180
Segmentos detectados	252	182
Tiempo medio de procesamiento	189,8ms	90,8ms

Tabla 7.6: Comparación entre los tiempos de ejecución del filtro Gaussiano más LSD optimizados y los originales, para la imagen 7.8. En todos los casos con precisión simple.

7.7. Resumen

En el presente capítulo se vió en detalle LSD, un algoritmo de detección de segmentos en imágenes que puede ser considerado el estado del arte en su rubro. Luego se afirmó que, si bien sus autores sostienen que el algoritmo es temporalmente lineal, lo que haría viable su uso en tiempo real; la implementación disponible del mismo, realizada por los propios autores, no está optimizada para tal caso y por eso hubo que hacerle algunos pequeños cambios al código. Dichos cambios lograron mejoras importantes en cuanto al tiempo de procesamiento, manteniendo prácticamente invariado su desempeño.

Los resultados expuestos en las Tablas 7.1 y 7.2 pueden interpretarse como que la decisión de cambiar la precisión de la implementación del algoritmo de *double* a *float* fue una idea acertada. Por su parte, la lectura de las Tablas 7.3, 7.4, 7.5 y 7.6 sugiere que las mejoras en los tiempos de LSD optimizado para el tiempo real, respecto del original, son del orden de:

30 % para imágenes con pocos segmentos;
50 % para imágenes naturales genéricas, con muchos segmentos.

Cabe aclarar sin embargo, que si bien los resultados cualitativos¹ sugieren resultados similares, los resultados cuantitativos fueron logrados con tan sólo las dos imágenes presentadas anteriormente.

Finalmente, en las Figuras 7.9 y 7.10 se muestran los resultados luego de haber procesado a las Figuras 7.7 y 7.8 con LSD, primero con la implementación original y luego con la optimizada. Se puede ver, en primer lugar, la gran diferencia que existe entre la cantidad de segmentos detectados en una y otra imagen. Además, se concluye que el desempeño de ambas implementaciones es muy

¹Se entiende por resultados cualitativos a la ejecución de LSD en tiempo real en el *iPad 2*, imposibles de ilustrar en el presente texto. Ver Sección 12.2.

similar para el caso de la imagen *zebras.png* e idéntico para el caso del marcador.



Figura 7.9: Resultado de procesar a la Figura 7.7 con LSD. Izq.: Implementación original. Der.: Implementación optimizada.

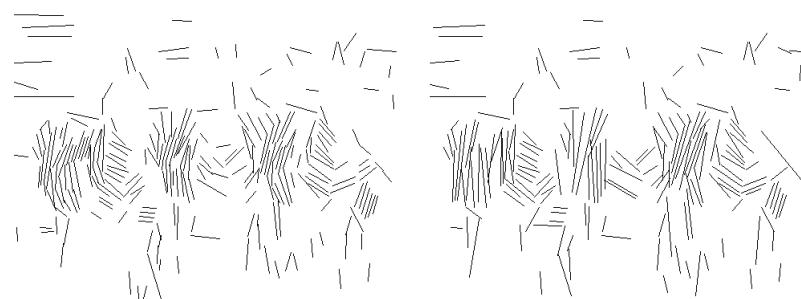


Figura 7.10: Resultado de procesar a la Figura 7.8 con LSD. Izq.: Implementación original. Der.: Implementación optimizada.

CAPÍTULO 8

Modelo de cámara y estimación de pose monocular

8.1. Introducción

Se le llama “estimación de pose” al proceso mediante el cual se calcula en qué punto del mundo y con qué orientación se encuentra determinado objeto respecto de un eje de coordenadas previamente definido al que se lo llama “ejes del mundo”. Las aplicaciones de realidad aumentada requieren de un modelado preciso del entorno respecto de estos ejes, para poder ubicar correctamente los agregados virtuales dentro del modelo y luego dibujarlos de forma coherente en la imagen vista por el usuario. El objeto cuya estimación de pose resulta de mayor importancia es la cámara, ya que por ésta es por donde se mira la escena y es respecto de ésta que los objetos virtuales deben ubicarse de manera consistente. Una forma de estimar la pose de la cámara es mediante el uso de las imágenes capturadas por ella misma. Asimismo, el concepto “monocular” hace referencia al uso de una sola cámara, ya que es posible trabajar con más de una.

Para poder obtener información relevante a partir de las imágenes tomadas por una cámara, resulta necesario contar con un modelo preciso de su arquitectura interna ya que no todas las cámaras son iguales. El modelo más comúnmente utilizado es el denominado *pin-hole*. Para modelar completamente la arquitectura de la cámara se deben estimar ciertos “parámetros intrínsecos” a ésta, y eso se logra luego de realizados ciertos experimentos. A la estimación de estos parámetros se le denomina “calibración de la cámara”.

En este capítulo se verá en detalle el modelo de cámara *pin-hole*, tomando en cuenta la distorsión introducida por las lentes. Más adelante, se mencionarán distintos métodos para la calibración de una cámara y se verá en detalle en particular, el método de Zhang.

También se presentan los algoritmos más utilizados para el problema de estimación de pose, entre ellos el DLT(Direct Linear Transform), PnP(Perspective n Point) y RANSAC(RANdom SAmple Consensus).

Finalmente se presentan las diferentes maneras que hay para representar los ángulos de la pose y los problemas que se presentan cuando se trabaja con estas representaciones.

8.2. Modelo de cámara *pin-hole*

El desarrollo teórico de esta sección esta fuertemente basado en [30].

8.2.1. Fundamentos y definiciones

Este modelo consiste en un centro óptico O , en donde convergen todos los rayos de la proyección y un plano imagen en el cual la imagen es proyectada. Se define *distancia focal* (f) como la distancia entre el centro óptico O y la intersección del eje óptico con el plano imagen (punto C). Ver Figura 8.1.

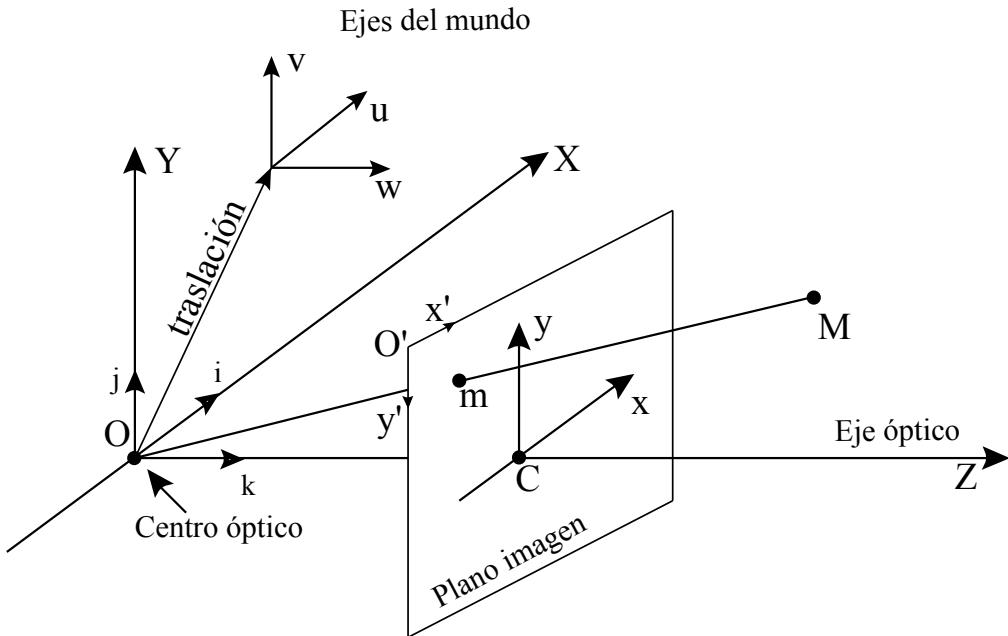


Figura 8.1: Modelo de cámara pin-hole.

Se llama proceso de proyección al proceso en el que se asocia al punto \mathbf{M} del mundo, un punto \mathbf{m} en la imagen. Para modelar el mismo es necesario referirse a varias transformaciones y varios ejes de coordenadas.

- *Coordenadas del mundo:* son las coordenadas que describen la posición 3D del punto \mathbf{M} respecto de los ejes del mundo (u, v, w) . La elección de los ejes del mundo es arbitraria.
- *Coordenadas de la cámara:* son las coordenadas que describen la posición del punto \mathbf{M} respecto de los ejes de la cámara (X, Y, Z) . i, j y k son los versores de este eje de coordenadas.
- *Coordenadas de la imagen:* son las coordenadas que describen la posición del punto 2D, \mathbf{m} respecto del centro del plano imagen, C . Los ejes de este sistema de coordenadas son (x, y) .
- *Coordenadas normalizadas de la imagen:* son las coordenadas que describen la posición del punto 2D, \mathbf{m} , respecto del eje de coordenadas (x', y') situado en la esquina superior izquierda del plano imagen.

La transformación que lleva al punto \mathbf{M} , expresado respecto de los ejes del mundo, al punto \mathbf{m} , expresado respecto del sistema de coordenadas normalizadas de la imagen, se puede ver como la composición de dos transformaciones menores. La primera, es la que realiza la proyección que transforma a un punto definido respecto del sistema de coordenadas de la cámara (X, Y, Z) en otro punto sobre el plano imagen expresado respecto del sistema de coordenadas normalizadas de la imagen (x', y') . Véase que una vez calculada esta transformación, es una constante característica de cada cámara. Al conjunto de valores que definen esta transformación, se le llama “parámetros intrínsecos” de la cámara. La segunda, es la transformación que lleva de expresar un punto respecto

de los ejes del mundo (u, v, w), a ser expresado según los ejes de la cámara (X, Y, Z). Esta última transformación varía conforme se mueve la cámara (respecto de los ejes del mundo) y el conjunto de valores que la definen es denominado “parámetros extrínsecos” de la cámara. Del cálculo de estos parámetros es que se obtiene la estimación de la pose de la cámara.

De lo anterior se concluye rápidamente que si se le llama H a la matriz proyección total, tal que:

$$m = H \cdot M,$$

entonces:

$$H = I \cdot E$$

donde I corresponde a la matriz proyección asociada a los parámetros intrínsecos y E corresponde a la matriz asociada a los parámetros extrínsecos. Ambos juegos de parámetros contienen información muy valiosa:

■ **Parámetros extrínsecos:** pose de la cámara.

- Traslación: ubicación del centro óptico de la cámara respecto de los ejes del mundo.
- Rotación: rotación del sistema de coordenadas de la cámara (X, Y, Z), respecto de los ejes del mundo.

■ **Parámetros intrínsecos:** parámetros propios de la cámara. Dependen de su geometría interna y de su óptica.

- Punto principal ($C = [x'_C, y'_C]$): es el punto intersección entre el eje óptico y el plano imagen. Las coordenadas de este punto vienen dadas en píxeles y son expresadas respecto del sistema normalizado de la imagen.
- Factores de conversión píxel-milímetros (d_x, d_y): indican el número de píxeles por milímetro que utiliza la cámara en las direcciones x e y respectivamente.
- Distancia focal (f): distancia entre el centro óptico (O) y el punto principal (C). Su unidad es el milímetro.
- Factor de proporción (s): indica la proporción entre las dimensiones horizontal y vertical de un píxel.

8.2.2. Matriz de proyección

En la sección anterior se vio que es posible hallar una “matriz de proyección” H que dependa tanto de los parámetros intrínsecos de la cámara como de sus parámetros extrínsecos:

$$m = H \cdot M$$

donde M y m son los puntos ya definidos y vienen expresados en “coordenadas homogéneas”. Por más información acerca de este tipo de coordenadas ver [21].

Para determinar la forma de la matriz de proyección se estudia cómo se relacionan las coordenadas de M con las coordenadas de m ; para hallar esta relación se debe analizar cada transformación, entre los sistemas de coordenadas mencionados con anterioridad, por separado.

- **Proyección 3D - 2D:** de las coordenadas homogéneas del punto **M** expresadas en el sistema de coordenadas de la cámara (X_0, Y_0, Z_0, T_0), a las coordenadas homogéneas del punto **m** expresadas en el sistema de coordenadas de la imagen (x_0, y_0, s_0):
Se desprende de la Figura 8.1 y algo de trigonometría la siguiente relación entre las coordenadas en cuestión y la distancia focal (f):

$$\frac{f}{Z_0} = \frac{x_0}{X_0} = \frac{y_0}{Y_0}$$

A partir de la relación anterior:

$$\begin{pmatrix} x_0 \\ y_0 \end{pmatrix} = \frac{f}{Z_0} \begin{pmatrix} X_0 \\ Y_0 \end{pmatrix}$$

Expresado en forma matricial, en coordenadas homogéneas:

$$\begin{pmatrix} x_0 \\ y_0 \\ s_0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} f & 0 & 0 & 0 \\ 0 & f & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X_0 \\ Y_0 \\ Z_0 \\ 1 \end{pmatrix}$$

- **Transformación imagen - imagen:** de las coordenadas homogéneas del punto **m** expresadas respecto del sistema de coordenadas de la imagen (x_0, y_0, s_0), a las coordenadas homogéneas de él mismo pero expresadas respecto del sistema de coordenadas normalizadas de la imagen (x'_0, y'_0, s'_0):

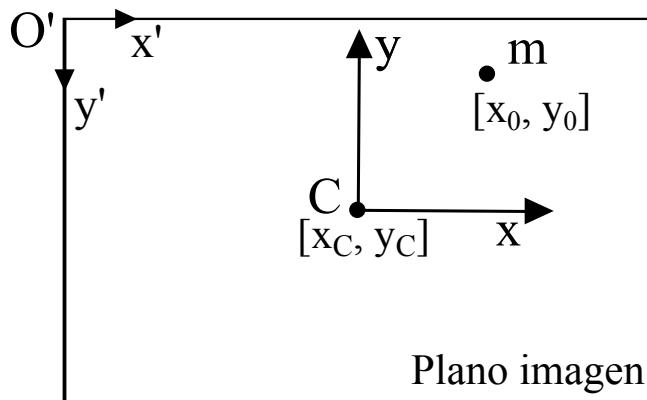


Figura 8.2: Relación entre el sistema de coordenadas de la imagen y el sistema de coordenadas normalizadas de la imagen.

Se les suma, a las coordenadas de **m** respecto del sistema de la imagen, la posición del punto **C** respecto del sistema normalizado de la imagen (x'_C, y'_C). Las coordenadas de **m** dejan de ser expresadas en milímetros para ser expresadas en píxeles. Aparecen los factores de conversión d_x y d_y :

$$\begin{aligned} x'_0 &= d_x \cdot x_0 + x'_C \\ y'_0 &= d_y \cdot y_0 + y'_C \end{aligned}$$

Se obtiene entonces la siguiente relación matricial, en coordenadas homogéneas:

$$\begin{pmatrix} x'_0 \\ y'_0 \\ s'_0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} d_x & 0 & x'_C \\ 0 & d_y & y'_C \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_0 \\ y_0 \\ 1 \end{pmatrix}$$

- **Matriz de parámetros intrínsecos (I):** de las coordenadas homogéneas del punto **M** expresadas en el sistema de coordenadas de la cámara ($X_0, Y_0, Z_0, 1$), a las coordenadas homogéneas del punto **m** expresadas respecto del sistema de coordenadas normalizadas de la imagen (x'_0, y'_0, s'_0):

Se obtiene combinando las dos últimas transformaciones. Nótese que como ya se aclaró, depende únicamente de parámetros propios de la construcción de la cámara:

$$I = \begin{pmatrix} d_x.f & 0 & x'_C & 0 \\ 0 & d_y.f & y'_C & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{pmatrix}$$

Nota: De forma genérica se puede agregar a la matriz de parámetros intrínsecos del modelo *pin-hole* un parámetro s llamado en inglés *skew parameter*, o “parámetro de proporción” en Español. Este parámetro toma valores distintos de cero muy rara vez, pues modela los casos en los que los ejes x e y de los píxeles de la cámara no son perpendiculares entre sí. En casos realistas, $s \neq 0$ cuando por ejemplo se toma una fotografía de una fotografía. La matriz de parámetros intrínsecos, tomando en cuenta este parámetro, tendrá la forma:

$$I = \begin{pmatrix} d_x.f & s & x'_C & 0 \\ 0 & d_y.f & y'_C & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{pmatrix}$$

- **Matriz de parámetros extrínsecos (E):** de las coordenadas homogéneas del punto **M** expresadas respecto del sistema de coordenadas del mundo (U_0, V_0, W_0, P_0), a las coordenadas homogéneas de él mismo pero expresadas respecto del sistema de coordenadas de la cámara (X_0, Y_0, Z_0, T_0):

Se obtiene de estimar la pose de la cámara respecto de los ejes del mundo y es la combinación de, primero una rotación R_{3x3} , y luego una traslación T_{3x1} . Se obtiene entonces la siguiente representación matricial:

$$\begin{pmatrix} X_0 \\ Y_0 \\ Z_0 \\ T_0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} R & T \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} U_0 \\ V_0 \\ W_0 \\ P_0 \end{pmatrix}$$

donde la matriz de parámetros extrínsecos desarrollada toma la forma:

$$E = \begin{pmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & t_x \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & t_y \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & t_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

- **Matriz de proyección (H):** de las coordenadas homogéneas del punto **M** expresadas respecto del sistema de coordenadas del mundo (U_0, V_0, W_0, P_0), a las coordenadas homogéneas del punto **m** expresadas respecto del sistema de coordenadas normalizadas de la imagen (x'_0, y'_0, s'_0):

Es la proyección total y se obtiene combinando las dos transformaciones anteriores:

$$\begin{pmatrix} x'_0 \\ y'_0 \\ s'_0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} d_x.f & 0 & x'_C & 0 \\ 0 & d_y.f & y'_C & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & t_x \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & t_y \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & t_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} U_0 \\ V_0 \\ W_0 \\ P_0 \end{pmatrix}$$

8.3. Distorsión introducida por las lentes

Hasta el momento se asumió que el modelo lineal presentado para la proyección de cualquier punto del mundo en el plano imagen de la cámara es lo suficientemente preciso en todos los casos. Sin embargo, en casos reales, y cuando las lentes de las cámaras no son del todo buenas, la distorsión introducida por estas resulta significativa. Dado el punto \mathbf{M} de coordenadas (X_0, Y_0, Z_0) respecto de los ejes de la cámara, se le llama distorsión a la diferencia entre su proyección ideal en el plano imagen (x_0, y_0) y su proyección real $(\tilde{x}_0, \tilde{y}_0)$. La más común de todas, es la denominada “distorsión radial”, ya que su magnitud depende del radio medido desde el punto principal del plano imagen, hasta las coordenadas del punto en cuestión.

La forma de solucionar el presente problema es realizar una corrección de la distorsión, modelando a la misma de la siguiente manera:

$$\begin{pmatrix} \tilde{x}_0 \\ \tilde{y}_0 \end{pmatrix} = L(r) \cdot \begin{pmatrix} x_0 \\ y_0 \end{pmatrix},$$

donde r es la distancia radial $\sqrt{x_0^2 + y_0^2}$ y $L(r)$ es un factor de distorsión que depende únicamente del radio r . Si se desarrolla la ecuación anterior, y se expresa en píxeles, respecto del sistema de coordenadas normalizadas de la imagen; se obtiene lo siguiente:

$$\begin{aligned} \tilde{x}'_0 &= x'_C + L(r)(x'_0 - x'_C) \\ \tilde{y}'_0 &= y'_C + L(r)(y'_0 - y'_C) \end{aligned}$$

donde $(\tilde{x}'_0, \tilde{y}'_0)$ son las coordenadas reales de la proyección medidas en píxeles, (x'_0, y'_0) son las coordenadas ideales de la proyección medidas también en píxeles y (x'_C, y'_C) son las coordenadas del punto principal. Véase que en este caso $r = \sqrt{(x'_0 - x'_C)^2 + (y'_0 - y'_C)^2}$.

La función $L(r)$ es definida sólo para valores positivos de r y $L(0) = 1$. Una aproximación a la función arbitraria $L(r)$ puede ser una expansión de Taylor: $L(r) = 1 + k_1 r + k_2 r^2 + k_3 r^3 + \dots + k_n r^n + o(n)$. Finalmente, a la hora de calcular los parámetros intrínsecos de una cámara, también deben ser estimados sus coeficientes de distorsión radial $\{k_1, k_2, k_3, k_4, \dots\}$.

8.4. Métodos para la calibración de cámara

Como se vio algunos párrafos atrás, el proceso mediante el cual se calculan los parámetros intrínsecos reales de una cámara es denominado “calibración de cámara”. Existen varios métodos para calibrar una cámara, sin embargo, los tres algoritmos basados en modelos planos más ampliamente utilizados alrededor del mundo [35] son el método de Zhang [34], el método de R.Y. Tsai [32] y el método llamado “Direct Linear Transform” (DLT) [2]. Para calibrar las cámaras utilizadas en este proyecto, se trabajó con una implementación en *Matlab* basada en el método de Zhang ([4]), que afortunadamente dio resultados muy buenos. Por eso se explicará a continuación, de forma breve, cómo funciona este método. Por dudas respecto de cualquier resultado matemático expuesto sin los cálculos intermedios, siempre se recomienda leer el artículo original.

El método de Zhang es muy sencillo y flexible. Sólo requiere de la cámara a calibrar, una computadora y una imagen patrón (plana), de tipo damero a la que se le tomarán al menos dos fotografías desde orientaciones distintas. En la Figura 8.3 se muestran los dos dameros utilizados para calibrar



Figura 8.3: Dos dameros distintos, utilizados para calibrar los distintos dispositivos utilizados durante el proyecto.

las cámaras de los distintos dispositivos con los que se trabajó durante el proyecto. Ni las posiciones de la cámara en cada caso, ni el movimiento entre estas posiciones tienen por qué ser conocidos. Este método devuelve los parámetros intrínsecos de la cámara correspondientes al modelo *pin-hole* visto anteriormente, sus parámetros extrínsecos para cada fotografía utilizada para la calibración y la distorsión radial de sus lentes.

Recuérdese que la relación entre un punto 3D **M** expresado respecto de los ejes de coordenadas del mundo y su proyección en el plano imagen **m**, expresada respecto de los ejes normalizados de la imagen, viene dada por:

$$\mathbf{m} = \mathbf{I} \cdot \mathbf{E} \cdot \mathbf{M}$$

donde **E** representa a la matriz de parámetros extrínsecos e **I** representa a la matriz de parámetros intrínsecos de la cámara. Además:

$$\mathbf{I} = \begin{pmatrix} \alpha & s & x'_C \\ 0 & \beta & y'_C \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

con $\alpha = d_x \cdot f$ y $\beta = d_y \cdot f$.

Se asume en este método que el sistema de coordenadas del mundo “reposa” sobre la imagen patrón; o lo que es lo mismo, que esta se encuentra en $Z = 0$. Se obtiene entonces la siguiente simplificación:

$$\begin{pmatrix} x'_0 \\ y'_0 \\ 1 \end{pmatrix} = \mathbf{I} \cdot \begin{pmatrix} r_1 & r_2 & r_3 & t \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} U_0 \\ V_0 \\ W_0 \\ 1 \end{pmatrix} = \mathbf{I} \cdot \begin{pmatrix} r_1 & r_2 & t \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} U_0 \\ V_0 \\ 1 \end{pmatrix}$$

donde $(U_0, V_0, W_0, 1)^T$ denota las coordenadas homogéneas del punto **M** respecto de los ejes del mundo y $(x'_0, y'_0, 1)^T$ representa las coordenadas homogéneas de su proyección en el plano imagen, **m**, respecto de los ejes normalizados de la imagen. Se le llamó r_i a la i-ésima columna de la matriz rotación de los parámetros extrínsecos de la cámara.

Dada una fotografía de la imagen patrón plana (Figura 8.3), es posible estimar una homografía que relacione a los puntos de la imagen con sus correspondientes en la fotografía. Si se toma en

cuenta que dicha homografía vale $H = (h_1, h_2, h_3) = I.(r_1, r_2, t)$, con h_i la i-ésima columna de la matriz, y que las columnas r_1 y r_2 son ortonormales entre sí, realizando algo de matemática se llega a que:

$$\begin{aligned} h_1^T \cdot (I^{-1})^T \cdot I^{-1} \cdot h_2 &= 0 \\ h_1^T \cdot (I^{-1})^T \cdot I^{-1} \cdot h_1 &= h_2^T \cdot (I^{-1})^T \cdot I^{-1} \cdot h_2 \end{aligned}$$

Las anteriores son las únicas dos relaciones básicas entre parámetros intrínsecos que se pueden obtener a partir de una única homografía. Esto es porque una homografía tiene 8 grados de libertad y existen 6 parámetros extrínsecos (3 para la traslación y 3 para la rotación).

Si se define la matriz B como sigue:

$$B = (I^{-1})^T \cdot I^{-1} = \begin{pmatrix} B_{11} & B_{21} & B_{31} \\ B_{12} & B_{22} & B_{32} \\ B_{13} & B_{23} & B_{33} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{1}{\alpha^2} & -\frac{s}{\alpha^2 \cdot \beta} & \frac{s \cdot v'_p - u'_p \cdot \beta}{\alpha^2 \cdot \beta} \\ -\frac{s}{\alpha^2 \cdot \beta} & \frac{s^2}{\alpha^2 \cdot \beta^2} + \frac{1}{\beta^2} & -\frac{s(s \cdot v'_p - u'_p \cdot \beta)}{\alpha^2 \cdot \beta^2} - \frac{v'_p}{\beta^2} \\ \frac{s \cdot v'_p - u'_p \cdot \beta}{\alpha^2 \cdot \beta} & -\frac{s(s \cdot v'_p - u'_p \cdot \beta)}{\alpha^2 \cdot \beta^2} - \frac{v'_p}{\beta^2} & \frac{(s \cdot v'_p - u'_p \cdot \beta)^2}{\alpha^2 \cdot \beta^2} + \frac{v'^2_p}{\beta^2} + 1 \end{pmatrix}$$

se ve fácilmente que esta es simétrica, por lo que quedará absolutamente definida por un vector de 6 dimensiones:

$$b = (B_{11}, B_{12}, B_{22}, B_{13}, B_{23}, B_{33})^T$$

Si además se define el vector variable v_{ij} de la siguiente manera:

$$v_{ij} = (h_{i1} \cdot h_{j1}, h_{i1} \cdot h_{j2} + h_{i2} \cdot h_{j1}, h_{i2} \cdot h_{j2}, h_{i3} \cdot h_{j1} + h_{i1} \cdot h_{j3}, h_{i3} \cdot h_{j2} + h_{i2} \cdot h_{j3}, h_{i3} \cdot h_{j3})^T,$$

se tiene que:

$$h_i^T \cdot B \cdot h_j = V_{ij}^T \cdot b$$

Las dos relaciones básicas entre parámetros intrínsecos obtenidas de una única homografía, vistas anteriormente, pueden ser reescritas como:

$$\begin{pmatrix} v_{12}^T \\ (v_{11} - v_{22})^T \end{pmatrix} \cdot b = V \cdot b = 0$$

Utilizando n fotografías distintas de la imagen patrón, y por lo tanto n homografías distintas se obtiene una matriz V de tamaño $2 \cdot n \times 6$. Es sabido que si $n \geq 3$, el sistema matricial anterior tendrá una solución b única, que varía según cierto factor de escala. Sin embargo, si $n = 2$, es posible imponer la condición $s = 0$ y así también calcular al vector b de forma única, sin mayores problemas.

Una vez estimado b es posible reconstruir la matriz de parámetros intrínsecos I , para luego utilizando I y las homografías H obtener los parámetros extrínsecos de la cámara para cada fotografía utilizada para la calibración.

El artículo de Zhang afirma que la solución obtenida hasta el momento no es del todo buena, pues se obtuvo minimizando una distancia algebraica y eso no tiene mucho sentido. Lo que se hace entonces es, utilizando las n fotografías tomadas para la calibración y los k puntos seleccionados en cada una de ellas, minimizar la siguiente ecuación:

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^k \|m_{ij} - \hat{m}(I, E_i, M_j)\|^2$$

donde $\hat{m}(I, E_i, M_j)$ es la proyección del punto M_j en la imagen i utilizando la homografía $H_i = I \cdot E_i$. El resultado de dicha minimización no lineal será el resultado final. Este método requiere de valores iniciales para I y para los $E_i|_{i=1..n}$; que serán los obtenidos en los cálculos anteriores.

Finalmente se realiza una estimación de la distorsión radial utilizando un modelo muy similar al visto en la sección 8.3.

8.5. Calibración de cámaras utilizadas

A lo largo del proyecto se utilizaron diferentes dispositivos, se utilizó un *iPad 2*, un *iPhone 4* y un *iPod Touch 4^{ta} generación*. Todas las cámaras fueron calibradas con el método de Zhang. La distorsión radial no se tomó en cuenta para ningún caso, aún así los resultados obtenidos buenos. Se recuerda que la matriz de parámetros intrínsecos se expresa como

$$I = \begin{pmatrix} d_x \cdot f & s & x'_C \\ 0 & d_y \cdot f & y'_C \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

A continuación se muestran las calibraciones, todos los valores están expresados en píxeles.

8.5.1. Calibración *iPod Touch 4^{ta} generación*

Se realizaron dos calibraciones con dos conjuntos de imágenes distintas. La primera calibración que se realizó fue para imágenes de 640×480 , y la matriz obtenida fue:

$$I = \begin{pmatrix} 746,36170 & 0 & 292,80331 \\ 0 & 745,43429 & 217,56288 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

La segunda calibración fue para imágenes de 960×720 . Se obtuvo la siguiente matriz:

$$I = \begin{pmatrix} 1154,46114 & 0 & 473,51550 \\ 0 & 1152,02675 & 418,95929 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

8.5.2. Calibración *iPhone 4*

Se realizaron dos calibraciones, la primera calibración fue para imágenes de 640×480 , se obtuvieron los siguientes parámetros intrínsecos:

$$I = \begin{pmatrix} 621,54488 & 0 & 345,63801 \\ 0 & 617,33033 & 235,04564 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

La segunda calibración fue para imágenes de 352×288 , la matriz obtenida fue:

$$I = \begin{pmatrix} 355,72881 & 0 & 222,56769 \\ 0 & 348,80501 & 139,91097 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

8.5.3. Calibración *iPad 2*

Los parámetros intrínsecos obtenidos para imágenes de 480×360 son:

$$I = \begin{pmatrix} 589,141 & 0 & 205,115 \\ 0 & 580,754 & 165,912 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

8.6. Problema de estimación de pose

Como se mencionó en 8.2.1 la matriz de parámetros extrínsecos E representa a la pose de la cámara. El problema de estimación de pose consiste en determinar esta matriz dadas n correspondencias entre puntos M_i en el mundo 3D y puntos m_i en la imagen.

Existen varios algoritmos de estimación de pose, a continuación se presentan algunos. Por más información consultar [26].

8.6.1. DLT (Direct Linear Transform)

Este método sirve para calcular la matriz \mathbf{H} en la cual están implícitos los parámetros intrínsecos y extrínsecos. Si se conocen los parámetros intrínsecos se puede despejar la matriz \mathbf{E} con la información de la pose.

Como se vio anteriormente

$$\begin{pmatrix} x_i \\ y_i \\ s_i \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \mathbf{H}_{11} & \mathbf{H}_{12} & \mathbf{H}_{13} & \mathbf{H}_{14} \\ \mathbf{H}_{21} & \mathbf{H}_{22} & \mathbf{H}_{23} & \mathbf{H}_{24} \\ \mathbf{H}_{31} & \mathbf{H}_{32} & \mathbf{H}_{33} & \mathbf{H}_{34} \\ \mathbf{H}_{41} & \mathbf{H}_{42} & \mathbf{H}_{43} & \mathbf{H}_{44} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} U_i \\ V_i \\ W_i \\ P_i \end{pmatrix}$$

Por comodidad a partir de ahora cuando se refiera a puntos 2D (x_i, y_i) serán expresados siempre desde el eje de coordenadas normalizadas de la imagen. Se debe notar que la matriz \mathbf{H} puede ser multiplicada por un factor distinto de cero sin alterar el resultado de la proyección, esto se debe a que se trabaja con coordenadas homogéneas. Por lo tanto lo que define la proyección no son los elementos de \mathbf{H} sino la relación entre todos los elementos (excepto el de factor de escala) y el elemento que da el factor de escala. Así entonces \mathbf{H} tiene 12 elementos pero solamente 11 grados de libertad.

Cada correspondencia $M_i \leftrightarrow m_i$ aporta dos ecuaciones linealmente independientes con los elementos de la matriz \mathbf{H} , \mathbf{H}_{ij} como variables

$$\frac{\mathbf{H}_{11}X_i + \mathbf{H}_{12}Y_i + \mathbf{H}_{13}Z_i + \mathbf{H}_{14}}{\mathbf{H}_{31}X_i + \mathbf{H}_{32}Y_i + \mathbf{H}_{33}Z_i + \mathbf{H}_{34}} = x_i,$$

$$\frac{\mathbf{H}_{21}X_i + \mathbf{H}_{22}Y_i + \mathbf{H}_{23}Z_i + \mathbf{H}_{24}}{\mathbf{H}_{31}X_i + \mathbf{H}_{32}Y_i + \mathbf{H}_{33}Z_i + \mathbf{H}_{34}} = y_i$$

La ecuación para s_i se puede obtener como combinación lineal de las de x_i y y_i , por eso no se tiene en cuenta. Estas ecuaciones se pueden reescribir como $\mathbf{A}h = 0$ donde

$$h = (\mathbf{H}_{11} \ \mathbf{H}_{12} \ \mathbf{H}_{13} \ \mathbf{H}_{14} \ \mathbf{H}_{21} \ \mathbf{H}_{22} \ \mathbf{H}_{23} \ \mathbf{H}_{24} \ \mathbf{H}_{31} \ \mathbf{H}_{32} \ \mathbf{H}_{33} \ \mathbf{H}_{34})^T$$

y

$$\mathbf{A} = \begin{pmatrix} X_0 & Y_0 & Z_0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & -x_0X_0 & -x_0Y_0 & -x_0Z_0 & -x_0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & X_0 & Y_0 & Z_0 & 1 & -y_0X_0 & -y_0Y_0 & -y_0Z_0 & -y_0 \\ X_1 & Y_1 & Z_1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & -x_1X_1 & -x_1Y_1 & -x_1Z_1 & -x_1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & X_1 & Y_1 & Z_1 & 1 & -y_1X_1 & -y_1Y_1 & -y_1Z_1 & -y_1 \\ \vdots & \vdots \\ X_{n-1} & Y_{n-1} & Z_{n-1} & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & -x_{n-1}X_{n-1} & -x_{n-1}Y_{n-1} & -x_{n-1}Z_{n-1} & -x_{n-1} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & X_{n-1} & Y_{n-1} & Z_{n-1} & 1 & -y_{n-1}X_{n-1} & -y_{n-1}Y_{n-1} & -y_{n-1}Z_{n-1} & -y_{n-1} \end{pmatrix}$$

La transformación obtenida la matriz \mathbf{H} tiene 11 grados de libertad como mencionó anteriormente, por lo tanto el rango de la matriz \mathbf{A} es 11. Se realiza la descomposición SVD de la matriz \mathbf{A} , el vector propio del valor singular de \mathbf{A} con valor menor es la base del núcleo de \mathbf{A} . Entonces se tiene que h es este vector a menos de una constante. Una vez que se tiene h se puede armar la matriz \mathbf{H} . Luego se tiene que

$$\mathbf{E} = \mathbf{I}^{-1} \mathbf{H}$$

8.6.2. *PnP (Perspective-n-Point)*

Si se cuenta con los parámetros intrínsecos, se puede utilizar un enfoque que se centre en calcular solamente la pose de la cámara. Dependiendo de la cantidad de correspondencias que se tienen entre la imagen y el modelo es posible obtener un número finito de soluciones de la pose. Si se tienen 1 o 2 correspondencias el problema tiene infinitas soluciones. Si se tienen 3 correspondencias(P3P) se obtienen hasta 4 posibles soluciones. Para 4 o más correspondencias se obtiene una única solución, siempre que los puntos no estén alineados. La idea detrás de este algoritmo es la siguiente:

- A partir de los puntos de la imagen m_i y conociendo la distancia focal f es posible calcular los versores j_i .

$$j_i = \frac{1}{\sqrt{x_i^2 + y_i^2 + f^2}} \begin{pmatrix} x_i \\ y_i \\ f \end{pmatrix}$$

- Con estos versores es posible determinar los ángulos que forman las líneas de vista de los puntos \mathbf{M}_i entre sí.
- Se busca estimar las distancias $l_i = \|\mathbf{OM}_i\|$ entre el centro de la cámara y los puntos 3D \mathbf{M}_i a partir de las relaciones dadas por los triángulos $\mathbf{OM}_i\mathbf{M}_j$.
- Una vez que se calculan las distancias l_i , los puntos \mathbf{M}_i se expresan en el sistema de coordenadas de la cámara como \mathbf{M}_i^C .
- Finalmente \mathbf{R} y \mathbf{T} quedan determinadas como la transformación que lleva puntos en el sistema de coordenadas del mundo a el sistema de coordenadas de la cámara.

En la bibliografía [15] y [19] se encuentran varios métodos para resolver numéricamente el problema.

8.6.3. **RANSAC(RANdom SAmple Consensus)**

Este es un algoritmo iterativo utilizado para estimar los parámetros de un modelo matemático de un conjunto de datos que contiene *outliers* (datos fuera del modelo). En particular se puede utilizar para el problema de estimación de pose cuando no se tienen las correspondencias entre puntos detectados y puntos del modelo.

A continuación se presenta el algoritmo:

- (1) Dado un modelo que requiere un mínimo de n puntos para determinar sus parámetros, y un conjunto de datos \mathbf{P} tal que el número de puntos en \mathbf{P} es mayor que n , se sortea un subconjunto S_1 de n puntos de \mathbf{P} para instanciar el modelo. Con el modelo instanciado \mathbf{M}_1 se determina el subconjunto de decisión S_1^* de puntos de \mathbf{P} que están a menos de una distancia t de \mathbf{M}_1 .
- (2) Si la cantidad de puntos en S_1^* es mayor que un umbral T entonces se elige el subconjunto de decisión S_1^* para computar el nuevo modelo \mathbf{M}_1^* .

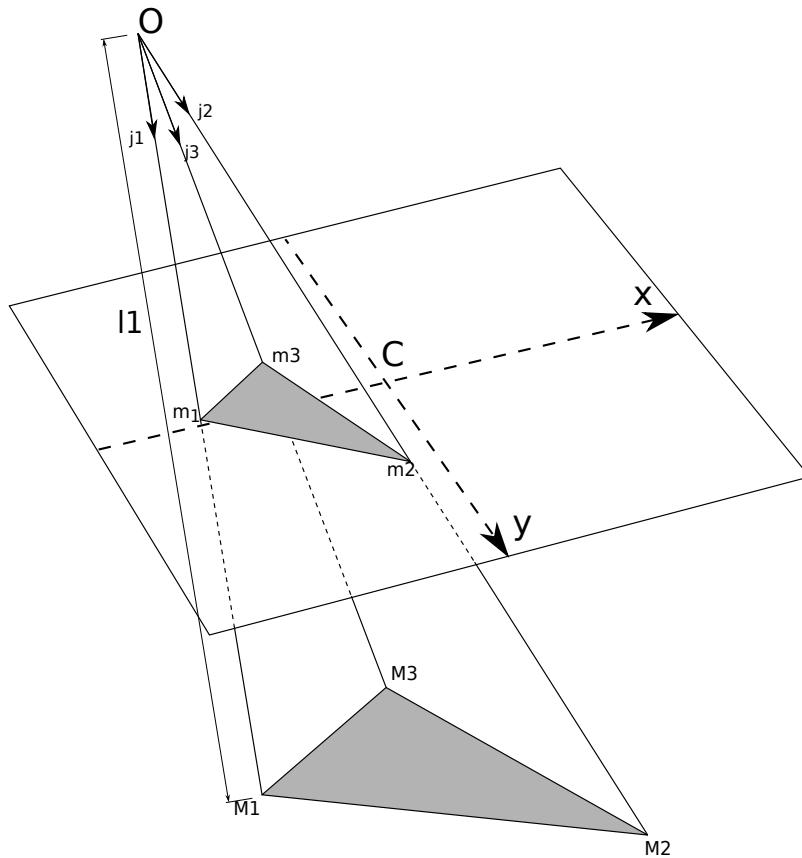


Figura 8.4: Geometría del problema P3P. Se busca calcular la distancia entre el centro óptico O y los puntos del modelo 3D.

- (3) Si la cantidad de puntos en S_1^* es menor que \mathbf{T} , se sortea un nuevo subconjunto S_2 y se repite el proceso. Si luego de una cantidad de N número de pruebas no se obtiene un subconjunto de decisión que cumple con el umbral \mathbf{T} , se resuelve el modelo con el subconjunto de decisión mas grande obtenido, o se termina sin devolver modelo.

Los parámetros t , \mathbf{T} y N , se eligen en base al modelo a estimar y a la probabilidad de encontrar un *outlier* en el conjunto de datos .

8.6.4. POSIT

Este es un algoritmo iterativo que se basa en utilizar la proyección ortogonal escalada (SOP) para resolver el problema de estimación de pose. Se necesita tener más de cuatro correspondencias entre puntos del modelo M_i y puntos en la imagen m_i . De todos los algoritmos presentados este fue el que se decidió utilizar. El desarrollo de la teoría de este algoritmo se encuentra en 9. Este algoritmo tiene diferentes variantes. Por un lado esta la versión original del algoritmo (POSIT Clásico) y una versión que resuelve el caso en que todos los puntos del modelo están en un mismo plano, (POSIT Coplanar). Luego se tiene una variante llamada SoftPOSIT que resuelve la estimación de pose sin la necesidad de conocer las correspondencias entre puntos del modelo 3D y puntos de la imagen en el caso en que los puntos del modelo no sean coplanares. Finalmente se tiene una variante de SoftPOSIT que trabaja con líneas.

La variante de SoftPOSIT de líneas se eligió ya que el detector de características que se usa es el LSD 7 y se tenía la intuición de que la estimación de líneas sería mas robusta que la basada en puntos. Para esta variante no se contó con una implementación, fue implementada pero sin éxito.

Sin embargo en busca de esta implementación se desarrolló una versión propia de POSIT para puntos coplanares que no está presentada en la bibliografía y dio buenos resultados. Otro argumento a favor de esta opción es que se contaba con implementaciones de algunas variantes. De [11] se obtuvieron las implementaciones de POSIT y POSIT coplanar en C y la implementación en MatLab de SoftPOSIT. Para la variante de SoftPOSIT de líneas sólo se contó con el artículo[9].

decir que se tenía la intuición de que la estimación de pose basada en líneas iba a ser más precisa que la basada en puntos, por eso se quería elegir este.

Como no se contaba con una implementación, se implementó pero sin éxito

8.7. Representación de la pose de la cámara

Como se vio anteriormente, la pose de la cámara queda determinada por una matriz de rotación \mathbf{R} y un vector de translación \mathbf{T} . La matriz \mathbf{R} indica la orientación de la cámara respecto al mundo. Hay varias maneras de representar esta orientación, entre ellas se encuentran la representación matricial, la representación en ángulos de Euler y los cuaternios o *quaternions* inglés. Dependiendo de la aplicación puede resultar más útil utilizar las diferentes representaciones.

8.7.1. Representación matricial

Esta representación es la que se introdujo en 8.2.2. En esta matriz las filas corresponden a los versores del sistema de coordenadas de la cámara expresados en las coordenadas del mundo. Se puede expresar como

$$\mathbf{R} = \begin{pmatrix} i_u & i_v & i_w \\ j_u & j_v & j_w \\ k_u & k_v & k_w \end{pmatrix}$$

La ventaja que tiene esta representación es que el pasaje de puntos en coordenadas del mundo a coordenadas de la cámara es directo, simplemente se multiplica por la matriz \mathbf{R} al punto en coordenadas del mundo y se le suma el vector de translación.

8.7.2. Ángulos de Euler

La matriz de rotación \mathbf{R} se puede escribir como un producto de matrices que representan las rotaciones alrededor de los ejes x , y y z . No hay ninguna convención establecida en cuanto al orden en que se realizan las rotaciones. Por ejemplo si se toman ψ , θ y ϕ como los ángulos de rotación en torno a x , y y z respectivamente se tiene

$$\mathbf{R} = R_z(\phi)R_y(\theta)R_x(\psi) = \begin{pmatrix} \cos \phi & -\sin \phi & 0 \\ \sin \phi & \cos \phi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos \theta & 0 & \sin \theta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \theta & 0 & \cos \theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \psi & -\sin \psi \\ 0 & \sin \psi & \cos \psi \end{pmatrix}$$

Desarrollando el producto se tiene que

$$\mathbf{R} = \begin{pmatrix} \cos \theta \cos \phi & \sin \psi \sin \theta \cos \phi - \cos \psi \cos \phi & \cos \psi \sin \theta \cos \phi + \sin \psi \sin \phi \\ \cos \theta \sin \phi & \sin \psi \sin \theta \sin \phi + \cos \psi \cos \phi & \cos \psi \sin \theta \sin \phi - \sin \psi \cos \phi \\ -\sin \theta & \sin \psi \cos \theta & \cos \psi \cos \theta \end{pmatrix}$$

8.7.2.1. Orden de rotaciones

Cuando se trabaja con matrices de rotaciones y ángulos de Euler es necesario saber en qué orden se aplican las rotaciones, pues no es una transformación comutativa. Un objeto rotado primero según el eje x y luego según el eje y termina en una posición diferente que si se lo rota primero según y y luego según x . Esto se puede ver en la Figura 8.5.

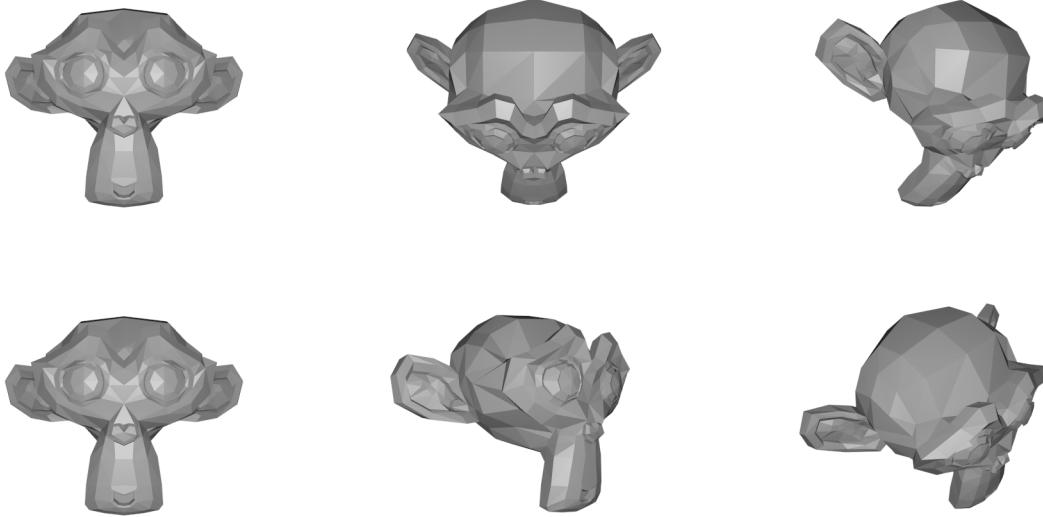


Figura 8.5: Se parte del mismo objeto, en la fila superior se aplica una rotación de 45° según x y luego una rotación de 45° según y . En la fila de abajo se aplican las mismas rotaciones pero en orden inverso. Se puede ver que se obtienen diferentes posiciones.

8.7.2.2. Cálculo de los ángulos de Euler

Si se tiene la matriz \mathbf{R} es posible realizar la descomposición y obtener los ángulos de Euler [78]. De \mathbf{R}_{31} se obtiene el valor de θ

$$\theta = -\arcsin(\mathbf{R}_{31}).$$

Como $\sin(\theta) = \sin(\pi - \theta)$, puede haber dos posibles valores de θ (si $\mathbf{R}_{31} \neq \pm 1$)

$$\begin{aligned}\theta_1 &= -\arcsin(\mathbf{R}_{31}) \\ \theta_2 &= \pi - \theta_1 = \pi + \arcsin(\mathbf{R}_{31})\end{aligned}\tag{8.1}$$

A partir de estos valores de θ es posible encontrar dos juegos de ángulos que dan la misma matriz \mathbf{R} . Para calcular ψ se observa que

$$\frac{\mathbf{R}_{32}}{\mathbf{R}_{33}} = \tan \psi$$

de donde se deduce que

$$\psi = \arctan\left(\frac{\mathbf{R}_{32}}{\mathbf{R}_{33}}\right)$$

Es importante obtener el cuadrante al que pertenece el ángulo, por esto es que se usa la función $\arctan 2$ que está disponible en C , recordar que la imagen de \arctan es $[-\pi/2, \pi/2]$ por lo que

hay 2 cuadrantes que no se consideran. Como en los términos \mathbf{R}_{32} y \mathbf{R}_{33} aparece el término $\cos \theta$ multiplicando, hay que tener en cuenta su signo para obtener el valor de ψ . Si $\cos(\theta) > 0$, se tiene que $\psi = \arctan(\mathbf{R}_{32}/\mathbf{R}_{33})$. Si $\cos(\theta) < 0$, $\psi = \arctan(-\mathbf{R}_{32}/-\mathbf{R}_{33})$. Para tener en cuenta esto se toma

$$\psi = \arctan \left(\frac{\mathbf{R}_{32}/\cos \theta}{\mathbf{R}_{33}/\cos \theta} \right)$$

Por lo tanto los dos posibles valores para ψ son

$$\begin{aligned}\psi_1 &= \arctan \left(\frac{\mathbf{R}_{32}/\cos \theta_1}{\mathbf{R}_{33}/\cos \theta_1} \right) \\ \psi_2 &= \arctan \left(\frac{\mathbf{R}_{32}/\cos \theta_2}{\mathbf{R}_{33}/\cos \theta_2} \right)\end{aligned}\tag{8.2}$$

De manera similar se puede obtener ϕ . Se observa que

$$\frac{\mathbf{R}_{21}}{\mathbf{R}_{11}} = \tan \phi$$

por lo tanto se llega a

$$\begin{aligned}\phi_1 &= \arctan \left(\frac{\mathbf{R}_{21}/\cos \theta_1}{\mathbf{R}_{11}/\cos \theta_1} \right) \\ \phi_2 &= \arctan \left(\frac{\mathbf{R}_{21}/\cos \theta_2}{\mathbf{R}_{11}/\cos \theta_2} \right)\end{aligned}\tag{8.3}$$

Las Ecuaciones 8.2 y 8.3 son válidas para el caso en que $\cos \theta \neq 0$

En el caso en que $\cos \theta = 0$ se tiene que $\theta = \pm\pi/2$, ademas los términos \mathbf{R}_{11} , \mathbf{R}_{21} , \mathbf{R}_{32} y \mathbf{R}_{33} son nulos. Por lo tanto se utilizan otros elementos de la matriz de rotación para hallar los ángulos restantes. En el caso en que $\theta = \pi/2$ se tiene que

$$\begin{aligned}\mathbf{R}_{12} &= \sin \psi \cos \phi - \cos \psi \cos \phi = \sin(\psi - \phi) \\ \mathbf{R}_{13} &= \cos \psi \cos \phi + \sin \psi \sin \phi = \cos(\psi - \phi) \\ \mathbf{R}_{22} &= \sin \psi \sin \phi + \cos \psi \cos \phi = \cos(\psi - \phi) = \mathbf{R}_{13} \\ \mathbf{R}_{23} &= \cos \psi \sin \phi - \sin \psi \cos \phi = -\sin(\psi - \phi) = -\mathbf{R}_{12}\end{aligned}$$

Cualquier ψ y ϕ que verifiquen estas ecuaciones serán soluciones válidas. Usando las ecuaciones para \mathbf{R}_{12} y \mathbf{R}_{13} se tiene que

$$\begin{aligned}(\psi - \phi) &= \arctan(\mathbf{R}_{12}/\mathbf{R}_{13}) \\ \psi &= \phi + \arctan(\mathbf{R}_{12}/\mathbf{R}_{13})\end{aligned}$$

Para el caso en que $\theta = -\pi/2$ se procede de igual manera y se llega a que

$$\begin{aligned}(\psi + \phi) &= \arctan(-\mathbf{R}_{12}/-\mathbf{R}_{13}) \\ \psi &= -\phi + \arctan(-\mathbf{R}_{12}/-\mathbf{R}_{13})\end{aligned}$$

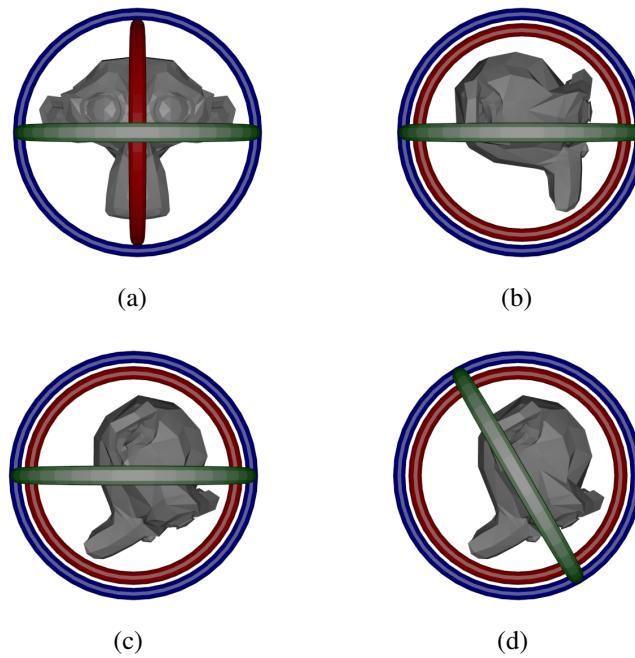


Figura 8.6: Los ejes rojo, verde y azul, son los ejes x , y y z . En (a) se ve la posición inicial. En (b) se puede ver el eje y rotado 90° . En (c) se ve la rotación según x de 60° respecto a la posición de (b). En (d) se ve la rotación según z de -60° respecto a la posición de (b).

8.7.2.3. Gimbal lock

La gran desventaja que presenta la representación de la rotación mediante ángulos de Euler, es el problema denominado *gimbal lock*. Este problema se da cuando 2 de los ejes de rotación quedan alineados. Si hay dos ejes alineados, se pierde un grado de libertad ya que los dos ejes rotan de la misma manera. Para la composición de rotaciones que se utilizan en la aplicación el *gimbal lock* se da cuando se gira $\pi/2$ según y . Como se vio anteriormente, en el caso en que $\theta = \pi/2$ la matriz de rotación queda

$$\mathbf{R} = \begin{pmatrix} 0 & \sin(\psi - \phi) & \cos(\psi - \phi) \\ 0 & \cos(\psi - \phi) & -\sin(\psi - \phi) \\ -1 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

Esto es una rotación entorno al vector $(0, 0, -1)$ de un ángulo $\alpha = \psi - \phi$.

Esto se puede ver gráficamente en la Figura 8.6. Se realiza la rotación según y y se pueden ver que los ejes de x y z quedan alineados. Luego se realiza una rotación de 60° en torno a x y por otra parte también se hace otra igual pero de signo opuesto en torno a z . Se ve que la posición final, partiendo de los ejes alineados para una y otra rotación del modelo es la misma. Lo que cambia es la posición del eje y . Cuando se rota en torno a x , el eje y queda quieto porque está más arriba en la jerarquía de rotaciones para este caso particular. Cuando se rota en torno a z , el eje y se mueve ya que está por debajo de z en la jerarquía.

8.7.3. Cuaternios

Los cuaternios son una extensión a los números reales, son generados añadiendo las unidades imaginarias i , j y k . Se cumple que $i^2 = j^2 = k^2 = -1$. Un número cuaternion q se expresa como $q = a + bi + cj + dk$. También puede ser expresado como un escalar y un vector de 3 elementos (a, \mathbf{v}) . Una rotación alrededor del versor ω un ángulo θ se puede expresar como el número cuaternion

unidad

$$q = \left(\cos\left(\frac{1}{2}\theta\right), \omega \sin\left(\frac{1}{2}\theta\right) \right)$$

Para rotar un punto 3D \mathbf{M} , se representa como un cuaternionio $p = (0, \mathbf{M})$ y el punto p' rotado se calcula como

$$p' = qp\bar{q}.$$

El producto que se utiliza es el producto de cuaternios y $\bar{q} = (\cos\left(\frac{1}{2}\theta\right), -\omega \sin\left(\frac{1}{2}\theta\right))$ es el cuaternionio conjugado de q .

Esta representación evita el problema del *gimbal lock* pero tiene como contra que tiene un mayor costo computacional.

8.8. Resumen

En este capítulo de presentó el modelo de cámara *pin-hole*, se explicaron los diferentes parámetros que componen el modelo y se describió el proceso de calibración de cámara utilizado durante el proyecto.

Luego se explicó en que consiste el problema de la estimación de pose monocular y se presentaron algunos de los métodos más conocidos para resolver este problema.

Finalmente se presentaron las diferentes maneras que existen para expresar la pose de la cámara y se vieron las ventajas y desventajas de las diferentes representaciones.

CAPÍTULO 9

POSIT: *POS* with *ITerations*

9.1. Introducción

En este capítulo se explica el algoritmo utilizado para el cálculo de la pose a partir de una imagen capturada por la cámara. Como lo dice el nombre del algoritmo se utiliza una técnica llamada *POS* (*Pose from Orthography and Scaling*), esta técnica consiste en aproximar la pose de la cámara a partir de la proyección *SOP*(*Scaled Orthographic Projection*). Se comienza explicando la versión clásica de POSIT, en la cual se presentan las técnicas utilizadas dentro del algoritmo, entre ellas se explica en qué consiste la proyección SOP. Luego se presenta el problema de trabajar con marcadores planos y se explica cómo se modifica el algoritmo para este caso. Se presenta también el algoritmo llamado SoftPOSIT, que sirve para obtener la pose en el caso en que no se conocen las correspondencias entre los puntos del modelo y los puntos detectados. También se presenta una variación de POSIT que resuelve la estimación de una manera diferente a la versión clásica. Finalmente se presentan los resultados obtenidos de la comparación de las dos versiones de POSIT.

9.2. POSIT clásico

La primera versión de POSIT presentada por DeMenthon et al. en [10] resuelve el problema de estimar la pose de la cámara dados 4 o más puntos detectados en la imagen y sus correspondientes en el mundo real, con la condición de que estos puntos no sean coplanares. Si bien no es la versión final que se utilizó vale la pena ser explicada ya que ayuda a explicar los fundamentos del algoritmo utilizado.

9.2.1. Notación

En la Figura 9.1 se puede ver un modelo de cámara pinhole como el que se presentó en 8.2.1. O es el centro óptico y G es el plano imagen ubicado a una distancia focal f de O . x e y son los ejes que apuntan en las direcciones de las filas y las columnas del sensor de la cámara respectivamente. z es el eje que está sobre el eje óptico de la cámara y apunta en sentido saliente. Los versores para estos ejes son \mathbf{i} , \mathbf{j} y \mathbf{k} respectivamente.

Se considera ahora un objeto con puntos característicos $M_0, M_1, \dots, M_i, \dots, M_n$, cuyo eje de coordenadas está centrado en M_0 y está compuesto por los versores (M_0u, M_0v, M_0w) . Como los ejes del mundo son arbitrarios se puede asumir sin pérdida de generalidad que los ejes del objeto coinciden con los ejes del mundo. La geometría del objeto se asume conocida, por ejemplo $(U_i,$

V_i, W_i) son las coordenadas del punto M_i en el marco de referencia del objeto. Los puntos correspondientes a los puntos del objeto M_i en la imagen son conocidos y se identifican como m_i , (x_i, y_i) son las coordenadas de este punto en la imagen¹. Las coordenadas de los puntos M_i en el eje de coordenadas de la cámara, identificadas como (X_i, Y_i, Z_i) , son desconocidas ya que no se conoce la pose del objeto respecto a la cámara.

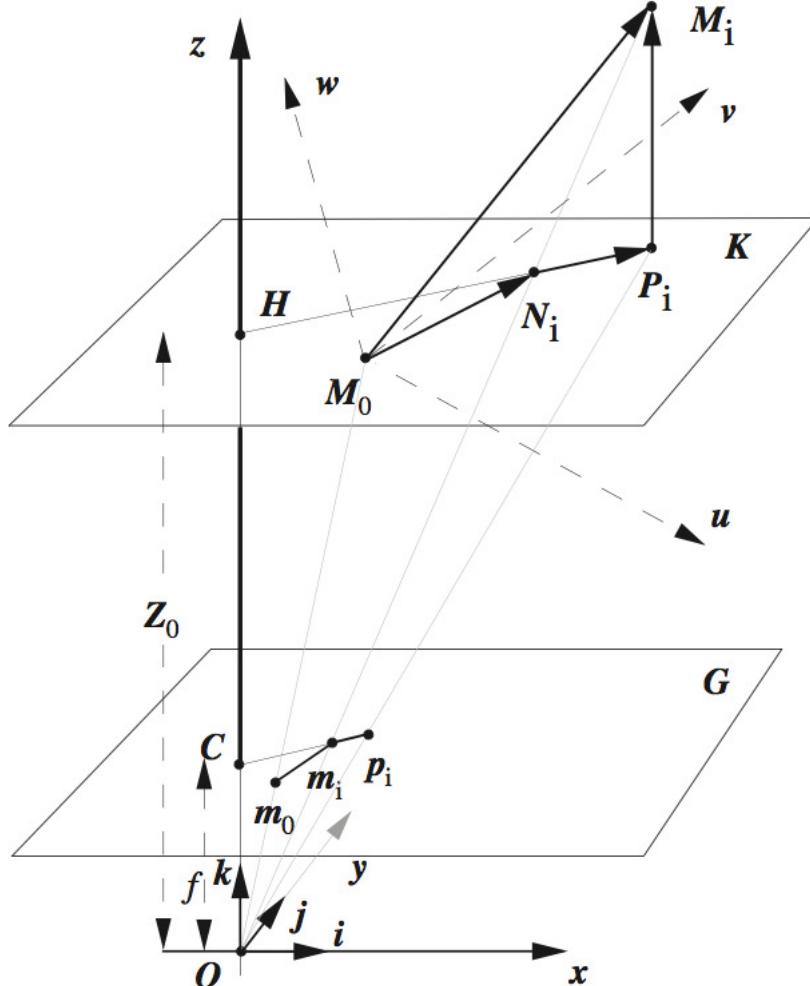


Figura 9.1: Proyección en perspectiva (m_i) y SOP (p_i) para un punto del modelo 3D M_i y un punto de referencia del modelo M_0 . Tomado de: [10] .

Se busca computar la matriz de rotación y el vector de translación del objeto respecto a la cámara. Se recuerda que matriz de rotación se expresa como:

$$R = \begin{pmatrix} i_u & i_v & i_w \\ j_u & j_v & j_w \\ k_u & k_v & k_w \end{pmatrix}$$

Por lo tanto, para obtener la matriz de rotación sólo es necesario obtener los versores \mathbf{i} y \mathbf{j} , el versor \mathbf{k} se obtiene de realizar el producto vectorial $\mathbf{i} \times \mathbf{j}$. El vector de translación es el vector que va del centro del objeto M_0 a el centro del sistema de coordenadas de la cámara O . Por lo tanto las coordenadas del vector de translación son (X_0, Y_0, Z_0) . Si este punto M_0 es uno de los puntos visibles en la imagen, entonces el vector \mathbf{T} esta alineado con el vector Om_0 y es igual a $(Z_0/f)Om_0$. La pose queda determinada si se conocen \mathbf{i} , \mathbf{j} y Z_0 .

¹En realidad los puntos m_i no están dados, vienen de la etapa anterior de detección.

9.2.2. SOP: Scaled Orthographic Projection

La proyección ortogonal escalada(SOP) es una aproximación a la proyección perspectiva. En esta aproximación se supone que las profundidades Z_i de diferentes puntos M_i en el eje de coordenadas de la cámara no difieren mucho entre sí, y por lo tanto se asume que todos los puntos M_i tienen la misma profundidad que el punto M_0 . Esta suposición es razonable cuando la relación distancia cámara objeto - profundidad del objeto es grande.

Para un punto M_i la proyección perspectiva sobre el plano imagen está dada por:

$$x_i = fX_i/Z_i, \quad y_i = fY_i/Z_i,$$

mientras que la proyección SOP está dada por:

$$x'_i = fX_i/Z_0, \quad y'_i = fY_i/Z_0.$$

De aquí en más las proyecciones SOP de los puntos M_i se identificarán como p_i , mientras que las proyecciones perspectivas, que son los puntos que se detectan en la imagen, se identifican como m_i . Al término $s = f/Z_0$ se lo conoce como el factor de escala de la SOP. Se puede ver que para el caso particular del punto M_0 la proyección perspectiva m_0 y la SOP p_0 coinciden.

En la Figura 9.1 se puede ver como se construye la SOP. Primero se realiza la proyección ortogonal de todos los puntos M_i sobre K , el plano paralelo al plano imagen que pasa por el punto M_0 . Las proyecciones de los puntos M_i sobre K se llaman P_i . El segundo paso consiste en hacer la proyección perspectiva de los puntos P_i sobre el plano imagen G para obtener finalmente los puntos p_i . En la figura también se puede ver que el tamaño del vector $m_0 p_i$ es s veces el tamaño de $M_0 P_i$. Teniendo esto en cuenta se pueden expresar las coordenadas de p_i como:

$$\begin{aligned} x'_i &= fX_0/Z_0 + f(X_i - X_0)/Z_0 = x_0 + s(X_i - X_0) \\ y'_i &= y_0 + s(Y_i - Y_0) \end{aligned}$$

9.2.3. Ecuaciones para calcular la proyección perspectiva

Como se mencionó anteriormente la pose queda determinada si se conocen los vectores \mathbf{i} , \mathbf{j} y la coordenada Z_0 del vector de translación. La relación entre las coordenadas de los puntos M_i en el sistema de coordenadas del objeto y el sistema de coordenadas de la cámara es

$$\begin{pmatrix} X_i \\ Y_i \\ Z_i \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} i_u & i_v & i_w \\ j_u & j_v & j_w \\ k_u & k_v & k_w \end{pmatrix} \begin{pmatrix} U_i \\ V_i \\ W_i \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} X_0 \\ Y_0 \\ Z_0 \end{pmatrix} \quad (9.1)$$

de esta expresión se tiene

$$x_i = f \frac{\mathbf{M}_0 \mathbf{M}_i \cdot \mathbf{i} + X_0}{\mathbf{M}_0 \mathbf{M}_i \cdot \mathbf{k} + Z_0}$$

y si se saca Z_0 de factor común se tiene

$$x_i = \frac{\mathbf{M}_0 \mathbf{M}_i \cdot \frac{f}{Z_0} \mathbf{i} + x_0}{\mathbf{M}_0 \mathbf{M}_i \cdot \frac{f}{Z_0} \mathbf{k} + 1}.$$

Lo mismo se tiene para y_i .

Por lo tanto la condición necesaria para que la pose definida por \mathbf{i} , \mathbf{j} , x_0 , y_0 y Z_0 sea la pose exacta se puede expresar en las siguientes ecuaciones:

$$M_0 M_i \frac{f}{Z_0} \mathbf{i} = x_i(1 + \varepsilon_i) - x_0 \quad (9.2)$$

$$M_0 M_i \frac{f}{Z_0} \mathbf{j} = y_i(1 + \varepsilon_i) - y_0 \quad (9.3)$$

donde ε_i se define como

$$\varepsilon_i = \frac{1}{Z_0} M_0 M_i \cdot \mathbf{k} \quad (9.4)$$

Se puede ver que los términos $x_i(1 + \varepsilon_i)$ y $y_i(1 + \varepsilon_i)$ son las coordenadas (x'_i, y'_i) de la SOP, en el caso en que la pose está determinada. En la expresión de ε_i en la Ecuación 9.4, el producto escalar con \mathbf{k} da la coordenada z de $M_0 M_i$, $Z_i - Z_0$. Entonces se tiene que

$$(1 + \varepsilon_i) = \frac{Z_i - Z_0}{Z_0} + 1 = \frac{Z_i}{Z_0}$$

además se tiene la proyección perspectiva $x_i = f X_i / Z_i$, combinando las dos expresiones se tiene

$$x_i(1 + \varepsilon_i) = f \frac{X_i}{Z_i} \frac{Z_i}{Z_0} = f \frac{X_i}{Z_0}$$

que es la coordenada x'_i del punto p_i .

9.2.4. Algoritmo

Las Ecuaciones 9.2 y 9.3 se puede reescribir como:

$$M_0 M_i \mathbf{I} = x_i(1 + \varepsilon_i) - x_0 \quad (9.5)$$

$$M_0 M_i \mathbf{J} = y_i(1 + \varepsilon_i) - y_0 \quad (9.6)$$

en donde

$$\mathbf{I} = \frac{f}{Z_0} \mathbf{i} = s \cdot \mathbf{i}, \quad \mathbf{J} = \frac{f}{Z_0} \mathbf{j} = s \cdot \mathbf{j} \quad (9.7)$$

Si se conociera el valor de ε_i , las Ecuaciones 9.5 y 9.6 representan un sistema de ecuaciones en que las incógnitas son los vectores \mathbf{I} y \mathbf{J} . Una vez obtenidos estos vectores se pueden obtener los versores \mathbf{i} y \mathbf{j} normalizando, y Z_0 se obtiene de la norma de cualquiera de los vectores \mathbf{I} o \mathbf{J} . A esta parte del algoritmo se le llama *POS (Pose from Orthography and Scaling)*, ya que estima la pose a partir de las proyecciones SOP de los puntos M_i .

Si se conocieran los valores exactos de los ε_i la pose obtenida de resolver el sistema de ecuaciones sería la pose exacta del objeto, como no se conocen los valores exactos de ε_i se utiliza un método iterativo que converge a la solución buscada. En la primera iteración se le toma $\varepsilon_i = 0$. La ecuación para un punto cualquiera está dada por:

$$\begin{aligned} M_0 M_i \cdot \mathbf{I} &= x'_i - x_0 \\ M_0 M_j \cdot \mathbf{J} &= y'_i - y_0 \end{aligned} \quad (9.8)$$

Si se escribe la Ecuación 9.8 para los n puntos del modelo, se tiene un sistema de n ecuaciones con \mathbf{I} y \mathbf{J} como incógnitas

$$\begin{aligned} \mathbf{A}\mathbf{I} &= x' - x_0 \\ \mathbf{A}\mathbf{J} &= y' - y_0 \end{aligned} \quad (9.9)$$

A es una matriz $n \times 3$ con las coordenadas de los puntos del modelo M_i en el marco de coordenadas del objeto. Si se tienen más de 4 puntos y no son coplanares, la matriz **A** es de rango 3, y las soluciones al sistema están dadas por

$$\begin{aligned}\mathbf{I} &= \mathbf{B} \left(\begin{pmatrix} x' \\ y' \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} x_0 \\ y_0 \end{pmatrix} \right) \\ \mathbf{J} &= \mathbf{B} \left(\begin{pmatrix} z' \\ 1 \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} z_0 \\ 1 \end{pmatrix} \right)\end{aligned}\quad (9.10)$$

donde **B** es la pseudo inversa de la matriz **A**. Se debe notar que la matriz **B** depende únicamente de la geometría del modelo que se asume conocida, por lo tanto solo es necesario calcularla una sola vez.

Una vez obtenidos **I** y **J** se calculan s y los versores **i**, **j** y **k**

$$s = (\|\mathbf{I}\| \|\mathbf{J}\|)^{1/2} \quad (9.11a)$$

$$\mathbf{i} = \frac{\mathbf{I}}{s} \quad (9.11b)$$

$$\mathbf{j} = \frac{\mathbf{J}}{s} \quad (9.11c)$$

$$\mathbf{k} = \mathbf{i} \times \mathbf{j} \quad (9.11d)$$

El vector traslación del centro del objeto al centro de la cámara es el vector OM_0

$$OM_0 = \frac{Z_0}{f} Om_0 = \frac{Om_0}{s} \quad (9.12)$$

El vector Om_0 es conocido ya que se conocen las coordenadas de los puntos m_i , en particular m_0 .

Una vez que se calcularon **i**, **j**, **k** y **T** se calculan los valores actualizados de ε_i según la Ecuación 9.4. Si la variación de los ε_i es mayor a un determinado umbral, se repite el procedimiento actualizando las proyecciones SOP en la Ecuación 9.9, si es menor al umbral se deja de iterar y se guarda la pose calculada.

9.2.5. POSIT para puntos coplanares

Como se mencionó anteriormente, el algoritmo POSIT no funciona en el caso en que los puntos del modelo pertenecen a un mismo plano. Como los marcadores utilizados son planos, se buscó una versión de POSIT que resuelve el problema de la estimación de pose para este caso. El algoritmo fue escrito por DeMenthon et al. en [29].

Para entender cual es el problema de trabajar con puntos coplanares se explica la situación desde un punto de vista geométrico. Como se vio anteriormente,

$$M_0 M_i \cdot \mathbf{I} = x'_i - x_0.$$

Esto quiere decir que si se toma que la base de **I** en M_0 , la punta del vector **I** se proyecta sobre el vector $M_0 M_i$ en un punto H_{x_i} , entonces todas las posibles puntas del vector **I** se encuentran en el plano perpendicular a $M_0 M_i$ que pasa por el punto H_{x_i} . Si se tuvieran 4 puntos no coplanares M_0, M_1, M_2 y M_3 , el vector **I** quedaría determinado. La base de **I** estaría en M_0 y la punta estaría en la intersección de los planos perpendiculares a $M_0 M_1, M_0 M_2$ y $M_0 M_3$ por los puntos H_{x_1}, H_{x_2} y H_{x_3} respectivamente. Para este caso el sistema definido en 9.9 es de rango 3.

Si los puntos son coplanares, los vectores $M_0 M_1, M_0 M_2$ y $M_0 M_3$ son todos coplanares y los planos perpendiculares que pasan por los puntos H_{x_1}, H_{x_2} y H_{x_3} , se intersectan todos en una línea o

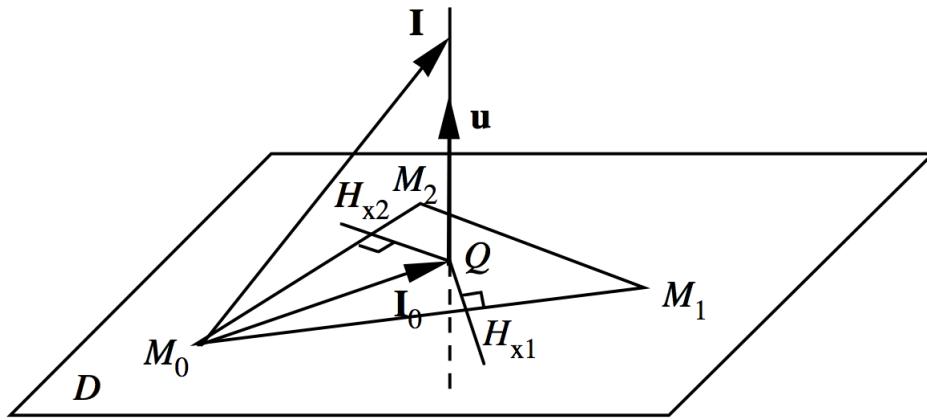


Figura 9.2: Configuración de puntos coplanares pertenecientes al plano \$D\$. Los planos perpendiculares que pasan por los puntos \$H_{x1}\$ y \$H_{x2}\$ se intersectan en un recta que pasa por el punto \$Q\$. Se puede ver que si hubiera un \$4^{to}\$ punto, el plano perpendicular correspondiente haría aparecer 2 rectas paralelas. Tomado de: [29].

en dos líneas paralelas por lo tanto hay infinitas soluciones para el vector \$\mathbf{I}\$. En este caso el sistema de ecuaciones en 9.9 queda de rango 2. El vector solución que se obtiene al realizar la pseudo inversa de \$\mathbf{A}\$ es el que está a menor distancia de los planos, en la Figura 9.2 es el vector \$\mathbf{I}_0\$. Esta solución no es la solución al problema de los vectores de rotación, las soluciones se pueden expresar como

$$\begin{aligned}\mathbf{I} &= \mathbf{I}_0 + \lambda \mathbf{u} \\ \mathbf{J} &= \mathbf{J}_0 + \mu \mathbf{u}\end{aligned}\tag{9.13}$$

donde \$\mathbf{u}\$ es un versor perpendicular al plano de los puntos, \$\mathbf{J}_0\$ se calcula de manera análoga a \$\mathbf{I}_0\$ y \$\lambda\$ y \$\mu\$ son las coordenadas de \$\mathbf{I}\$ y \$\mathbf{J}\$ según el versor \$\mathbf{u}\$. Para encontrar las soluciones hay que calcular el versor \$\mathbf{u}\$ y los valores de \$\lambda\$ y \$\mu\$.

Como el vector \$\mathbf{u}\$ es perpendicular al plano de los puntos característicos se cumple \$M_0M_i \cdot \mathbf{u} = 0\$, se puede hallar entonces como la base del núcleo de la matriz \$\mathbf{A}\$. En la práctica este vector se halla a partir de la descomposición SVD de la matriz \$\mathbf{A}\$. La descomposición en valores singulares de la matriz \$\mathbf{A}\$ queda:

$$\mathbf{A} = \mathbf{U}\Sigma\mathbf{V}^T\tag{9.14}$$

donde \$\mathbf{U} \in \mathbb{R}^{n \times n}\$ es ortogonal, \$\Sigma \in \mathbb{R}^{n \times 3}\$ es diagonal, con los valores singulares en la diagonal y \$\mathbf{V} \in \mathbb{R}^{3 \times 3}\$ es ortogonal. Como la matriz \$\mathbf{A}\$ es de rango 2, los dos primeros vectores columna de la matriz \$\mathbf{V}\$ corresponden a la base de todos los puntos que pertenecen al plano del modelo, mientras que el último vector de \$\mathbf{V}\$ es la base del núcleo de \$\mathbf{A}\$, o sea el vector \$\mathbf{u}\$. El cálculo \$\mathbf{u}\$ se realiza junto al cálculo de la matriz \$\mathbf{B}\$, ya que para ambos es necesario hacer la descomposición SVD de \$\mathbf{A}\$.

Para calcular los valores de \$\lambda\$ y \$\mu\$ se utilizan las condiciones de que \$\mathbf{I}\$ y \$\mathbf{J}\$ tienen que ser perpendiculares entre sí y del mismo largo. Como tienen que ser perpendiculares se tiene que

$$\mathbf{I} \cdot \mathbf{J} = (\mathbf{I}_0 + \lambda \mathbf{u}) \cdot (\mathbf{J}_0 + \mu \mathbf{u}) = 0$$

entonces se tiene que

$$\lambda\mu = -\mathbf{I}_0 \cdot \mathbf{J}_0\tag{9.15}$$

Como tienen que ser del mismo largo se tiene que

$$(\mathbf{I}_0 + \lambda \mathbf{u}) \cdot (\mathbf{I}_0 + \lambda \mathbf{u}) = (\mathbf{J}_0 + \mu \mathbf{u}) \cdot (\mathbf{J}_0 + \mu \mathbf{u}) \Leftrightarrow \lambda^2 - \mu^2 = \mathbf{J}_0^2 - \mathbf{I}_0^2\tag{9.16}$$

Se define el número complejo $C = \lambda + i\mu$, si se eleva al cuadrado queda $C^2 = \lambda^2 - \mu^2 + i\lambda\mu$. Utilizando 9.15 y 9.16 se llega a que

$$C^2 = \mathbf{J}_0^2 - \mathbf{I}_0^2 - 2i\mathbf{I}_0 \cdot \mathbf{J}_0 \quad (9.17)$$

por lo que λ y μ pueden calcularse como las partes real e imaginaria del complejo C^2 . Para hallar la raíces de C^2 , se expresa en forma polar:

$$\begin{aligned} C^2 &= [R, \Theta], \text{ donde} \\ R &= \left((\mathbf{J}_0^2 - \mathbf{I}_0^2)^2 + 4(\mathbf{I}_0 \cdot \mathbf{J}_0)^2 \right)^{1/2} \\ \Theta &= \arctan \left(\frac{-2\mathbf{I}_0 \cdot \mathbf{J}_0}{\mathbf{J}_0^2 - \mathbf{I}_0^2} \right), \text{ si } \mathbf{J}_0^2 - \mathbf{I}_0^2 > 0, \text{ y} \\ \Theta &= \arctan \left(\frac{-2\mathbf{I}_0 \cdot \mathbf{J}_0}{\mathbf{J}_0^2 - \mathbf{I}_0^2} \right) + \pi, \text{ si } \mathbf{J}_0^2 - \mathbf{I}_0^2 < 0 \\ \text{si } \mathbf{J}_0^2 - \mathbf{I}_0^2 = 0 \text{ se toma } \Theta &= -\text{sg}(\mathbf{I}_0 \cdot \mathbf{J}_0) \frac{\pi}{2}, \text{ y } R = |2\mathbf{I}_0 \cdot \mathbf{J}_0| \end{aligned}$$

Se obtienen 2 raíces, $C = [\rho, \theta]$, y $C = [\rho, \theta + \pi]$, donde

$$\rho = \sqrt{R}, \text{ y } \theta = \frac{\Theta}{2}$$

como se mencionó anteriormente λ y μ son las partes real e imaginaria de C , por lo tanto

$$\lambda_1 = \rho \cos \theta, \quad \mu_1 = \rho \sin \theta \quad (9.18a)$$

$$\lambda_2 = -\rho \cos \theta, \quad \mu_2 = -\rho \sin \theta \quad (9.18b)$$

Esto quiere decir que se obtienen dos soluciones para \mathbf{I} y \mathbf{J}

$$\mathbf{I}_1 = \mathbf{I}_0 + \rho \cos \theta \mathbf{u}, \quad \mathbf{J}_1 = \mathbf{J}_0 + \rho \sin \theta \mathbf{u} \quad (9.19a)$$

$$\mathbf{I}_2 = \mathbf{I}_0 - \rho \cos \theta \mathbf{u}, \quad \mathbf{J}_2 = \mathbf{J}_0 - \rho \sin \theta \mathbf{u} \quad (9.19b)$$

Como el vector \mathbf{u} es perpendicular al plano del objeto, la solución encontrada en 9.19a es simétrica a 9.19b. Desde el punto de vista de la cámara, se puede ver que las dos posibles soluciones son aquellas que tienen la misma proyección SOP, este comportamiento se puede ver en la Figura 9.3.

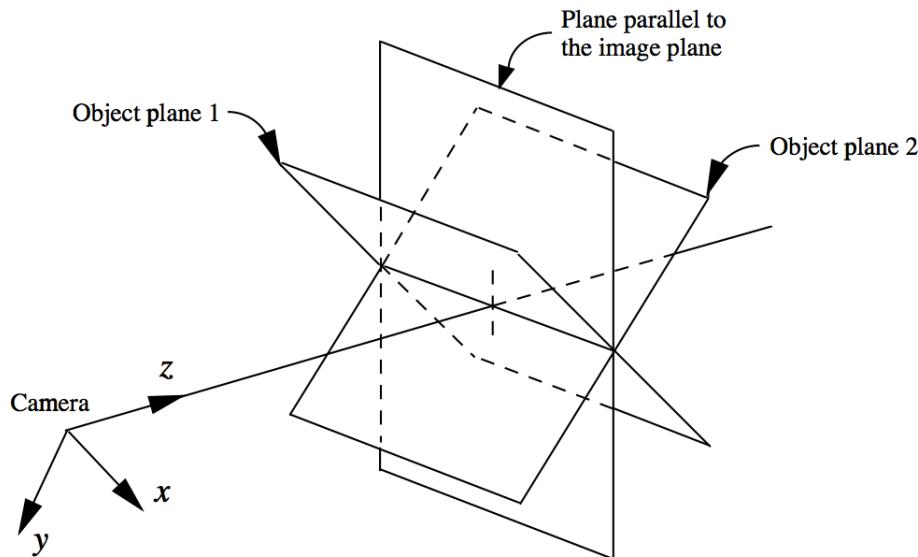


Figura 9.3: Dos objetos dando la misma proyección SOP. Fuente: [29].

Por lo tanto se toman las soluciones $(\mathbf{I}_1, \mathbf{J}_1)$ y $(\mathbf{I}_2, \mathbf{J}_2)$ y se calculan las poses. Como las dos poses son simétricas respecto a un plano paralelo al plano imagen, puede pasar que una pose dé una solución en la que los los puntos del objeto queden ubicados detrás de la cámara. Por lo tanto previo a dar las dos soluciones como válidas hay que verificar esto.

En el caso en que las dos soluciones sean válidas para todas las iteraciones, el número de poses posibles sería 2^n a lo largo de n iteraciones. En la práctica se manejan menos soluciones posibles. Se diferencian dos casos:

- Si se tiene que sólo una de las dos primeras poses calculadas es válida, en las siguientes iteraciones se da mismo comportamiento, por lo que hay solo un camino a seguir. Figura 9.4(a).
- Si se tiene que las dos primeras poses calculadas son válidas, se abren dos posibles ramas. En la segunda iteración cada rama da lugar a dos nuevas poses, pero en este caso se toma la pose que da menor error de reproyección. Figura 9.4(b).

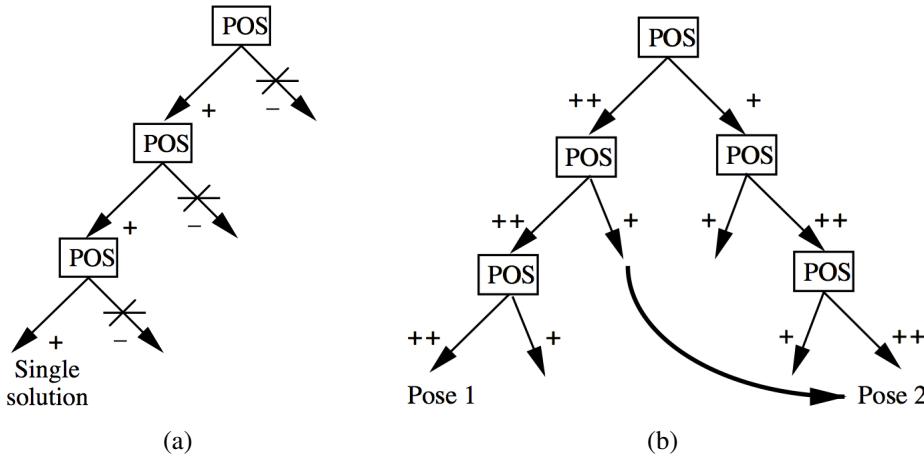


Figura 9.4: (a):Caso en el que solo una pose de las dos iniciales es coherente, también en las siguientes iteraciones solo una de las dos poses es posible, se tiene un única solución. (b): Caso en el que en cada paso hay dos posibilidades, se opta por la mejor pose(++) mejor pose, + peor pose) en cada rama. Tomado de: [29].

9.3. SoftPOSIT

Hasta aquí se vio el algoritmo POSIT que permite obtener la pose de un modelo respecto a la cámara para el caso en que se tienen correspondencias entre puntos del modelo y puntos característicos en la imagen. Como se vio en el Capítulo 5 obtener correspondencias entre puntos detectados en una imagen y el modelo real puede ser complicado. Por este motivo se estudió el algoritmo Soft-POSIT desarrollado por DeMenthon et al. en [8]. Este algoritmo recibe como entrada los puntos del modelo 3D, una lista de puntos detectados en la imagen para los cuales no se sabe como se relacionan con los puntos del modelo y una pose inicial para realizar la búsqueda. Utiliza un método llamado *softassign* [77] para resolver las correspondencias y luego que tiene las correspondencias utiliza una versión modificada de POSIT.

9.3.1. Modern POSIT

Como se mencionó anteriormente, SoftPOSIT utiliza una versión modificada de POSIT llamada Modern POSIT. POSIT clásico requiere que se conozca cual es el punto de referencia en el modelo y en la imagen, ya que de estos datos se calcula el vector de traslación. Para el caso de SoftPOSIT no es posible saber de antemano cual es el punto de referencia del modelo ya que no se tienen las correspondencias. Modern POSIT calcula la pose, sabiendo las correspondencias, pero sin utilizar ningún punto en particular como referencia.

El punto M_0 origen del sistema de coordenadas del objeto no es conocido, por lo tanto tampoco se conoce su correspondiente m_0 en el plano imagen. En la Ecuación 9.8 que se presentó en la Sección 9.2.4 se conocían las coordenadas del punto m_0 , por lo que las incógnitas de esta ecuación eran solamente los vectores \mathbf{i}, \mathbf{j} .

$$\begin{aligned} M_0M_i \cdot \mathbf{I} &= x'_i - x_0 \\ M_0M_j \cdot \mathbf{J} &= y'_i - y_0 \end{aligned}$$

En este caso no se conocen las coordenadas de m_0 , por lo que también hace falta calcularlas para obtener el vector de traslación. Sabiendo que

$$\begin{aligned} X_0 &= x_0/s \\ Y_0 &= y_0/s \end{aligned}$$

se puede reescribir la Ecuación 9.8 como

$$\begin{aligned} x'_i &= M_0M_i \cdot s\mathbf{i} + sX_0 \\ y'_i &= M_0M_j \cdot s\mathbf{j} + sY_0 \end{aligned} \tag{9.20}$$

El sistema a resolver queda

$$\mathbf{A} \cdot \begin{bmatrix} \mathbf{I} & \mathbf{J} \\ sX_0 & sY_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x' & y' \end{bmatrix} \tag{9.21}$$

donde la matriz \mathbf{A} son los puntos del modelo 3D en coordenadas homogéneas. Este sistema se puede resolver utilizando mínimos cuadrados, como se vio en la Sección 9.2.4.

Sin embargo se propone un método que busca minimizar la distancia al cuadrado entre las proyecciones SOP de los puntos M_i y las proyecciones SOP calculadas en cada iteración. En la Figura 9.5 se puede ver geométricamente cual es la distancia que se busca minimizar.

En el término de la derecha de la Ecuación 9.20 se tiene la proyección SOP de M_i , p_i . Las coordenadas de este punto son

$$p_i = s(M_0M_i \cdot \mathbf{i} + X_0, M_0M_i \cdot \mathbf{j} + Y_0).$$

Por otro lado, en el término de la izquierda de 9.20 se tienen las coordenadas del punto p'_i

$$p'_i = (1 + \varepsilon_i)(x_i, y_i).$$

que es la proyección SOP de la intersección de la línea de vista del punto m_i con el plano G'' , esto esta demostrado en [8]. La pose encontrada es correcta cuando ambos lados de la Ecuación 9.20 son iguales. Por lo tanto la ecuación que se busca minimizar es la siguiente:

$$E = \sum_i \left((\mathbf{Q}_1 \cdot M_0M_i - (1 + \varepsilon_i)x_i)^2 + (\mathbf{Q}_2 \cdot M_0M_i - (1 + \varepsilon_i)y_i)^2 \right) \tag{9.22}$$

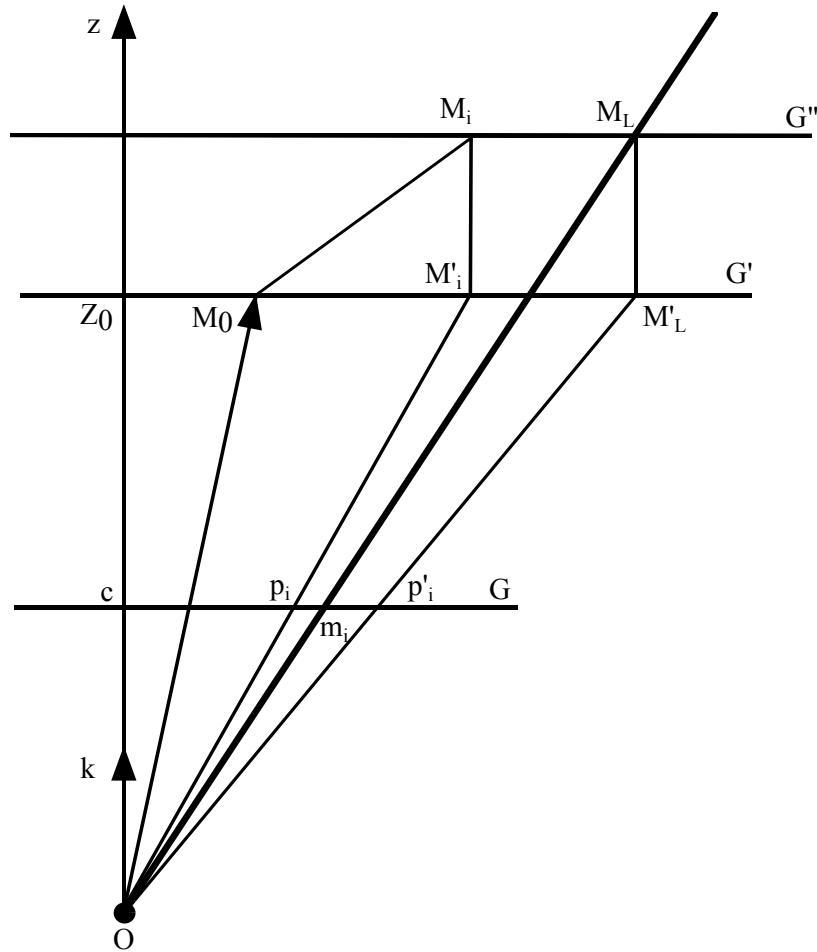


Figura 9.5: Interpretación geométrica de POSIT. El punto p_i es la proyección SOP de M_i que es el término de la derecha de la Ecuación 9.20. El punto p'_i es la proyección SOP de M_L , ubicado en la línea de vista de m_i , corresponde al término de la izquierda de la Ecuación 9.20. Para que la ecuación se satisfaga se tiene que cumplir que p_i y p'_i sean iguales. Fuente: [8].

donde

$$\begin{aligned}\mathbf{Q}_1 &= s(i, X_0) \\ \mathbf{Q}_2 &= s(j, Y_0)\end{aligned}\tag{9.23}$$

y M_0M_i se toma en coordenadas homogéneas.

Los vectores \mathbf{Q}_1 y \mathbf{Q}_2 son aquellos que minimizan el valor E , por lo tanto se despejan de derivar la expresión de E e igualarla a cero. La expresión para calcular \mathbf{Q}_1 y \mathbf{Q}_2 queda:

$$\mathbf{Q}_1 = \left(\sum_i M_0 M_i^T M_0 M_i \right)^{-1} \left(\sum_i (1 + \varepsilon_i) x_i M_0 M_i \right) \tag{9.24}$$

$$\mathbf{Q}_2 = \left(\sum_i M_0 M_i^T M_0 M_i \right)^{-1} \left(\sum_i (1 + \varepsilon_i) y_i M_0 M_i \right) \tag{9.25}$$

La matriz $L = (\sum_i M_0 M_i^T M_0 M_i)$ es una matriz 4×4 y como sólo depende de los puntos del modelo puede ser calculada previamente.

Para calcular la pose se procede como sigue:

- (1) Se calculan los vectores \mathbf{Q}_1 y \mathbf{Q}_2 asumiendo que se conocen los valores de ε_i , para el paso inicial se supone que $\varepsilon_i = 0$.
- (2) Con los vectores \mathbf{Q}_1 y \mathbf{Q}_2 calculados se calculan los ε_i corregidos.

Cuando E es menor a determinado umbral el algoritmo se detiene y se obtiene la pose.

9.3.2. Cálculo de pose sin correspondencias

Se tienen N puntos detectados en la imagen y M puntos en el modelo. Cuando no se conocen las correspondencias cada punto detectado m_j es candidato a corresponderse con cualquier punto del modelo M_i . La distancia que se busca minimizar es

$$d_{ji}^2 = (\mathbf{Q}_1 \cdot M_i M_0 - (1 + \varepsilon_i) x_j)^2 + (\mathbf{Q}_2 \cdot M_i M_0 - (1 + \varepsilon_i) y_j)^2$$

Se puede ver que para cada punto de modelo hay N candidatos, la distancia d_{ji}^2 da una idea de que tan cerca esta de ser el correspondiente. Para resolver el problema de estimar la pose y las correspondencias simultáneamente se busca minimizar la siguiente función:

$$\begin{aligned} E &= \sum_{j=1}^N \sum_{i=1}^M a_{ji} (d_{ji}^2 - \alpha) \\ &= \sum_{j=1}^N \sum_{i=1}^M a_{ji} \left((\mathbf{Q}_1 \cdot M_0 M_i - (1 + \varepsilon_i) x_j)^2 + (\mathbf{Q}_2 \cdot M_0 M_i - (1 + \varepsilon_i) y_j)^2 - \alpha \right) \end{aligned} \quad (9.26)$$

donde a_{ji} son pesos para cada una de las distancias d_{ji}^2 . Los pesos a_{ji} forman lo que se llama matriz de asignación, en esta matriz se puede ver el grado de correspondencia de cualquier punto detectado con cualquier punto del modelo. El valor α es la tolerancia que se le da a la medida de distancia.

Las expresiones para los vectores \mathbf{Q}_1 y \mathbf{Q}_2 se modifican

$$\mathbf{Q}_1 = \left(\sum_{i=1}^M a'_i M_0 M_i^T M_0 M_i \right)^{-1} \left(\sum_{j=1}^N \sum_{i=1}^M a_{ji} (1 + \varepsilon_i) x_j M_0 M_i \right) \quad (9.27)$$

$$\mathbf{Q}_2 = \left(\sum_{i=1}^M a'_i M_0 M_i^T M_0 M_i \right)^{-1} \left(\sum_{j=1}^N \sum_{i=1}^M a_{ji} (1 + \varepsilon_i) y_j M_0 M_i \right) \quad (9.28)$$

donde $a'_i = \sum_{j=1}^N a_{ji}$. El término $L = \sum_{i=1}^M a'_i M_0 M_i^T M_0 M_i$ es una matriz 4×4 , para este caso L no se puede calcular previamente porque la matriz de asignación cambia en cada iteración.

Para minimizar E se procede como sigue:

- (1) Se calculan las variables de la matriz de asignación asumiendo todo lo demás conocido.
- (2) Se calculan los vectores \mathbf{Q}_1 y \mathbf{Q}_2 asumiendo que se conocen los valores de ε_i . Para el paso inicial se supone que $\varepsilon_i = 0$.
- (3) Con los vectores \mathbf{Q}_1 y \mathbf{Q}_2 calculados se calculan los ε_i corregidos.

Esto se repite hasta que la pose converge.

Este algoritmo realiza la búsqueda a partir de una pose inicial. La función de costo que se busca minimizar, presentada en la Ecuación 9.26, presenta mínimos locales. La técnica de *softassign*

suaviza esta función de costo por lo que muchos mínimos locales se evitan. Sin embargo no siempre es posible suavizar la función de costo hasta tener un solo el mínimo global, y mucho suavizado hacer que se pierda el mínimo global. Es importante entonces contar con una buena pose inicial para que el resultado sea el correcto. Otro enfoque que se presenta en [8] es el de correr el algoritmo varias veces con poses iniciales aleatorias y llegar así al mínimo global.

9.3.3. Matriz de asignación

Se busca tener una matriz a que indique las correspondencias entre los N puntos detectados y los M puntos en del modelo y además minimice E . La matriz de asignación tiene las siguientes características:

- Tiene $N+1$ filas y $M+1$ columnas.
- $a_{ji} \in [0, 1]$. Si $a_{ji} = 1$ quiere decir que el punto detectado m_j se corresponde con el punto del modelo M_i .
- La fila $N+1$ y la columna $M+1$ se utilizan para ver si hay alguna correspondencia en esa fila o columna. Por ejemplo si el elemento j de la columna $M+1$ es 1, significa que el punto detectado m_j no se corresponde con ningún punto del modelo.
- La suma de los elementos a lo largo de cualquier fila o columna es siempre 1.

Para obtener una matriz a que cumpla con las características mencionadas se utiliza una técnica llamada *softassign*. Se comienza con una matriz a^0 en la que los elementos están dados por

$$a_{ji}^0 = e^{-\beta(d_{ji}^2 - \alpha)}$$

en donde β es una constante muy pequeña y la fila $N+1$ y la columna $M+1$ son inicializadas con constantes pequeñas. Luego se itera utilizando los siguientes pasos hasta obtener la matriz a .

- (1) Se normaliza cada fila y columna por la suma de los elementos de esa fila o columna respectivamente hasta que $\|a^i - a^{i-1}\|$ sea pequeño. La matriz resultante cumple que todas las filas y columnas suman 1.
- (2) Se incrementa el valor de β a medida que se itera. A medida que se agranda β cada fila y columna de a^0 es renormalizada, los términos a_{ji}^0 correspondientes a las d_{ji}^2 convergen a 1, mientras que los demás convergen a 0.

Al final del algoritmo se observa que la matriz a está muy cerca de ser una matriz binaria indicando las correspondencias.

9.3.4. Implementación

Durante la investigación de este algoritmo se desarrollaron versiones de POSIT moderno y Soft-POSIT en C. Ambas implementaciones son autocontenido, no se necesita ninguna librería adicional para poderlas usar. Además todas las funciones están incluidas en un solo archivo. Esto es de gran valor ya que no se encontró en la web una versión de estos algoritmos que fuera del tipo *plug and play* como lo son estas.

Se implementó pero sin éxito la variante de SoftPOSIT para líneas presentada en [9]. El principal problema para llevar adelante la implementación fue la construcción de la matriz de asignación. Esta matriz de asignación indica correspondencias entre líneas en el mundo y líneas en la imagen, en el

artículo no aparece una expresión explícita de la matriz sino que se dan los pasos para construirla. Las matriz de asignación que se obtuvo a partir de la interpretación de los pasos en el artículo no dio resultados satisfactorios.

Se intentó implementar una variante de SoftPOSIT para puntos coplanares, combinando el método de *softassign* y POSIT coplanar. Esta variante no se encuentra en la bibliografía. El principal problema para llevar a cabo esta implementación fue elegir en cada iteración una de las dos poses calculadas por el POSIT coplanar. Se obtuvieron resultados prometedores pero el tiempo de desarrollo no era compatible con los tiempos del proyecto.

9.4. POSIT moderno para puntos coplanares

La implementación que se usó en la aplicación es el POSIT moderno adaptado para trabajar con puntos coplanares. Inicialmente se quiso desarrollar una versión de SoftPOSIT que trabajara con puntos coplanares, para ello previamente se desarrolló POSIT moderno coplanar a modo de prueba.

Como se vio en la Sección 9.2.5 cuando los puntos son coplanares, al resolver el sistema 9.9 se obtienen las proyecciones de los vectores \mathbf{i} y \mathbf{j} sobre el plano del objeto. Se utilizó el enfoque de POSIT moderno para hallar las proyecciones de \mathbf{i} y \mathbf{j} sobre el plano del modelo, así como los componentes en x e y del vector de traslación. Luego aplicando lo visto en POSIT para puntos coplanares se terminó de calcular la pose.

Se definen los puntos $M_0M_i^*$ como los puntos M_0M_i sin la coordenada z , ya que la coordenada z es función de x e y . A su vez se definen los vectores \mathbf{Q}_1^* y \mathbf{Q}_2^* como los vectores \mathbf{Q}_1 y \mathbf{Q}_2 sin la componente según el eje w en el sistema de coordenadas del modelo. Teniendo esto en cuenta se tiene

$$E^* = \sum_i \left((\mathbf{Q}_1^* \cdot M_0M_i^* - (1 + \varepsilon_i)x_i)^2 + (\mathbf{Q}_2^* \cdot M_0M_i^* - (1 + \varepsilon_i)y_i)^2 \right)$$

Los vectores \mathbf{Q}_1^* y \mathbf{Q}_2^* se calculan de

$$\begin{aligned} \mathbf{Q}_1^* &= \left(\sum_{i=1}^M m'_i M_0M_i^{*T} M_0M_i^* \right)^{-1} \left(\sum_{j=1}^N \sum_{i=1}^M m_{ji} (1 + \varepsilon_i) x_j M_0M_i^* \right) \\ \mathbf{Q}_2^* &= \left(\sum_{i=1}^M m'_i M_0M_i^{*T} M_0M_i^* \right)^{-1} \left(\sum_{j=1}^N \sum_{i=1}^M m_{ji} (1 + \varepsilon_i) y_j M_0M_i^* \right) \end{aligned}$$

En este caso el término $L = \sum_{i=1}^M m'_i M_0M_i^{*T} M_0M_i^*$ es una matriz 3×3 . Una vez que se tienen los vectores \mathbf{Q}_1^* y \mathbf{Q}_2^* se procede como se vio en la Sección 9.2.5

Esta implementación de POSIT para puntos coplanares dio resultados levemente mejores que la versión obtenida de [11]. Es una variante de POSIT coplanar que no se encuentra en la bibliografía, permite obtener la pose minimizando una función de costo a diferencia de POSIT clásico que usa mínimos cuadrados.

Además desde el punto de vista de programación se mejoró en la interfaz respecto a la versión clásica. En la versión clásica se tiene varios archivos con las diferentes funciones que se necesitan, puede llegar a ser difícil entender por completo la arquitectura del algoritmo y el código está comentado en francés. En cambio en la versión implementada para este proyecto se buscó tener un solo archivo con todas las funciones y mejorar la arquitectura respecto a la versión anterior.

9.5. Resultados

Se realizó una comparación entre la implementación en C de POSIT clásico para puntos coplanares, obtenida de [11], y una versión desarrollada para esta aplicación de POSIT moderno para puntos coplanares.

En una primera instancia se utilizaron imágenes sintéticas para las cuales se cuenta con la información de la pose. Con estas poses se proyectaron los puntos del modelo sobre las imágenes y se aplicó el algoritmo para los puntos del modelo y sus proyecciones. Se buscó evaluar los algoritmos de manera aislada y no como parte del proceso completo. Este análisis ayudó a elegir el algoritmo a utilizar.

Luego se utilizaron imágenes reales capturadas con el *iPad 2* e imágenes sintéticas y se les aplicó todo el proceso. Para estas imágenes se calculó el error de reproyección entre los puntos a la entrada de POSIT y los puntos reproyectados por la pose obtenida.

9.5.1. Error en pose

En esta sección se analiza el error de estimación obtenido de las diferentes implementaciones. Se trabajó únicamente con imágenes sintéticas, para cada pose estimada se la compara con la pose utilizada para generar la imagen. Se definen dos tipos de errores: el *error de orientación* que es la diferencia entre los ángulos de la pose real y la pose estimada, y el *error de posición* es la diferencia entre la posición del centro del objeto calculado y el real. Se utilizó un conjunto de 360 imágenes. 180 imágenes simulan el marcador a 1m de distancia y se utilizan rotaciones entre $[-30^\circ, 30^\circ]$ en torno a todos los ejes, en la Figura 9.6 se pueden ver algunos ejemplos. Para las otras 180 imágenes se toman las mismas rotaciones pero la distancia al marcador es de 1.5m.

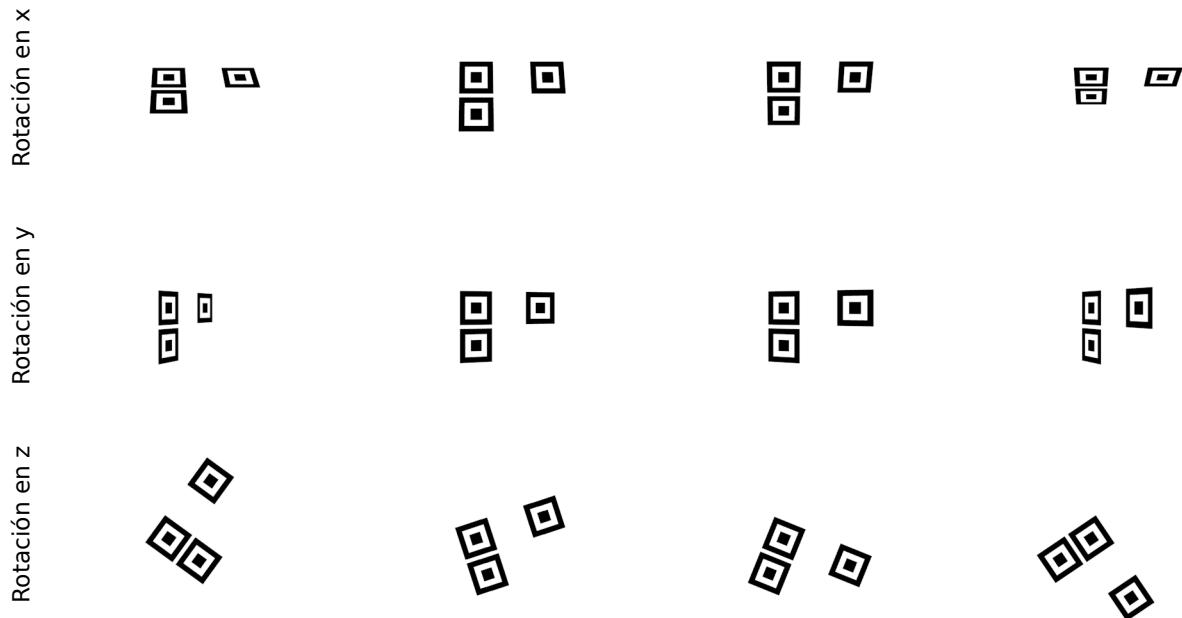


Figura 9.6: Imagen sintéticas utilizadas para calcular error en pose.

Se estudia cuál es el rango de funcionamiento de los algoritmos, es decir para qué orientaciones y posiciones el algoritmo estima la pose correctamente.

9.5.1.1. Error de orientación

En la Figura 9.7 se muestran los resultados obtenidos para el error en orientación.

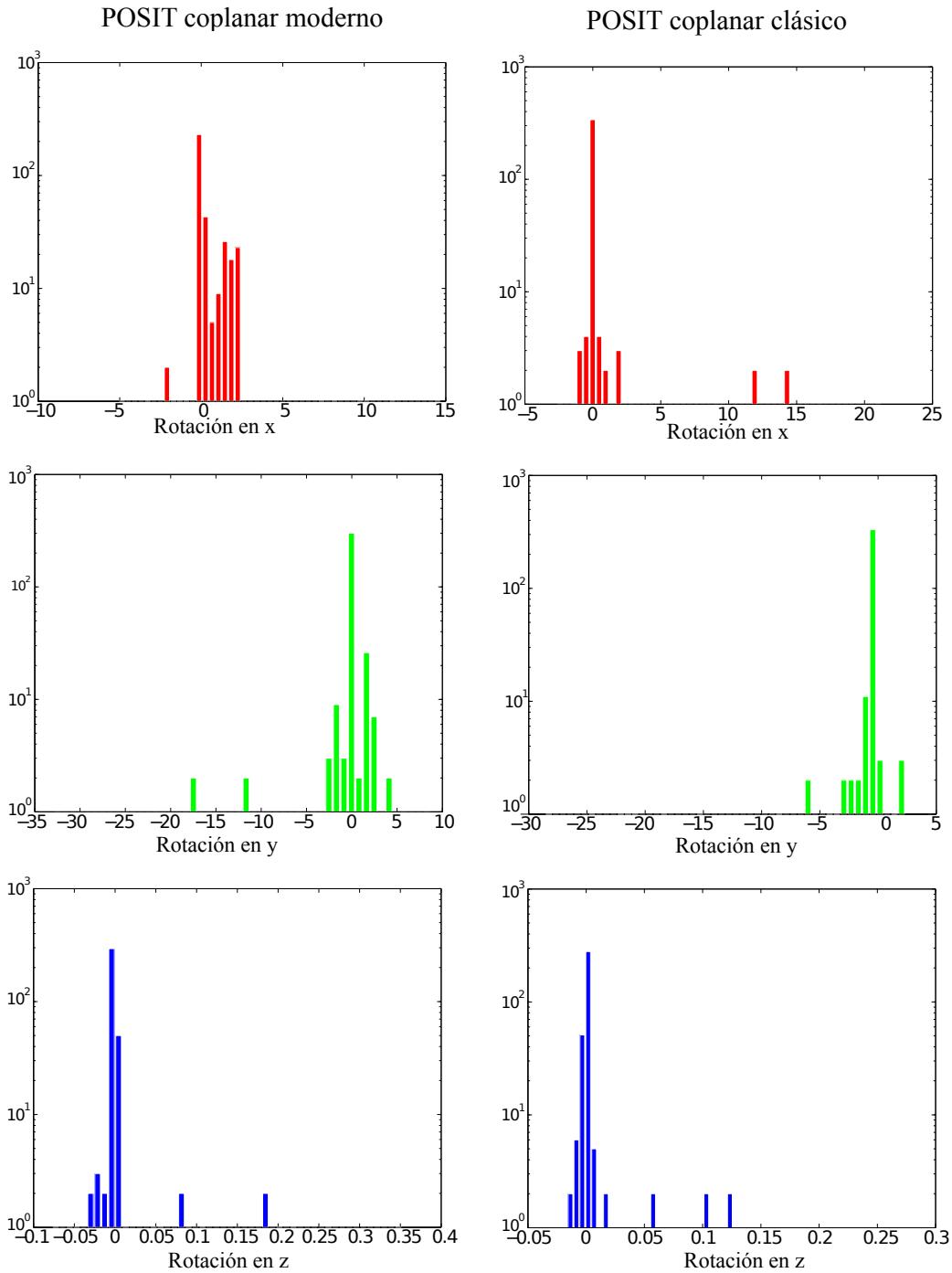


Figura 9.7: Histograma de los errores obtenidos en la orientación. La escala de las gráficas es logarítmica.

En la Figura 9.8(a) se puede ver que el algoritmo no presenta problemas para posiciones de la cámara que corresponden a imágenes del marcador muy deformadas por la perspectiva, ángulos cercanos a 90° . Este límite está dado por el filtro de correspondencias visto en 6.

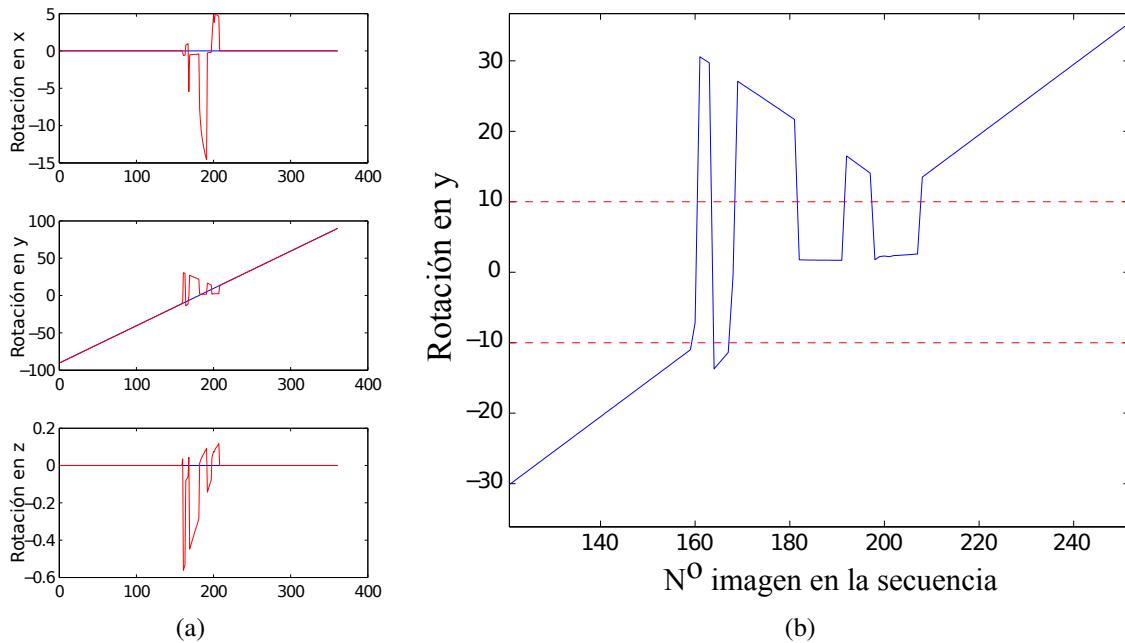


Figura 9.8: En (a) se puede ver un barrido de rotaciones respecto al eje y, solo hay error cuando el ángulo de rotación es pequeño. En (b) se puede ver más de cerca el comportamiento en torno a cero, se grafican los límites aproximados para los cuales el algoritmo presenta problemas.

9.5.1.2. Error de posición

En la Figura 9.9 se muestran los errores de posición para los diferentes ejes. Como se mencionó anteriormente se manejan distancias entre $1m$ y $1,5m$ en z , si se observan los valores máximos obtenidos de los histogramas, se nota que el mayor error es menor a $10mm$, y es justamente para la estimación de la distancia en z . Por esto se concluye que el algoritmo no presenta dificultades estimar la posición. La limitación en distancia viene dada por la etapa de detección de segmentos estudiada anteriormente..

9.5.1.3. Comportamiento global

A continuación se muestra el comportamiento de las dos variantes del algoritmo para una trayectoria representativa del movimiento que se realiza con el dispositivo. Se generaron 100 imágenes a partir de poses a las que se les sumó un ruido blanco para simular el comportamiento de una persona. Esta trayectoria se muestra resumida en la Figura 9.10

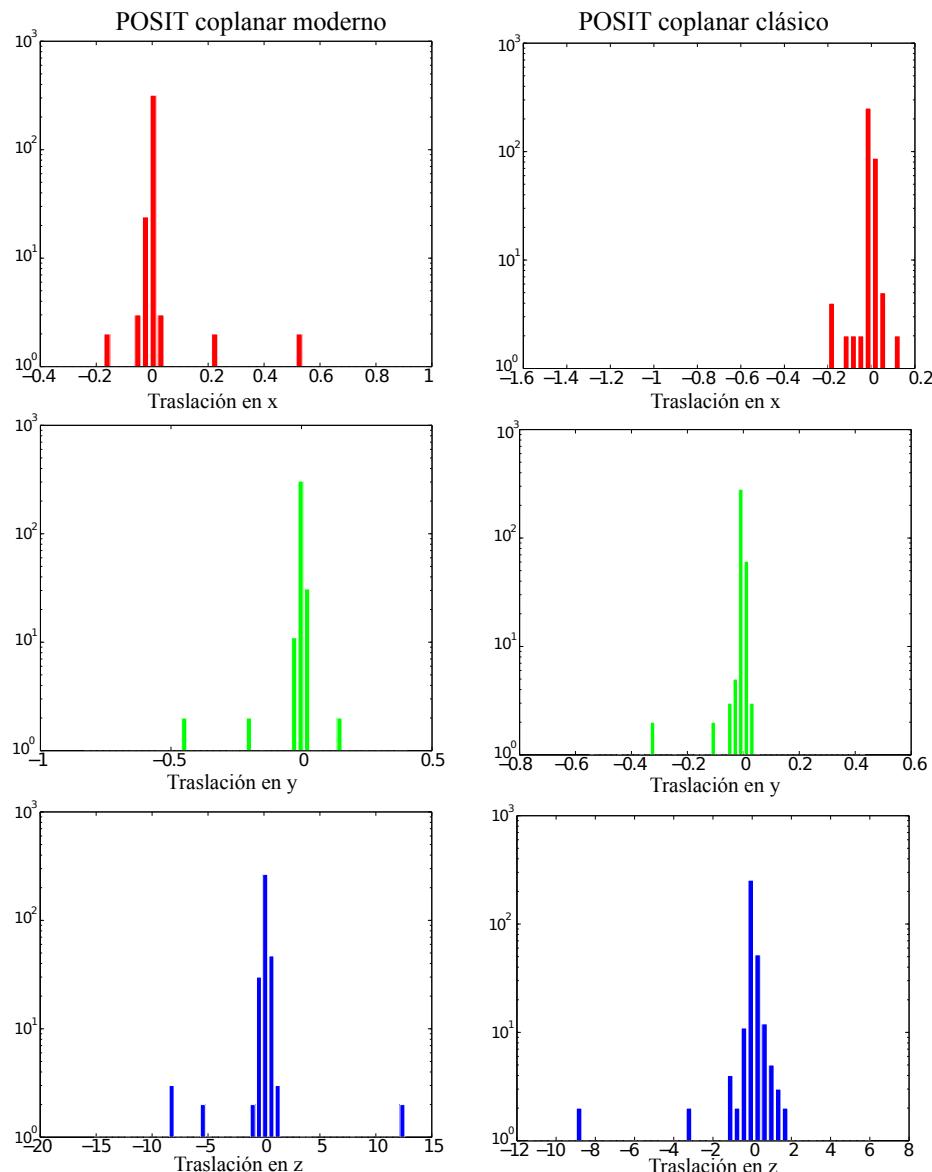


Figura 9.9: Histograma de los errores obtenidos en traslación. La escala en el de las gráficas es logarítmica.

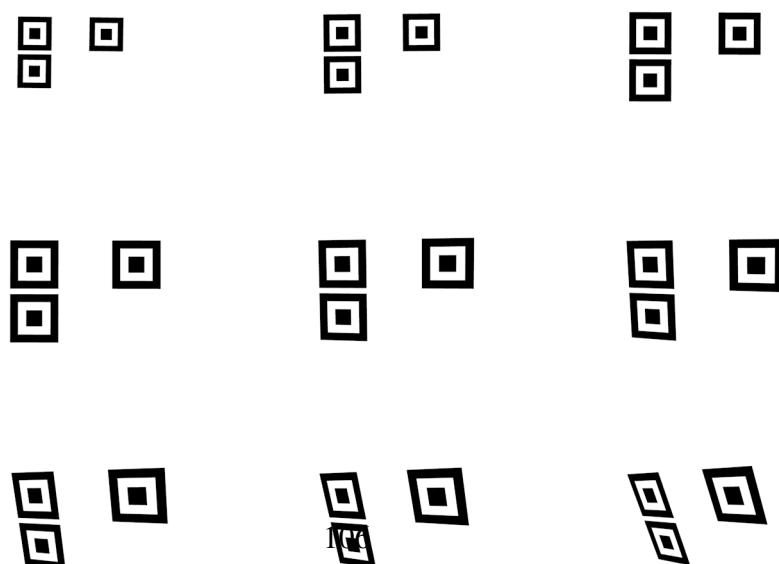


Figura 9.10: Trayectoria de prueba utilizada. Se parte de una distancia de $1.2m$ del marcador y se

La trayectoria se puede dividir en dos movimientos. El primer movimiento simula la cámara acercándose al marcador, en las Figuras 9.11 y 9.12 se puede ver cómo fallan los algoritmos. La versión moderna comete menos error. El segundo movimiento se tiene a la cámara en una posición fija y va cambiando su orientación, se puede apreciar que para este caso el error cometido en orientación es muy pequeño.

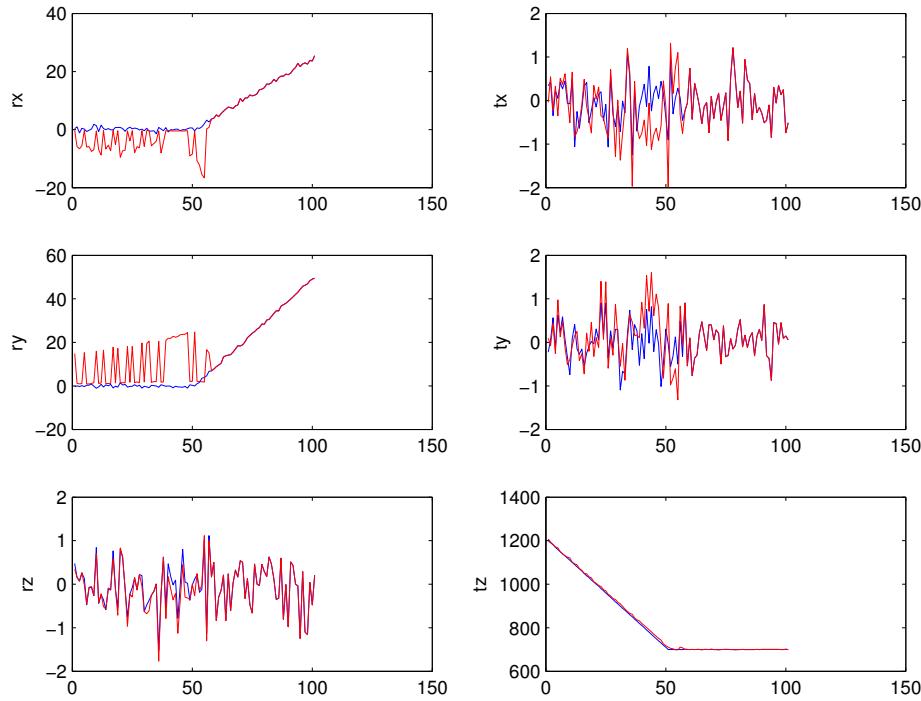


Figura 9.11: Comportamiento de POSIT coplanar moderno para la trayectoria utilizada.

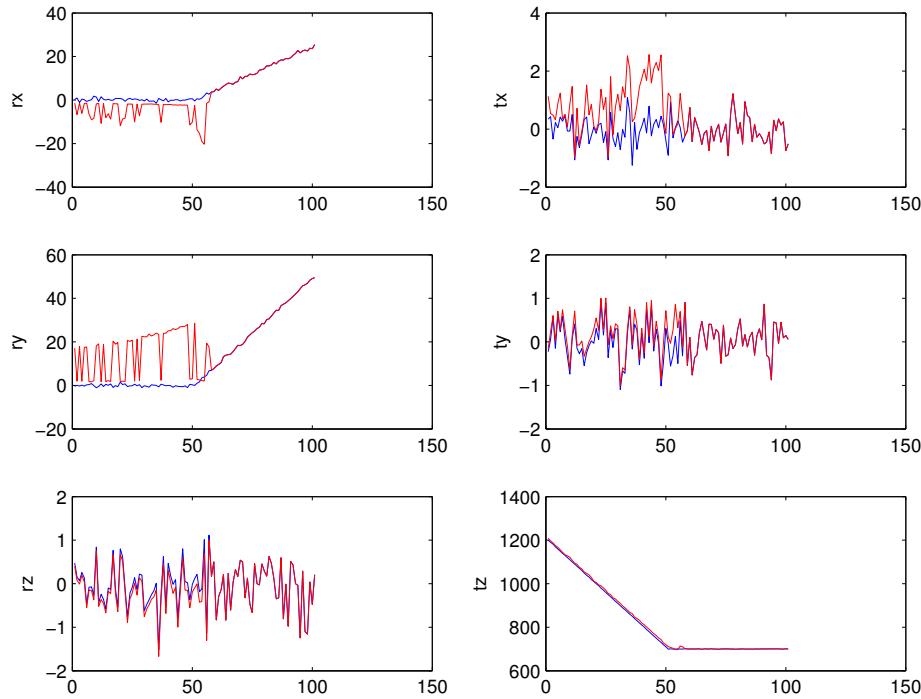


Figura 9.12: Comportamiento de POSIT coplanar clásico para la trayectoria utilizada.

	Media	Desviación estándar
POSIT coplanar moderno	1.4012	3.2910
POSIT coplanar clásico	2.4991	4.9868

Tabla 9.1: Error de reproyección

	POSIT coplanar moderno		POSIT coplanar clásico	
	Media	Desviación estandar	Media	Desviación estandar
ψ_x	2.035	3.8616	3.4011	4.7145
θ_y	-6.8797	9.483	-6.6954	10.1103
ϕ_z	0.0766	0.1248	0.0757	0.0781

Tabla 9.2: Error de orientación

En la Tabla 9.1 se puede ver el error de reproyección medio y su desviación estándar para los diferentes algoritmos. En la Tabla 9.2 se ve la media y la desviación estándar de los errores para cada eje de rotación. Si bien el comportamiento de los dos algoritmos resultó similar, la versión de POSIT coplanar moderno dio resultados levemente mejores que la versión clásica. Además en la práctica se comportó mejor por lo que esta versión es la que se utiliza en la aplicación final.

9.5.2. Error de reproyección

Se utilizaron imágenes de prueba obtenidas con el *iPad 2* e imágenes sintéticas. Para ambos grupos de imágenes se midió el error de proyección obtenido entre los puntos del modelo y los puntos detectados.

Para el caso de las imágenes de prueba del *iPad* se eligieron 9 posiciones y en cada posición se sacaron 50 fotos. Con estas 450 fotos se obtuvo la estadística del funcionamiento de los algoritmos. En la Figura 9.13 se puede ver una de las imágenes utilizadas para cada posición. También se utilizaron imágenes sintéticas en posiciones similares a las de las imágenes de prueba que se pueden ver en la Figura 9.15, se utilizaron 9 casos con 50 fotos por caso. Se partió de una posición base y se varió la posición muy poco, intentando simular el movimiento que se tuvo al sacar las fotos con el *iPad*. En total se probaron 900 imágenes.

A las imágenes se les aplica todo el proceso, se realiza la detección y filtrado de segmentos, se calculan las correspondencias y luego se estima la pose. Para cada imagen se calcula el error de proyección de cada punto, luego se promedian obteniendo una sola medida de error por imagen, esta medida es a su vez promediada con los errores obtenidos de todas las imágenes. Esto sirve para evaluar el comportamiento de los algoritmos ya que los puntos a la entrada son los mismos para las dos variantes.

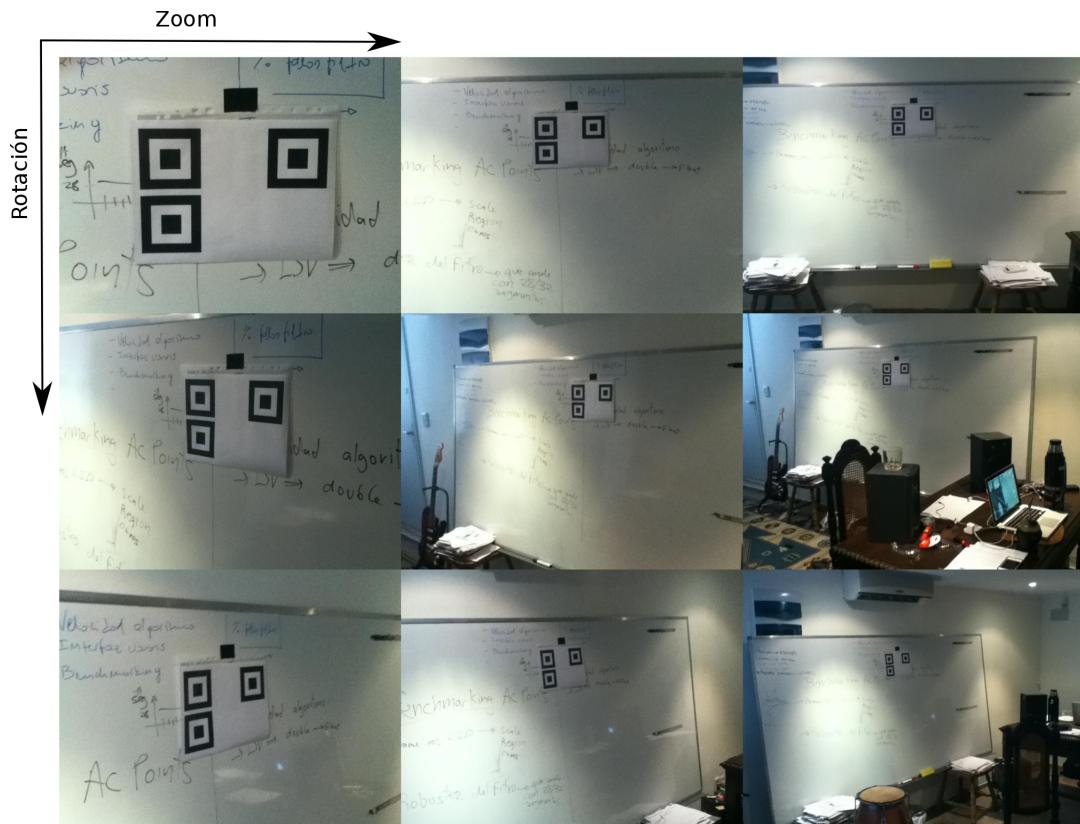


Figura 9.13: Posiciones que se utilizaron para las imágenes de prueba.

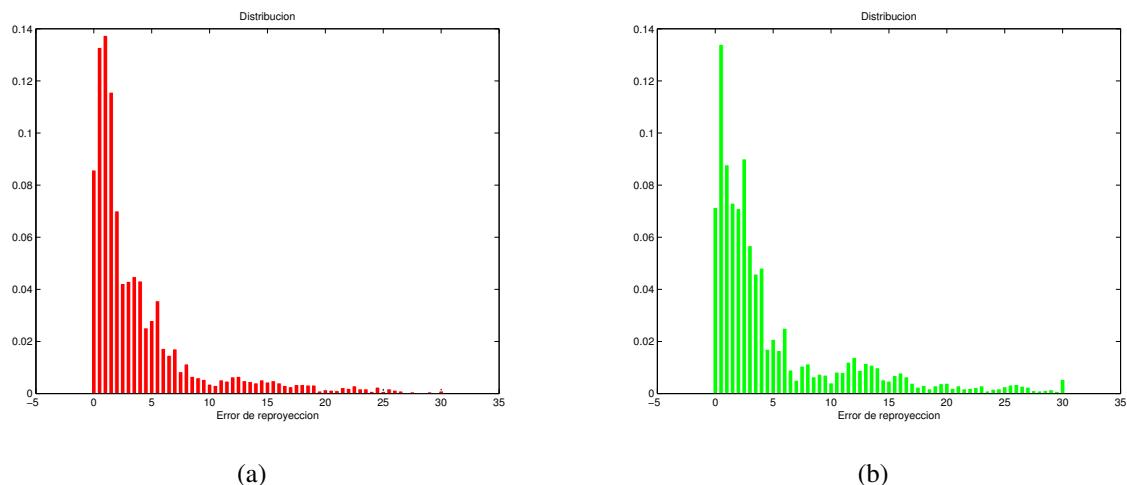


Figura 9.14: Histograma normalizado de los errores de reprojeción para POSIT para las imágenes de prueba. (a), POSIT moderno. (b), POSIT clásico

	Modern POSIT	Classic POSIT
Media	3.9684	5.1368
Desviación estándar	5.1212	6.8950

Tabla 9.3: Error de proyección de imágenes de pruebas. El error está expresado en píxeles

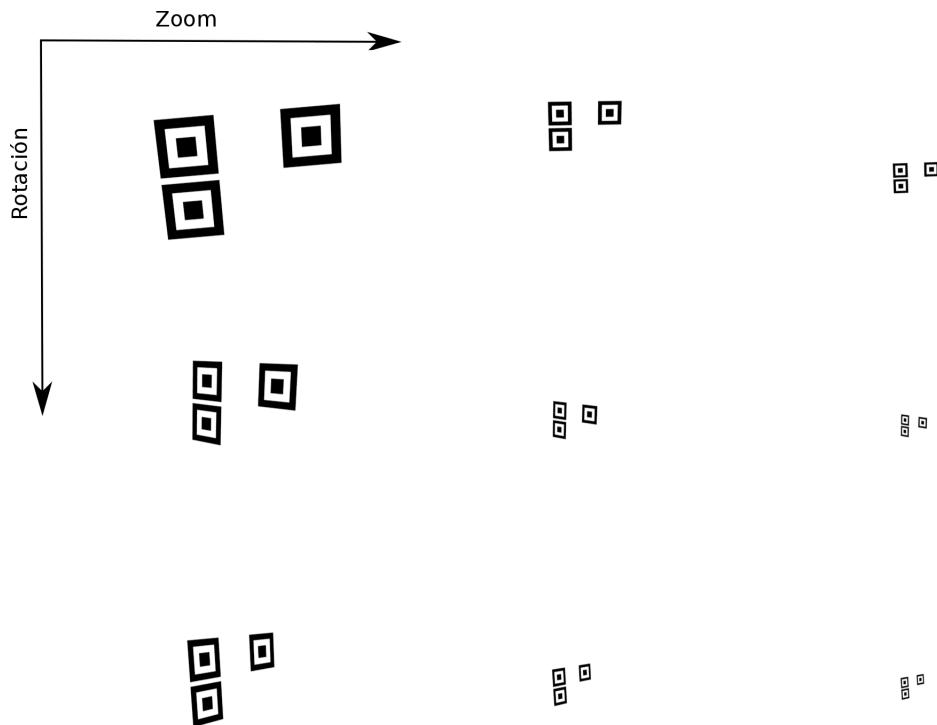


Figura 9.15: Posiciones que se utilizaron para las imágenes sintéticas

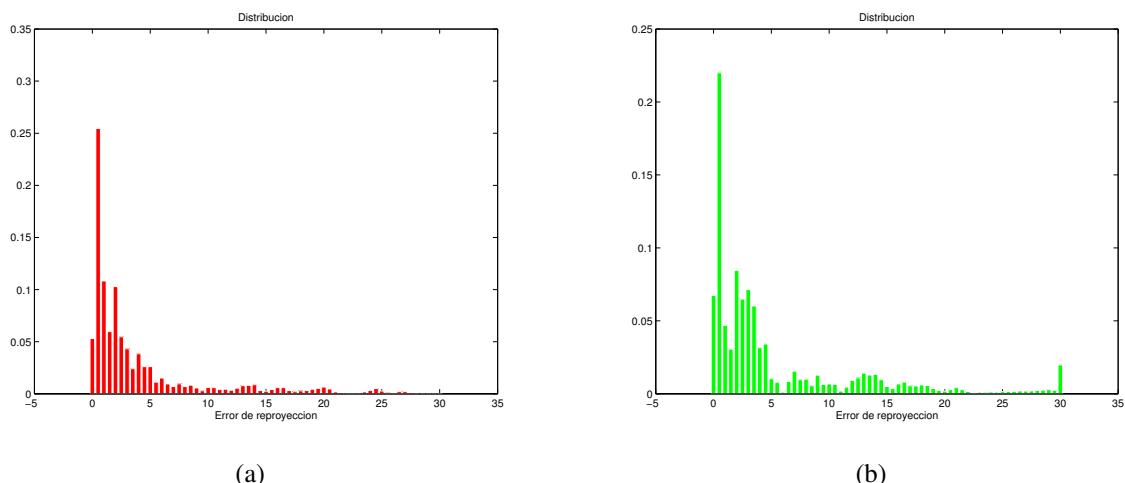


Figura 9.16: Histograma normalizado de los errores de reproyección para POSIT para las imágenes sintéticas. (a), POSIT moderno. (b), POSIT clásico

	Modern POSIT	Classic POSIT
Media	4.033	5.4942
Desviación estándar	5.6196	7.2591

Tabla 9.4: Error de proyección de imágenes sintéticas. El error está expresado en píxeles

En general se puede ver que el error de proyección y la varianza son un poco menores para el

caso de POSIT coplanar moderno. Esto justifica la elección del POSIT coplanar moderno.

9.6. Resumen

En este capítulo se presentó la teoría detrás del algoritmo POSIT. Se explicaron las diferentes versiones que se utilizaron, se vio que para marcadores coplanares hay ambigüedad en la estimación de la pose lo que genera errores. Se presentó una variante del POSIT coplanar moderno que minimiza una función de costo para estimar la pose, a diferencia de la versión clásica que resuelve la estimación utilizando mínimos cuadrados. También se explicó el algoritmo SoftPOSIT que estima las pose para conjuntos de puntos para los cuales no se saben las correspondencias. Este algoritmo requiere de una pose inicial para realizar la búsqueda.

Se realizó un estudio detallado del desempeño de las dos versiones de POSIT coplanar y se compararon los resultados obtenidos, se vio que las dos versiones funcionan de manera similar.

CAPÍTULO 10

Filtrado de Kalman para estimación de pose

10.1. Introducción

Luego de obtener la pose de la cámara para un cuadro, se procedió a evaluar el desempeño de la aplicación en tiempo real. Una de las cosas que se notó fue que había ruido en la estimación. Por ejemplo con el dispositivo quieto se puede ver que la pose varía. Si bien numéricamente no es mucha la variación, perceptivamente se nota. Es por esto que se decidió implementar un filtro de Kalman para suavizar la estimación.

Otra razón por la cual se usó el filtro de Kalman fue para realizar integración de sensores con el objetivo de mejorar la *performance*. El dispositivo cuenta con sensores iniciales y es posible obtener la variación en la orientación entre dos cuadros. Esta información se integró con la información obtenida de la pose en la etapa de POSIT mediante un filtro de Kalman.

En este capítulo se presenta el filtro de Kalman de forma genérica para luego explicar las implementaciones particulares del caso de Kalman para suavizado y Kalman para fusión de sensores.

10.2. Filtro de Kalman

Sea \mathbf{x}_k un vector de estados de dimensión n que evoluciona de acuerdo a la ecuación

$$\mathbf{x}_{k+1} = \mathbf{F}_k \mathbf{x}_k + \mathbf{w}_k \quad (10.1)$$

donde \mathbf{F}_k es la matriz de transición de estados de dimensiones $n \times n$ y \mathbf{w}_k es el vector de ruido del proceso, es de tamaño n y se modela como $\mathbf{w}_k \sim \mathcal{N}(\mathbf{0}, \mathbf{Q}_k)$ en donde \mathbf{Q}_k es la matriz de covarianza de tamaño $n \times n$ [22]. Este ruido sirve para ajustar la confianza que se le tiene al modelo utilizado. Si el modelo utilizado es bueno el ruido de proceso \mathbf{w}_k es pequeño.

Adicionalmente se tiene el vector de observaciones \mathbf{y}_k formado como

$$\mathbf{y}_k = \mathbf{H}_k \mathbf{x}_k + \mathbf{v}_k \quad (10.2)$$

donde \mathbf{y}_k es de largo m . \mathbf{H}_k es la matriz de medición, relaciona las observaciones con los estados del proceso, es de tamaño $m \times n$. \mathbf{v}_k es el vector de ruido en la medición, es de tamaño m y se modela como $\mathbf{v}_k \sim \mathcal{N}(\mathbf{0}, \mathbf{R}_k)$ siendo \mathbf{R}_k la matriz de covarianza de tamaño $m \times m$.

Se tiene entonces un proceso representado por un modelo en variables de estado que se puede expresar así:

$$\begin{cases} \mathbf{x}_{k+1} = \mathbf{F}_k \mathbf{x}_k + \mathbf{w}_k \\ \mathbf{y}_k = \mathbf{H}_k \mathbf{x}_k + \mathbf{v}_k \end{cases}$$

El estado del filtro se representa por dos variables, la estimación del estado *a posteriori* en el instante k , $\hat{\mathbf{x}}_{k|k}$, y la matriz de covarianza del error de estimación *a posteriori*, $\mathbf{P}_{k|k}$.

El filtrado parte de una condición inicial $\hat{\mathbf{x}}_{0|0}$ y $\mathbf{P}_{0|0}$. El proceso de filtrado se realiza iterativamente en dos etapas, una de predicción y una de actualización:

■ Predicción

$$\begin{aligned}\hat{\mathbf{x}}_{k|k-1} &= \mathbf{F}_k \hat{\mathbf{x}}_{k-1|k-1} \\ \mathbf{P}_{k|k-1} &= \mathbf{F}_k \mathbf{P}_{k-1|k-1} \mathbf{F}_k^T + \mathbf{Q}_k\end{aligned}$$

■ Actualización

$$\begin{aligned}\mathbf{K}_k &= \mathbf{P}_{k|k-1} \mathbf{H}_k^T [\mathbf{H}_k \mathbf{P}_{k|k-1} \mathbf{H}_k^T + \mathbf{R}_k]^{-1} \\ \hat{\mathbf{x}}_{k|k} &= \hat{\mathbf{x}}_{k|k-1} + \mathbf{K}_k [\mathbf{y}_k - \mathbf{H}_k \hat{\mathbf{x}}_{k|k-1}] \\ \mathbf{P}_{k|k} &= (\mathbf{I} - \mathbf{K}_k \mathbf{H}_k) \mathbf{P}_{k|k-1}\end{aligned}$$

10.3. Kalman para suavizado

La información que se obtiene de la etapa de estimación de pose son la orientación de la cámara expresada en ángulos de Euler y la traslación. Se busca suavizar el efecto del ruido introducido al estimar la rotación, este ruido es el que más influye en la calidad de la realidad aumentada. Los estados son por lo tanto los tres ángulos de Euler, ψ_k , θ_k y ϕ_k .

Para implementar el filtro de Kalman es necesario contar con un modelo físico que modele la evolución de los estados. Como el dispositivo es controlado por una persona, no se puede asumir nada en cuanto al movimiento que va a realizar esta persona. Por lo tanto se toma un modelo de posición constante y se asume que los movimientos que se realizan son pequeños. La matriz de evolución de estados \mathbf{F} se toma como la matriz identidad.

La matriz de covarianza del ruido de proceso \mathbf{Q} se toma como una matriz diagonal constante ya que, por cómo se definió el modelo se deduce que el ruido del proceso para cada estado es independiente.

$$\mathbf{Q} = \begin{pmatrix} \sigma_w^2 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_w^2 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_w^2 \end{pmatrix}$$

El parámetro σ_w^2 se utiliza para ajustar la respuesta del filtro.

En este caso las observaciones que se tienen son los ángulos de Euler obtenidos en la etapa de estimación de pose ψ_{Ck} , θ_{Ck} y ϕ_{Ck} . Estos tienen el mismo significado físico que los estados, por lo tanto la matriz de medición \mathbf{H} se toma como la matriz identidad.

Para calcular la matriz de covarianza del ruido de medición se tomó la estadística de alrededor de 200 imágenes sintéticas en las cuales tomó el error entre la estimación y la pose original. Con los errores de estimación para los tres ángulos se obtuvieron los datos suficientes para estimar la matriz \mathbf{R} . A partir de estos datos se obtuvo que:

$$\mathbf{R} = \begin{pmatrix} 4,962496 & 4,314506 & -0,045967 \\ 4,314506 & 7,023549 & 0,074892 \\ -0,045967 & -0,074892 & 0,001062 \end{pmatrix}$$

Con estos parámetros se implementó el filtro de Kalman para suavizado. El modelo en variables de estado queda:

$$\left\{ \begin{array}{l} \begin{pmatrix} \psi_k \\ \theta_k \\ \phi_k \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \psi_{k-1} \\ \theta_{k-1} \\ \phi_{k-1} \end{pmatrix} + \mathbf{w}_k \\ \begin{pmatrix} \psi_{Ck} \\ \theta_{Ck} \\ \phi_{Ck} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \psi_k \\ \theta_k \\ \phi_k \end{pmatrix} + \mathbf{v}_k \end{array} \right.$$

Donde \mathbf{w}_k es el vector de ruido de proceso de 3×1 cuya matriz de covarianza es \mathbf{Q} y \mathbf{v}_k es el vector de ruido de observación también de 3×1 cuya matriz de covarianza es \mathbf{R} .

10.4. Kalman con sensores

Para hacer la integración de sensores se tomaron los mismos estados, la misma matriz de evolución de estados, el mismo error de proceso y la misma matriz de covarianza \mathbf{Q} que en caso de suavizado. Como observaciones se tienen los ángulos de Euler calculados por POSIT (ψ_C, θ_C, ϕ_C) y los ángulos de Euler a la salida de los sensores inerciales (ψ_S, θ_S, ϕ_S). El modelo en variables de estado queda:

$$\left\{ \begin{array}{l} \begin{pmatrix} \psi_k \\ \theta_k \\ \phi_k \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \psi_{k-1} \\ \theta_{k-1} \\ \phi_{k-1} \end{pmatrix} + \mathbf{w}_k \\ \begin{pmatrix} \psi_{Ck} \\ \theta_{Ck} \\ \phi_{Ck} \\ \psi_{Sk} \\ \theta_{Sk} \\ \phi_{Sk} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \psi_k \\ \theta_k \\ \phi_k \end{pmatrix} + \mathbf{v}_k \end{array} \right.$$

El vector de ruido de observación \mathbf{v}_k es de 6×1 . La matriz de covarianza del error de observación es una matriz de bloques diagonal compuesta por la matriz de covarianza del error de medición de POSIT y por la matriz de covarianza del error de medición de los sensores. Se tiene entonces

$$\text{textbf}{R} = \begin{pmatrix} 4,962496 & 4,314506 & -0,045967 & 0 & 0 & 0 \\ 4,314506 & 7,023549 & 0,074892 & 0 & 0 & 0 \\ -0,045967 & -0,074892 & 0,001062 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

Es razonable tomar la matriz covarianza como diagonal ya que esto implica que el error de medición de POSIT es independiente de el de los sensores. Para los sensores no se contó con ninguna estadística que permitiera calcular la matriz de covarianza, lo que es un aspecto a mejorar.

10.5. Resultados

En esta sección se muestra el resultado de aplicar el filtro de Kalman para suavizado a la trayectoria simulada en 9.5.1.3.

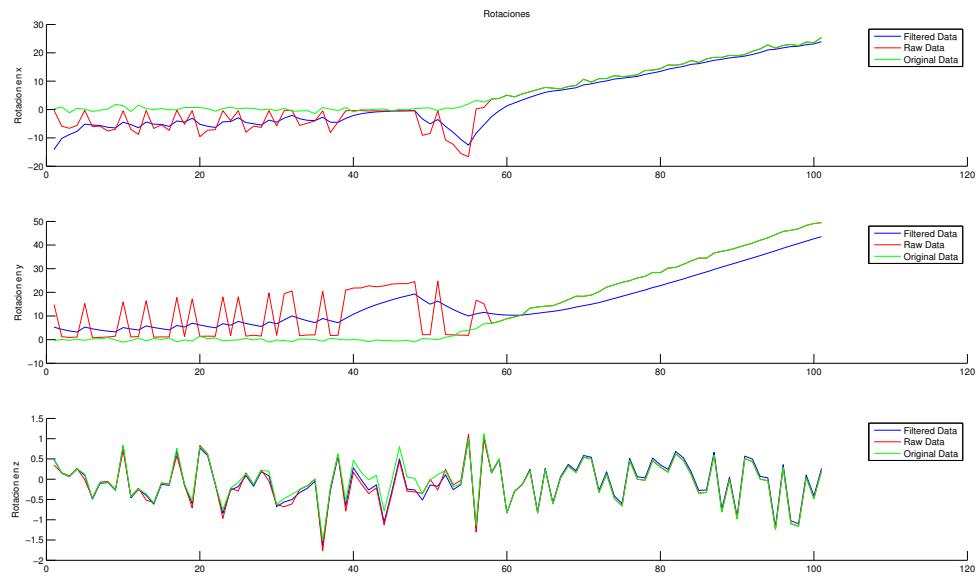


Figura 10.1: Desempeño del filtro de Kalman para trayectoria de prueba. En verde se ve la pose original, en rojo la pose estimada por POSIT y en azul la pose suavizada por Kalman.

Se puede ver que para el caso en que la cámara se acerca de frente al marcador el filtro suaviza. El parámetro que se puede variar en este filtro es la potencia del ruido de proceso (la potencia del ruido en las observaciones se calcula a partir de datos empíricos). A mayor potencia se le da menos confianza al modelo, por lo que la pose filtrada se va a parecer más a la pose estimada por POSIT y se pierde el efecto de suavizado. En cambio cuando el ruido de potencia disminuye la pose filtrada se mueve muy lento. Esto se debe a que el modelo que se utilizó es de posición constante, ante cambios bruscos el filtro reacciona de forma lenta. El valor de la potencia del ruido de proceso se ajustó utilizando el caso de uso de interactividad presentado en 12, en el que se puede variar este parámetro en tiempo real y ver como se comporta el filtro.

10.6. Resumen

En este capítulo se presentó el marco teórico para el desarrollo del filtro de Kalman. Se explicó el modelo dinámico utilizado y el motivo de su elección. Se presentaron las ecuaciones utilizadas para la integración de la orientación obtenida por POSIT y la orientación obtenida por los sensores iniciales de dispositivos. Finalmente se muestra cómo se comportó el filtro para suavizado.

CAPÍTULO 11

Rendering en iOS: ISGL3D

11.1. Introducción

Rendering es un término en inglés que denota el proceso de generar una imagen 2D a partir de un modelo digital 3D o un conjunto de ellos, a los que se les llama “escena”. Puede ser comparado con tomar una foto o filmar una escena en la vida real, en donde se tiene una cámara, luces y actores u objetos. Cada uno de estos componentes tiene su equivalente digital cuando se hace un *render*. Afortunadamente, existen varias herramientas de *rendering*, también llamadas “ motores de juego 3D”, para plataformas móviles, en especial que funcionen sobre iOS. Algunas de ellas son Unity 3D, ISGL3D, Cocos3D, Open GL ES y ShiVa3D. A continuación serán comentadas tan sólo las consideradas durante el presente proyecto por ser populares y gratuitas.

La primera en ser tomada en cuenta fue “Open Graphics Library Embedded Systems” (Open GL ES), que es un subconjunto de las herramientas de gráficos 3D de Open GL. Fue diseñada para ser utilizada sobre sistemas embebidos (dispositivos móviles, consolas de video juegos, etc.); Open GL es el estándar más ampliamente usado alrededor del mundo para la creación de gráficos 2D y 3D, es gratis y multiplataforma. Como la programación en Open GL y en particular en Open GL ES es de muy bajo nivel y por lo tanto bastante complicada, se optó por investigar otras herramientas. Se descubrió entonces ISGL3D [7] un *framework* escrito en Objective-C que trabaja sobre Open GL ES y que busca facilitar la tarea del programador al momento de crear y manipular escenas 3D mediante una “*Application Program Interface*” (API) sencilla e intuitiva. Es un proyecto gratis y en código abierto. Luego de algunas semanas de trabajo con la herramienta e importantes avances desde el punto de vista del manejo de la misma se descubrió la existencia de otro *framework* de idénticas características llamado “Cocos3D”. Cocos3D es una extensión de “Cocos2D”, una herramienta para la generación de gráficos 2D, muy popular entre los desarrolladores de aplicaciones para iOS. Como no se identificaron diferencias significativas entre ISGL3D y Cocos3D, se priorizó el tiempo dedicado a ISGL3D y se decidió continuar trabajando de forma inalterada. Al día de hoy, sobre el final del proyecto, se cree que si bien técnicamente ambos *frameworks* son muy buenos y a la vez similares entre sí, ISGL3D parece estar algo más avanzado en cuanto a su desarrollo. Sin embargo debido a la gran popularidad de Cocos2D, Cocos3D ha heredado muchos usuarios y cuenta con una comunidad mucho más activa, lo que facilita mucho su uso y hace pensar que en un futuro cercano resulte en un *framework* más desarrollado.

En este capítulo se comentarán algunas características y conceptos de ISGL3D que fueron importantes para el proyecto; por detalles de algunos temas en particular referirse a la referencia de la ya mencionada API en: www.isgl3d.com/resources/api. Además se trazará una hoja de ruta

para todo aquel que quiera iniciarse en el manejo de la herramienta.

11.2. Conceptos básicos de ISGL3D

ISGL3D es un motor de juegos 3D para *iPad*, *iPhone* y *iPod touch* escrito en *Objective-C*, que sirve para crear escenas y *renderizarlas* de forma sencilla. Es un proyecto en código abierto y gratis. En su sitio web oficial: www.isgl3d.com, se puede descargar su código, y de forma sencilla ISGL3D puede ser agregado como un complemento de *Xcode*. Además se pueden encontrar tutoriales, detalles de su API y un acceso a un grupo de *Google* donde la comunidad pregunta y responde dudas propias y ajena. Una buena manera de iniciarse en manejo de la herramienta es siguiendo los tutoriales en: www.isgl3d.com/resources/tutorials; al menos este fue el camino elegido por el grupo. Los tutoriales son 6, y abarcan distintos tópicos:

- **Tutorial 0:** primer paso en el creado de una aplicación ISGL3D. Cubre algunos conceptos básicos y muestra cómo integrar la herramienta a *Xcode*.
- **Tutorial 1:** muestra cómo crear una escena bien simple, con tan sólo un cubo en rotación continua.
- **Tutorial 2:** enseña cómo agregar luz a una escena. Se ven las distintas fuentes de luz que existen en el *framework*.
- **Tutorial 3:** se ve cómo hacer para mapear texturas en los objetos 3D con el objetivo de hacerlos más realistas.
- **Tutorial 4:** muestra cómo crear interacción entre el usuario y los distintos objetos ISGL3D, cuando este los toca a través de la pantalla.
- **Tutorial 5:** se ven algunas nuevas primitivas (modelos básicos) y se muestra cómo agregar transparencia a los objetos.

Al descargar e instalar ISGL3D, se puede ver que la herramienta incluye un proyecto *Xcode* integrado por varios ejemplos para ejecutar y a la vez ver su código, otra buena forma de aprender cómo realizar distintas tareas de interés. Entre los ejemplos se encuentra la solución a cada uno de los tutoriales.

Cuando se crea una aplicación ISGL3D, el núcleo de la misma es la llamada “view” (“vista” en Español). Una *view* está compuesta principalmente por una escena y una cámara:

- Una **escena** (*Isgl3dScene3D*) es donde los objetos o modelos 3D son agregados como nodos. Todos los nodos pueden ser tanto trasladados como rotados y pueden tener otros nodos hijos; los nodos hijos son trasladados y rotados con sus padres. Así como objetos 3D, se pueden agregar luces de distinto tipo, que generarán en la escena efectos de sombra que luego serán adecuadamente *renderizados* en función de dónde se encuentre y hacia dónde esté mirando la cámara.
- Una **cámara** que es utilizada para ver la escena desde una posición y un ángulo en particular. La cámara se manipula como cualquier otro objeto o nodo en la escena, se puede trasladar, rotar y hasta indicar hacia dónde quiere uno que esta apunte. Es importante ajustar la cámara de manera que su arquitectura sea la que uno busca. Se pueden entonces ajustar

ciertos parámetros intrínsecos a esta como por ejemplo su campo visual, su distancia focal, la altura y la anchura del plano imagen, etc.

Es importante entender que el llamado *render* se realiza sumando la información de la escena, objetos 3D y sus hijos, luces, etc.; más la información de dónde se encuentra la cámara, sus características y hacia dónde esta apunta.

11.3. FOV y ejes de ISGL3D

Una particularidad de la cámara de ISGL3D es que el parámetro intrínseco “distancia focal” visto en la sección 8.2, no es directamente configurable. En cambio, el valor que sí se puede alterar es el llamado “FOV”, acrónimo de “Field Of View”. El *field of view* de una cámara no es más que su campo visual, y se mide como la extensión angular máxima mapeable en el plano imagen, medida desde el centro óptico O. Puede ser medido de forma horizontal o de forma vertical; sin embargo, en ISGL3D es definido verticalmente. Ver figura 11.1.

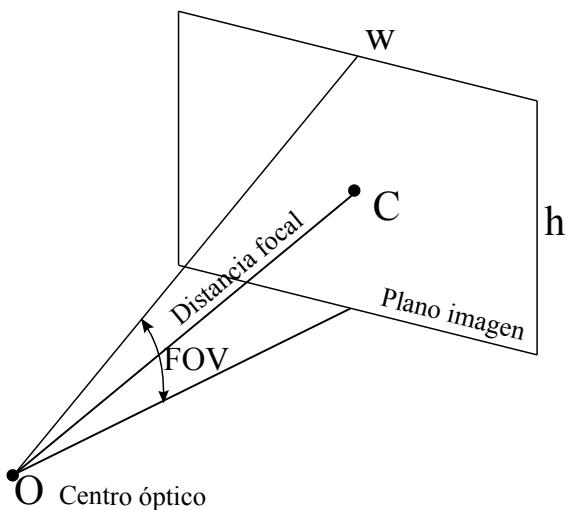


Figura 11.1: Definición gráfica del FOV.

Realizando algo de geometría se ve que la relación entre la distancia focal y el FOV es:

$$FOV = 2 \cdot \arctg \left(\frac{h}{2 \cdot f} \right)$$

donde h denota la altura del plano imagen y f la distancia focal de la cámara.

Otra particularidad de ISGL3D es el sistema de coordenadas que difiere del que se usa en algunas herramientas de modelado, como por ejemplo Blender, en las que el plano X-Y se corresponde con el plano horizontal. Para ISGL3D los ejes están orientados como en la Figura 11.2, con el origen en el centro del plano de la pantalla del dispositivo que coincide con el plano X-Y, y el eje Z saliente de la misma.

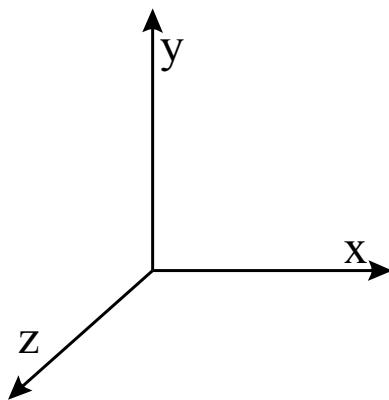


Figura 11.2: Sistema de coordenadas de ISGL3D.

11.4. Primitivas de ISGL3D

ISGL3D cuenta con algunas estructuras primitivas que pueden ser usadas como modelos, o incluso combinadas de manera de formar modelos algo más complejos. Las principales estructuras primitivas de ISGL3D son:

- **Isgl3DArrow:** modelo correspondiente a una flecha. Tiene 4 parámetros configurables:
 - *headHeight*: altura de la punta.
 - *headRadius*: radio de la punta.
 - *height*: altura total de la flecha.
 - *radius*: radio de la base.
- **Isgl3DCone:** modelo correspondiente a un cono. Tiene 3 parámetros configurables:
 - *bottomRadius*: radio de la base inferior.
 - *height*: altura del cono.
 - *topRadius*: radio de la base superior.
- **Isgl3DCube:** modelo correspondiente a un cubo. Tiene 3 parámetros configurables:
 - *depth*: profundidad del cubo.
 - *height*: altura del cubo.
 - *width*: anchura del cubo.
- **Isgl3DCylinder:** modelo correspondiente a un cilindro. Tiene 3 parámetros configurables:
 - *height*: altura del cilindro.
 - *radius*: radio del cilindro.
 - *openEnded*: indica si el cilindro cuenta con sus extremos abiertos o no.
- **Isgl3DEllipsoid:** modelo correspondiente a una elipsoide. Cuenta con 3 parámetros configurables:

- *radiusX*: radio de la elipsoide en la dirección *x*.
- *radiusY*: radio de la elipsoide en la dirección *y*.
- *radiusZ*: radio de la elipsoide en la dirección *z*.

- **Isgl3DOvoid:** modelo ovoide. Cuenta con 3 parámetros configurables:

- *a*: radio del ovoide en la dirección *x*.
- *b*: radio del ovoide en la dirección *y*.
- *k*: factor que modifica la forma de la curva. Cuando toma el valor 0, el modelo se corresponde con el de una ellipsoide.

- **Isgl3DSphere:** modelo correspondiente a una esfera. Tiene un único parámetro configurable:

- *radius*: radio de la esfera.

- **Isgl3DTorus:** modelo correspondiente a un toroide. Cuenta con 2 parámetros configurables:

- *radius*: radio desde el origen del toroide hasta el centro del tubo.
- *tubeRadius*: radio del tubo del toroide.

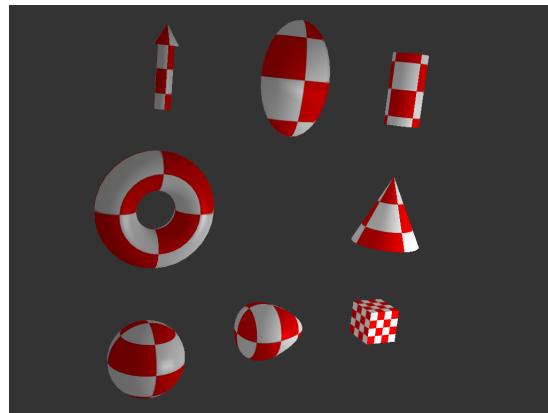


Figura 11.3: Principales primitivas en ISGL3D.

Para la creación de cada primitiva, se debe especificar además, la cantidad de segmentos que la forman en las distintas dimensiones. En la figura 11.3 se pueden ver todas las primitivas anteriores. Es fácil ver que dichas primitivas cuentan con cierta textura cuadriculada de colores rojo y blanco, que fue lograda mapeando una imagen sobre cada una de ellas. La porción de código que se usó para realizar tal mapeo se muestra a continuación:

```
Isgl3dTextureMaterial * material = [Isgl3dTextureMaterial
    materialWithTextureFile:@"red_checker.png" shininess:0.9];

Isgl3dTorus * torusMesh = [Isgl3dTorus meshWithGeometry:2 tubeRadius:1 ns:32 nt:32];

Isgl3dMeshNode * _torus = [self.scene createNodeWithMesh:torusMesh andMaterial:material];
```

En la primera línea de código se crea el material. Dicho material es del tipo *Isgl3dTextureMaterial*; y la imagen con la que este se crea es la de la figura 11.4. Luego, se crea el toroide asignándole los parámetros vistos más atrás en esta sección; y finalmente, se crea y se agrega a la escena el nodo asociado al toroide, con el material creado al principio.

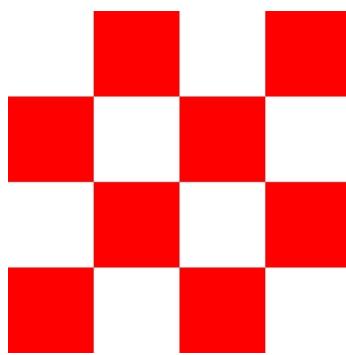


Figura 11.4: Imagen *red_checker.png*, utilizada para crear la textura asociada a las primitivas de la figura 11.3.

11.5. Importación de modelos a ISGL3D.

A veces lo que se quiere no es agregar a la escena una primitiva sino un modelo previamente creado. Los modelos son realizados en herramientas de creado y animación de gráficos 3D como por ejemplo *Blender*, *MeshLab*, *Autodesk Maya* o *Autodesk 3ds Max*. Luego deben ser exportados en un formato llamado *COLLADA*, acrónimo de “COLLAborative Design Activity”, que sirve para el intercambio de contenido digital 3D entre distintas aplicaciones de modelado. Por su parte, ISGL3D permite importar modelos pero en un formato llamado “POD”. Se usó entonces, una aplicación llamada *Collada2POD* que lo que hace es convertir modelos tridimensionales en formato *COLLADA* al formato POD. *Collada2POD* puede ser descargada gratuitamente de la página oficial de *Imagination Technologies*, su desarrollador: <http://www.imgtec.com>. No esta de más aclarar que el proceso de conversión de formatos no es algo bueno; en ocasiones se vuelve problemático y puede resultar en un modelo que no anda como uno espera.

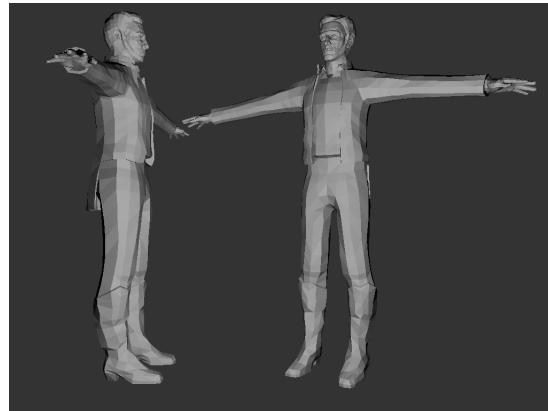


Figura 11.5: Modelo de José Artigas agregado dos veces a una misma escena, pero visto desde ángulos distintos.

Una vez que se tiene al objeto 3D en el formato requerido, este puede ser importado en ISGL3D de forma sencilla:

```
Isgl3dPODImporter * podImporter = [Isgl3dPODImporter podImporterWithFile:@“modelo.pod”];
Isgl3dNode * _model = [self.scene createNode];
```

```
[podImporter addMeshesToScene:_model];

_model.position = iv3(2, 6, 0);
```

En la primera línea de código se instancia la clase *Isgl3dPODImporter* que sirve para transformar modelos POD a objetos ISGL3D, y se le asigna a la misma el modelo “modelo.pod”. Luego, se crea un nodo llamado “_model”, al que se le asigna el modelo; y se agrega a la escena. Finalmente, se le asigna al nodo una posición. En la figura 11.5 se puede ver un modelo de José Artigas, agregando dos veces a una misma escena, pero visto desde ángulos distintos.

Si lo que se quiere es que los modelos sean animados, o lo que es lo mismo, que tengan movimiento, hay dos soluciones posibles a tomar en consideración:

- **Modelo animado:** muchas veces lo que se tiene es un modelo 3D animado desde su construcción. Estos pueden ser creados, al igual que los modelos 3D inanimados, con las herramientas para el creado y la animación de gráficos 3D antedichas. Lo que se hace es agregarle al modelo un “esqueleto” que al moverlo, le transmite a dicho modelo su movimiento. Existe mucha bibliografía al respecto, además de haber múltiples sitios en internet de donde bajar los modelos, incluso en forma gratuita. Luego de obtenido el modelo animado, lo que se tiene es precisamente al modelo, pero con una línea de tiempo con las animaciones. Nuevamente, hay que convertirlo a formato POD para ser usado en ISGL3D. El código para poder visualizar al modelo es:

```
Isgl3dPODImporter * podImporter = [Isgl3dPODImporter
    podImporterWithFile:@“animated_model.pod”];

Isgl3dSkeletonNode *_model = [self.scene createSkeletonNode];

[podImporter addMeshesToScene:_model];

Isgl3dAnimationController *_animationController = [[Isgl3dAnimationController alloc]
    initWithSkeleton:_model andNumberOfFrames:[podImporter numberOfFrames]];

[_animationController start];
```

En la primera línea de código se instancia la clase *Isgl3dPODImporter*, y se le asigna a la misma el modelo animado “animated_model.pod”. Luego, se crea y se agrega a la escena un nodo del tipo *Isgl3dSkeletonNode* llamado “_model” que contiene al modelo animado. La clase *Isgl3dSkeletonNode* provee una interfaz sencilla para animar al ahora objeto ISGL3D, que con la ayuda de la clase *Isgl3dAnimationController*, logra automatizar el movimiento del mismo. Finalmente, se instancia y configura la clase *Isgl3dAnimationController* y se le da inicio a la animación en la última línea.

- **Múltiples modelos inanimados:** otra forma de animar un modelo 3D es usando múltiples modelos inanimados. Estos pueden ser cargados en ISGL3D como un único objeto o nodo y mediante ciertas instrucciones sencillas, se le dice al *framework* que presente uno a continuación del otro, interpolando entre posiciones contiguas, lo que genera una sensación de movimiento. Este fue el método utilizado en el presente proyecto para animar al modelo de José Artigas. En la figura 11.6 se puede ver al mismo en 3 posiciones distintas.

El código para realizar la interpolación mencionada, aplicado por ejemplo a dos modelos, será:

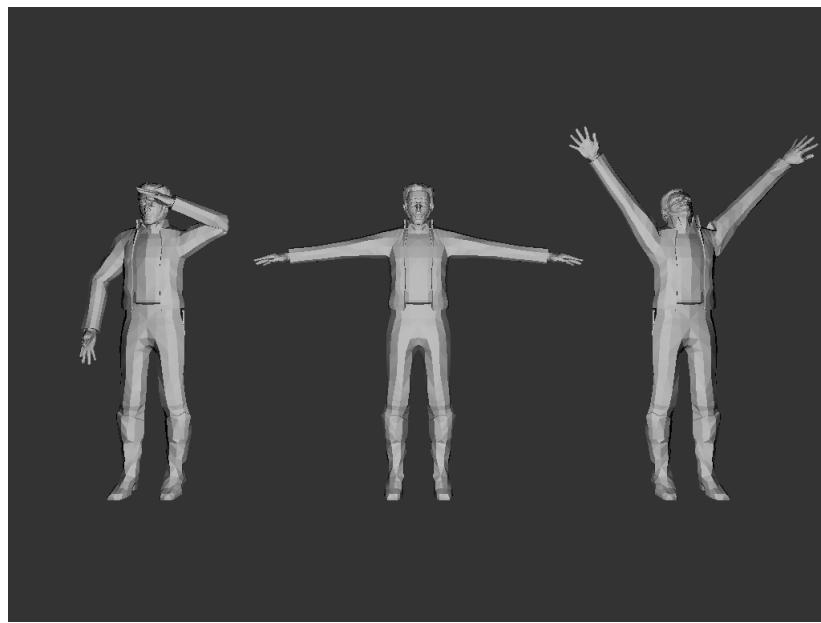


Figura 11.6: Modelo de José Artigas en 3 posiciones distintas, utilizadas para generar en ISGL3D una sensación de movimiento.

```
Isgl3dPODImporter * podImporter = [Isgl3dPODImporter
    podImporterWithFile:@"model_1.pod"];

[podImporter buildSceneObjects];

Isgl3dPODImporter * podImporter2 = [Isgl3dPODImporter
    podImporterWithFile:@"model_2.pod"];

[podImporter2 buildSceneObjects];

Isgl3dGLMesh* _modelMesh = [podImporter meshAtIndex:0 ];

Isgl3dGLMesh* _modelMesh2 = [podImporter2 meshAtIndex:0 ];

Isgl3dKeyframeMesh * _mesh = [Isgl3dKeyframeMesh keyframeMeshWithMesh:_modelMesh];

[_mesh addKeyframeMesh:_modelMesh2];

[_mesh addKeyframeAnimationData:0 duration:1.0f];
[_mesh addKeyframeAnimationData:0 duration:2.0f];
[_mesh addKeyframeAnimationData:1 duration:1.0f];
[_mesh addKeyframeAnimationData:1 duration:2.0f];

[_mesh startAnimation];

Isgl3dNode * node = [_container createNodeWithMesh:_mesh
    andMaterial:[podImporter materialWithName:@"material_0"]];

node.position = iv3(-90, -60, -150);

[podImporter addMeshesToScene:node];
```

En las primeras 4 líneas de código se instancia en dos oportunidades la clase *Isgl3dPODImporter*, y se les asigna a las instancias los modelos inanimados “model_1.pod” y “model_2.pod”. La

instrucción *buildSceneObjects* crea todos los objetos de la escena del modelo POD, pero no los agrega a la escena ISGL3D. Luego se obtienen los modelos indexados de cada uno de los PODs (cada POD puede tener una escena con más de un modelo, mediante un índice se referencia qué modelo se quiere obtener) y se almacenan en “_modelMesh” y “_modelMesh2” respectivamente. Se genera a continuación un nuevo modelo al que se le asignan los dos modelos anteriores, luego se programa la animación y se le da inicio mediante la instrucción *startAnimation*. Finalmente, se genera un nuevo objeto o nodo ISGL3D al que se le asigna el modelo, y un material también cargado desde el archivo POD; se le asigna además una posición y se lo agrega a la escena.

11.6. Luz en ISGL3D

Un tema importante al momento de proyectar modelos 3D en una escena es la luz. La visualización de un modelo puede cambiar significativamente en función de las características de luz que tenga una escena. En ISGL3D la luz se logra mediante la suma de tres componentes independientes: *ambiente*, *difusa* y *especular*; siendo esto un estándar en todos los motores de juego y programas de modelado en general. La luz ambiente es no direccional y está presente en toda la escena. La luz difusa ya implica la reacción que tiene la luz proveniente de las distintas fuentes de luz direccionales sobre las superficies de los objetos que existen en la escena generando haces de luz en direcciones aleatorias. La luz specular modela el comportamiento de la luz reflejada sobre las distintas superficies en ciertas direcciones particulares (no aleatorias) que dependen del coeficiente de reflexión de los materiales. Cada uno de estos tres tipos de luz que modelan el mundo real, existen en ISGL3D y son representados como características configurables de los objetos de luz. A su vez existen fuentes lumínicas de distintos tipos: *puntual*, *direccional* y *cónica*. Cada tipo tiene una función distinta de la atenuación con respecto a la distancia. Un ejemplo de la creación de un elemento lumínico para una escena se ve en el siguiente código:

```
Isgl3dLight * _redLight = [Isgl3dLight lightWithHexColor:@“FF0000” diffuseColor:@“FF0000” specularColor:@“FFFFFF” attenuation:0.02];
_redLight.renderLight = YES;
[self.scene addChild:_redLight];
```

En la primera línea de código se crea una luz con una componente ambiente de color rojo, una componente difusa también de color rojo y una componente specular de color blanca. En todos los casos se usa la notación hexadecimal de las componentes RGBA. Además se escogió un valor 0,02 de atenuación. Luego, se pide que el foco de luz sí sea *renderizado* y finalmente, este es agregado a la escena. Por defecto, el tipo de luz utilizado es puntual.

11.7. Método - (*void*) *tick:(float)dt*

Cuando se instancia la clase encargada de generar el render (clase *HelloWorldView*), la misma ejecuta la configuración básica de inicialización del objeto. Entre otras cosas, dentro del código de inicialización, se agrega lo siguiente:

```
[self schedule:@selector(tick:)];
```

Esto lo que hace es “agendarse” una invocación del método *tick* en forma periódica. Dentro de dicho método es que se hace la actualización de la escena, y el en caso particular de este proyecto, es

en dónde se actualiza la posición de los objetos 3D en función de la posición de la cámara respecto de los ejes del mundo. Ver Capítulo 8. Este método es de vital importancia por tratarse de uno de los dos *callbacks* que toda aplicación de realidad aumentada tiene (el otro es la captura y procesamiento de la imagen para obtener la pose).

11.8. ISGL3D en la aplicación

En el Capítulo 13 se explican algunos detalles sobre el uso de ISGL3D dentro de la aplicación final. En particular se dan detalles constructivos sobre cómo utilizar esta herramienta para generar *renders* sobre un fondo que sea la captura de la cámara y de la convivencia de los dos *callbacks* de la aplicación.

11.9. Resumen

En el presente capítulo se mencionaron algunas herramientas existentes para realizar *renders* en dispositivos móviles con sistema operativo iOS. Luego, se justificó la elección de ISGL3D para tal función y se dieron algunos conceptos introductorios a la herramienta; además se dió una hoja de ruta para todo aquel que le interese ampliar sus conocimientos en el *framework*. Se indicaron dos formas distintas de embeber un modelo 3D en ISGL3D y se aclaró cuál fue la forma escogida por el grupo. Finalmente, se referenció el Capítulo 13, en donde se explica cómo se usó ISGL3D en la aplicación final.

CAPÍTULO 12

Casos de Uso

12.1. Introducción

En este capítulo se presentan los distintos casos de uso que se implementaron con el fin de integrar los algoritmos comentados en capítulos anteriores en pequeñas aplicaciones que funcionen *de punta a punta*. Se buscó resolver individualmente los diferentes desafíos técnicos que una aplicación real de realidad aumentada para museos puede llegar a tener. Estas últimas no serán más que una combinación guionada de cada uno de estos casos de uso.

A lo cargo del capítulo se verán entonces los tres casos de uso implementados: “interactividad”, “video” y “modelos”. El primero presenta un modelo simple sobre el marcador que responde a toques con cierto movimiento y un audio en particular, el segundo soluciona el problema de proyectar un video sobre el marcador de forma consistente con el movimiento del usuario. El último caso de uso muestra cómo es posible importar modelos a ISGL3D de manera de lograr realidades aumentadas mucho más interesantes que si tan sólo se hicieran con las primitivas del *framework*, por detalles ver Capítulo 11.

12.2. Caso de uso “interactividad”

12.2.1. Comentarios sobre el caso de uso

En este caso de uso se implementa la parte interactiva de la aplicación. Al enfocar el marcador, se puede ver un cubo sobre el *QISet* de la esquina superior izquierda. Ver Figura 12.1. Si el cubo es tocado a través de la pantalla del dispositivo, este se anima y se reproduce un audio que indica la posición del cubo en el instante de ser presionado. Inmediatamente después, es desplazado hacia el *QISet* de la esquina superior derecha. Nuevamente, si el cubo es tocado a través de la pantalla del dispositivo, este se anima y se reproduce un audio que indica la posición del cubo en el instante de ser presionado. Inmediatamente después, este se desplaza hacia el *QISet* restante. Lo anterior sucederá de forma cíclica, cada vez que se presione sobre el modelo.

Esta funcionalidad es fundamental si lo que se quiere implementar es por ejemplo una audioguía interactiva. Podría pensarse una aplicación en la que el cubo anterior se reemplace por flechas 3D, y que estas sean ubicadas conjuntamente en distintas partes de una obra. Entones, al seleccionar cada una de las flechas, se podría reproducir un audio con información referente a esa zona o punto en particular.

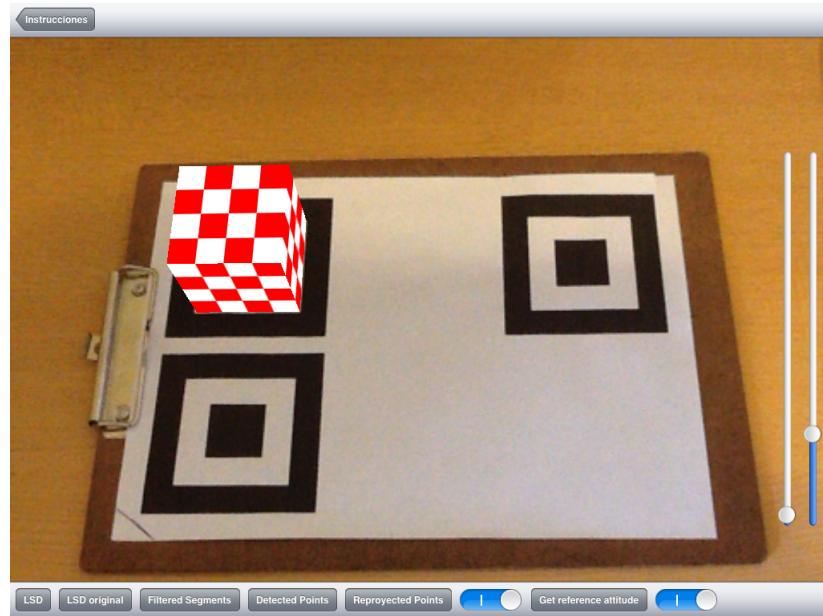


Figura 12.1: Captura de pantalla del caso de uso “interactividad”. Se puede ver al cubo apoyado sobre el *QLSet* de la esquina superior izquierda y los diferentes controles que ayudan a la depuración del código.

Esta aplicación también se utilizó con fines de *debugging* o depuración de la integración de cada uno de los bloques. Se le agregaron las siguientes funcionalidades:

- La posibilidad de ver dibujados sobre la imagen los segmentos detectados por LSD. En sus versiones original y optimizada.
- La posibilidad de ver dibujados sobre la imagen los segmentos filtrados pertenecientes al marcador. Así como también las esquinas detectadas de cada uno de los cuadriláteros que lo forman.
- La posibilidad de variar el umbral utilizado para el filtrado de segmentos.
- La posibilidad de ver las esquinas de cada uno de los cuadriláteros que forman al marcador reproyectadas según la pose del dispositivo obtenida.
- La posibilidad de prender o apagar el filtro de Kalman.
- La posibilidad de aumentar o disminuir el ruido de medición del filtro de Kalman.
- La posibilidad de elegir si usar o no la fusión de la estimación de pose con los sensores.

En la Figura 12.1 también se puede ver cómo es la interfaz de usuario de este caso de uso, en donde se puede elegir entre todas las funcionalidades anteriores. El mismo fue fundamental para evaluar el desempeño de los algoritmos utilizados funcionando en tiempo real. Gracias a estas funcionalidades se pudieron definir las condiciones para las cuales el conjunto de todos los bloques funciona mejor. Se fue variando la distancia al marcador y se ajustó el umbral para el filtro de segmentos. Además, se pudieron ajustar los parámetros del filtro de Kalman y se pudo comparar el desempeño de la estimación de pose utilizando solamente información de la cámara con el resultado obtenido de la fusión de sensores. Fue en este caso de uso que se evaluó cualitativamente el

desempeño de la versión optimizada de LSD, respecto del de la versión original.

Si bien todas estas pruebas y ajustes se hicieron previamente en una computadora y con imágenes de prueba, fue necesario contar con una aplicación en la que se pudiera ver sobre el dispositivo al conjunto de los algoritmos funcionando en tiempo real.

12.2.2. Detalles constructivos

12.2.2.1. Objetos ISGL3D interactivos

La manera de agregar interactividad a un nodo ISGL3D es bastante sencilla. En primer lugar, debe configurarse su propiedad *interactive* de forma positiva y luego se le debe ejecutar el método *addEvent3DListener*:

```
Isgl3dTextureMaterial * material = [Isgl3dTextureMaterial
materialWithTextureFile:@"red_checker.png" shininess:0.9
precision:Isgl3dTexturePrecisionMedium repeatX:NO repeatY:NO];

Isgl3dCube* cubeMesh = [Isgl3dCube meshWithGeometry:60 height:60 depth:60 nx:40 ny:40];

Isgl3dNode * _cubito = [self.scene createNodeWithMesh:cubeMesh andMaterial:material];

_cubito.interactive =YES;

[_cubito addEvent3DListener:self method:@selector(objectTouched:) forEventType:TOUCH_EVENT];
```

En el código anterior, primero se crea un nodo llamado “_cubito” con la primitiva de un cubo y cierto material. Luego, se indica que sí se quiere que dicho nodo tenga interactividad y finalmente se lo configura para que cuando “_cubito” reciba eventos del tipo *TOUCH_EVENT*, o lo que es lo mismo, cuando se lo toque; se ejecute el método *objectTouched*, definido en la misma clase que esta escrita el código (*self*).

En este caso de uso lo que se hizo en *objectTouched* no fue más que cambiar la posición del cubo en la escena y reproducir un audio dependiente de la posición del mismo.

12.2.2.2. Reproducción de audio en Objective-C

Para reproducir audios en Objective-C primero la clase en la que se quiere reproducir el audio debe importar el framework *AVFoundation* y luego debe implementar el protocolo *AVAudioPlayer-Protocol*. El código que se debe escribir es el siguiente:

```
NSURL *url =[NSURL fileURLWithPath:[NSString stringWithFormat:@"%@/ %@",[[NSBundle mainBundle] resourcePath],audio.mp3]];

AVAudioPlayer * audioPlayer =[[AVAudioPlayer alloc] initWithContentsOfURL:url error:nil];

audioPlayer.numberOfLoops=0;

audioPlayer.delegate = self;

[audioPlayer play];
```

En la primera línea se genera un *url* que indica cuál es el audio a reproducir y luego se le asigna a una instancia de la clase *AVAudioPlayer*. Se dice que no se quiere reproducir el audio en bucle,

se asigna a la clase en la que se esta escribiendo el código como la delegada de *audioPlayer*, una instancia de *AVAudioPlayer*, y finalmente se le da inicio al audio. Luego de reproducido el audio, se ejecuta autamáticamente el método de firma:

```
- (void)audioPlayerDidFinishPlaying:(AVAudioPlayer *)player successfully:(BOOL)flag;
```

En este código es en donde se indica que la próxima vez que se presione sobre el cubo, se querrá reproducir un audio distinto.

12.2.2.3. Dibujar en ISGL3D

Lo que se hizo fue crear una clase nueva, del tipo *UIView*, a la que se la llamó “claseDibujar”. Esta fue agregada como *subView* de la *view* en donde se muestra el video por detrás de lo que dibuja ISGL3D. Dicha clase se configuró para que fuera transparente y del mismo tamaño que la pantalla del *iPad*. *claseDibujar* cuenta con una cantidad de propiedades a las que se les asignan los diferentes puntos o segmentos que se quieren dibujar; son del tipo “puntero a entero” y “puntero a *float*” respectivamente. Luego, un método llamado *drawRect* es el que se encarga de dibujar cada uno de los puntos y segmentos. Los puntos se dibujan con las siguientes líneas de código:

```
CGContextRef context = UIGraphicsGetCurrentContext();  
  
CGContextStrokeRect(context, CGRectMake(punto_X, punto_Y, 4, 4));
```

En la primera línea de código se crea un contexto. Un contexto contiene ciertos parámetros y toda la información específica del dispositivo, requerida para poder dibujar. En la segunda línea se dibuja cada punto como un rectángulo centrado en el punto en cuestión y con 4 píxeles de ancho y largo. Los segmentos se dibujan con las siguientes líneas de código:

```
CGContextRef context = UIGraphicsGetCurrentContext();  
  
CGContextStrokeLineSegments(context, puntos, 2);
```

En la primera línea de código se crea un contexto (este paso puede saltarse si ya fue creado anteriormente), y en la segunda se dibuja la línea. La variable “puntos” es un arreglo de dos variables del tipo *CGPoint*, cada una de ellas tiene dos valores en precisión simple correspondientes a las coordenadas de un punto. Además, se le configura al segmento una anchura de 2 píxeles.

Finalmente, es bueno aclarar que *claseDibujar* se instancia y se destruye cuadro a cuadro; el método *drawRect* se invoca cada vez que se instancia la clase.

12.3. Caso de uso “video”

12.3.1. Comentarios sobre el caso de uso

Este caso de uso proyecta un video sobre el *QlSet* de la esquina superior izquierda del marcador de manera consistente con la pose del dispositivo. Ver Figura 12.2. La aplicación de esta solución técnica es directa. Tan sólo ajustando un par de parámetros el video podría ser proyectado dentro del marco de un cuadro, sobre uno de sus extremos, sobre una pared blanca o incluso sobre un mapa. Esto puede ser de gran interés para un museo, por ejemplo como complemento a una audioguía. A continuación se explican brevemente algunos detalles técnicos que fue necesario solucionar para lograr implementar este caso de uso.



Figura 12.2: Captura de pantalla del caso de uso “video”. Se puede ver al video proyectado sobre el *QlSet* de la esquina superior izquierda.

12.3.2. Detalles constructivos

El desafío técnico es, dados 4 puntos dinámicos cualesquiera sobre la pantalla, poder reproducir un video cuyas esquinas se ajusten a esos 4 puntos. Por lo tanto, en la implementación del presente caso de uso, de toda la lógica de estimación de pose, solamente se hace uso de los bloques de detección, filtrado y determinación de correspondencias. En particular, no se utiliza el algoritmo POSIT visto en el Capítulo 9. Teniendo entonces detectados los límites dentro de los que se quiere reproducir el video, parecería que el problema está resuelto, pues sólo basta con ubicar al video dentro de los mismos. Sin embargo, *Xcode* no permite posicionar en forma directa una *view* (que será la que embeba al video) tomando como límites cuatro puntos cualesquiera.

Si sólo se quiere reproducir un video, y no se quiere procesar su contenido, la solución más simple es utilizar la clase *MPMoviePlayerController* que hereda de *NSObject*. Una alternativa similar es hacer uso de la clase *MPMoviePlayerViewController* que hereda de *UIViewController* y tiene como única propiedad una del tipo *MPMoviePlayerController*. *MPMoviePlayerController* tiene como atributo una *view*, del tipo *UIView*, y son las esquinas de este atributo a las que se las quiere posicionar sobre 4 de los 36 puntos detectados por el filtro. La clase *UIView* tiene un atributo *frame* que es del tipo *CGRect*:

```
theMovie.view.frame = CGRectMake(0, 0, 60, 60);
```

En el código anterior *theMovie* es del tipo *MPMoviePlayerController*. De esta manera, parecería que los videos solamente pueden ser reproducidos sobre rectángulos y no sobre cualquier cuadrilátero genérico. Sin embargo, algo que sí se les puede hacer a las instancias de la clase *UIView* es una transformación afín o incluso, de forma más genérica, una homografía.

12.3.3. *CGAffineTransform* y *CATransform3D*

La clase *UIView* tiene una propiedad llamada *transform* que es del tipo *CGAffineTransform*. Las primeras letras de esta clase (*CG*) refieren a la API **Core Graphics** utilizada ampliamente como herramienta para resolver problemas de *rendering* y cualquier tipo de transformación en 2D.

La clase *UIView* además tiene una propiedad llamada *layer* que es del tipo *CALayer* y que permite realizar transformaciones del tipo *CATransform3D*. Las primeras letras de estas dos clases (*CA*) refieren a la API **Core Animation** que es utilizada para generar animaciones y transformaciones sobre objetos 3D solamente indicando un punto inicial y final para el objeto (también es posible agregar efectos para la transición). En definitiva, para resolver el problema del caso de uso existen *a priori* dos alternativas posibles: *CGAffineTransform* y *CATransform3D*.

Se pueden generar fácilmente instancias de transformaciones afines invocando la siguiente función:

```
CGAffineTransform CGAffineTransformMake (
    CGFloat a,
    CGFloat b,
    CGFloat c,
    CGFloat d,
    CGFloat tx,
    CGFloat ty
);
```

que toma 6 *CGFloats* (números reales en coma flotante y precisión simple), y crea una *CGAffineTransform*, donde cada uno de los valores anteriores se corresponde con los elementos de una matriz transformación afín de la siguiente manera¹:

$$\begin{pmatrix} a & b & 0 \\ c & d & 0 \\ t_x & t_y & 1 \end{pmatrix}$$

Así entonces, de los 9 valores de la matriz, 2 de ellos son nulos por tratarse de una transformación afín y otro de ellos es un factor de escala de valor constante 1. Resolviendo el sistema como se muestra en la Sección 12.3.4 y obteniendo los restantes 6 valores, se le puede asignar transformaciones a la propiedad *transform* y realizar la trasnformación deseada. Sin embargo, una transformación afín preserva colinealidad y realaciones entre distancias; y lo que realmente se necesita en este caso es una transformación proyectiva. Se decidió entonces estudiar la posibilidad de utilizar una *CATransform3D*.

Una *CATransform3D* se define de la siguiente manera:

```
struct CATransform3D
{
    CGFloat m11, m12, m13, m14;
    CGFloat m21, m22, m23, m24;
    CGFloat m31, m32, m33, m34;
    CGFloat m41, m42, m43, m44;
```

¹Véase que en este caso Apple expresa la matriz afín de forma traspuesta a lo que se comunmente acostumbra.

```
};

typedef struct CATransform3D;
```

donde m_{ij} corresponde al elemento de la matriz ubicado en la fila i y la columna j . Así entonces, conociendo los valores que debe tomar la homografía, también es posible completar los elementos de esta matriz 4×4 y asignarle la transformación a la propiedad *layer* de cualquier objeto del tipo *UIView*. Demás decir que una transformación 3D es algo bastante más genérico que una transformación proyectiva; pero si se anulan algunas entradas de la matriz, es posible lograr el tipo de transformación que se busca. En particular, la coordenada z debe ser nula:

$$\begin{pmatrix} m_{11} & m_{12} & 0 & m_{14} \\ m_{21} & m_{22} & 0 & m_{24} \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ m_{41} & m_{42} & 0 & m_{44} \end{pmatrix}$$

donde también en este caso se asume el valor unitario para m_{44} por ser tan sólo un factor de escala. Al igual que para la transformación afín, resolviendo la homografía como se ve en la Sección 12.3.4 se obtienen los 8 valores restantes de la matriz.

12.3.4. Resolución de Homografía

A continuación se plantea la resolución del sistema de ecuaciones que, dados 4 punto correspondientes entre 2 planos, halla los parámetros de la homografía que los relaciona. La explicación que sigue es un caso particular de la del método DLT explicado en la Sección 8.6.1. Esta transformación proyectiva se puede expresar en forma matricial, en coordenadas homogéneas, de la siguiente manera:

$$\begin{pmatrix} \mathbf{H}_{11} & \mathbf{H}_{12} & \mathbf{H}_{13} \\ \mathbf{H}_{21} & \mathbf{H}_{22} & \mathbf{H}_{23} \\ \mathbf{H}_{31} & \mathbf{H}_{32} & \mathbf{H}_{33} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \\ s \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} U \\ V \\ P \end{pmatrix}$$

donde la matriz \mathbf{H}_{3x3} representa la transformación homográfica, el vector $(x, y, s)^t$ representa los puntos de referencia y el vector $(U, V, P)^t$ representa los puntos transformados. Asumiendo un valor unitario para las coordenadas s y P la resolución del sistema se simplifica mucho y no se pierde generalidad. Imponiendo esto entonces, el sistema anterior se puede expresar de la siguiente forma:

$$x\mathbf{H}_{11} + y\mathbf{H}_{12} + \mathbf{H}_{13} = U \quad (12.1)$$

$$x\mathbf{H}_{21} + y\mathbf{H}_{22} + \mathbf{H}_{23} = V \quad (12.2)$$

$$x\mathbf{H}_{31} + y\mathbf{H}_{32} + \mathbf{H}_{33} = 1 \quad (12.3)$$

Multiplicando la Ecuación (12.3) por U e igualándola a la Ecuación (12.1) se obtiene lo siguiente:

$$x\mathbf{H}_{11} + y\mathbf{H}_{12} + \mathbf{H}_{13} = xU\mathbf{H}_{31} + yU\mathbf{H}_{32} + U\mathbf{H}_{33} \quad (12.4)$$

o lo que es lo mismo:

$$x\mathbf{H}_{11} + y\mathbf{H}_{12} + \mathbf{H}_{13} - xU\mathbf{H}_{31} - yU\mathbf{H}_{32} - U\mathbf{H}_{33} = 0 \quad (12.5)$$

Procediendo de manera análoga y multiplicando la Ecuación (12.3) por V e igualándola a la Ecuación (12.2) se obtiene lo siguiente:

$$x\mathbf{H}_{21} + y\mathbf{H}_{22} + \mathbf{H}_{23} = xV\mathbf{H}_{31} + yV\mathbf{H}_{32} + V\mathbf{H}_{33} \quad (12.6)$$

o lo que es lo mismo:

$$x\mathbf{H}_{21} + y\mathbf{H}_{22} + \mathbf{H}_{23} - xV\mathbf{H}_{31} - yV\mathbf{H}_{32} - V\mathbf{H}_{33} = 0 \quad (12.7)$$

Las Ecuaciones (12.3) y (12.7) se pueden expresar en forma matricial, de la siguiente manera:

$$\begin{pmatrix} x & y & 1 & 0 & 0 & 0 & -xU & -yU & -U \\ 0 & 0 & 0 & x & y & 1 & -xV & -yV & -V \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \mathbf{H}_{11} \\ \mathbf{H}_{12} \\ \mathbf{H}_{13} \\ \mathbf{H}_{21} \\ \mathbf{H}_{22} \\ \mathbf{H}_{23} \\ \mathbf{H}_{31} \\ \mathbf{H}_{32} \\ \mathbf{H}_{33} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$$

Teniendo entonces 4 parejas de puntos de referencia y puntos transformados, y asumiendo \mathbf{H}_{33} de valor unitario, se logran 8 ecuaciones con 8 incógnitas. Se tiene ahora un sistema compatible determinado, que puede ser expresado de la siguiente manera:

$$\begin{pmatrix} x_0 & y_0 & 1 & 0 & 0 & 0 & -U_0x_0 & -U_0y_0 \\ 0 & 0 & 0 & x_0 & y_0 & 1 & -V_0x_0 & -V_0y_0 \\ x_1 & y_1 & 1 & 0 & 0 & 0 & -U_1x_1 & -U_1y_1 \\ 0 & 0 & 0 & x_1 & y_1 & 1 & -V_1x_1 & -V_1y_1 \\ x_2 & y_2 & 1 & 0 & 0 & 0 & -U_2x_2 & -U_2y_2 \\ 0 & 0 & 0 & x_2 & y_2 & 1 & -V_2x_2 & -V_2y_2 \\ x_3 & y_3 & 1 & 0 & 0 & 0 & -U_3x_3 & -U_3y_3 \\ 0 & 0 & 0 & x_3 & y_3 & 1 & -V_3x_3 & -V_3y_3 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \mathbf{H}_{11} \\ \mathbf{H}_{12} \\ \mathbf{H}_{13} \\ \mathbf{H}_{21} \\ \mathbf{H}_{22} \\ \mathbf{H}_{23} \\ \mathbf{H}_{31} \\ \mathbf{H}_{32} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} U_0 \\ V_0 \\ U_1 \\ V_1 \\ U_2 \\ V_2 \\ U_3 \\ V_3 \end{pmatrix}$$

Finalmente, si los puntos de referencia se definen como 4 puntos del modelo del marcador (en el caso particular de la imagen 12.2, se usan los puntos 4, 5, 6 y 7 del *QlSet* de la esquina superior izquierda del marcador), y los transformados son sus correspondientes filtrados e identificados cuadro a cuadro en las imágenes capturadas por el dispositivo; es posible transformar en cada instante a la *view* que contiene al video de manera de que se mantenga siempre en dentro de los límites que uno quiere.

12.4. Caso de uso “modelos”

12.4.1. Comentarios sobre el caso de uso

El presente caso de uso no hace más que importar modelos en ISGL3D de manera de agregarle valor a la realidad aumentada. La aplicación de este caso de uso es casi cualquier ejemplo de realidad aumentada en la que se espere contar con una escena con más que tan sólo primitivas agregadas de forma individual o conjunta. Es importante entonces, contar con una pequeña aplicación piloto para, de forma controlada, importar los modelos a la escena, ajustar sus tamaños, definir sus posiciones, probar diferentes configuraciones para las luces de la misma y hasta intentar animarlos; para así entonces, a la hora de implementar una aplicación final, contar con las herramientas suficientes para que los modelos se vean de la mejor manera posible.

También resulta importante contar con una instancia de prueba para buscar y descargar distintos modelos 3D de internet; incluso puede ser un buen ejercicio probar editarlos, rotarlos o escalarlos en algún *software* de creación y animado de modelos. Finalmente, habrá que llevar a cabo todos los pasos necesarios para darle al modelo el formato POD, necesario para ser importado en ISGL3D.

En la Figura 12.3 se pueden ver dos imágenes de los modelos 3D pertenecientes a un perro chihuahueño y dos sillones, uno de dos plazas y otro de tres, vistas desde dos ángulos distintos. Todos descansan sobre el marcador.

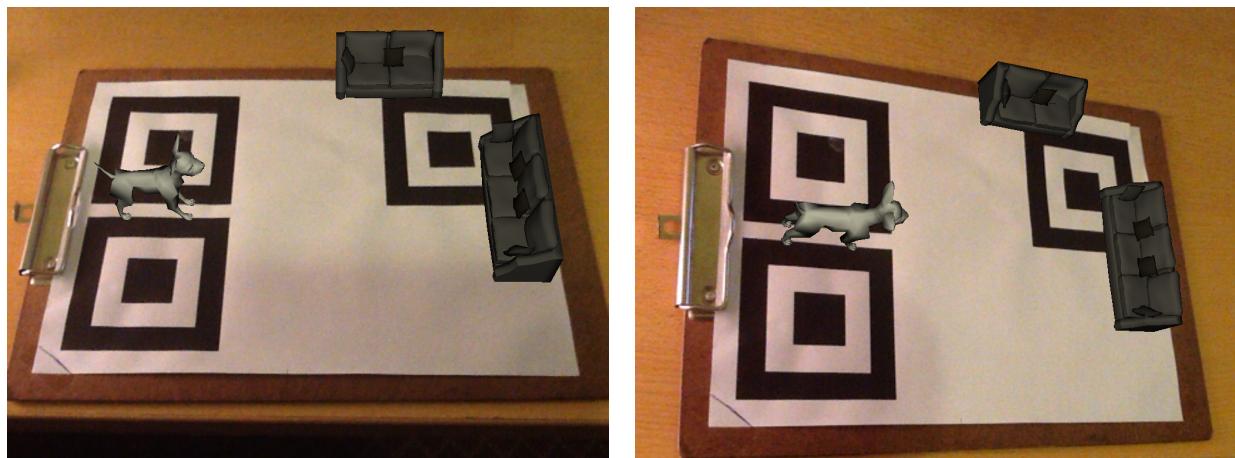


Figura 12.3: Dos capturas de pantalla del caso de uso “modelos”, desde dos ángulos distintos. Se pueden ver los modelos 3D pertenecientes a un perro chihuahueño y a dos sillones, uno de dos plazas y otro de tres.

12.4.2. Detalles constructivos

Los detalles constructivos de este caso de uso ya fueron vistos en el Capítulo 11.

12.5. Resumen

En este capítulo se presentó la necesidad de contar con ciertos casos de uso que resolvieran cada uno de los desafíos técnicos existentes en una aplicación interactiva y de realidad aumentada completa para museos. Se definieron y describieron los tres casos de uso, y se mostraron algunas imágenes que ayudaran al lector a comprender el funcionamiento de cada uno de ellos. Además, se definieron en cada caso, las herramientas técnicas extra necesarias para su implementación.

CAPÍTULO 13

Implementación

13.1. Introducción

En este capítulo se muestra la integración de los conocimientos adquiridos a lo largo del proyecto para poder llevar a cabo la realidad aumentada en una aplicación real. Si bien el objetivo principal del proyecto era la exploración de distintos métodos y algoritmos, parecía importante poder poner en práctica todo lo desarrollado en un producto final que pudiera parecerse a un prototipo de aplicación comercial. En particular se desarrolló una aplicación pensando en los cuadros de la planta baja del Museo Nacional de Artes Visuales (MNAV). Entre otros autores, tiene cuadros de Pedro Figari, Juan Manuel Blanes y de Joaquín Torres García, que se eligieron para hacer el prototipo. Se siguió la línea que se planteó desde un inicio que fue la de tener tres partes fundamentales: Navegación, Identificación y Realidad Aumentada. Para eso se incorporaron a la aplicación las siguientes funcionalidades:

- Navegación por detección de QRs.
- Identificación de obras mediante SIFT.
- Comunicación con un servidor.
- Navegación por listas de cuadros.
- Interactividad con modelos.
- Utilización de redes sociales.

En las próximas secciones se describe más en detalle cada uno de estos puntos y su integración a la aplicación final. También se describe el flujo de la aplicación y algunas clases implementadas.

13.2. Diagrama global de la aplicación

En la descripción de las clases que conforman los bloques principales de la aplicación se hace referencia a conceptos de desarrollo sobre Objective-C, así como también a *frameworks* y herramientas utilizadas que fueron explicadas en el Capítulo 3. Para la comprensión del detalle de la implementación es importante conocer estos conceptos de desarrollo.

Para que sea más sencilla la comprensión de los bloques que componen la aplicación, en la Figura 13.1 se muestra un diagrama esquemático de la misma que sirve para visualizar cómo es su flujo a

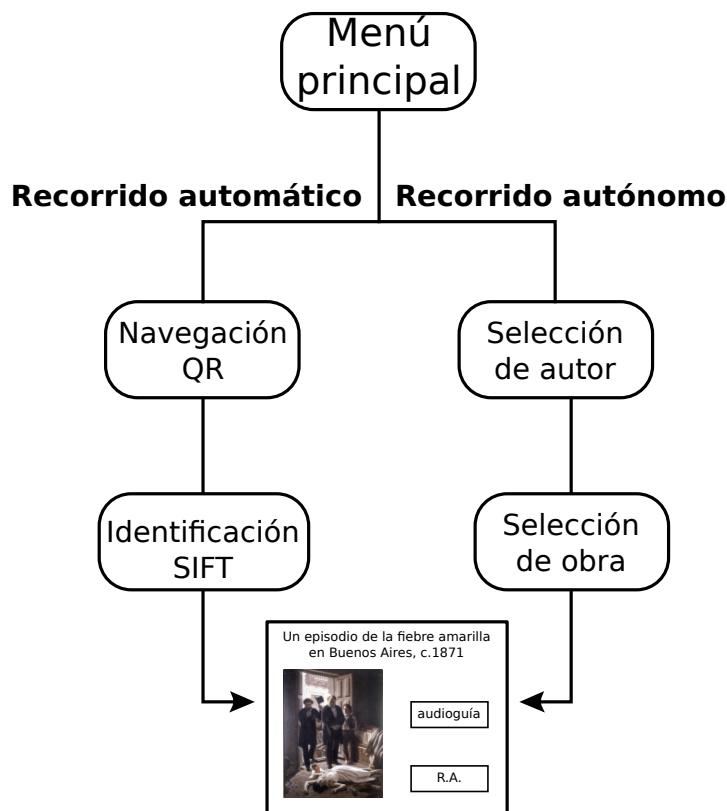


Figura 13.1: Diagrama global de la aplicación

nivel de usuario.

Al comenzar el recorrido, el usuario tiene la opción de elegir cómo recorrer el museo: de manera *autónoma* o de manera *automática*. En la opción autónoma el usuario es el encargado de elegir dentro de una lista de autores el que más le interese, y dentro de la lista de cuadros del autor seleccionado, la obra que desea contemplar en detalle. De esta manera el usuario llega eligiendo opciones al cuadro de interés y está listo para comenzar la interacción con la obra, a través de audioguías o realidad aumentada. De la otra manera de recorrer el museo, con la opción automática, el usuario tiene la opción de navegar por el museo leyendo códigos QR desplegados en las distintas salas o secciones, que sirven para identificar en qué parte del museo se encuentra el usuario. De esta manera una vez que el usuario lee el QR, la aplicación lo reconoce y despliega una foto del autor y un mensaje que invita al usuario a continuar con el recorrido. Internamente la aplicación guarda la información en la que está el usuario y la utiliza en la siguiente etapa: identificación de la obra. La identificación de la obra se da una vez que el usuario está frente a la misma y toma una foto de ella que es procesada y en pocos segundos la aplicación responde con la imagen original de la obra y el usuario puede comenzar la interacción con la obra, a través de audioguías o realidad aumentada. Ver Figura 13.1

De esta manera es que se da el flujo de la aplicación a nivel de usuario, para llegar a un determinado cuadro de interés y así entonces interactuar con él. Pero este flujo es necesario representarlo en una serie de clases e instancias y con cierta invocación de métodos que cumplan las reglas de Objective-C con las herramientas existentes de desarrollo que provee Xcode. Para tener una idea de cómo se mapea el flujo de la aplicación en el lenguaje de desarrollo, en la Figura 13.2, se presenta el *Storyboard* de la misma, que muestra la relación entre las distintas clases. Se recuerda al lector que el *Storyboard* es una herramienta de programación gráfica, que permite generar instancias de clases y vínculos entre las mismas en forma visual a la vez de ser una representación gráfica de la interfaz

de usuario. A su vez, a la Figura 13.2 se le agregó un número identificador en cada *ViewController* para poder referenciarlos en la medida que sea necesario detallar determinados aspectos de las clases involucradas.

En las próximas subsecciones se explican algunas de las clases implementadas en la aplicación y

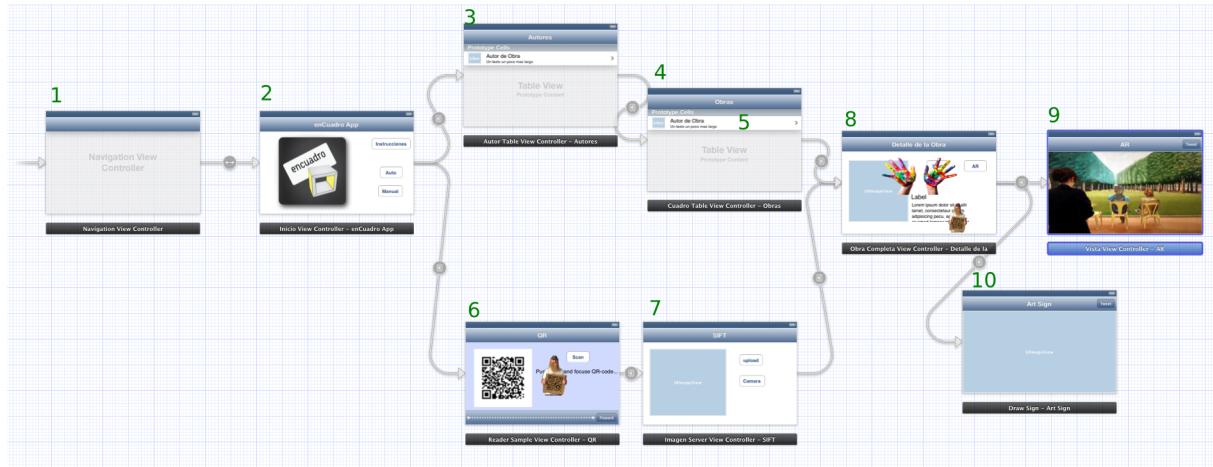


Figura 13.2: *Storyboard* de la aplicación

que además tienen cierta relevancia. Se muestran su rol dentro de la aplicación y sus principales características.

13.2.1. NavigationViewController

Esta clase se ve en la Figura 13.2, identificada con el número 1. La aplicación está embebida dentro de un *UINavigationController*. Esto implica que cada uno de los *ViewControllers* que tiene la aplicación es gestionado por esta clase. Es quien se encarga de la presentación y del pasaje de un *ViewController* a otro, creando y destruyendo instancias de cada uno. Está en esta clase la responsabilidad de manejar las jerarquías de los distintos *ViewControllers* así como de mantener cierta integridad visual utilizando las *Toolbars* ya sea arriba como encabezado o abajo al pie. Las *Toolbars* son botones que se pueden agregar en los extremos de los *ViewControllers* para realizar una funcionalidad específica.

El hecho de contar con una jerarquía permite entre otras cosas, la posibilidad de hacer un cambio (en la interfaz de usuario por ejemplo), en todos los *ViewControllers*, simplemente afectando a la clase *NavigationViewController* y sin necesidad de cambiar cada uno de ellos por separado. Esto resulta particularmente práctico en aplicaciones con bastantes *ViewControllers* y lo único que tiene que hacer el desarrollador es aclarar que ciertos atributos sean manejados por la clase encargada de la navegación dentro de la aplicación.

Por otra parte, es deseable tener un criterio común para todos los *ViewControllers* en la orientación de la aplicación con respecto a la orientación del dispositivo. Es decir, es posible lograr por ejemplo, que frente a rotaciones del dispositivo, la interfaz de usuario acompañe la rotación y gire también, o también es posible permitir que rotaciones del dispositivo en determinado sentido se vean reflejados en una rotación de la interfaz de usuario y otras no. Para esto se definen cuatro posibles posiciones para el dispositivo con ayuda del acelerómetro: *Portrait*, *Upside Down*, *Landscape Left* y *Landscape Right*. Las mismas se pueden ver en la Figura 13.3.

Para el caso particular de esta aplicación se optó por reimplementar la clase *UINavigationController* bajo el nombre *NavigationViewController* ya que se buscaba tener cierto control sobre las rotaciones de la interfaz de usuario, por lo que se decidió afectar los métodos que estuvieran a

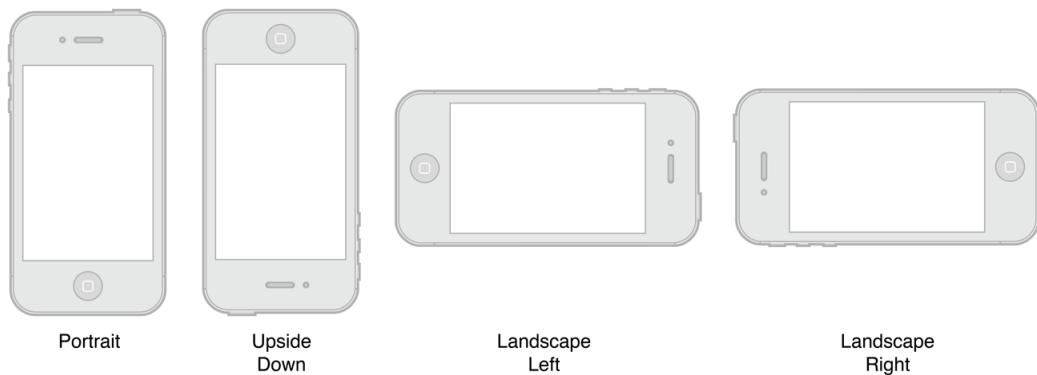


Figura 13.3: Orientaciones posibles del dispositivo.

cargo de las rotaciones de interfaz de usuario. En particular se reimplementaron los métodos *supportedInterfaceOrientations* y *preferredInterfaceOrientationForPresentation* de la siguiente manera

```
- (NSUInteger)supportedInterfaceOrientations
{
    NSLog(@"supportedInterfaceOrientations NAVIGATION");
    return UIInterfaceOrientationMaskLandscapeRight;
}

- (UIInterfaceOrientation)preferredInterfaceOrientationForPresentation
{
    NSLog(@"preferredInterfaceOrientationForPresentation NAVIGATION");
    return UIInterfaceOrientationLandscapeRight;
}
```

Esto lo que hace es fijar la orientación de la interfaz de usuario a modo *LandscapeRight*. También hubiera sido posible lograrlo editando el archivo *Info.plist* que toda aplicación de Xcode tiene, agregando el ítem *SupportedInterfaceOrientations* y completando las opciones que se desean. Las rotaciones de interfaz de usuario son algo con bastante relevancia en las aplicaciones. En particular se optó por bloquear las rotaciones de interfaz, dejándola fija, para facilitar la proyección de la realidad aumentada. De no haberlo hecho de esta manera, con cada rotación de la interfaz se tendrían que intercambiar los ejes de coordenadas en función del sentido de la rotación. Esto es posible de hacer ya que con cada rotación se ejecuta una serie de métodos en forma automática entre los cuales se encuentra el siguiente:

```
- (void) willRotateToInterfaceOrientation:(UIInterfaceOrientation)
toInterfaceOrientation duration:(NSTimeInterval)duration;
```

Dentro de dicho método sería posible hacer el ajuste de coordenadas correspondiente. La serie de métodos que son ejecutados al haber un evento del tipo rotación es algo que ha sufrido cambios recientes con la actualización de software a iOS 6.

13.2.2. InicioViewController

Este *ViewController* es la pantalla de inicio de la aplicación, identificado con el número 2 en la Figura 13.2. En la misma hay un botón que al ser presionado comienza un audio con instrucciones y una presentación sobre cómo es el recorrido y las funcionalidades con las que cuenta la aplicación.

También hay dos botones más que dan al usuario la opción de elegir la forma de recorrer el museo: autónoma o automática. El botón de recorrido automático instancia al *ReaderSampleViewController* y el de recorrido autónomo instancia al *AutorTableViewController*.

13.2.3. UITableViewControllers

Para el recorrido manual, el usuario es el encargado de seleccionar el autor, luego las obras disponibles del autor seleccionado y luego se muestra un detalle de la obra seleccionada por el usuario presentando una instancia del *ViewController* llamado *ObraCompletaViewController*. Este recorrido que parece bastante intuitivo aparece en muchas aplicaciones de iOS en las que existen listas de datos. Un ejemplo son las aplicaciones que gestionan contenido musical que está ordenado en base a autores, dentro de los mismos, sus discos y dentro de los discos sus canciones. Como navegar en listas de datos es algo bastante frecuente, Xcode ya tiene implementada una clase llamada *UITableViewController*. En la Figura 13.4 se puede ver un ejemplo con varios tipos de tablas que organizan la información. Como se puede ver la tabla es una forma sencilla de organizar la información en la que existe una sola columna y muchas filas, llamadas celdas. También pueden existir secciones, con un encabezado y pie de sección. Volviendo a la aplicación lo que se hizo entonces fue crear varias

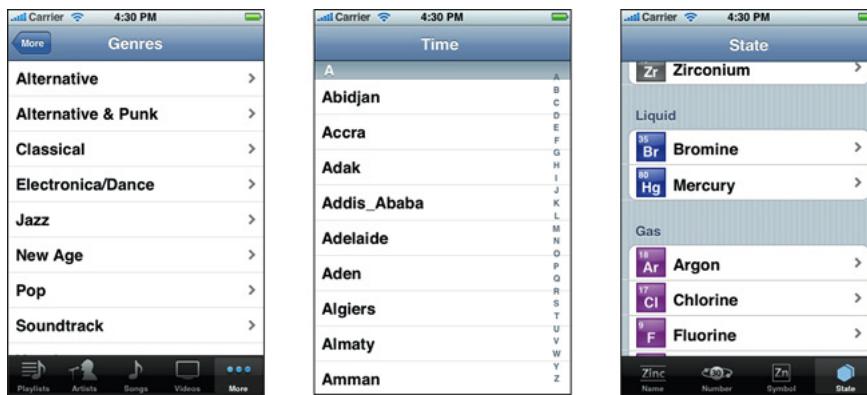


Figura 13.4: Ejemplos de TableViewController con distintos tipos de tablas.

clases que heredan de *UITableViewController* y manejar los contenidos de manera jerárquica. A continuación siguen dos clases que se resolvieron de esta manera.

13.2.3.1. AutorTableViewController

Esta clase (identificada con el número 3 en la Figura 13.2) hereda de *UITableViewController* y cumple la función de almacenar la lista de autores disponibles dentro del museo que a los efectos del prototipo como se dijo son: Figari, Blanes y Torres García. En lo que sigue se explican algunos detalles importantes que se tuvieron que comprender para poder organizar la información en tablas de datos (lo cual también aplica para la clase *CuadroTableViewController* que se describe en la siguiente subsección).

Uno de los métodos implementados por esta clase es el siguiente:

- (NSInteger)numberOfSectionsInTableView:(UITableView *)tableView

que por defecto retorna un 0. El mismo indica la cantidad de secciones con las que cuenta una tabla. Para que tenga sentido y al instanciarse la clase se vea algo de contenido tiene que retornar algo distinto de 0. Otro método importante es:

```
- (NSInteger)tableView:(UITableView *)tableView numberOfRowsInSection:(NSInteger)section
```

El mismo es el encargado de devolver un número con la cantidad de filas con las que cuenta la sección de la tabla. En esta implementación se devuelve la cantidad de autores.

Un tercer método, de mayor importancia, es el siguiente:

```
- (UITableViewCell *)tableView:(UITableView *)tableView cellForRowAtIndexPath:(NSIndexPath *)indexPath
```

El mismo es el encargado de devolver una *UITableViewCell* que es la que se despliega. Es en este método que se configura el formato de la celda. Para el caso de la aplicación se resolvió generar una clase que hereda de *UITableViewCell* que se llama *CuadroTableViewCell* y que tiene ciertas características como una imagen, autor y obra que son mostradas en la celda. En este método se asocian las características mencionadas de la celda en función del número de fila. Esta clase implementa un método *prepareForSegue* que le asigna un valor a la variable *opcionAutor* en función del autor seleccionado. Esto permite luego en la clase *CuadroTableViewController* desplegar distintas listas de cuadros en función del autor seleccionado.

13.2.3.2. CuadroTableViewController

Esta clase (identificada con el número 4 en la Figura 13.2) es muy similar a la clase *AutorTableViewController* recién descripta pero que difiere simplemente en su contenido. Los conceptos utilizados y métodos implementados son básicamente los mismos pero su contenido es un listado de obras en lugar de autores. Una especificación extra es que al instanciarse la clase se completa una lista de cuadros diferente en función del autor seleccionado. Así como en la clase *AutorTableViewController* en esta también se implementa el método *prepareForSegue* para poder completar los datos de la instancia de la clase con la que se está conectando, con los datos de la obra seleccionada (autor, obra, imagen, descripción, audio, ARid). El ARid es un identificador de realidad aumentada que asocia una realidad aumentada a cada cuadro.

13.2.3.3. CuadroTableViewCell

Esta es una clase sencilla que hereda de la clase *UITableViewCell* (identificada con el número 5 en la Figura 13.2) y simplemente tiene tres atributos asociados a nivel de interfaz de usuario: una imagen, un nombre de autor y un nombre de obra para cada celda de la tabla que se despliega.

13.2.4. ReaderSampleViewController

Este *ViewController* (identificado con el número 6 en la Figura 13.2) es el encargado de hacer la lectura de los códigos QR y de invocar los métodos necesarios para realizar la búsqueda de la zona del museo en la que se encuentra el usuario. Esto es, existe un código QR asociado a cada autor (Blanes, Figari y Torres García) y en base al código QR leído se despliega un texto y una imagen asociados al mismo. El funcionamiento de la decodificación se explica un poco más en detalle en la Sección 13.3.

13.2.5. ImagenServerViewController

Este *ViewController* (identificado con el número 7 en la Figura 13.2) es el encargado de la comunicación con el servidor. Al instanciarse esta clase, también se instancia la clase *UIImagePickerController*, encargada de implementar una captura de imagen. Una vez que se toma una fotografía a

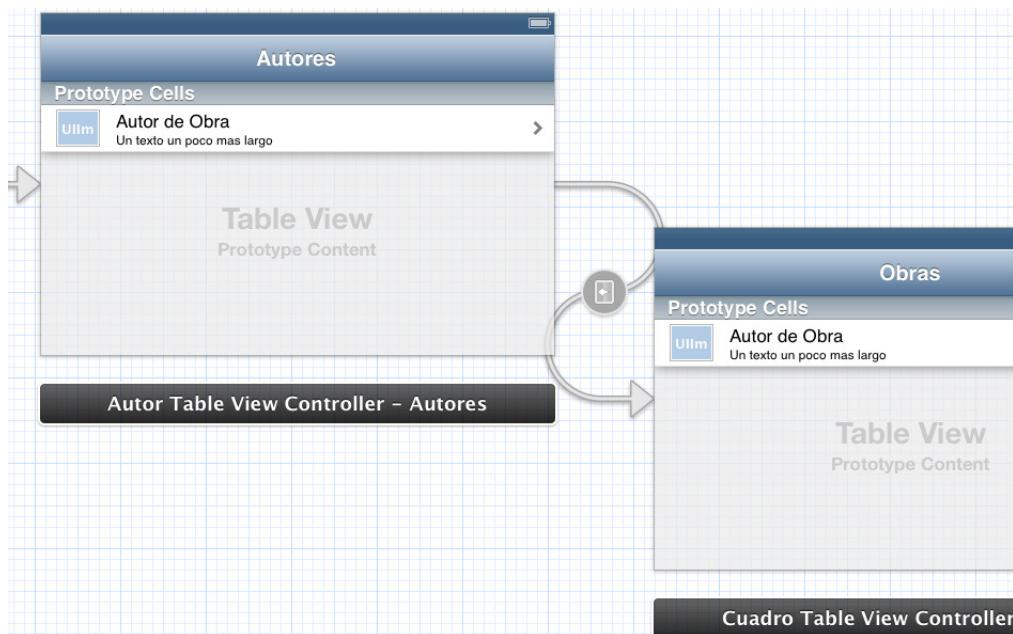


Figura 13.5: Autor y Cuadro TableViewControllers

la obra, la misma se muestra en una *UIImageView* y existen dos botones: uno de ellos simplemente dispara una nueva instancia del *UIImagePickerController* dando la opción de volver a tomar la fotografía y el otro botón inicia la comunicación con el servidor. Ver Figura 13.6.



Figura 13.6: Ejemplo de captura para reconocimiento SIFT

El botón encargado de la comunicación con el servidor, botón de *upload*, es un *segue* hacia el *ObraCompletaViewController*. Dentro del método *prepareForSegue*, encargado de preparar todo previo a la invocación de *ObraCompletaViewController* se invoca el método *uploadImage*. Este método genera un mensaje HTTP del tipo POST y se lo envía a la IP del servidor. En el cuerpo del mensaje se adjunta la foto tomada previamente y se le agrega una variable llamada *room*. Esta variable es completada previamente en el *ReaderSampleViewController* en base al QR detectado, dando información respecto de en qué sala/región del museo se encuentra el usuario (sala Figari, sala Blanes o sala Torres García). Esta variable lo que permite es tener un identificador para poder realizar la búsqueda de la imagen tomada en una base de datos más pequeña, que contenga solamente los cuadros de la región del museo en cuestión. En caso que el usuario se haya saltado la

detección QR y haya seleccionado directamente la opción de tomar una fotografía a la obra para comenzar la comunicación con el servidor, entonces la variable *room* estará vacía y la búsqueda de la obra se realiza en toda la base de datos del museo. El gran valor agregado de la detección QR es la velocidad con la que el servidor devuelve información respecto de a qué obra se fotografió. Para la búsqueda con detección QR, los tiempos son claramente mejores (del orden de 3s en una LAN), mientras que cuando el usuario se ahorra este paso, los tiempos aumentan al doble (del orden de 6s en una LAN).

Luego de establecida la conexión y enviada la consulta POST, el servidor responde con otra variable llamada *returnString*. Esta variable contiene un identificador de obra que indica qué obra fue fotografiada. Esto se logra mediante un archivo *upload.php* en el servidor que recibe la imagen y le ejecuta un algoritmo de detección de características llamado SIFT, que le retorna al PHP el identificador en cuestión. Detalles sobre el algoritmo SIFT se pueden ver más adelante en la Sección 13.5. El archivo *upload.php* entrega esta información a la aplicación. La variable *returnString* es recibida por la aplicación con cierta nomenclatura en particular, que sigue la lógica Autor-Número, por ejemplo “Figari3” se corresponde con la obra número 3 de la base de datos del autor Figari. Con este identificador de obra, la aplicación le pide al servidor cierta información de interés acerca de la misma, como por ejemplo el nombre completo de la obra, el nombre de su autor y una breve descripción. El servidor cuenta con varias carpetas a las que la aplicación accede remotamente:

- (1) **autor:** contiene el nombre del autor de cada obra.
- (2) **obra:** contiene el nombre completo de cada obra.
- (3) **texto:** contiene una breve descripción de cada obra.
- (4) **imagen:** contiene una imagen de cada obra.
- (5) **audio:** contiene una audioguía asociada a cada obra.

Esta información solicitada es alojada en variables que son mostradas (imagenes, texto) y reproducidas (audio) en el siguiente *ViewController*, el *ObraCompletaViewController*. Ver Figura 13.7.

13.2.6. ObraCompletaViewController

Este *ViewController* (identificado con el número 8 en la Figura 13.2) simplemente es la presentación de la obra en la que se muestra una imagen del cuadro, título, autor, descripción y distintas opciones para interactuar con el mismo. Tiene dos botones y una animación que funciona como botón. Ver Figura 13.7. El primero de los botones dispara una audioguía relacionada con la obra que el usuario está contemplando. El otro botón conecta con el *VistaViewController*, encargado de mostrar la realidad aumentada, explicado en la Sección 13.2.7. La animación que aparece funciona como *segue* hacia otro *ViewController*, llamado *DrawSign* que se explica más adelante en la Sección 13.2.8.

13.2.7. VistaViewController

Este *ViewController* (identificado con el número 9 en la Figura 13.2) es el encargado de mostrar la realidad aumentada. Esta clase, al ser instanciada ejecuta el siguiente método:

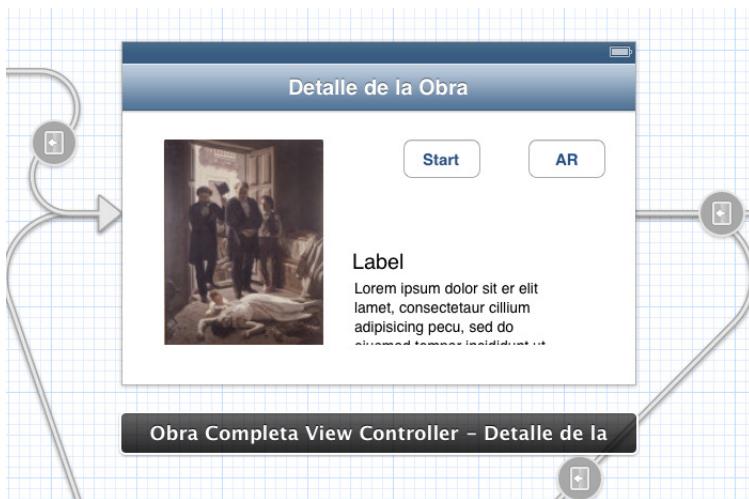


Figura 13.7: Pantalla con la obra completa

```
- (void)viewWillAppear:(BOOL)animated
{
    NSLog(@"%@", @"VIEW WILL APPEAR VISTA");
    [super viewWillAppear:animated];

    [self hacerRender];

}
```

Este método se ejecuta justo antes de que el controlador despliegue el contenido de la pantalla, y como se ve, invoca al método homónimo de la clase superior y luego al método *hacerRender*, encargado de mostrar efectivamente la realidad aumentada. Antes de explicar los detalles de *hacerRender* se comentan algunos detalles generales de las aplicaciones iOS.

Como en cualquier programa, en las aplicaciones de Xcode, lo que se ejecuta al comenzar es el *main*. En este tipo de aplicaciones en particular, el *main* crea una instancia de la clase *appDelegate* (delegado de la aplicación). A su vez, al instanciarse al *appDelegate* se ejecuta el método *applicationDidFinishLaunching*. En este método, típicamente el código por defecto está vacío, pero cuando se trabaja con ISGL3D, este método crea un objeto de la clase *Isgl3dViewController* que hereda de *UIViewController*. Es sobre la instancia de *Isgl3dViewController* que se despliegan los *renders*. Aclarados estos puntos se pasa ahora a explicar lo que se hace en el método *hacerRender*. A continuación se muestran algunas de las partes más importantes del método:

```
app0100AppDelegate *appDelegate = (app0100AppDelegate *)[[UIApplication sharedApplication] delegate];
self.viewController=(Isgl3dViewController*)appDelegate.viewController;
```

Con lo anterior lo que se hace es generar una instancia de la clase *app0100AppDelegate* que es puntero al *appDelegate* de la aplicación. Luego, en la segunda línea se le asigna a la propiedad de la clase *VistaViewController* llamada *viewController* (que es de tipo *Isgl3dViewController*) la propiedad de igual nombre pero del *appDelegate* de la aplicación (que fue instanciada en el método *applicationDidFinishLaunching*). Luego se agregan las *views* *viewController.view* y *viewController.videoView* con valor de transparencia *alpha* nulo y se inicia una animación generando un efecto

de *fade out* de la imagen y *fade in* del *render*. Este tipo de animaciones son sencillas de ejecutar con el framework Core Animation y permiten agregar efectos interesantes a cualquier *UIView*.

13.2.8. DrawSign

Esta clase (identificada con el número 10 en la Figura 13.2) hereda de *UIViewController* y está pensada para que el usuario pueda dibujar al tocar la pantalla. Un ejemplo de cómo queda el dibujo se puede ver en la Figura 13.8. Se implementó haciendo una reimplementación de los siguientes tres



Figura 13.8: Ejemplo de dibujo libre

métodos:

- (void)touchesBegan:(NSSet *)touches withEvent:(UIEvent *)event;
- (void)touchesMoved:(NSSet *)touches withEvent:(UIEvent *)event;
- (void)touchesEnded:(NSSet *)touches withEvent:(UIEvent *)event;

Cada vez que una instancia de una clase que hereda de *UIViewController* detecta un toque sobre la pantalla (evento *touch*), se invocan los métodos mencionados. La secuencia de invocaciones se da al comenzar el toque en la pantalla (*touchesBegan*), al desplazar el dedo sin levantarla de la pantalla (*touchesMoved*) y al finalizar el *gesture* levantando el dedo de la pantalla (*touchesEnded*). Un *gesture* es una forma característica de tocar la pantalla. Ejemplos de *gestures* existentes son: *touch*, *double touch*, *multi touch* entre otros. Se obtienen entonces las coordenadas del punto de toque sobre la pantalla invocando el siguiente método:

```
[touch locationInView:self.view]
```

donde *touch* es del tipo *UITouch* y tiene propiedades que dependen del evento. Una vez que se tienen las coordenadas del punto de contacto en la pantalla se guarda esta posición y al obtener una nueva posición en la pantalla (luego de desplazar el dedo en *touchesMoved*), se dibuja una línea entre el punto actual y el anterior con el método siguiente:

```
[image.image drawInRect:CGRectMake(0, 0, self.view.frame.size.width,
                                         self.view.frame.size.height)];
```

El método *drawInRect* sirve para dibujar en forma 2D sobre *UIViews* y fue utilizado extensivamente en este proyecto. Finalmente en el método *touchesEnded* lo que se hace es dibujar una línea en el punto actual y sí mismo, generando un punto final al levantar el dedo de la pantalla. Otra característica interesante a mencionar respecto de la capacidad de responder a eventos *touch* es el reconocimiento de *gestures* que pueden ser nativos o incluso creados por el propio desarrollador. De esta manera si se quiere reconocer un *double touch* por ejemplo, se puede invocar el siguiente método:

```
[touch tapCount];
```

que devuelve la cantidad de veces que se tocó la pantalla en un intervalo corto de tiempo. Esto fue utilizado en esta clase para borrar lo dibujado y poder comenzar a dibujar nuevamente.

A esta clase también se le agregó una *IBAction* que genera un *tweet* con el dibujo generado por el usuario. El mismo es logrado generando una instancia de la clase *TWTweetComposeViewController* y agregándole un texto e imagen con los siguientes métodos:

```
[controller setInitialText:text];
[controller addImage:img];
```

donde *text* e *img* son el texto del *tweet* y la imagen adjunta. Finalmente se presenta la *view* del *TWTweetComposeViewController* y una vez finalizado se vuelve a la instancia *DrawSign*.

13.2.9. TouchVista

Esta clase hereda de la clase *UIView* y se creó para poder manejar eventos *touch* en *ViewControllers* que tienen varias *subviews* y que interesa que se dispare un evento al tocar tan sólo una de ellas en determinada área de la pantalla. Entonces lo que se hace en esos casos es agregar a la *subview* en cuestión una instancia de *TouchVista* en forma transparente por encima y del mismo tamaño. De esta manera al tocar la *subview* se toca en realidad la instancia de *TouchVista* y se invoca el método *touchesBegan*. Este método simplemente configura una bandera y configura lo siguiente:

```
[super touchesBegan:touches withEvent:event];
```

Lo que se hace en el código anterior es invocar al método *touchesBegan* de la clase superior. Para el caso en que se tiene un *ViewController*, con una *subview* del tipo *TouchVista* transparente, entonces esta línea invoca directamente el método *touchesBegan* del *ViewController*. Dos de los *ViewControllers* que utilizan esto son *VistaViewController* y *ObraCompletaViewController*.

13.2.10. Realidad Aumentada en ISGL3D

Para realizar realidad aumentada se necesita poder hacer un *render* por encima de las imágenes capturadas por la cámara del dispositivo en tiempo real. Sin embargo, cuando se crea un proyecto de ISGL3D, este permite realizar *renders* pero sobre un fondo estático y gris (o cualquier otro color configurable). Resulta entonces necesario configurar el proyecto de manera de reemplazar al fondo antes mencionado por imágenes capturadas por la cámara. Para lograr esto, hubo que trabajar sobre las clases *Isgl3dViewController* y *app0100AppDelegate*. A continuación se muestran algunas modificaciones sobre estas dos clases

```
UIImageView* vistaImg = [[UIImageView alloc] init];

/* Se ajusta la pantalla*/
UIScreen *screen = [UIScreen mainScreen];
CGRect fullScreenRect = screen.bounds;

[vistaImg setCenter:CGPointMake(fullScreenRect.size.width/2,
fullScreenRect.size.height/2)];
[vistaImg setBounds:fullScreenRect];
```

```
[self.window addSubview:vistaImg];
[self.window sendSubviewToBack:vistaImg];
ViewController.videoView = vistaImg;
```

Con esto se ajusta el atributo *videoView* de la propiedad *viewController* que pertenece a la clase *app0100AppDelegate* y es instancia de la clase *Isgl3dViewController*.

Como fue mencionado en el Capítulo 3, en Xcode, si se quiere simplemente hacer una filmación, sacar fotos o acceder a la galería de las fotos, se utiliza generalmente instancias de la clase *UIImagePickerController*. Esta última clase se instancia en la aplicación en otras clases, como ser *ImagenServerViewController*. Si lo que se desea es acceder a los píxeles de las imágenes capturadas, para luego poder procesarlos en tiempo real, entonces la forma más indicada es usando el conocido framework *AVFoundation*. En la clase *Isgl3dViewController*, en el método *viewDidLoad* está toda la configuración necesaria para la utilización de *AVFoundation*. A continuación se muestra el código con sus comentarios sobre esta configuración.

```
/*Creamos y setteamos la captureSession*/
self.session = [[AVCaptureSession alloc] init];
self.session.sessionPreset = AVCaptureSessionPresetMedium;

/*Creamos al videoDevice*/
self.videoDevice = [AVCaptureDevice defaultDeviceWithMediaType:AVMediaTypeVideo];

/*Creamos al videoInput*/
self.videoInput = [AVCaptureDeviceInput deviceInputWithDevice:
self.videoDevice error:nil];

/*Creamos y setteamos al frameOutput*/
self.frameOutput = [[AVCaptureVideoDataOutput alloc] init];

self.frameOutput.videoSettings = [NSDictionary dictionaryWithObject:
[NSNumber numberWithInt:kCVPixelFormatType_32BGRA] forKey:(id)
kCVPixelBufferPixelFormatKey];

/*Ahora conectamos todos los objetos*/
/*Primero le agregamos a la sesión el videoInput y el videoOutput*/

[self.session addInput: self.videoInput];
[self.session addOutput: self.frameOutput];
```

Como se ve, es necesario crear una sesión de captura, luego un dispositivo de captura y una salida de los datos y agregarlos a la sesión. También se puede configurar el tipo de captura de la cámara (tiene que ser soportado por el *hardware*, sino se genera un error en este punto). Otra cosa importante que se hace en la clase *Isgl3dViewController* es la configuración del *multithreading*. A continuación se muestra el código que logra esto.

```
dispatch_queue_t processQueue = dispatch_queue_create("procesador", NULL);
[self.frameOutput setSampleBufferDelegate:self queue:processQueue];
dispatch_release(processQueue);
```

Con esto lo que se hace es hacer una instancia de una *Queue*, que representa una cola de procesamiento. De esta manera se puede hacer que ciertas tareas se alojen en esa instancia de cola, que lógicamente es otra distinta que la cola de procesamiento principal (*mainQueue*). Esto mismo es lo que se hace en la segunda línea del código anterior, diciendo que el *Delegate* de los datos de salida (*frameOutput*) es la propia clase y que ese *Delegate* se ejecute en la *Queue* que se instanció en la línea anterior. De esta manera todo lo que sea invocado por el *Delegate* en forma periódica será enviado a una cola distinta de la principal, pudiendo tener entonces, una cola de procesamiento separada de la cola de interfaz de usuario. Esto es algo ampliamente utilizado y es una recomendación de la documentación de iOS, pues se basa en los conceptos de tener la mayor atención posible a la interfaz de usuario, impidiendo en lo posible dejar al usuario esperando por algún eventual procesamiento que se esté llevando a cabo.

Finalmente se da comienzo a la sesión:

```
[self.session startRunning];
```

Como la clase *Isgl3dViewController* implementa el protocolo *textitAVCaptureVideoDataOutputSampleBufferDelegate*, una vez que comienza la sesión, se invoca cuadro a cuadro el siguiente método:

```
- (void) captureOutput:(AVCaptureOutput *)captureOutput didOutputSampleBuffer:(CMSampleBufferRef)sampleBuffer fromConnection:(AVCaptureConnection *)connection;
```

donde *sampleBuffer* es una referencia al *buffer* que contiene los píxeles de la cámara en ese momento. Así entonces, se accede a los píxeles y se invoca dentro del *captureOutput* periódicamente al método *procesamiento*, encargado de procesar la imagen recibida por la cámara.

13.3. El QR en la aplicación

Para el prototipo de aplicación se optó por tener un identificador QR para cada uno de los tres artistas elegidos del Museo Nacional de Artes Visuales (MNAV). De esta manera, para el caso del recorrido del museo de forma automática, es posible determinar la posición del usuario utilizando imágenes QR debidamente ubicadas en cada zona. Esto sirve como localización y también sirve para lograr que el paso siguiente, que es la identificación de la obra que el usuario tiene enfrente, sea mediante una búsqueda en una base de datos discriminada por autor como se explicó en la Sección 13.6. Es decir, si el usuario no escanea el QR la búsqueda de la obra a identificar se hará en una base de datos global del museo, pero en el caso que el usuario sí decida escanear el QR, entonces se cuenta con la posibilidad de realizar la búsqueda en una base de datos reducida y por lo tanto más veloz.

13.4. Servidor

Si bien el desarrollo de la aplicación busca lograr un prototipo y no una aplicación comercial, por lo que la cantidad de imágenes y datos en general es pequeña y por lo tanto puede ser almacenada dentro de la aplicación, por prolijidad y escalabilidad resulta imprescindible contar con un servidor. Es necesario un servidor que guarde la toda la información y a la vez realice algo de procesamiento, siempre y cuando este no deba hacerse en tiempo real. Se decidió entonces, almacenar toda aquella

información relevante en cuanto a registro de obras (imágenes, títulos, autores y descripciones), audioguías, videos, modelos y animaciones utilizadas para la realidad aumentada en un servidor que hubo que implementar. El servidor debe estar ubicado dentro del museo y se debe poder interactuar con él por medio de la Wireless LAN (54 Mbps). Si bien es cierto que el servidor podría perfectamente ser remoto, con acceso por medio de internet, su desempeño a nivel de tiempos bajaría notoriamente.

13.4.1. Creando el servidor

Para la creación del servidor se buscó primeramente la alternativa de hacerlo sobre una máquina con sistema operativo con núcleo Linux, distribución Ubuntu, ya que se creyó sería más sencillo. Luego de realizada esta tarea, se estudió la posibilidad de tener el servidor corriendo sobre una plataforma Mac OS X y de manera sorpresiva, en este segundo caso, el objetivo se logró de forma mucho más sencilla. A continuación se explica paso por paso como se implementaron los servidores en uno y otro sistema operativo.

13.4.1.1. Servidor LAMP

Se le llama LAMP a la combinación de todas las herramientas necesarias para lograr un servidor web: Linux (Sistema Operativo), Apache (Servidor Web), MySQL (Gestor de base de datos) y PHP/Perl/Python (lenguaje de programación del lado del servidor). Se comenzó entonces por instalar un servidor web Apache, que tiene como principales ventajas el hecho de ser multiplataforma, gratis y de código abierto. La descarga y la instalación son inmediatas, se abre un terminal y se escribe:

```
sudo apt-get install apache2
```

Una vez finalizada la instalación de este conjunto de paquetes ya se cuenta con el servidor y mediante los siguientes comandos, uno puede dar inicio y fin al mismo:

```
sudo /etc/init.d/apache2 start  
sudo /etc/init.d/apache2 stop
```

Luego de tener instalado Apache, se procede a instalar php:

```
sudo apt-get install php5
```

Para este proyecto en particular, no fue necesario instalar MySQL.

13.4.1.2. Servidor en Mac OS X

A diferencia de otros sistemas operativos, Mac OS X cuenta por defecto con Apache y Php, no así con MySQL. Para tener un servidor entonces, sólo resta activarlos y si además se quiere contar con MySQL, es necesario instalarlo. La activación del servidor es un proceso muy simple, del cual existe bastante material disponible en internet.

Una vez instalado el servidor en cualquiera de ambos sistemas operativos, se puede corroborar su correcto funcionamiento abriendo cualquier navegador web y digitando la dirección IP de la máquina en la que se instaló el servidor (si se está en ella misma, se puede digitar la dirección del bucle local). Se deberá ver la página que por defecto muestra el servidor, la de la Figura 13.9.



Figura 13.9: Página por defecto del servidor Apache.

13.4.1.3. Aspectos a mejorar del Servidor

Como se mencionó el servidor se implementó sin MySQL y tampoco con ningún otro gestor de base de datos, lo que hace que cualquier modificación sobre la información de los cuadros, ya sea en cuanto a imágenes, descripciones, audioguías o cualquier información que se quiera modificar dentro del servidor hace que quien administre el mismo tenga la necesidad de comprender en cierta medida cómo está implementado y tener cierto dominio técnico. Para el caso de aplicar esto en un museo y pensando que quienes administren la información de los cuadros sea gente encargada del museo no especializada en aspectos de software, es deseable que la interfaz de gestión del servidor tenga un entorno más amigable. Esto es algo que se podría mejorar para un futuro en caso de querer continuar trabajando con el presente proyecto para darle más completitud y usabilidad.

13.5. SIFT

SIFT fue utilizado en el presente proyecto para el reconocimiento de las obras contempladas por los usuarios, cuando estos deciden realizar el recorrido interactivo del museo de forma automática. El algoritmo corre en el servidor y el código utilizado es una adaptación propia de la implementación en C que está en la librería VL-Feat. VL-Feat es una librería gratis y en código abierto que implementa algoritmos populares de visión artificial que puede ser descargada de su página web oficial [43].

Se tiene entonces, para cada obra en cuestión, una lista de 128 descriptores invariantes a factores de escala, traslación, rotación y parcialmente invariantes a cambios de iluminación y afinidades; almacenada en el servidor. Cuando el usuario se encuentra frente a una obra determinada, le toma una fotografía que es subida al servidor, en donde es procesada con SIFT y luego sus descriptores son comparados contra todos los descriptores de la base de datos, o al menos los correspondientes a la región del museo en donde el usuario se encuentra. La obra con más descriptores en común con la imagen en cuestión será la que el usuario contempla.

13.6. Resumen y comentarios sobre la implementación

Hasta el momento se mencionaron una cantidad de herramientas más que interesantes, que reunidas logran un recorrido interactivo para uno o más museos. Sin embargo, no se expusieron cuáles son las aplicaciones puntuales de realidad aumentada que se dijo se iba a hacer sobre las obras. Por otra parte, aunque dejando afuera aspectos estéticos y artísticos, en el Capítulo 12 se mostró cómo se resolvieron los aspectos técnicos necesarios para llevar a cabo una aplicación final real de realidad

aumentada. Así entonces generar un *render* de un perro junto a un sillón (caso de uso “modelos”), que claramente puede llegar a ser de muy poco interés para un museo, resuelve el mismo problema que si se quisiera generar un *render* con el modelo de José Artigas. Asimismo ser capaz de responder frente a al toque en la pantalla del modelo de un cubo y así entonces actuar en consecuencia (caso de uso “interactivo”), resuelve el mismo problema que animar al modelo de José Artigas si este es tocado. Lo que se tiene en este caso (y efectivamente se logró), es una escultura digital e interactiva de Artigas, que sólo puede visualizarse a través de un *iPad*. Ver Figura 13.10.

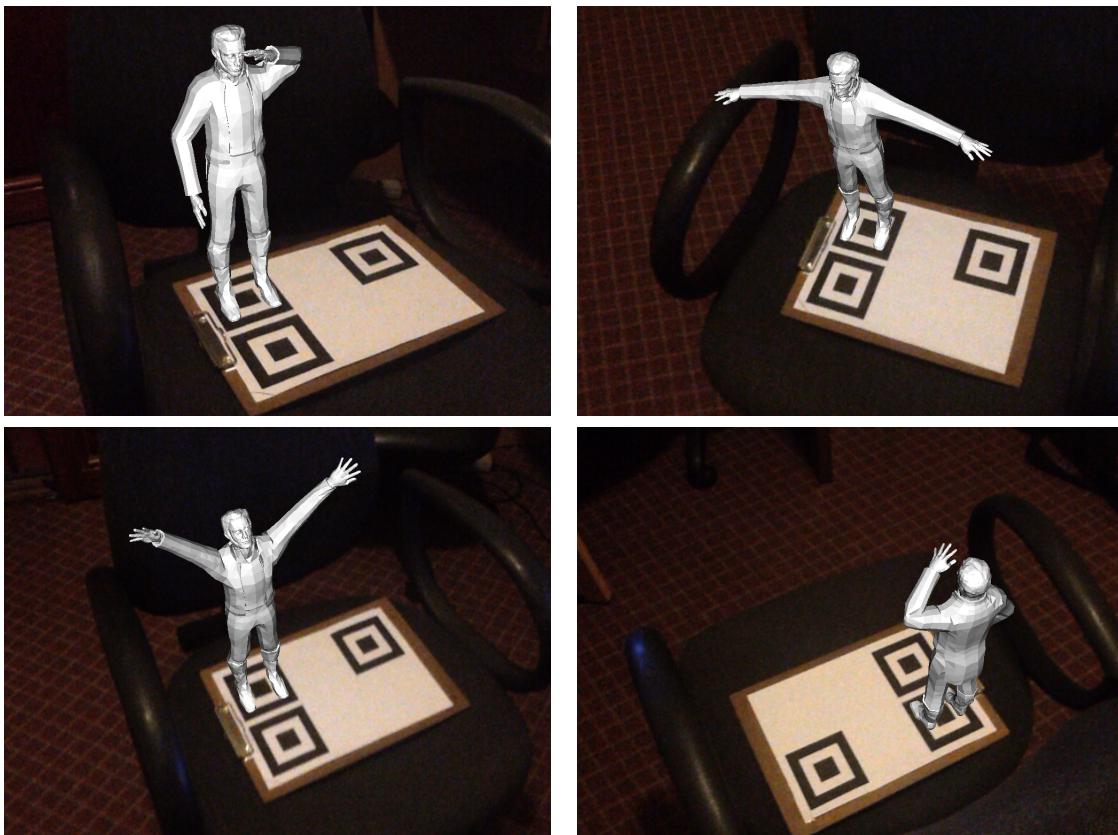


Figura 13.10: Escultura digital e interactiva de Artigas vista desde ángulos distintos y en posiciones distintas.

Lo mismo sucede con el caso de uso “video”, que proyecta un video sobre el marcador, que puede facilmente adaptarse para proyectar un video de interés sobre una obra, parte de ella o incluso un mapa con información del museo o cualquier otra cosa. Así entonces logrando una audioguía interactiva, donde el usuario puede, mientras se le habla de la obra, ver fotos y videos relacionados a la misma. A la fecha se está buscando aplicar, dentro de lo posible, los desafíos técnicos resueltos en cada uno de los casos de uso mencionados en el Capítulo 12 a diferentes implementaciones que puedan llegar a resultar atractivas para uno o varios museos. Las opciones son muchísimas y se cree que este proyecto deja una puerta abierta a seguir explorando ideas innovadoras.

CAPÍTULO 14

Conclusiones y trabajo a futuro

14.1. Introducción

En el presente capítulo se analiza al proyecto en su conjunto, primero desde el cumplimiento o no de sus objetivos y luego se hará una discusión técnica respecto de las elecciones realizadas, sobre todo en cuanto a los algoritmos utilizados para implementar cada uno de los bloques involucrados en la realidad aumentada. Finalmente, se plantea el trabajo que se podría hacer a futuro de manera de mejorar la aplicación final.

14.2. Conclusiones generales

En líneas generales, se puede decir que el presente proyecto resultó exitoso. En primer lugar, porque se considera que se cumplieron con todos los objetivos originales. Al día de hoy se cuenta con una documentación de toda la investigación realizada que brinda herramientas y un registro de la experiencia a todo aquel que busque continuar con esta línea de investigación. Se destaca la importancia de contar con implementaciones de algoritmos disponibles en código abierto, ya que implementar todos los algoritmos hubiera sido una tarea demasiado extensa y hubiera limitado la capacidad de resolver el problema completo. También es bueno resaltar el tiempo invertido en analizar el estado del arte de los algoritmos de detección de características, identificación y estimación de pose. Se logró un nivel de comprensión de los mismos que permitió incluso proponer modificaciones que lograron optimizar su performance. Por otra parte, se logró implementar varios casos de uso que solucionan diferentes problemas en los que se puede aplicar realidad aumentada. Finalmente, se implementó el mencionado recorrido interactivo para el museo, que cuenta con los bloques de *navegación, reconocimiento de obra y realidad aumentada* que se explican en el Capítulo 2.

En segundo lugar, se destaca el hecho de haber logrado desarrollar una aplicación completa que funcione correctamente. Se cree que el desempeño de la misma es muy bueno, y en particular, si bien la realidad aumentada puede mejorar, es suficiente para la misma.

En cuanto al funcionamiento del grupo de trabajo, se cree que fue excelente. Se adquirió una dinámica de subgrupos de trabajo que resultaron muy eficientes. Se respetó mucho la división de tareas y el trabajo se mantuvo perfectamente equilibrado, con integrantes proactivos en todo momento.

Finalmente, la relación con el tutor fue muy buena. Se cree que fue un excelente orientador y que su compromiso con el proyecto fue notable.

14.3. Conclusiones específicas

Hay varios temas a discutir respecto de los bloques utilizados para el diseño de la realidad aumentada. Previo a tal discusión es bueno volver a detallar, tal y como se realizó en el Capítulo 2, el diagrama de bloques del proceso mediante el cual se logra la realidad aumentada, en la Figura 14.1.

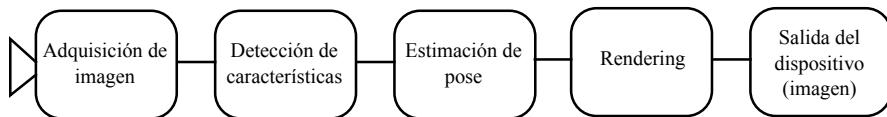


Figura 14.1: Diagrama de bloques del proceso mediante el cual se logra la realidad aumentada.

14.3.1. Detección de características

El bloque de detección de características se expande en la Figura 14.2.



Figura 14.2: Diagrama de bloques de la detección de características utilizada en este proyecto.

Se vio en capítulos anteriores que la detección de segmentos se realizó utilizando LSD. Se está conforme tanto con el desempeño del algoritmo como con la optimización que se le hizo para tiempo real. Sin embargo, se cree que la implementación se puede optimizar aún más.

En lo que respecta a los algoritmos de filtrado y agrupación de segmentos, determinación de esquinas y correspondencias, se puede afirmar que funcionan correctamente. De cualquier manera, se cree que para ciertas aplicaciones en particular se podría utilizar un marcador más sencillo, con una geometría más simple de detectar; lo que simplificaría los algoritmos de detección y aumentaría la aplicabilidad a otros casos de uso.

14.3.2. Estimación de pose

En el Capítulo 9 se explicaron en detalle diferentes versiones de POSIT, el algoritmo que este proyecto utiliza para estimar la pose de la cámara a partir de ciertas características de la imagen. En particular, se utilizó el **POSIT coplanar moderno** que toma como entrada ciertos puntos en un modelo predefinido y sus correspondientes en la imagen. Este es un algoritmo muy preciso bajo ciertas condiciones y veloz respecto de los algoritmos de estimación de pose tradicionales. Sin embargo, resulta no del todo lógico utilizar un algoritmo que tome puntos como entrada si las características extraídas de la imagen primeramente son segmentos.

Existe por su parte, otra versión de POSIT denominada “*Soft POSIT* de líneas”. Esta versión, toma como entrada líneas en una imagen y líneas en un modelo y tiene la habilidad de detectar correspondencias entre ellas y luego estimar la pose de la cámara a partir de dichas correspondencias. De haberse usado esta versión de POSIT, el segundo y tercer bloque del diagrama de la Figura 2.3 no hubieran sido necesarios.

Sin embargo, *Soft POSIT* de líneas no funciona para marcadores planos como los utilizados en este proyecto. Además, requiere de una estimación de la pose inicial del dispositivo lo que no hace tan trivial su uso. Por estos motivos se optó por utilizar *POSIT coplanar* y resolver las correspondencias en la etapa de filtrado de segmentos.

14.3.3. Una solución alternativa: SLAM

“*Simultaneous Localization And Mapping*” (SLAM), o en español “Localización y Mapeado Simultáneos”, es el problema de ubicar a un dispositivo de visión artificial en un determinado lugar desconocido y que este, de manera incremental, vaya construyendo un modelo del lugar y a la vez vaya ubicándose dentro del modelo.

Este problema no sólo tiene solución, sino que además muchos de los kits de desarrollo de realidad aumentada, como por ejemplo *Metaio*, presentado en el Capítulo 2, lo utilizan. Y por lo que se pudo ver, da muy buenos resultados. En particular, logra resultados sustancialmente mejores a los de este proyecto, en cuanto a los tiempos de procesamiento.

De esta manera, los bloques “Detección de características” y “Estimación de pose” del diagrama de la Figura 14.1, pueden ser sustituidos por un algoritmo que solucione este problema.

14.3.4. Demás bloques

El desempeño de los demás bloques involucrados en el proceso mediante el cual se logra la realidad aumentada no requiere de un análisis extra al realizado en capítulos anteriores. ISGL3D, la herramienta utilizada para realizar renders sobre las imágenes capturadas, funciona perfectamente y los dispositivos de captura y despliegue de imágenes del *iPad* son muy buenos. Hubiera sido mejor capturar imágenes de mayor tamaño, para así lograr una mejor calidad a la salida. Pero cuanto mayor es el tamaño de la imagen capturada, también lo es el tiempo de procesamiento de los algoritmos de detección, en particular LSD.

14.4. Trabajo a futuro

14.4.1. Sobre el servidor

Se cree que la implementación del servidor en la aplicación final estuvo bien lograda, aunque no fue la más ortodoxa. Es poco escalable básicamente por dos razones. En primer lugar, no existe una interfaz de usuario para agregar o quitar obras de la base de datos del servidor, o incluso editar la información asociada a las mismas como por ejemplo imagen, audioguía, descripción, etc. Por eso, cualquier tipo de cambio en el servidor debe ser realizado por un técnico conocedor del sistema en su conjunto. En segundo lugar, al día de hoy toda la información referente a la realidad aumentada y al modelo del marcador es almacenada en la aplicación y por lo tanto, de agregarse algún cuadro a la base de datos, también se requeriría de un técnico conocedor del sistema para agregar esta información a la aplicación.

Un trabajo a futuro importante es, en primer lugar, implementar de manera prolífica tanto la interacción entre la aplicación y el servidor, como la forma de almacenar los datos en este. En segundo lugar, realizar la aplicación de usuario que sirva para agregar o quitar información de la base de datos y finalmente, independizar completamente a la aplicación de los cuadros almacenados en la base de datos.

Actualmente, se está trabajando en coordinación con un proyecto de fin de estudios en la carrera Tecnólogo Informático de Paysandú, que tiene como objetivo realizar los cambios descriptos en el párrafo anterior.

14.4.2. Sobre la realidad aumentada

Lo expuesto en la Sección 14.3 sugiere, en primer lugar, probar diferentes marcadores y hacer un estudio detallado del desempeño de la realidad aumentada con cada uno de ellos para diferentes aplicaciones particulares.

En segundo lugar, un desafío a futuro prometedor es investigar las herramientas que resuelven SLAM y buscar la forma de integrarlas al bloque de realidad aumentada. Se cree que de esta manera, puede llegar a mejorar mucho su desempeño, tanto desde el punto de vista de la precisión como en los tiempos de ejecución.

De forma alternativa, se puede profundizar en la integración de los sensores iniciales del dispositivo a la estimación de la pose del mismo. Estos, mediante un bajo costo computacional, estiman de forma muy precisa cambios en su orientación lo que puede llevar bajar el *frame rate* obtenido en la aplicación.

14.4.3. Sobre la plataforma

Como trabajo a futuro también se considera la migración de todo lo desarrollado, a dispositivos que funcionen con *Android* como sistema operativo. Dado que gran parte del desarrollo fue en lenguaje C, en particular todos los algoritmos de procesamiento de imágenes, es fácilmente portable a Android, que si bien se basa en Java, cuenta con una herramienta llamada NDK que permite reutilizar código de C/C++. Una motivación importante para considerar esta migración a Android es que estos dispositivos son de uso más masivo que los dispositivos *Apple* y en algunos casos tienen prestaciones similares y con precios más accesibles.

APÉNDICE A

Herramientas

A.1. Herramientas de Benchmark

Durante el desarrollo del proyecto se hizo presente la necesidad de contar con herramientas de medida del desempeño objetivas para la validación de los algoritmos que se utilizaron y desarrollaron. En particular se desea evaluar los algoritmos asociados a la detección de características y estimación de pose. Estos son LSD, filtrado de segmentos, determinación de correspondencias y Posit Coplanar.

El enfoque elegido para la validación de dichos algoritmos consiste en la generación de un conjunto de “datos de referencia” o *ground truth* de forma de poder comparar la detección y resultados obtenidos con los valores reales o verdaderos de los mismos. Este proceso es lo que se denomina en este proyecto como *Benchmark* o Comparativa. De esta forma se puede generar un número suficiente de datos de salida de forma de obtener algunas estadísticas de interés para la evaluación de los algoritmos.

Debido a la naturaleza del proyecto fue necesario generar un entorno para la evaluación el cual incluye la generación de imágenes sintéticas asociadas a esa *ground truth* en Blender. También fue necesario el desarrollo de un entorno en Matlab que permita una ejecución tipo batch para la generación de estas imágenes así como para la generación, análisis y despliegue de resultados en forma rápida y simple.

A.1.1. Generación de imágenes sintéticas: Blender

Para realizar el Benchmark se desarrolló un entorno de generación de imágenes sintéticas que utiliza herramientas gratuitas y de código abierto que permiten capacidades de *scripting* y ejecución en forma “batch” de forma de serializar la producción de renders en un proceso automático. El proceso de generación de los renders fue realizada mediante el uso del software Blender.

La generación de imágenes sintéticas consiste en producir una imagen 2D en base a un modelo 3D de una escena y una pose de la cámara respecto a esa escena o viceversa. Este proceso se denomina *Rendering*, o renderizado, y el mismo se trata en el Capítulo 11 para la herramienta para dispositivos móviles *ISGL3D*.

Blender es un *suite* de creación de contenidos gratuito y de código abierto. Está disponible para los principales sistemas operativos, Windows, Mac, Linux; bajo la Licencia Pública General GNU[38]. Algunas de sus prestaciones son modelado, *shading*, animación, renderizado, e interacción 3D. También presenta herramientas de *scripting* mediante el uso del lenguaje *Python* las cuales se explicarán más adelante. Se utilizó la versión de Blender 2.58 para el desarrollo siguiente ha sido utilizado satisfactoriamente con versiones más recientes como la 2.63.

A.1.1.1. Modelo 3D y escena

Para lograr hacer un render es necesario contar con una escena 3D y en particular con un modelo 3D del objeto de interés. Para realizar la detección de características se utiliza un marcador plano que se describe en el Capítulo 6.

Se manejaron algunas alternativas para la generación del modelo 3D del marcador entre las cuales se encuentran, VTK, Paraview, Autodesk 3ds Max y el mismo programa utilizado por este proyecto para rendering en un PC, Blender. Finalmente debido a la simplicidad del marcador, y principalmente a que es un marcador plano, se utilizó un dibujo vectorial del marcador (formato *svg*) generado en Inkscape. Este dibujo vectorial puede ser importado a Blender y con él generar un modelo 3D que será un actor en la escena. Dentro de la interfaz de Blender se ajustó un factor de escala para que las medidas reales del marcador se correspondan con las unidades de Blender, por razones de facilidad en el manejo en Blender se estableció que la unidad de Blender corresponde a un centímetro en el mundo real.

En la Figura A.1 se muestra la vista de *Perspectiva de usuario* en donde se puede ver el modelo del marcador importado, la cámara en el centro de coordenadas de Blender y el sistema de coordenadas interno. Se busca construir una escena mínima y controlada en la cual sólo actúa el objeto

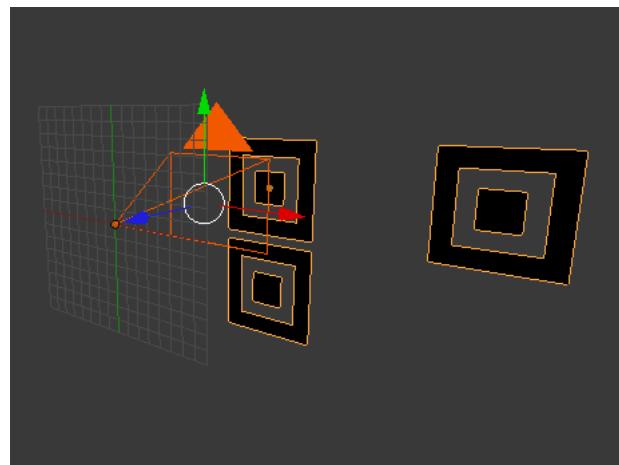


Figura A.1: Vista de perspectiva de usuario para el modelo 3D del marcador y la cámara en la escena.

marcador. Con este fin es que se decide por una escena que contenga únicamente el marcador y una cámara. No se añaden luces ya que el efecto de estas en el marcador para alguna pose puede resultar en artefactos de iluminación indeseados. La no inclusión de luces en las imágenes está ligada a que el modelo 3D del marcador es en realidad hueco en las zonas blancas y negro en las zonas negras por lo tanto el negro permanece negro y la parte hueca asume el color del fondo. En otro caso se podría utilizar algún tipo de iluminación de ambiente que sea pareja en todas las direcciones y lograr un efecto similar.

Blender utiliza el sistema de coordenadas que se ve en la Figura A.1 en donde los ejes *x*, *y*, *z* se corresponden con los ejes de color rojo, verde y azul respectivamente y forman un sistema de coordenadas siguiendo la regla de la mano derecha, lo que se dice en lenguaje técnico: *right handed*.

Finalmente, la escena conteniendo el modelo 3D del marcador se resume en el archivo: **Marker.blend**.

A.1.1.2. Ajustes de escena y parámetros: GUI

El software Blender permite el ajuste de la escena y los parámetros y características asociados al render, la cámara y el objeto mediante su interfaz gráfica. Estos tienen como resultado final la imagen renderizada. Los parámetros y ajustes que fueron realizados y resultan ser los más relevantes para la reproducción del proceso de renderizado del marcador se explican a continuación.

- **Mundo y fondo:** Los ajustes realizados al mundo y fondo se explicaron en cierta medida anteriormente. Al no utilizar iluminación en la escena es importante definir el color del fondo ya que los huecos del modelo 3D asumirán ese color. Los ajustes realizados se muestran en la Figura A.2(a) y consisten principalmente en definir el fondo de color blanco.
- **Parametros de Render:** Los principales parámetros ajustables en cuanto a las propiedades de render son el tamaño de imagen y el porcentaje de escala sobre el tamaño de imagen, el cual por defecto en proyectos nuevos se ubica en 50 % y en este caso interesa que sea 100 %. Estos ajustes se pueden ver en la Figura A.2(b).
- **Parámetros de Cámara:** Sobre las propiedades ajustables de la cámara se encuentra un parámetro de interés como es el campo visual, *field of view*, o *fov*. Adicionalmente el *Shift* representa el corrimiento del centro de imagen de la misma y también se puede ajustar el *near* y el *far*. Los ajustes realizados se pueden ver en la Figura A.2(c).
- **Parámetros de Objeto:** Las propiedades ajustables de mayor interés sobre el objeto se refieren a su pose. La locación y rotación del objeto pueden ser asociadas a la pose del objeto respecto a la cámara si se asume una interacción del tipo cámara fija, objeto móvil. Se aclara aquí que un ajuste idéntico se puede realizar sobre el objeto cámara. La cámara se fija para todos los casos en el origen de coordenadas de Blender con orientación nula en las tres direcciones. Esto resulta en una cámara alineada con el eje z que mira hacia los z negativos. Volviendo a los ajustes del objeto marcador, se presentan los ajustes de escala ya mencionados en el ajuste de unidades del modelo 3D y también un factor relevante como es el orden de las rotaciones respecto al tipo de rotación: *XYZ Euler*. Todos los ajustes aquí descritos para el objeto marcador se pueden ver en la Figura A.2(d).

Vale la pena observar que los ajustes de Render y Cámara constituyen una forma de establecer los **parámetros intrínsecos** de la cámara. Mientras que los ajustes de Objeto para la Cámara y el Marcador representan la **pose del objeto** en el modelo de vinculación adoptado. Se aclara que los **parámetros extrínsecos** de la cámara respecto a las coordenadas de Blender es nula en rotación y traslación.

A.1.1.3. Ajustes de parámetros: Python scripting

Python es un lenguaje de programación interpretado, interactivo y orientado a objetos. Incorpora módulos, excepciones, *tipo* dinámico, tipos de datos de muy alto nivel y clases. Python logra combinar notablemente poder con claridad en la sintaxis [39]. La mayoría de las áreas de Blender pueden ser programadas mediante *scripts*, incluyendo Animación, Renderizado, Importación y Exportación, Creación de objetos y Tareas repetitivas. Para la interacción con Blender se hace uso de una API “ajustada a medida”.

La API de Blender para Python se encuentra empaquetada en el módulo *bpy*. Mediante este módulo se puede acceder a los objetos y sus propiedades de la escena. De esta forma se puede de forma programática ajustar las propiedades y parámetros explicados anteriormente. Por lo tanto mediante el intérprete de comandos de Blender se puede prescindir de la interfaz gráfica de Blender. En la

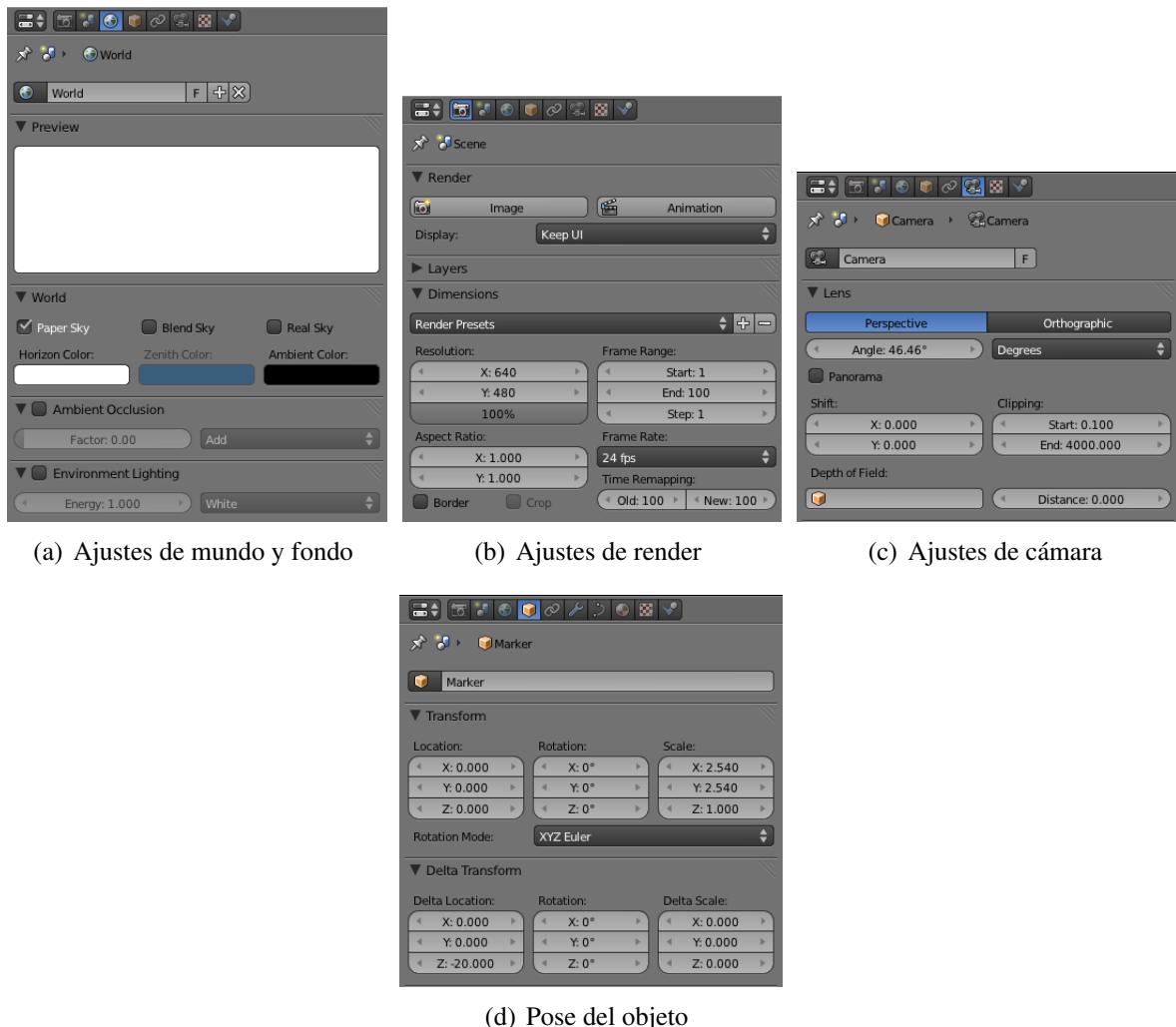


Figura A.2: Ajustes en la escena en Blender para realizar el render.

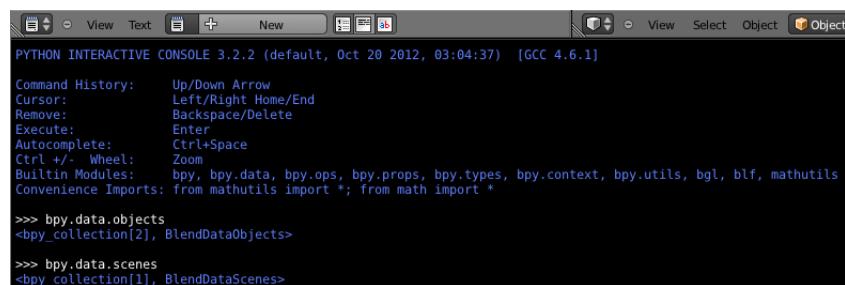


Figura A.3: Consola interactiva de Python incrustada en Blender.

Figura A.3 se muestra un *screenshot* de la consola interactiva de Python en Blender. A continuación se muestran las principales funcionalidades que se utilizaron en la manipulación de Blender mediante la consola interactiva. Estas se van ejecutando en serie hasta la última orden que realiza el renderizado y guarda la imagen.

- Obtener referencias a la escena y al marcador.

```
>>> scene = bpy.data.scenes["Scene"]
>>> marker = bpy.data.objects["Marker"]
```

- Seleccionar modo de rotación y ubicar y orientar cámara como se desea.

```
>>> scene.camera.rotation_mode = 'XYZ'  
>>> scene.camera.rotation_euler = [0,0,0]  
>>> scene.camera.location = [0,0,0]
```

- Asignación de valores asociados a **parámetros intrínsecos** de la cámara.

```
>>> scene.render.resolution_x = width  
>>> scene.render.resolution_y = height  
>>> scene.camera.data.angle = fov*(pi/180.0)
```

- Asignación de valores asociados a la **pose** del marcador.

```
>>> marker.rotation_mode = 'XYZ'  
>>> marker.rotation_euler = [rx,ry,rz]  
>>> marker.location = [tx,ty,tz]
```

- Asignación de nombre de imagen y ejecución de renderizado para guardar la imagen.

```
>>> bpy.data.scenes["Scene"].render.filepath = str(fname)  
>>> bpy.ops.render.render( write_still=True )
```

En la Figura A.4 se muestra el resultado de esta secuencia de comandos para los valores parámetros de cámara y render: `width = 480`, `height = 360`, `fov = 45.5` y la pose del objeto como `(rx,ry,rz) = (0,30,0)` y `(tx,ty,tz) = (0,0,-100)`.

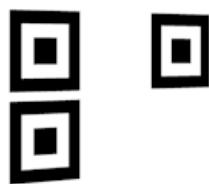


Figura A.4: Imagen del render realizado con Blender. El mismo resultado se puede lograr mediante interfaz gráfica o mediante la consola interactiva de Python de Blender.

A.1.1.4. Ejecución por consola de comandos

La ejecución de Blender por consola de comandos es útil en situaciones en donde se quieren realizar acciones como el Renderizado remotamente sobre una computadora potente que actúe de servidor. También puede ser utilizado para realizar acciones repetitivas sobre alguna escena o modelo y esta es la utilidad que se le dio.

Asumiendo que se tiene acceso a la aplicación Blender como el ejecutable `blender`, el mismo puede ser ejecutado desde consola por el comando:

```
> blender
```

Esta orden da lugar a la ejecución de Blender con su interfaz gráfica. La opción `-b` o `--background` permite la ejecución de Blender sin interfaz gráfica. Si se quiere utilizar este modo se debe especificar el nombre del archivo a cargar, en este caso **Marker.blend**:

```
> blender -b "Marker.blend"
```

Esto no produce ningún resultado visible, solamente abre Blender sin interfaz gráfica, carga el modelo y se cierra. Es una prueba del tipo *Hello World* y un chequeo de sanidad para comprobar que todo anda bien, en otro caso se mostrará algún mensaje de error de Blender.

Adicionalmente se pueden añadir las funcionalidades de *scripting* en Python previamente explicadas se pueden agrupar en un *script* para la ejecución mediante consola de comandos sin interfaz gráfica. La opción `-P` o `--python` seguida del nombre del archivo del script permite la ejecución del mismo dentro de la ejecución de Blender.

```
> blender -b "Marker.blend" -P "moveMarker.py"
```

La ejecución de la orden de arriba produce una imagen renderizada del marcador. El script **moveMarker.py** agrupa los comandos previamente explicados para su ejecución desde la consola interactiva integrada en Blender. Para que el script pueda hacer uso de los módulos de Blender se debe importar el módulo, `bpy`, al comienzo del script. También se importa el módulo `sys` para la posibilidad de tener un script de Python con argumentos de línea de comando.

```
import bpy
import sys
...
```

Finalmente se pueden agregar argumentos de línea de comando sobre el script de Python dejando accesibles las variables de interés para el proceso de renderización serial. Por ejemplo:

```
> blender -b "Marker.blend" -P "moveMarker.py" -- <tx> <ty> <tz>
   <rx> <ry> <rz> <fov> <heigh> <width> <fname>
```

En donde el `<fname>` determina el nombre de la imagen producto del renderizado y `--` especifica que el script de Python contiene argumentos. El parseo de estos argumentos de Python se debe hacer dentro del script en el cual se deben realizar las asignaciones y las conversiones a tipos de datos apropiadas.

A.1.1.5. Comentarios sobre el script de Python

A continuación se realizan algunos comentarios respecto al desarrollo del script en Python para lograr coherencia entre los sistemas de coordenadas y dimensiones que se utilizan entre el algoritmo de estimación de pose y Blender.

Debido a que el sistema de coordenadas que utiliza Blender difiere con el adoptado por el algoritmo de estimación de pose es que debe ajustar en algún punto los ejes de alguno de los dos sistemas para trabajar de forma coherente. Lo razonable y el enfoque que se eligió es el de ajustar los ejes que se van a utilizar en Blender dentro del script de Python. Por lo tanto se aplica una transformación sobre los valores de las rotaciones y traslaciones correspondientes a esta convención de ejes:

$$\begin{aligned}x_{blender} &= x_{posit} \\y_{blender} &= -y_{posit} \\z_{blender} &= -z_{posit}\end{aligned}$$

Esto se traduce en invertir el sentido de las rotaciones y el valor de las traslaciones de los ejes z e y .

Otra aclaración importante refiere a que las unidades de Blender fueron ajustadas para corresponder con centímetros mientras que a lo largo del proyecto las unidades utilizadas para las coordenadas del modelo 3D y del mundo son los milímetros. Por esto es que las traslaciones dentro del script son ajustadas para corresponder con centímetros.

Con estos dos ajustes la realización de imágenes sintéticas con el entorno desarrollado es *transparente* al usuario ya que si este es coherente con las convenciones tomadas para el algoritmo de estimación de pose no se tendrán que realizar reajustes.

A.1.2. Ejecución Batch: Matlab

Se generó un entorno de ejecución serial tipo batch en Matlab en donde se ejecuta Blender, en su modo de ejecución por consola de comandos con script de Python con argumentos , mediante el uso de la función de Matlab `system` la cual realiza una llamada al sistema.

El entorno desarrollado para generación automática de juegos de imágenes sintéticas tipo batch, que utiliza Matlab como interfaz hacia el usuario, consiste en varios pasos:

- **Configuración de Cámara:** Se fijan los parámetros intrínsecos y extrínsecos de la cámara así como el tamaño de imagen.
- **Setup general:** Se definen las rutas a los archivos del modelo y script de Blender así como las rutas a las carpetas para las imágenes de salida y se genera esta estructura de carpetas en caso de ser necesario. Se establece el identificador sobre el juego de poses a renderizar.
- **Generar Poses:** Se generara el juego de poses correspondiente al identificador del Setup. Las definiciones sobre los juegos de poses se realizan previamente. Por ejemplo un juego de poses puede consistir en variar el ángulo de rotación respecto del eje x manteniendo todos las otras rotaciones fijas y la traslación en en un $z = 1000mm$. Existe la posibilidad de agregar ruido al juego de poses.
- **Ejecución de Blender:** En base a la Cámara, el Setup y las Poses se ejecuta para cada pose una llamada al sistema con el comando de Blender de línea de comandos con script de Python

y argumentos de línea. El valor de los argumentos se ajusta para cada ejecución de forma de lograr el resultado esperado. Se genera en la estructura de carpetas un juego de imágenes de salida que corresponden a una imagen sintética del marcador.

- **Registro:** Se guarda un archivo de texto con las poses utilizadas y otro con las configuraciones de las cámara.

A.1.3. Resumen

En esta sección se describió el proceso general para la generación de imágenes sintéticas para la validación de los algoritmos desarrollados y utilizados en el proyecto. Se explicó qué ajustes son de interés a realizar en Blender mediante su interfaz gráfica así como a través de la consola de comandos interactiva de Python. Se describió el proceso para realizar renders desde consola de comandos mediante la utilización de un script en Python y adicionalmente mediante la inclusión de argumentos de línea de comandos de forma de parametrizar el proceso. Finalmente se describió el entorno desarrollado en Matlab para automatizar este proceso.

A.2. Herramientas de Hardware y Software de Apple Inc.

A.2.1. SoC, CPU y GPU de plataformas Apple Inc.

Uno de los puntos a evaluar de las plataformas de Apple Inc. es el **SoC**, que refiere a *System on Chip* por sus siglas en inglés. *System on Chip* es un concepto de los sistemas embebidos que refiere a la integración de todo lo necesario para poder correr un sistema operativo, en un solo circuito integrado. En contraposición a un microcontrolador que es capaz de realizar procesamiento más básico y menos potente, con poca interacción de usuario y menor flexibilidad, un *SoC* refiere a la idea de tener todo lo necesario para desarrollar sobre la plataforma y poder hacer procesamiento sin tantas limitaciones. Básicamente cumplen funciones similares pero el *SoC* forma parte de una evolución de los microcontroladores, siendo de una complejidad mayor e integrado en un tamaño muy reducido buscando poco consumo y eficiencia de costos. Así entonces un *SoC* puede estar conformado por un microcontrolador y hardware adicional como procesadores de señal y bloques de memoria [49].

En la Figura A.5 se ilustran los dos tipos de *SoC* de los dispositivos de la Tabla 3.1: Apple A4 y Apple A5. Algunos dispositivos que no figuran en la tabla como el *iPhone 5* o el *iPad 4* usan *SoCs* más recientes como el Apple A6 o Apple A6x respectivamente. La familia de *SoCs* Apple Ax, es la que la mencionada firma utiliza en todas sus plataformas, inclusive en el *Apple TV* y es manufacturada por Samsung. Estos *SoCs* se caracterizan por utilizar CPUs de arquitectura ARM, en su mayoría ARMv7 y GPUs de PowerVR de la línea SGX.

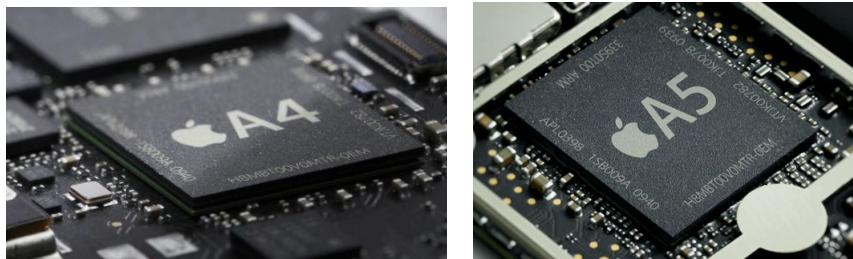


Figura A.5: *System on Chip*: SoC.

La arquitectura ARM incorpora algunas características de la arquitectura RISC (*Reduced Instruction Set Computer*) como el hecho que las operaciones sean llevadas a cabo sobre un conjunto de registros a tales efectos y no sobre la memoria directamente. Otra característica que tiene de RISC es que tiene un modo simple de direccionamiento donde las direcciones son también guardadas sobre registros destinados a tales efectos [50]. La mayoría de los procesadores están hechos con un ancho de palabra de 32-bit salvo el reciente ARMv8 que incorpora la posibilidad de utilizar ambos anchos de palabra: 32-bit o 64-bit. Por más información sobre esta arquitectura referirse a la web de la empresa [69].

Por su parte las GPU utilizadas en los *SoCs* de la serie Apple Ax, son GPUs de PowerVR, una división de la firma Imagination Technologies que desarrolla hardware y software para *rendering* 2D y 3D, procesamiento de imágenes y codificación [70]. La función que tiene la GPU es asignar a cada pixel de la pantalla su color para cada cuadro. En particular, estas GPU implementan un concepto innovador de *renderizado* que mejora notoriamente la performance de los gráficos: *Tile-Based Deferred Rendering* (TBDR) [52]. Este concepto aprovecha la independencia de áreas alejadas de la

pantalla y de la correlación de píxeles cercanos y divide la pantalla en *tiles* o baldozas. A cada *tile* se le asocia un procesamiento paralelo y con esto se mejora notablemente la performance respecto al método tradicional: *Immediate mode renderers* (IMRs), que procesa la pantalla completa. Las imágenes *renderizadas* están construidas por triángulos (polígonos), por lo que uno de los indicadores fundamentales para evaluar la performance de una GPU es la cantidad de triángulos (polígonos) que es capaz de procesar por segundo. En [51] se puede ver un análisis interesante que compara entre otros, a los dos tipos de GPU que se presentaron en la Tabla 3.1: SGX535 y SGX543MP2. En dicho análisis se muestra por ejemplo que en el mejor de los casos la GPU SGX535 fue capaz de procesar 8.69 millones de triángulos por segundo frente a los 29 millones procesados por la GPU SGX543MP2.

A.2.2. Sistemas Operativos

Para poder desarrollar aplicaciones sobre dispositivos móviles de la firma Apple Inc. es necesario contar con computadoras que corran el sistema operativo **Mac OS X**. Esto puede ser llevado a cabo, ya sea adquiriendo plataformas de desarrollo de la mencionada firma o creando máquinas virtuales que corran dicho sistema operativo. Para la segunda opción (la más económica pero con ciertas dificultades de performance), es necesario que la computadora cuente con virtualización de hardware. Se comenzó trabajando de esta manera hasta el momento de adquirir plataformas de desarrollo que contaran con Mac OS X en forma nativa.

Mac OS X refiere a la versión número 10 (en números romanos) de una serie de sistemas operativos que comenzaron a desarrollarse en la década de los 80 (Mac OS 1 data del año 1984). En los últimos 28 años se han ido sucediendo nuevas versiones que han ido mejorando características en la estructura de datos con la incorporación de la jerarquía de archivos en Mac OS 3 por ejemplo, en la búsqueda de archivos, con la simultaneidad de tareas, multiplicidad de usuarios o incluso con el énfasis en la interfaz de usuario por mencionar algunas características importantes en la evolución de esta familia de sistemas operativos. Dentro de Mac OS X existen distintas versiones, siendo la más actual la Versión 10.8: Mountain Lion lanzada durante 2012.

Por su parte todas las plataformas móviles de Apple Inc. corren otro dispositivo de código cerrado: **iOS**. Originalmente llamado así por ser el sistema operativo utilizado por la plataforma *iPhone*, este sistema operativo está también en las plataformas *iPad*, *iPod Touch* y *Apple TV* en todas sus versiones. La versión más reciente de este SO es el iOS 6.1.

Una de las grandes innovaciones de estas plataformas es el hecho de poder desarrollar aplicaciones y correrlas en el propio dispositivo (por supuesto también sucede lo mismo en el mundo Android). Para poder lograr esto, es necesario como se ha dicho, contar con una máquina que corra Mac OS X y contar con el IDE apropiado llamado **Xcode**. Este entorno de desarrollo y su lenguaje se explican en la Sección A.2.3.

A.2.3. Objective-C

El lenguaje que fue elegido por Apple Inc. para desarrollar sobre plataformas móviles es Objective-C. Este lenguaje fue desarrollado en la década de 1980 como un superconjunto de C orientado a objetos. Se trata entonces de una extensión del standard ANSI C que incorpora un modelo orientado a objetos basado en **Smalltalk** [53]. Una de las diferencias sustanciales del modelo orientado a objetos de Objective-C respecto a otros lenguajes como Java o C++, es la manera en que se invocan los métodos (procedimientos) de las instancias de clases. En objective-C esta invocación se da enviando mensajes, algo que se hereda de Smalltalk. Así entonces para invocar un método se procede con el siguiente código por ejemplo:

```
[receiver message];
```

Donde *receiver* es un objeto que recibe un mensaje (acción) *message* a realizar. Esta acción puede tener parámetros asociados, como por ejemplo el siguiente código real:

```
[myRectangle setWidth:20.0];
```

Esta diferencia conceptual de utilizar mensajes se representa en el hecho de que en tiempo de compilación estos mensajes no son más que una etiqueta y no están asociados al bloque de código como es el caso de Java o C++. Entonces es factible que suceda el hecho de que ese mensaje o método no esté implementado por esa clase y recién en tiempo de ejecución es que sucede el error al sustituirse esa etiqueta por un código inexistente, pues un objeto recibe un mensaje para realizar un método que no está dentro de su repertorio. Para esto es que en la documentación de Apple Inc. se recomienda utilizar ciertos trucos para garantizar que el objeto que reciba el mensaje sea capaz de responder correctamente, como por ejemplo consultando primero si es capaz de realizar dicha acción y luego en caso de poder, realizar dicha acción.

Otro detalle a destacar es que este lenguaje, al igual que Java, también soporta la herencia múltiple. Esto es, dado un conjunto de métodos que son comunes a un conjunto de clases pero que no llegan a tener un lazo tan fuerte como para estar jerárquicamente relacionadas con una superclase común, se puede generar una clase abstracta cuyos métodos sean implementados por más de una clase sin necesidad de generar ese vínculo fuerte que es la herencia. Así como en Java existen las interfaces, que hacen esto posible, en Objective-C existen los protocolos. Existen protocolos formales e informales y con métodos obligatorios de implementar y otros opcionales. Una clase que implemente un protocolo dado tiene que tener dentro de su encabezado declarado el nombre del protocolo. Esto es:

```
@interface ClassName : ItsSuperclass < protocol list >
```

Hay otras particularidades del lenguaje pero que no van más allá de la sintaxis como los métodos de clase y los métodos de instancia, como los métodos *get* y *set* para acceder y configurar atributos (propiedades) de los objetos, como la notación de *import* en lugar de *include* para quienes están acostumbrados a C, y así varios detalles más. Sin embargo más allá de estas y otras diferencias y particularidades resulta un lenguaje relativamente ágil y dentro de todo sencillo de aprender para quien tiene ya un conocimiento de otros lenguajes orientados a objetos.

A.2.4. Xcode: Herramientas y Librerías

Como se dijo anteriormente el entorno de desarrollo de aplicaciones típico es Xcode, el cual es gratuito y permite compilar código C, C++, Objective-C, Objective-C++, Java y AppleScript. Xcode integra en una sola interfaz todo lo que involucra código, diseño de interfaz de usuario (**Interface Builder**) y *debugging*. También viene con un conjunto herramientas útiles para evaluar la *performance* de la aplicación en distintos aspectos que se llama **Instruments**. Por otra se tiene el iOS SDK que cuenta con un conjunto importante de *Frameworks* entre los cuales se encuentran **Cocoa** y **Cocoa Touch** que proveen las herramientas necesarias para desarrollar aplicaciones para Mac OS X e iOS respectivamente [54].

El SDK de iOS se puede clasificar en cuatro grandes capas según el nivel de abstracción: Cocoa Touch, Media, Core Services y Core OS como se muestra en la Figura A.6. Así entonces, dentro de cada capa existen distintos *Frameworks* según la funcionalidad. A continuación se explica el rol que cumple cada capa, los distintos *Frameworks* que tiene cada una y para qué sirven.

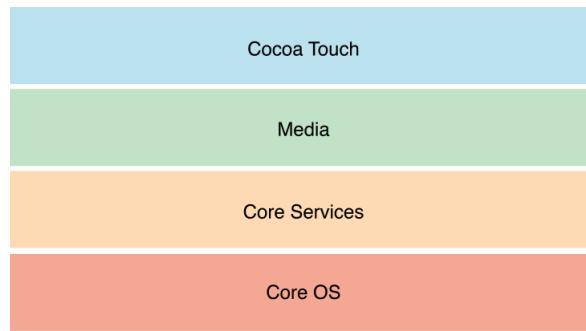


Figura A.6: Capas del SDK de iOS

A.2.4.1. Cocoa Touch Layer

Cocoa Touch es la capa de más alto nivel del SDK de iOS y es la encargada de proveer al desarrollador de ciertos *Frameworks* que permitan lograr distintas tecnologías como la posibilidad de multitarea, el ingreso de órdenes a la aplicación a través de la pantalla táctil, notificaciones y alertas, preservación del estado de la aplicación al salir de la misma, reconocimiento de gestos en la pantalla y otro tipo de funcionalidades de alto nivel. Permiten al desarrollador, sin tener que involucrarse demasiado a bajo nivel, el acceso a determinados servicios que ya están resueltos en forma bastante modular. Cocoa Touch está basado en la arquitectura **Modelo-Vista-Controlador**, en el que se separa en tres áreas distintas el modelo de la información, la interfaz de usuario y el conjunto de reglas que negocian la presentación de la información en base a la interacción con el usuario. Así pues, el usuario y una aplicación se podrían considerar dos sistemas que interactúan. Por su parte el usuario tiene como entrada la vista de la aplicación y como salida tiene su respuesta a esta entrada, generando efectos sobre el control de la aplicación. Por otro lado la aplicación tiene como entrada las órdenes dadas por el usuario que tienen efectos sobre el modelo de la información y este sobre la vista, quien resulta ser la salida de la aplicación. Esta interacción se puede ilustrar con la Figura A.7. Como se dijo, dentro de Cocoa Touch, existen distintos *Frameworks* enfocados en

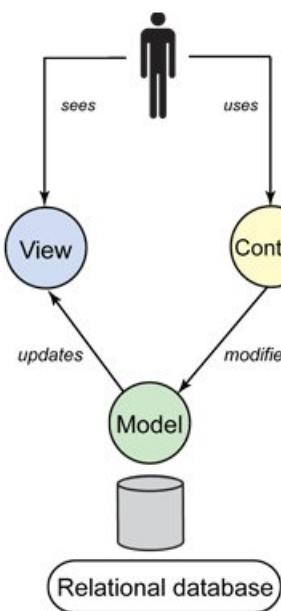


Figura A.7: Interacción entre las tres partes del MVC

permitirle al desarrollador resolver en alto nivel distintos aspectos. Los mismos son los siguientes:

- (1) Address Book UI Framework
- (2) Event Kit UI Framework
- (3) Game Kit Framework
- (4) iAd Framework
- (5) Map Kit Framework
- (6) Message UI Framework
- (7) Twitter Framework
- (8) UIKit Framework

Varias de estas librerías no fueron utilizadas en el presente proyecto dada su función específica. Sin embargo hay una en particular que tiene bastante importancia y que permite la mayoría de las funcionalidades básicas que toda aplicación tiene. Se trata del **UIKit**, encargado de gestionar la aplicación, su interfaz de usuario y gráficos, encargado soportar eventos frente al toque de la pantalla, de manejar sensores como el acelerómetro y giroscopio, y de tener acceso a la cámara y galería de fotos entre lo más importante a destacar. El soporte de la multitarea y de **Storyboards** también está a cargo de este *Framework*.

Hay funcionalidades que han ido cambiando con las distintas versiones de iOS. Una de ellas y quizás una que ha generado bastantes diferencias respecto a versiones anteriores a iOS 5, es esta última, el Storyboard, una herramienta muy útil de programación gráfica, que permite generar instancias de clases y vínculos entre las mismas en forma visual a la vez de ser una contraparte de interfaz de usuario. Con una biblioteca de objetos disponibles, listos para ser usados, mediante el uso de Storyboard se hace accesible con algunas horas de dedicación implementar aplicaciones sencillas. Esta herramienta vino para sustituir los archivos *.nib* que permitían diseñar la interfaz pero no tantas funcionalidades programáticas como el Storyboard. En particular éste último permite agregar la funcionalidad de *segues*, encargados de vincular un *ViewController* con otro. Este tipo de diferencias vinieron con la idea de evitar la necesidad de implementar ciertos bloques de código en forma repetitiva. Un Storyboard luce como la Figura A.8.

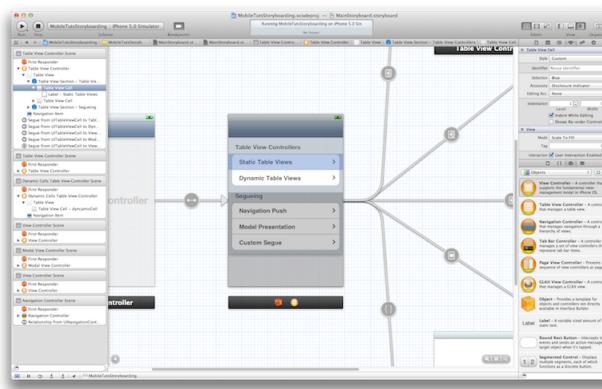


Figura A.8: Ejemplo de Storyboard.

Si bien se podría extender bastante más la explicación sobre los detalles de Cocoa Touch, a los efectos del presente proyecto, no es de tanta relevancia excederse en este punto.

A.2.4.2. Media Layer

Media Layer es la capa encargada de gestionar correctamente elementos multimedia y es posible distinguir tres grandes grupos que engloban distintos *Frameworks*: Gráficos, Audio y Video.

Dentro de las tecnologías más destacadas está todo lo vinculado a **gráficos** 2D y 3D, dentro de lo que se puede incluir algunos *Frameworks* bastante utilizados en el presente proyecto, tales como: **Core Graphics**, muy utilizado para dibujos 2D, **Quartz Core**, quien contiene las herramientas necesarias para interactuar con otro *Framework* para animación de vistas, de una capa de más bajo nivel como **Core Animation**, que es comentado en la Sección A.2.4.3. También es parte de lo vinculado a gráficos, el *Framework* **Core Image**, contenido lo vinculado a procesamiento de imágenes a través filtros que utilizan directamente la unidad de procesamiento de gráficos (GPU) y otros dos *Frameworks* bastante importantes en lo que respecta a *rendering* como **OpenGL ES** y **GLKit** (utilizado por el motor de juegos *Isgl3d* entre otros).

Por otra parte hay otra gran familia de *Frameworks* dentro de Media Layer que apunta a resolver todo lo vinculado al manejo de audio, ya sea de grabación como procesamiento y reproducción de alta calidad. Existen algunos SDK como **iSpeech** o **Dragon Mobile** que resuelven de manera similar al proyecto Siri, el procesamiento de la voz humana reconociendo palabras e interpretando, que utilizan algunos de los *Frameworks* de procesamiento de audio de esta familia.

En cuanto a lo vinculado al manejo de video, como parte de esta capa, se tienen dos *Framework* importantes con distintos niveles de abstracción: **MediaPlayer** y **AVFoundation** [55]. También existen otros *Frameworks* fuera de esta capa que son capaces de manejar video como la clase **UIImagePickerController** (muy utilizada en el proyecto) del mencionado **UIKit**. En la Figura A.9 se esquematiza el nivel de abstracción de los *Frameworks* de las distintas capas que son capaces de manejar multimedia. Con **MediaPlayer** es posible reproducir audio y video muy fácilmente en de-

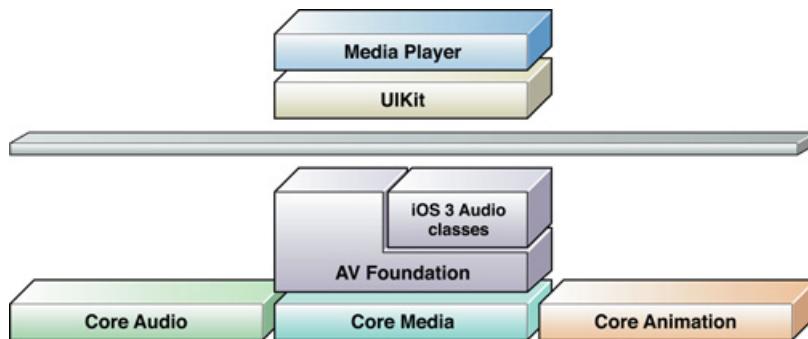


Figura A.9: Frameworks de las distintas capas para manejo de video

terminada área de la pantalla ya sea desde un URL o de un archivo, es posible mostrar o no los elementos de control del video así como también controlar, volumen y tamaño de la pantalla. Por su parte, con **AVFoundation** es posible capturar con la cámara, reproducir, editar y procesar audio y video. Es posible implementar ciertos protocolos que hace de esto algo relativamente sencillo.

A.2.4.3. Core Services

Core Services es la capa de más bajo nivel de iOS y contiene los elementos fundamentales sobre los que se construyen las capas superiores. Es posible que al comenzar a programar para iOS no se tenga mucha interacción con esta capa pero sin embargo existen algunos conceptos importantes de esta capa que sí vale la pena mencionar dado que en el presente proyecto se tuvieron que entender y discutir. Una de ellas es la *Automatic Reference Counting* o **ARC**. Esta funcionalidad compete a la reserva y liberación de memoria por parte de los objetos. La idea básica es lograr que el uso de

memoria sea el mínimo posible, logrando que los objetos existan en la medida que son necesarios y que su memoria sea liberada ni bien sea posible. Típicamente, al crear una instancia de un objeto se

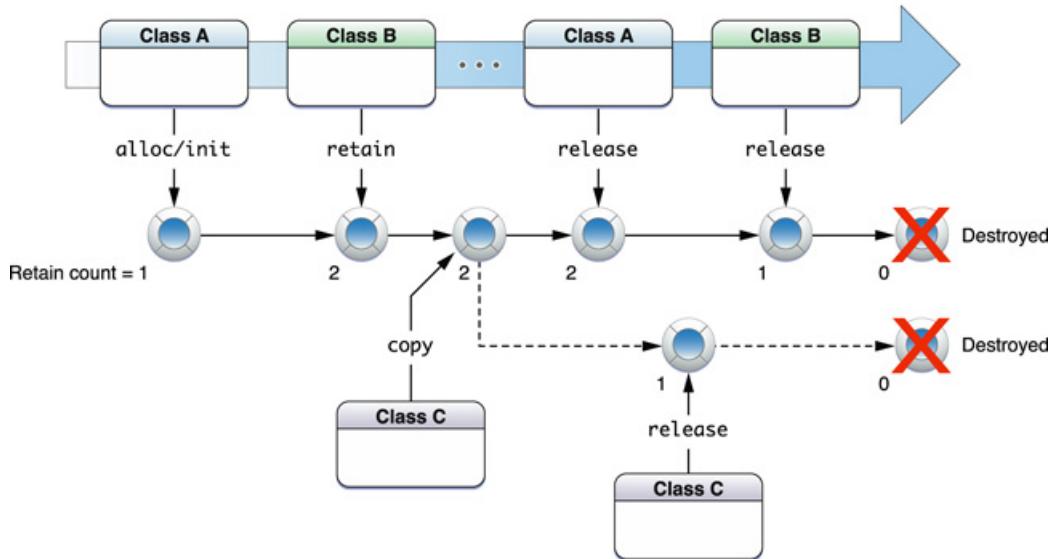


Figura A.10: Ciclo de vida de objetos, Manual-Retain-Release.

incrementa un contador y al liberar se decrementa y entonces se tiene cierto control sobre la reserva y liberación de memoria en base al contador. Sin embargo, la liberación de memoria reservada por objetos queda bajo la responsabilidad del desarrollador y en casos de un código complejo puede llegar a ser habitual olvidarse de la liberación de memoria. Lo anterior refiere a una gestión manual de la reserva y liberación conocido como *manual retain-release* se puede ver esquemáticamente en la Figura A.10. Para no tener que enfrentar este tema y poder instanciar clases sin tener presente la posterior liberación de memoria se utiliza ARC. Esta funcionalidad evalúa el ciclo de vida de los objetos y agrega código en tiempo de compilación en caso de considerarlo necesario. Es bueno aclarar que esto refiere a memoria reservada pura y exclusivamente por objetos, es decir mediante *alloc*. En caso de tratarse de memoria reservada para variables de lenguaje C (*malloc*), es necesario proceder de igual manera que en dicho lenguaje, liberando la memoria mediante un *free* [56] [57].

Además del ARC, Core Services permite el manejo de archivos XML y manejo de base de datos SQL así como también la protección de datos cuando el dispositivo está bloqueado entre otros servicios importantes. Tiene varios *Frameworks* como **Core Media** que logran un nivel aún más bajo que AVFoundation para el manejo de multimedia, **Quick Look** para las vistas previas de archivos, **Social** que viene a suplantar el *Framework* para la utilización de Twitter que existe en iOS 5 y extiende la gestión para otras redes sociales, **Core Motion** para el manejo de sensores como el acelerómetro y el giroscopio, **Core Telephony** para el manejo de la información de red del dispositivo como elemento de la red de telefonía, **CFNetwork** para el manejo de protocolos de red como http, https, ftp y resolución de servidores DNS, entre otros *Frameworks* importantes dentro de la capa.

A.2.4.4. Core OS

Con esta capa de iOS en general es difícil que el desarrollador tenga que involucrarse directamente dado que es la de más bajo nivel. Salvo que se esté frente a una aplicación que requiera aspectos de seguridad o comunicación con HW externo, esta capa solamente existe para ser la base sobre la cual se desarrollan los *Frameworks* de las capas de más alto nivel. Los distintos *Frameworks*

que tiene están enfocados en resolver temas de procesamiento basados en el hardware de iOS, en comunicarse con dispositivos externos basados en iOS y de garantizar la seguridad de los datos de una aplicación.

A.2.4.5. Simulador

Uno de los detalles más importantes del entorno de desarrollo es la capacidad de simular lo que se programa antes de probarlo en un dispositivo. Esto es útil por cuestiones de seguridad e incluso permite programar sin la necesidad de contar con una plataforma. Esto existe para *Xcode* y es necesario decir que funciona muy bien, generando una representación bastante fiel de lo que sucede en el dispositivo real. La única crítica que se le podría hacer es el hecho de no contar con cámara y para el caso de aplicaciones de realidad aumentada esto es algo bastante importante. Sin embargo, sin ser eso, el simulador cuenta con conexión a internet, pantalla multitáctil, con información de GPS ingresada por el programador, acceso a la galería de fotos, capacidad de procesamiento y todas las funcionalidades que un dispositivo real tiene.

A.2.4.6. Instruments

Dentro de las herramientas que vienen con el entorno de desarrollo viene *Instruments*, un conjunto de herramientas que permiten analizar la *performance* de una aplicación para iOS o para Mac OS X desde distintos puntos de vista. Resulta muy útil pues muchas veces sucede que una aplicación compila y se ejecuta correctamente y sin embargo puede que el desarrollador no esté conforme en cuanto a los tiempos de procesamiento o el uso de memoria consumido.

Para poder hacer uso del *Instruments*, es necesario correr la aplicación en modo *Profile*. Eso despliega una ventana como la de la Figura A.11. Allí es posible elegir dentro de cada una de las posibilidades que ofrece *Instruments*, si se quiere analizar tiempos, memoria, recursos de CPU, *multithreading* entre otros tipos de datos de interés que es posible recoger de la aplicación. También es posible elegir la plataforma, ya sea iOS, simulador iOS o Mac OS X [58].

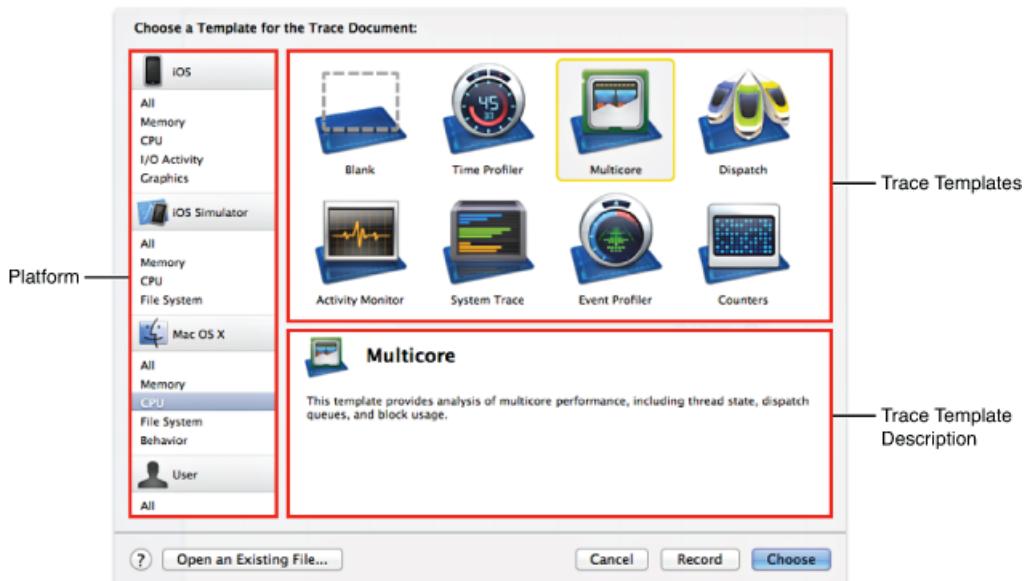


Figura A.11: Distintas opciones de *Instruments*.

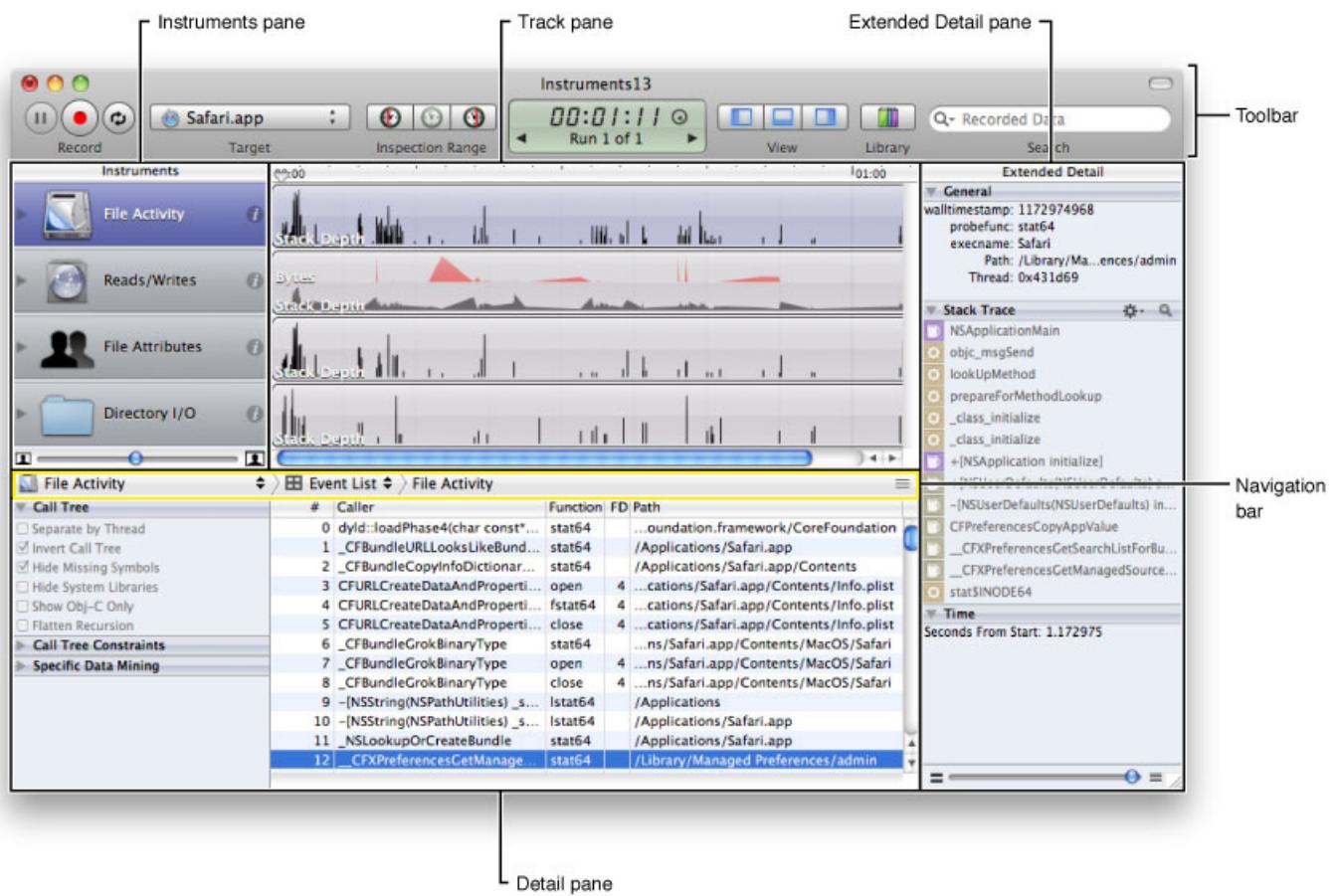


Figura A.12: Trazado y análisis de datos recogidos.

Luego de elegir el tipo de datos a ser recolectados según lo que se busque analizar, se despliega una ventana como se ve en la Figura A.12. Allí es necesario registrar durante varios segundos los datos mientras se corre la aplicación y luego de terminado el registro, *Instruments* dedica un tiempo a analizar los datos recolectados. En el detalle inferior, se desglosan los procesos que corre la aplicación en forma de árbol. Cuando se desea medir tiempos por ejemplo, esto resulta muy útil porque entre otras cosas se puede analizar qué porcentaje del tiempo de la aplicación es consumido por un método en particular. Esto es posible simplemente buscando dentro del árbol mencionado, al método y leyendo el valor asignado de tiempo. Para el caso de análisis de memoria también es posible identificar fácilmente en qué parte del código se está dando algún problema de reserva de memoria no liberada.

En el presente proyecto se hizo uso principalmente del **Time Profiler** que permite analizar tiempos y del **Memory Leak** que permite hacer un análisis de la reserva de memoria no liberada. Con los mismos fue posible optimizar tiempos en determinados métodos del procesamiento, así como también eliminar problemas de memoria no liberada que generaban la interrupción abrupta de la aplicación luego de llegar a un cierto nivel de reserva. Esta interrupción abrupta es una forma de proteger la memoria del dispositivo y evitar que se vea afectada cierta memoria útil a otros efectos. El resto de las herramientas de *Instruments* fueron probadas pero no utilizadas en detalle para resolver problemas particulares.

A.3. Herramientas de Productividad

Además de las herramientas mencionadas propias del entorno de desarrollo fueron utilizadas algunas herramientas más generales de desarrollo de software en lo que respecta al control de versiones de código. A continuación se describen brevemente ciertos detalles de las mismas.

A.3.1. GIT

GIT es un software para gestionar código que fue desarrollado por Linus Torvalds. Entre algunos de los tantos proyectos que es gestionado por esta herramienta se encuentra el Kernel de Linux. Se basa en la idea de desarrollo colaborativo en el que existen diversas fuentes que aportan al código y es necesario llevar un control de las distintas versiones. Así entonces lo que se hace es generar un repositorio remoto donde se aloja todo el código y generar una copia local donde es posible realizar modificaciones y actualizar ese repositorio remoto. El repositorio tiene una estructura de archivos y mediante distintos comandos en terminal es posible hacer las actualizaciones. Otro aspecto a considerar es que es posible que existan distintas líneas de desarrollo simultáneas que pueden ser independientes o no. Es posible entonces crear, borrar o *converger (merge)* distintas líneas de desarrollo. Existen numerosas empresas que hacen uso de esta herramienta en su desarrollo como Facebook, Twitter o RedHat entre otros. Más información sobre este software se puede encontrar en [71].

A.3.2. GoogleCode

GoogleCode es un sitio que ofrece Google para *hosting* de proyectos, foros de discusión sobre temas de desarrollo y una API para quienes desarrollan sobre recursos de Google. Una de las características principales es que es *open-source* y que ofrece la opción de utilizar distintos software para la gestión de código como Subversion, Mercurial y Git. También ofrece otras funcionalidades como una página *wiki* y la posibilidad de vincular directamente el código con esta página.

A.3.3. Github

Github es otro sitio que ofrece *hosting* para proyectos *open-source*. Cuenta con muchas herramientas de gran utilidad y se ha vuelto uno de los sitios más populares. También utiliza el software Git y entre otras cosas permite navegar dentro de la estructura de archivos *online*, ofrece un historial para cada archivo, permite identificar qué colaborador realizó determinados cambios e incluso realizar modificaciones de archivos *online*, sin necesidad de hacer actualizaciones desde terminal.

Para el presente proyecto comenzó utilizándose GoogleCode pero luego se decidió migrar todo el repositorio a Github por contar con mayores facilidades de gestión. Todo el código generado en este proyecto, así como la documentación es *open source* y se puede bajar del repositorio git ubicado en: <https://github.com/encuadro/encuadro>.

APÉNDICE B

Costos

B.1. Introducción

En este capítulo se realiza un análisis de los tiempos y costos económicos del proyecto **enCuadro**. Por ser un proyecto de investigación más desarrollo de *software*, la gran parte de estos costos se deben a las horas-hombre dedicadas. Se exponen entonces las mismas y su costo estimado, para luego ser comparadas con las horas-hombre estimadas al inicio del proyecto. Finalmente, se comentan los demás costos que se tuvieron, que fueron principalmente adquisición de tecnología.

B.2. Tiempos

A lo largo de los 15 meses que duró el proyecto (desde el 1/ago/2011 hasta 30/nov/2012, descontando enero de 2012 que no se trabajó), se anotaron cada una de las horas dedicadas al proyecto por cada uno de los integrantes. Si se asume que todos los integrantes trabajaron en promedio las mismas horas y que a lo largo de todos los meses, la dedicación se mantuvo constante, se puede razonar como sigue:

Horas totales aproximadas dedicadas por **enCuadro** : **3500 hs.**

Por lo que cada integrante dedicó al proyecto unas:

Horas totales aproximadas dedicadas por cada integrante : **875 hs.**

A lo largo de los 15 meses que duró el proyecto, se tiene que cada integrante le dedicó aproximadamente unas 58 horas mensuales. A modo de comentario, se menciona que la dedicación total estimada al comienzo del proyecto fue de 4400 horas a una intensidad aproximada de 25 horas semanales por integrante, durante un periodo de 11 meses.

B.3. Costos de investigación más desarrollo

Si se cotiza cada hora-hombre de forma lineal a unos 15 dólares, se tiene que el costo en recursos humanos sumó:

Costo total aproximado en recursos humanos : **USD 52.500**

B.4. Otros costos

Cualquier proyecto, mayor o menor a enCuadro, tiene costos extra como por ejemplo transporte, llamadas telefónicas, consultorías. Sin embargo, ninguno de estos costos fueron considerables durante el proyecto, y por lo tanto no serán tomados en cuenta.

Sin embargo, como se desarrolló para iOS, hubo que hacerlo en computadoras *Apple* con procesadores *Intel* y sistemas operativos *Mac OS X*. Se decidió entonces, presentarse a los fondos concursables del “Programa de Apoyo a la Investigación Estudiantil” (PAIE) que dependen de la “Comisión Sectorial de Investigación Científica” (CSIC) con el objetivo de conseguir fondos para comprar los equipos necesarios. Estos fueron obtenidos por un monto en pesos Uruguayos de \$25,000.

De esta manera, se compraron una computadora *Mac mini Mid 2011* y un *iPod Touch 4^{ta} generación*. En la Tabla B.1 se especifican los costos de cada uno de ellos y el costo total dedicado a la adquisición de tecnología que es la suma de ambos.

Equipo adquirido	costo (USD)
<i>Mac mini</i>	940
<i>iPod Touch</i>	370
Total	1310

Tabla B.1: Costo total dedicado a la adquisición de equipamiento para el desarrollo del proyecto.

B.5. Costos totales

Una buena aproximación a lo que fueron los costos totales del proyecto es la suma de los costos dedicados a los recursos humanos destinados a la investigación más desarrollo, sumados a los costos de la adquisición de tecnología necesaria para llevar a cabo el proyecto. Se puede decir entonces, que los costos de enCuadro fueron del orden de:

Costo total del proyecto enCuadro : **USD 53.810**

B.6. Resumen

A lo largo de este capítulo se vieron los distintos costos económicos que tuvo este proyecto, y se vio el alto costo que tienen la investigación y el desarrollo, por requerir de mano de obra calificada a lo largo períodos de tiempo considerables. Se vio cuál fue la dedicación real y la estimada al inicio del proyecto y se concluye que se sobrestimó la carga horaria, aunque no se logró la intensidad de trabajo que se esperaba. Se destaca la importancia que tienen para nuestro país, los fondos destinados a la investigación y el desarrollo.

Bibliografía

- [1] Metaio homepage. <http://www.metaio.com/>, dic 2012.
- [2] Vuforia homepage. <http://www.qualcomm.com/solutions/augmented-reality>, dic 2012.
- [3] String homepage. <http://www.poweredbystring.com/>, dic 2012.
- [4] Aurasma homepage. <http://www.aurasma.com/>, dic 2012.
- [5] Layar homepage. <http://www.layar.com/>, dic 2012.
- [6] iphone 4 support specification. <http://support.apple.com/kb/SP587>, nov 2012.
- [7] iphone 4s support specification. <http://support.apple.com/kb/SP643>, nov 2012.
- [8] ipod touch support specification. <http://support.apple.com/kb/SP594>, nov 2012.
- [9] ipad 2 support specification. <http://support.apple.com/kb/SP622>, nov 2012.
- [10] Peter Thoman. *Microcontroller and System-on-a-chip*. University of Innsbruck, second edition, 2009.
- [11] The objective-c programming language. <http://developer.apple.com/library/mac/#documentation/Cocoa/Conceptual/ObjectiveC/Introduction/introObjectiveC.html>, nov 2012.
- [12] C. Avellone and G. Capdehourat. Posicionamiento indoor con señales wifi. Trabajo final del curso Tratamiento Estadístico de Señales. Facultad de Ingeniería, Universidad de la República, 2010.
- [13] Denso wave web page. <https://www.denso-wave.com/en/>, dic 2012.
- [14] Qr components. <http://www.qrme.co.uk/qr-code-resources/understanding-a-qr-code.html>, dic 2012.
- [15] Zxing. <http://code.google.com/p/zxing/>, dic 2012.
- [16] Zbar. <http://zbar.sourceforge.net/>, dic 2012.
- [17] Qr artist. <http://www.qrcartist.com/>, dic 2012.
- [18] David G. Lowe. Distinctive image features from scale-invariant keypoints. *Int. J. Comput. Vision*, 60(2):91–110, nov 2004.

- [19] David G. Lowe. Object recognition from local scale-invariant features. In *Proceedings of the International Conference on Computer Vision-Volume 2 - Volume 2*, ICCV '99, pages 1150–, Washington, DC, USA, 1999. IEEE Computer Society.
- [20] F. John Canny. A computational approach to edge detection. *IEEE-PAMI*, 8(6):679–698, 1986.
- [21] Canny edge detector. wikipedia. http://en.wikipedia.org/wiki/Canny_edge_detector.
- [22] Image processing on line. canny demo. http://dev.ipol.im/~coco/ipol_demo/canny/.
- [23] Chris Harris and Mike Stephens. A combined corner and edge detector. In *In Proc. of Fourth Alvey Vision Conference*, pages 147–151, 1988.
- [24] Rafael Grompone von Gioi, Jérémie Jakubowicz, J.-M. Morel, and Gregory Randall. On straight line segment detection. *Journal of Mathematical Imaging and Vision*, 2008.
- [25] Mathworks documentation center. hough lines. <http://www.mathworks.com/help/images/ref/houghlines.html>, dic 2012.
- [26] Image processing on line. lsd: a line segment detector. <http://www.ipol.im/pub/art/2012/gjmr-lsd/>, nov 2012.
- [27] Cuneyt Akinlar and Cihan Topal. Edlines: A real-time line segment detector with a false detection control. *Pattern Recognition Letters*, 32(13):1633 – 1642, 2011.
- [28] Cihan Topal and Cuneyt Akinlar. Edge drawing: A combined real-time edge and segment detector. *Journal of Visual Communication and Image Representation*, 23(6):862 – 872, 2012.
- [29] Edlines: A real-time line segment detector with a false detection control. homepage. <http://ceng.anadolu.edu.tr/cv/EDLines/>, dic 2012.
- [30] Cse 576 computer vision. software. object recognition toolkit (ort). <http://www.cs.washington.edu/education/courses/cse576/07sp/software/index.html>, dic 2012.
- [31] Repositorio svn para descarga de object recognition toolkit (ort 2.3). http://iie.fing.edu.uy/avn/external_code/ORT-2.3/, dic 2012.
- [32] A.Etemadi. Robust segmentation of edge data. In *Proceedings of the 4th international conference on Image Processing and its applications*, 1992.
- [33] A. Etemadi, J-P. Schmidt, G.Matas, J.Illingworth, and J. Kittler. Low-level grouping of straight-line segments. In Peter Mowforth, editor, *Proceedings of the British Machine Vision Conference*. Springer-Verlag, 1991.
- [34] V. Lepetit and P. Fua. Monocular model-based 3d tracking of rigid objects: A survey. *Foundations and Trends in Computer Graphics and Vision*, 1(1):1–89, 2005.
- [35] Dr. Hirokazu Kato. Artoolkit: a software library for building augmented reality (ar) applications. <http://www.hitl.washington.edu/arToolkit/>.
- [36] Mark Fiala. Artag revision 1, a fiducial marker system using digital techniques. <http://www.artag.net/>, November 2004.

- [37] Daniel Wagner and Dieter Schmalstieg. Artoolkitplus for pose tracking on mobile devices. 2007.
- [38] Martin Hirzner. Marker detection for augmented reality applications. http://studierstube.icg.tugraz.at/thesis/marker_detection.pdf, October 2008.
- [39] Matias Tailanian and Santiago Paternain. Autoposicionamiento 3d. <http://sites.google.com/site/autoposicionamiento3d/>, dic 2012.
- [40] Rafael Grompone von Gioi, Jérémie Jakubowicz, J.-M. Morel, and Gregory Randall. Lsd: a line segment detector. *Image Processing Online*, mar 2012.
- [41] J. Brian Burns, Allen R. Hanson, and Edward M. Riseman. Extracting straight lines. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 8:425–455, 1986.
- [42] Agnès Desolneux, Lionel Moisan, and Jean-Michel Morel. Meaningful alignments. *International Journal of Computer Vision*, 40(1):7–23, 2000.
- [43] J. García Ocón. Autocalibración y sincronización de múltiples cámaras ptz. Proyecto de fin de carrera, Universidad autónoma de Madrid, Escuela Politécnica Superior, 2007.
- [44] R. I. Hartley and A. Zisserman. *Multiple View Geometry in Computer Vision*. Cambridge University Press, ISBN: 0521540518, second edition, 2004.
- [45] Helmut Zollner and Robert Sablatnig. Comparision of methods for geometric camera calibration using planar calibration targets. In W. Burger and J. Schäringer, editors, *Digital Imaging in Media and Education, Proc. of the 28th Workshop of the Austrian Association for Pattern Recognition (OAGM/AAPR)*, volume 179, pages 237–244. Schriftenreihe der OCG, 2004.
- [46] Zhengyou Zhang. Flexible camera calibration by viewing a plane from unknown orientations. In *ICCV*, pages 666–673, 1999.
- [47] R.Y. Tsai. An efficient and accurate camera calibration technique for 3d machine vision. In *Proceedings of IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, pages 364–374, 1986.
- [48] Y. I. Abdel-Aziz and H. M. Karara. Direct linear transformation from comparator coordinates into object space coordinates in close-range photogrammetry. In *Proceedings of the Symposium on Close-Range photogrammetry*, volume 1, pages 1–18, 1971.
- [49] Jean-Yves Bouguet. Camera calibration toolbox for matlab. http://www.vision.caltech.edu/bouguetj/calib_doc/, November 2012.
- [50] Martin A. Fischler and Robert C. Bolles. Random sample consensus: a paradigm for model fitting with applications to image analysis and automated cartography. *Commun. ACM*, 24(6):381–395, jun 1981.
- [51] Robert M. Haralick, Chung-Nan Lee, Karsten Ottenberg, and Michael Nölle. Review and analysis of solutions of the three point perspective pose estimation problem. *Int. J. Comput. Vision*, 13(3):331–356, dec 1994.
- [52] Daniel DeMenthon Denis Oberkampf. Posit for coplanar points. http://www.cfar.umd.edu/~daniel/Site_2/Code.html, 1996 - 2004.

- [53] Philip David, Daniel DeMenthon, Ramani Duraiswami, and Hanan Samet. Simultaneous pose and correspondence determination using line feature. In *CVPR* (2), pages 424–431, 2003.
- [54] Gregory G. Slabaugh. Computing euler angles from a rotation matrix.
- [55] Daniel F. DeMenthon and Larry S. Davis. Model-based object pose in 25 lines of code. *International Journal of Computer Vision*, 15:123–141, 1995.
- [56] Denis Oberkampf, Daniel F. DeMenthon, and Larry S. Davis. Iterative pose estimation using coplanar feature points. *Comput. Vis. Image Underst.*, 63(3):495–511, may 1996.
- [57] Philip David, Daniel Dementhon, Ramani Duraiswami, and Hanan Samet. Simultaneous pose and correspondence determination using line features. pages 424–431, 2003.
- [58] Steven Gold and Anand Rangarajan. A graduated assignment algorithm for graph matching. *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell.*, 18(4):377–388, April 1996.
- [59] Monson H. Hayes. *Statistical Digital Signal Processing and Modeling*. John Wiley & Sons, Inc., New York, NY, USA, 1st edition, 1996.
- [60] Stuart Caunt. Isgl3d homepage. <http://www.isgl3d.com>, nov 2012.
- [61] Vlfeat homepage. <http://www.vlfeat.org>, nov 2012.
- [62] Blender homepage. <http://www.blender.org/>.
- [63] Blender 2.6 python manual. <http://wiki.blender.org/index.php/Doc:2.6/Manual/Extensions/Python>.
- [64] Arm cortex-a processors. <http://www.arm.com/products/processors/cortex-a/index.php>, nov 2012.
- [65] Arm web page. <http://www.arm.com>, dic 2012.
- [66] Imagination technologies web page. <http://www.imgtec.com/>, dic 2012.
- [67] Powervr graphics technology. <http://www.imgtec.com/powervr/powervr-graphics-technology.asp>, nov 2012.
- [68] Gpu benchmark. <http://www.anandtech.com/show/4216/apple-ipad-2-gpu-performance-explored-powervr-sgx543mp2-benchmarked>, nov 2012.
- [69] Ios technology overview. http://developer.apple.com/library/ios/#documentation/Miscellaneous/Conceptual/iPhoneOSTechOverview/Introduction/Introduction.html#/apple_ref/doc/uid/TP40007898-CH1-SW1, nov 2012.
- [70] Av foundation programming guide. http://developer.apple.com/library/ios/#DOCUMENTATION/AVFoundation/Conceptual/AVFoundationPG/Articles/00_Introduction.html#/apple_ref/doc/uid/TP40010188, nov 2012.
- [71] Advanced memory management programming guide. http://developer.apple.com/library/ios/#documentation/Cocoa/Conceptual/MemoryMgmt/Articles/MemoryMgmt.html#/apple_ref/doc/uid/10000011i, nov 2012.

- [72] Transitioning to arc release notes. http://developer.apple.com/library/ios/#releasenotes/ObjectiveC/RN-TransitioningToARC/Introduction/Introduction.html#/apple_ref/doc/uid/TP40011226, nov 2012.
- [73] Instruments user guide. https://developer.apple.com/library/ios/documentation/DeveloperTools/Conceptual/InstrumentsUserGuide/Introduction/Introduction.html#/apple_ref/doc/uid/TP40004652, nov 2012.
- [74] Git scm web page. <http://git-scm.com/>, dic 2012.