



ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA DE
TELECOMUNICACIÓN

GRADO EN INGENIERÍA TELEMÁTICA

TRABAJO FIN DE GRADO

**Navegación autónoma de rutas 3D en un
entorno real**

Autor: Andres de Jesús Hernández Escobar

Tutor: José María Cañas Plaza

Curso académico 2017/2018

Resumen

La tecnología y los robots cada vez más están encaminados hacia la autonomía y a un menor tiempo de supervisión de sus tareas. La consolidación de estas premisas acerca un futuro cada vez más cercano en el que las máquinas ganarán independencia y podrán realizar múltiples tareas, independientemente de la primera aplicación para la que fueron creados, ganando en flexibilidad y aprovechamiento de los recursos.

Este Trabajo de Fin de Grado se enfoca en dotar de autonomía a un drone real. Con el fin de demostrar esta autonomía, el cuadricóptero deberá despegar, navegar en un entorno de 3D y aterrizar, todo esto sin asistencia por parte de un teleoperador. Para ello dividiremos el problema en cuatro más sencillos que son el despegue controlado, búsqueda de balizas, navegación a partir de la autolocalización relativa y por último el aterrizaje controlado. Se utilizarán dos tipos diferentes de balizas, en función del problema que vayamos a abordar ya que actuarán a modo de referencia o identificador único. Se ha integrado todo en una aplicación basada en un autómata de estados finito. Este automáta se ha diseñado empleando la herramienta VisualStates. Como objetivo adicional, se realizará todo el procesado de manera externa y a bordo del drone. Será necesario diseñar y poner a prueba una infraestructura y facilitar el despliegue de la aplicación en la unidad de procesamiento anteriormente mencionada.

El componente final, llamado *3DPathFollower*, se ha escrito en el lenguaje de programación Python, en la versión de JdeRobot 5.6.4. Se ha validado experimentalmente la aplicación desarrollada y la infraestructura en un drone real. Para ello, se han realizado tanto experimentos unitarios como globales.

Índice general

Índice de figuras	7
1. Introducción	1
1.1. Robótica actual	1
1.1.1. Historia	3
1.1.2. Aplicaciones actuales	5
1.1.3. Software en robots	8
1.2. Visión en robots	9
1.2.1. Aplicaciones actuales	9
1.3. Simulación	10
1.4. Robótica Aérea	11
1.4.1. Historia	12
1.4.2. Robótica Aérea en la Universidad Rey Juan Carlos	16
2. Objetivos	19
2.1. Problema a abordar	19
2.2. Requisitos	21
2.3. Metodología	21
2.4. Planificación	23
3. Infraestructura	25
3.1. Parrot Ar.Drone 2	25
3.2. ICE	26

ÍNDICE GENERAL	4
3.3. Biblioteca AprilTags	26
3.4. Biblioteca OpenCV	28
3.5. JdeRobot	29
3.5.1. Ardrone_Server	30
3.5.2. Teleoperadores uav_viewer y uav_viewer_py	30
3.5.3. Color Tuner	31
3.5.4. Slam_Markers	32
3.5.5. VisualStates	33
3.6. Gazebo	34
3.7. Intel Compute Stick	35
3.8. OpenSSH	37
4. Navegación autónoma para seguimiento de rutas 3D	38
4.1. Diseño	38
4.2. Componente CalibrationTool	41
4.2.1. Algoritmo de calibración	43
4.3. Componente 3DPathFollower basado en estados	46
4.3.1. Algoritmo de Despegue	48
4.3.2. Algoritmo de navegación	50
4.3.3. Algoritmo de aterrizaje	52
4.4. Configuración del Co-procesador	53
5. Experimentos	54
5.1. Pruebas unitarias Autolocalización	55
5.2. Pruebas unitarias Pilotaje	58
5.3. Pruebas integrales del sistema	62
6. Conclusiones	66
6.1. Conclusiones	66
6.2. Trabajos futuros	68

ÍNDICE GENERAL 5

Bibliografía 70

Índice de figuras

1.1. Ejemplos de robots	3
1.2. Autómata de Maillardet	4
1.3. Robot de Stanford Cart	5
1.4. Robots en el siglo XX	5
1.5. Ventas anuales estimadas de robots industriales por regiones	6
1.6. Aplicaciones en la actualidad	8
1.7. Visión artificial en robots	10
1.8. Personas simuladas en Gazebo	11
1.9. UAV Predator.	12
1.10. Ejemplos de UAV civiles	13
1.11. Relación entre la potencia de los rotores y el movimiento de un cuadricóptero	15
1.12. Simulación en exteriores	17
1.13. ArDrone simulado en Gazebo	17
2.1. Representación del desarrollo en espiral.	22
3.1. Ejemplo de detección en AprilTag	27
3.2. Ejemplos de familias en AprilTag	28
3.3. Ejemplo filtro de color en OpenCV	29
3.4. Estructura de ardrone_server	30
3.5. Interfaz de JdeRobot para el AR.Drone	31

ÍNDICE DE FIGURAS

7

3.6. Ejemplo de Slam_Markers identificando una baliza	33
3.7. Ejemplo de VisualStates	34
3.8. Ejemplo de simulador Gazebo	35
3.9. Imágen de Intel compute Stick	36
3.10. Intel Compute Stick acoplado en Ar.Drone 2	37
4.1. Diseño de la solución final.	40
4.2. Diseño del componente 3DPathFollower.	41
4.3. Ejemplo de baliza de color arlequinada.	42
4.4. Ejemplo del componente CalibrationTool.	45
4.5. Estados que forman de la aplicación 3DPathFollower en Visual States .	47
4.6. Fichero de configuración de interfaces ICE.	48
5.1. Mundo Gazebo ArDones1.	55
5.2. Cálculo de errores de distancia y de ángulos	56
5.3. Cálculo de posición de Slam-VisualMarkers	57
5.4. Error asociado al pilotaje.	59
5.5. Ruta sencilla en el pilotaje por trayectorias.	60
5.6. Comparación del error entre ambos pilotos en ruta sencilla.	60
5.7. Ruta compleja en el pilotaje por trayectorias.	61
5.8. Comparación del error entre ambos pilotos en ruta compleja.	61
5.9. Prueba integral de ruta por puntos.	63
5.10. Prueba integral de ruta por trayectoria.	63
5.11. Error de distancia a la ruta deseada en la prueba integral del sistema .	64

Capítulo 1

Introducción

En este primer capítulo, se introducirá brevemente al lector en el mundo de la robótica y más concretamente en los robots aéreos, para establecer así el estado actual, su evolución y el impacto que ha tenido en este sector. Adicionalmente, se contextualizarán las técnicas de visión en robots relacionadas con este TFG.

1.1. Robótica actual

La robótica es la ciencia y la técnica que está involucrada en el diseño, la fabricación y la aplicación de robots. Un robot es una máquina que puede programarse para que interactúe con objetos y lograr un objetivo, como imitar el comportamiento humano o la sustitución de una persona en un entorno peligroso. Para comprender mejor que es un robot, es necesario conocer que partes lo forman y los posibles comportamientos para los que ha sido diseñado.

Un sensor es un dispositivo eléctrico y/o mecánico que convierte magnitudes físicas (luz, electricidad, presión, etcétera) en valores medibles de dicha magnitud. Si utilizamos como analogía la anatomía humana, son equivalentes a los sentidos del cuerpo humano, como la vista o el oído. Generan la información, que una vez procesada, produce una acción, normalmente en los actuadores. Por ejemplo, con sensores de temperatura se puede medir el número de grados Celsius en una habitación.

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

Un actuador es un dispositivo capaz de transformar energía hidráulica, neumática o eléctrica en energía mecánica. Un ejemplo es un motor eléctrico que transforma electricidad en un movimiento rotacional para girar una rueda. Hay diferentes tipos según su naturaleza, y limitan las acciones que puede realizar un robot con el mundo que le rodea. Siguiendo con la analogía anterior, el actuador se correspondería a los músculos y articulaciones que componen un cuerpo humano.

Por último, un robot está formado por procesadores, que obtienen datos de los sensores y que se encargan de materializar acciones en los actuadores. El software se encarga procesar los datos de entrada y generar un comportamiento mediante la consecución de acciones. Volviendo a la analogía con el ser humano, sería nuestro cerebro y nervios.

Los robots pueden ser o no autónomos. Por autonomía se entiende la habilidad para tomar decisiones por uno mismo y llevarlas a cabo. Esto en un robot, es la capacidad de percibir la situación y actuar apropiadamente. Mediante acciones enviadas a los actuadores, se puede desplegar el comportamiento que realiza un robot. Éste, es definido por las decisiones tomadas durante el procesamiento de los datos de los sensores.

En caso de carecer de autonomía, se puede interaccionar con el robot mediante la teleoperación y la telepresencia. La teleoperación es la manipulación y envío de órdenes para ser ejecutadas por un robot que se encuentra en un lugar diferente a la persona. En medicina, se utiliza para realizar operaciones a través de unos brazos que ejecutan los movimientos enviados desde un lugar lejano. La telepresencia es la obtención de datos de los sensores de forma remota. En el espacio exterior, se aplica a la hora de enviar órdenes a satélites o robots como el Curiosity en Marte.

El comportamiento ha de ser en tiempo real, incluyendo la toma de decisiones y el análisis de diferentes situaciones. Además, robusto para evitar posibles accidentes o resultados no esperados. Otra forma de generar un comportamiento es por medio de sistemas distribuidos. En estos, los diferentes robots colaboran juntos y se comunican sin intervención humana para la obtención de un objetivo en común.

Uno de los objetivos para el futuro de la robótica, es la multitarea. Hoy en día

un robot está diseñado para un número limitado de posibles trabajos o tareas, a diferencia de los seres humanos, los cuales nos adaptamos sin necesidad de cambiar nuestra naturaleza física. Esto será posible con la evolución de inteligencias artificiales más capaces, actualmente muy limitadas.



(a) *Curiosity* en Marte



(b) Teleoperación médica

Figura 1.1: Ejemplos de robots

1.1.1. Historia

El origen etimológico del término robot, comúnmente utilizado hoy en día, tiene como origen la obra con título *R.U.R*, que es la abreviatura de Rossum's Universal Robots. El escritor de origen checoeslovaco, Karel Čapek, inventó la palabra *roboťa* (labor, trabajo) y cuya raíz eslava *rabu* coincide con esclavo. La palabra robot fue difundida gracias a numerosos autores de ciencia ficción de éxito en Norteamérica, como por ejemplo Isaac Asimov.

Los predecesores de los robots son los autómatas. Son artefactos, creados por el hombre, capaces de realizar tareas diarias y comunes para los hombres, o bien, para facilitar las labores cotidianas. Aunque no todos tenían una utilidad, algunas de ellos servían para entretenir a sus dueños.

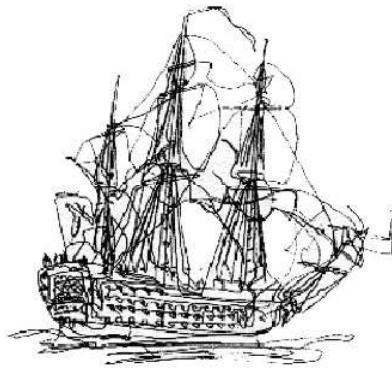
Un ejemplo es el *hombre de palo* (1500) para el emperador Carlos V en España. Juanelo Turriano construyó este autómata con forma de monje. Andaba y movía la cabeza, ojos, boca y brazos. Conforme pasaron los siglos, la complejidad mecánica fue

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

aumentando hasta llegar por ejemplo, al autómata de Maillardet(1800) en Londres. Con una memoria muy superior a cualquier máquina de la época, era capaz de dibujar cuatro dibujos y escribir tres poemas (dos en francés y uno en inglés) en un papel.



(a) Autómata

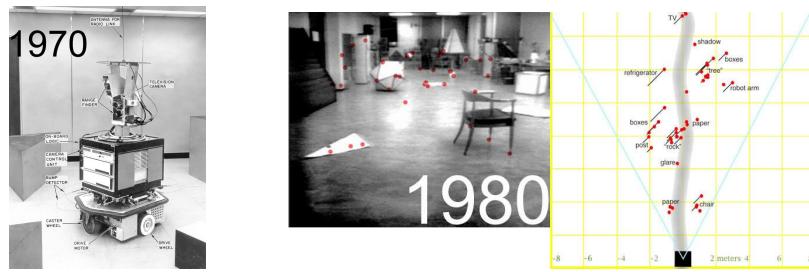


(b) Dibujo en papel

Figura 1.2: Autómata de Maillardet

Entre los años 1960 y 1980, la aparición de los primeros ordenadores revolucionan los autómatas, llegando por primera vez la robótica a las universidades. Un ejemplo es el Stanford Cart. Se utilizó para demostrar que no se podía controlar de forma fiable un vehículo no tripulado en la Luna. Utilizaba cuatro ruedas con motores eléctricos y una cámara. La siguiente evolución de este carrito fue con el logro del primer robot con ruedas y visión autónomo. Hasta que en 1980, utilizando dos cámaras, se comienza a reconstruir el espacio en 3D mediante la construcción de mapas.

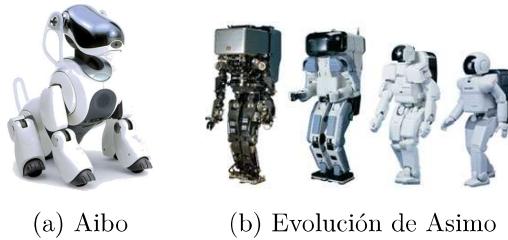
Más adelante, con la aparición de nuevos sistemas operativos y ordenadores mucho más potentes, las aplicaciones de la robótica son cada vez más extensas y se populariza la interacción entre robots y humanos. La compañía Sony pone al mercado el primer Aibo, el perro robot. Un juguete pensado para interaccionar con niños y simular el comportamiento de una mascota. Los humanoides también se popularizan como por ejemplo ASIMO del fabricante de coches japonés HONDA.



(a) Stanford Cart

(b) Reconstrucción del espacio 3D en mapas

Figura 1.3: Robot de Stanford Cart



(a) Aibo

(b) Evolución de Asimo

Figura 1.4: Robots en el siglo XX

1.1.2. Aplicaciones actuales

Hoy en día, las aplicaciones de los robots son muy diversas. Fuera y dentro de nuestro planeta, los robots permiten hacernos ver sitios en los que el hombre no puede llegar o en los que el hábitat es hostil. Como el Global Explorer ROV, que se ha sumergido en diferentes océanos para obtener imágenes nunca antes vistas por el hombre.

Sector industrial

Es uno de los sectores que más compra robots y se encuentra en constante crecimiento. China pasó en 2013 a los E.E.U.U. en densidad de robots por trabajador y el número de ventas de robots industriales en el mundo aumentó un 16% en 2016 por cuarto año consecutivo(Figura 1.5¹).

Dentro de las aplicaciones encontramos:

¹Datos obtenidos de International Federation of Robotics <http://www.ifr.org/>

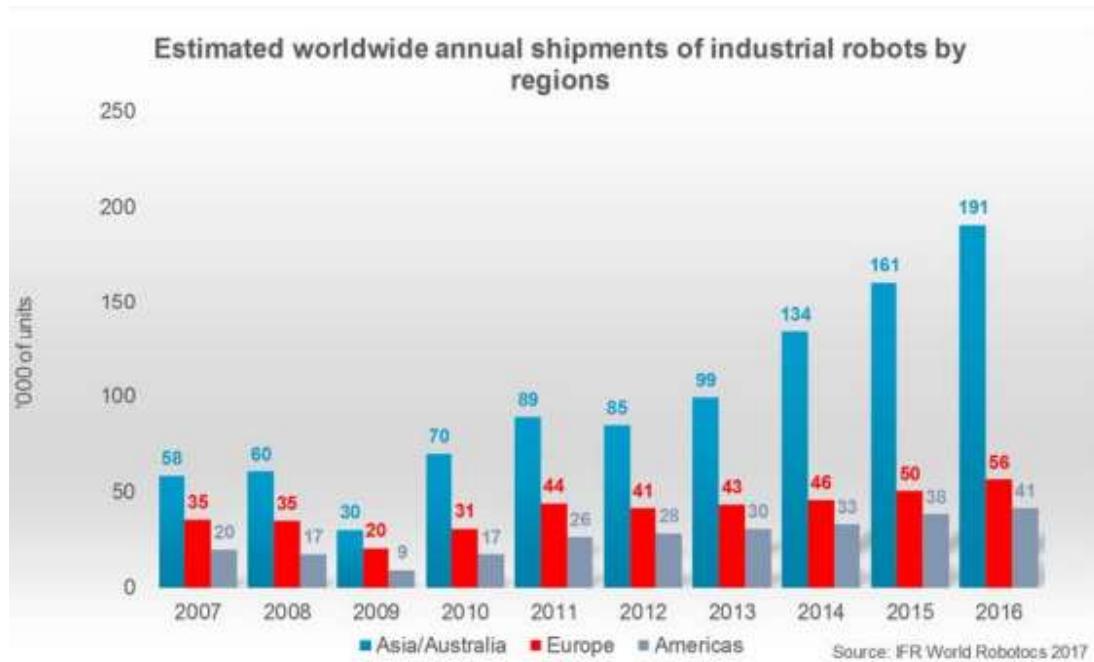


Figura 1.5: Ventas anuales estimadas de robots industriales por regiones

- Operaciones de manipulación: Usan pinzas, colaboran con otros robots y/u operarios y desplazan objetos. Este uso es uno de los más extendidos en empresas. Por ejemplo en el montaje de coches, ayudando a operarios a desplazar objetos pesados como las puertas.
- Soldadores. Se encargan de las tareas de soldadura de componentes. La compañía Asus ha creado un método de producción automático para sus tarjetas gráficas. En concreto, este proceso de soldadura mejora la calidad del producto y permite reducir el tamaño de sus tarjetas notablemente.²
- Montaje. Las cadenas de montaje se vuelven más rápidas y eficientes. En las plantas de procesadores Intel, el proceso de montaje es uno de los más avanzados del mundo y se utilizan salas en las que el aire no es respirable para personas y garantizan un área de partículas externas muy baja, muy importante para la

² Introducing ASUS Auto-Extreme Technology: <https://www.youtube.com/watch?v=4gRpuurPsuc>

pureza de los procesadores.

Aplicaciones comerciales

El acercamiento de los robots a la población ha supuesto que su uso se encuentre en constante crecimiento y el número de aplicaciones es muy variado, desde recreación pasando por la grabación profesional para cine. A continuación, se recogen algunas de las aplicaciones que tienen lugar en la actualidad:

- Limpieza doméstica: Incluye robots que limpian piscinas, hasta aspiradoras inteligentes. Este último caso es el de Roomba, de la compañía iRobot, que incorpora algoritmos de construcción de mapas, evasión de objetos o incluso detección de escaleras (para evitar posibles accidentes).
- Transporte de personas: El mayor representante de este tipo de productos es el Google Car (Figura 1.6). Este proyecto, en funcionamiento desde 2009, ofrece a personas con movilidad reducida o discapacitados, la utilización de automóviles, en concreto un coche. Está equipado con todo tipo de sensores que permiten la autolocalización, evitar accidentes y llegar al destino deseado. Dota de mayor autonomía a estas personas, mejorando su calidad de vida. Otras compañías como Uber han sufrido recientemente accidentes mortales que pueden retrasar esta aplicación en el futuro.
- Automatización en vehículos: En esta categoría se recogen sistemas de seguridad que controlan la distancia de seguridad respecto de otros vehículos, luces inteligentes e incluso sistema de aparcamiento asistido. Compañías como BMW, Tesla o Mercedes Benz apuestan cada día más por la utilización de estas tecnologías en la industria de automoción.
- Ocio y entretenimiento: La utilización de drones con la capacidad de volar, ha reducido considerablemente el coste de planos aéreos y simplificado el equipo necesario. Airdog (Figura 1.6) es un proyecto nacido de una campaña Kickstarter

que permite el seguimiento de actividades deportivas o recreativas a gran velocidad, de forma totalmente autónoma, y la grabación de las mismas.

- Educación: La aplicación de robots como para el uso didáctico se contempla como un recurso innovador, que aumenta el interés de los niños y sirve de apoyo para los maestros (Figura 1.6).
- Militar y seguridad: Para evitar la pérdida de bajas humanas, aumentar la capacidad de motorización y mejorar su potencia de combate. Los ejércitos están invirtiendo cada vez más en robots capaces de sustituir a soldados en el frente y como armas de defensa de la nación.



(a) Google Car



(b) Secuencia de seguimiento
de un Airdog



(c) Robot PEPPER en
un aula como complemento
educador

Figura 1.6: Aplicaciones en la actualidad

1.1.3. Software en robots

El software que se encuentra en los robots, es el encargado de dotar de un comportamiento inteligente a los mismos. Se pueden distinguir tres tipos software en un robot. Uno, es el sistema operativo que se ocupa del procesador. El segundo es el que se encarga, por ejemplo, de calcular el movimiento necesario de cada actuador basándose en algoritmos. Se caracteriza porque puede contener diferentes niveles de lenguaje. Desde unos de alto nivel, como el que utilizaría cualquier programa que ejecuta en un ordenador, hasta otros de bajo nivel, como el código máquina. El último grupo es la

colección de programas y funciones desarrolladas para utilizar los periféricos del robot. Dicha colección, abstrae los dos grupos anteriormente explicados en beneficio de una programación más fácil.

1.2. Visión en robots

La visión, al igual que en los seres humanos, es una gran fuente de información de nuestro entorno. Las personas utilizamos el espectro visible de la luz, que se corresponde con lo que llamamos colores. Además, percibimos el mundo que nos rodea como un mundo en tres dimensiones debido a que tenemos dos ojos. Esto nos permite obtener propiedades del entorno y poder desplazarnos en él sin preocupaciones. Los robots utilizan sensores de visión de todo tipo, capaces de ver en la oscuridad o distinguir diferentes temperaturas. Además, en los últimos años, los sensores de visión han disminuido en precio y su utilización se ha visto incrementada notablemente en el mundo de la robótica. A pesar de este incremento en su uso y de ser una fuente potencialmente rica en información, el flujo de datos puede llegar a ser muy grande y su procesado complicado.

El objetivo de la visión artificial es conseguir datos a través de las imágenes que recibe de una cámara. Para esto se aplican diferentes operaciones matemáticas con el fin de conseguir bordes, formas, colores, patrones en la imagen, etcétera.

1.2.1. Aplicaciones actuales

Actualmente, las aplicaciones de visión artificial son muy variadas, desde seguridad, como sistemas de detección de movimiento, pasando por el entretenimiento, como el sensor Kinect, hasta la accesibilidad para dotar de autonomía a personas que lo necesitan. Es muy común, hoy en día, que un robot incluya como parte de sus sensores una cámara.

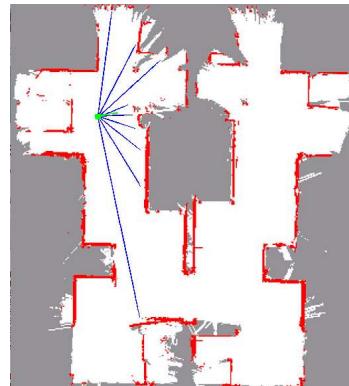
- Navegación y construcción de mapas: Es una de las primeras aplicaciones a través de visión y permite a los robots la creación de mapas a través de la detección de

bordes, formas o profundidad. Esta información sirve también para poder navegar sobre sitios desconocidos o previamente han sido convertidos a un mapa.

- Autolocalización: Permite extraer información a un robot sobre la posición relativa respecto al resto del mundo que lo rodea, mediante el reconocimiento de patrones o balizas. Una técnica es el SLAM (*Simultaneous Localization and Mapping*), que permite la autolocalización al mismo tiempo que se realiza un mapa del entorno.



(a) Reconocimiento de objetos en imagen



(b) Reconstrucción de mapas con técnicas SLAM

Figura 1.7: Visión artificial en robots

1.3. Simulación

Una parte importante del diseño del comportamiento de un robot, es la simulación. Proporciona un entorno virtual en el que somete a diferentes escenarios y situaciones a un modelo creado a partir del robot elegido. Permite probar algoritmos sin necesidad de utilizar uno real. Puede llegar a aportar información muy valiosa y familiarizarse con posibles situaciones. Además de prevenir accidentes como cualquier daño físico al objeto o herir a las personas cercanas. El problema que se presenta es que los resultados

dependen de la precisión a la hora de caracterizar el modelo y mundo virtual. Una vez alcanzado el resultado deseado, se ha de adaptar nuestra aplicación robótica al mundo real.

Para una mayor precisión del comportamiento en el mundo real, los simuladores incluyen la adición de funciones de ruido en sensores y actuadores. Esto permite la creación de comportamientos mucho más robustos.

Un ejemplo es Gazebo³, un proyecto de software libre que incluye multitud de modelos y motores de física virtualizada. Ofrece una interfaz gráfica y control sobre los objetos y el mundo generado, además de la creación y modificación de actuadores y sensores personalizados. Por ejemplo, se pueden crear vehículos con diferentes sensores o casas con las que interactuar. En nuestro caso, se ha utilizado como herramienta de virtualización junto a la plataforma JdeRobot de la Universidad Rey Juan Carlos.

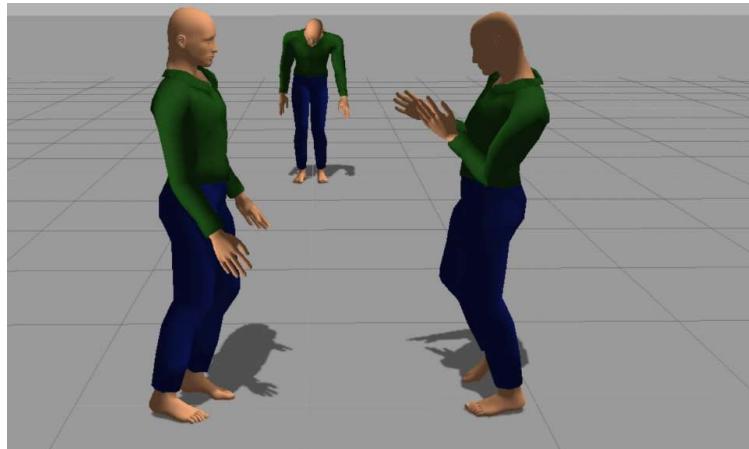


Figura 1.8: Personas simuladas en Gazebo

1.4. Robótica Aérea

Es una de las ramas de la robótica de mayor auge actualmente y sus aplicaciones son cada vez más extendidas. Pertenece a este área los *Unmanned Aircraft Vehicles*.

³Página web oficial de Gazebo : <http://gazebosim.org/>

cle(UAV),en español *Vehículo Aéreo No Tripulado*(VANT), o también conocidos como *drones*. Se trata de un vehículo capaz de volar, que puede o no recibir órdenes del exterior. Incluyen multitud de diferentes sensores para mantenerse en vuelo, aterrizar o despegar.

1.4.1. Historia

Históricamente, el origen de los UAV ha sido en aplicaciones militares, como en otras áreas de investigación. Una vez ha sido suficientemente desarrollado comienzan las aplicaciones civiles y su aplicación comercial e industrial. En 1883, Douglas Archibald instaló un anemómetro, un instrumento para medir la velocidad del viento, a su cometa para poder medir la velocidad del viento a una altura de más de 350 metros. En 1887 instaló dos cámaras, de las cuales tomó fotografías una vez en el aire. Se consideran las primeras imágenes tomadas por un UAV. Más tarde se usaría esta técnica en la guerra entre España y los Estados Unidos en 1898 para obtener datos estratégicos.

Durante la primera y la segunda guerra mundial se utilizaron drones para la obtención de mapas sin poner en peligro al piloto. Más tarde, en 1995 se utilizaron en Bosnia para tareas de vigilancia o análisis de daños. Especialmente importante para el reconocimiento nocturno. El modelo se llamaba *Predator* y era lanzado desde Hungría.



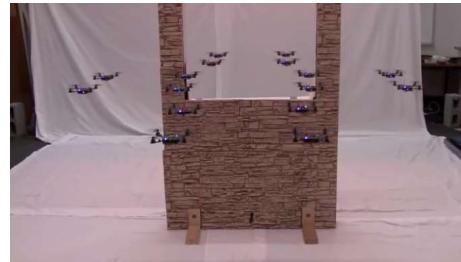
Figura 1.9: UAV Predator.

Aplicaciones actuales

Actualmente, gracias al avance de la estabilización electrónica, los UAV han alcanzado tamaños mucho más reducidos, como el *Hummingbird*⁴ o colibrí en español, de DARPA. Además son mucho más ágiles y mecánicamente simples. Han aparecido numerosos usos comerciales y civiles, aunque no desaparece el interés militar. Compañías como *Amazon*, están trabajando en proyectos para conseguir crear un sistema de envío de compra a domicilio utilizando *drones*, en concreto *cuadricópteros*. En universidades como *University of Pennsylvania* están diseñando comportamientos basados en grupos masivos, creando formaciones en el aire y dotando capacidad de pensamiento en grupo a los drones. Otro de los usos es la exploración aérea, que incluye la inspección de embalses, líneas de alta tensión, campos agrícolas y la vigilancia. Este último caso es el de Alemania, que utiliza drones aéreos para evitar el ataque de grafiteros a vagones de tren⁵. Uno de los campeonatos más recientes de programación para UAV es el *Mohamed Bin Zayed International Robotics Challenge*(MBZIRC)⁶. Con una recompensa de 5 millones de dólares, una de las pruebas consiste en localizar, seguir y aterrizar, coincidiendo con los objetivos principales de este Trabajo Fin de Grado.



(a) Amazon Prime



(b) Grupos masivos

Figura 1.10: Ejemplos de UAV civiles

⁴Más información en: <http://www.avinc.com/nano>

⁵Alemania pone a prueba drones contra los grafitis: http://www.bbc.com/mundo/noticias/2013/05/130528_tecnologia_drones_graffiti_alemania_aa

⁶Página Web oficial del campeonato: <http://www.mbzirc.com/>

Cuadricópteros

Existen diferentes tipos de drones en función del diseño y los componentes que los forman. Algunos son similares a los aviones, con alas y el mismo método de despegue y aterrizaje. Están pensados para largos períodos de tiempo y altas velocidades. Otros, buscan una excepcional maniobrabilidad y estabilidad aérea. En este caso utilizan rotores, al igual que los helicópteros. A este grupo pertenecen los cuadricópteros. Se caracterizan por ser un helicóptero multi-rotor de cuatro brazos en forma de cruz. Los rotores, se encuentran en el extremo de cada brazo.

Cuando los motores giran, las hélices situadas en ellos generan una fuerza de empuje vertical, llamada *sustentación*. Ésta es perpendicular al movimiento de la hélice y depende de la velocidad a la que gira. La suma de cada fuerza en cada rotor produce una resultante. Los diferentes movimientos que puede describir el cuadricóptero se encuentran recogidos en la ilustración de la Figura1.11. El color rojo indica que una potencia mayor ha sido aplicada, mientras que el verde, representa una potencia menor. Para evitar un fenómeno que en los helicópteros produce vueltas sobre sí mismo, la disposición de los motores sigue una forma de cruz, en la que cada par opuesto gira en el mismo sentido. Uno en el sentido de las agujas del reloj y el otro anti-horario.

Para que sea posible el despegue (Figura1.11,e), esta resultante ha de ser superior al peso del UAV. Si es igual, se consigue un estado de altitud fija (también conocida en inglés como *hovering*). Para aterrizar sería necesario una resultante menor que el peso del objeto (Figura1.11,f).

Para conseguir el giro conocido como *yaw* (Figura1.11,g y h) o *guinada*, es el giro del plano horizontal al drone. Para girar a la derecha se transmite más potencia al par de rotores que giran en sentido anti-horario. Si la potencia fuera superior en el otro par opuesto, giraría hacia la izquierda sobre sí mismo.

En el supuesto de que sólo uno de los motores aplicase más potencia que los demás, por ejemplo el delantero, el cuadricóptero se desplazaría hacia atrás, inclinando la parte trasera del vehículo hacia arriba. Esto se correspondería con el movimiento llamado *pitch*(Figura1.11,a y b) o *cabeceo*.

Por último, si aumentamos la potencia en uno de los motores laterales, por ejemplo la derecha, el vehículo se inclinará y trasladará hacia la izquierda, provocando un movimiento conocido como *roll*(Figura 1.11,c y d) o *alabeo*.

Comportamiento de los rotores

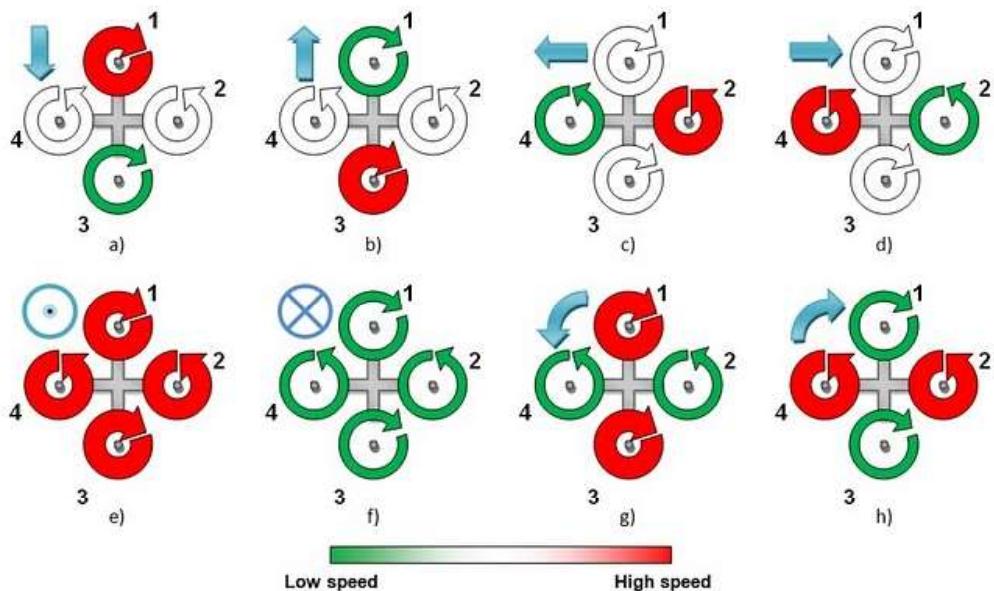


Figura 1.11: Relación entre la potencia de los rotores y el movimiento de un cuadricóptero

Los cuadricópteros pueden tener numerosos sensores desde acelerómetros, giroscopios, magnetómetros, ultrasonidos, incluso cámaras con resoluciones de hasta 4K. Todo ello se utiliza en combinación, para conseguir una mayor estabilización durante el vuelo. Dentro de los actuadores encontramos los cuatro rotores pero también se pueden añadir pinzas para cargar objetos o, en caso de uso militar, armas y sus respectivos gatillos.

Algunos de los fabricantes de drones más relevantes actualmente son:

- Parrot: Con modelos como el Ar.Drone 1 y 2 que acercaron a un gran público el uso de los drones.

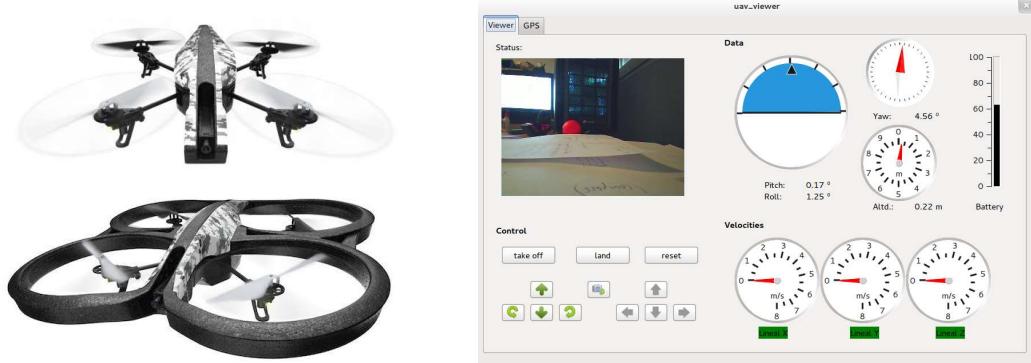
- 3DRobotics: Diseñado para la obtención de planos aéreos estables.
- Erle: Está soportado oficialmente por Ubuntu.
- Airdog: Ya mencionado previamente en el apartado ??
- DJI: Una de las compañías que más drones vende anualmente, cargados de todo tipo de sensores, cámaras con las últimas tecnologías de estabilización y algoritmos inteligentes de navegación.

1.4.2. Robótica Aérea en la Universidad Rey Juan Carlos

El grupo de Robótica de la Universidad Rey Juan Carlos lleva años desarrollando proyectos relacionados con la navegación, visión, autolocalización y virtualización de entornos con robots. Gracias a la popularización y a la reducción en coste de los drones se comenzó en el año 2013 una nueva línea de investigación sobre los UAV. Los primeros proyectos han creado las bases sobre las que seguir investigando y han proporcionado la infraestructura necesaria. Éstos han sido integrados en la plataforma JdeRobot, en la cual participan profesores, alumnos y gente de la comunidad de software libre. Sirve como base para nuevos proyectos o la mejora de los actuales.

Entre estos proyectos se encuentra el Trabajo de Fin de Grado(TFG) *Navegación visual en robots aéreos* de Alberto Martín. Sus aportaciones a JdeRobot fueron la de un componente llamado *ardrone_server*, que crea una interfaz capaz de comunicarse con el *AR.Drone* de la compañía Parrot. En el mismo trabajo, incluye una herramienta, llamada *uav_viewer* cuya función es obtener la información de los sensores y controlar los actuadores de dicho UAV. Por último, se encuentra un componente de visión y navegación llamado *object_tracking*. Utiliza filtros de colores para el seguimiento de objetos a través de las imágenes recibidas por la cámara frontal y ventral del drone. El drone es capaz de un seguimiento autónomo de objetos, tanto en el suelo como en 3D.

Daniel Yagüe en su Proyecto Fin de Carrera *Cuadricóptero AR.Drone en Gazebo y JdeRobot*, desarrolló un modelo para la plataforma JdeRobot en el simulador Gazebo del mismo AR.drone que utilizó Alberto Martín, anteriormente mencionado. Esto



(a) ArDrone sin y con protección de interiores

(b) Interfaz gráfica del componente uav_viewer

Figura 1.12: Simulación en exteriores

permite tanto la simulación de los datos sensoriales como de la virtualización realista de un comportamiento cercano a dicho drone. Adicionalmente, programó diferentes aplicaciones de navegación autónomas como el seguimiento de balizas por posición, de carretera o de otro cuadricóptero. Para ello, crea unas interfaces incluidas en el entorno de JdeRobot que permiten el desarrollo de otras aplicaciones de navegación.

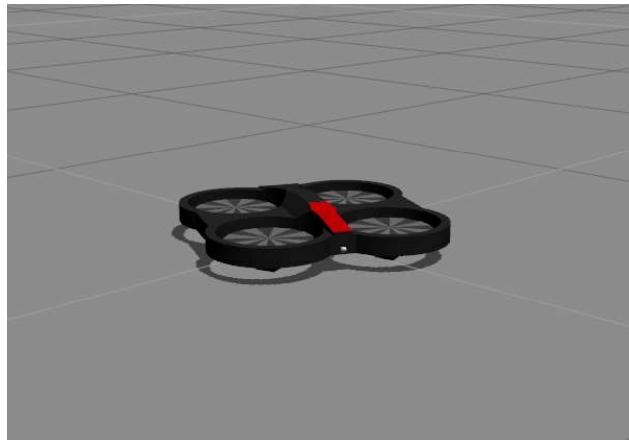


Figura 1.13: ArDrone simulado en Gazebo

Alberto López-Cerón, con *Autolocalización visual robusta basada en marcadores*, creó un algoritmo capaz de estimar la posición de la cámara a partir de la detección

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

de marcadores o balizas.

Manuel Zafra siguió desarrollando la idea de Alberto López-Cerón en *Seguimiento de rutas 3D por un drone con autolocalización visual con balizas*. Diseño un algoritmo de navegación en interiores basado en autolocalización mediante la visión artificial en simulador.

Jorge Vela se centró en el *Despegue, navegación y aterrizaje visuales de un drone usando JdeRobot*. Sentó las bases para el despegue y aterrizaje controlado utilizando visión artificial en un drone real.

Siguiendo con las bases aportadas por los proyectos previamente explicados, en este TFG se programará el comportamiento autónomo de despegue controlado y aterrizaje de un drone sobre una baliza visual y la navegación a partir de la autolocalización. Se utilizará un drone real, empleando la infraestructura existente en JdeRobot para estos cuadricópteros. Con ello se pretende unificar los avances anteriores, en un drone real y dejando la puerta abierta a nuevos comportamientos más complicados.

En el próximo capítulo, se explicarán los objetivos y la metodología propuesta para resolverlos. En el tercer capítulo se expondrán con profundidad la infraestructura y herramientas utilizadas. En el cuarto, se describirá el desarrollo de todos los componentes que forman este proyecto. En quinto lugar, se realizarán distintos experimentos para observar los datos obtenidos en diferentes escenarios y validar experimentalmente la solución programada. Para terminar, unas conclusiones aportarán un visión global del conjunto y los conocimientos extraídos.

Capítulo 2

Objetivos

En este capítulo describiremos los objetivos planteados para el Trabajo de Fin de Grado, los requisitos exigidos y la metodología utilizada para el desarrollo.

2.1. Problema a abordar

El objetivo principal de este trabajo, es desarrollar una aplicación, que a través de técnicas de visión artificial, dote de un comportamiento autónomo a un dron real. El resultado consistirá en un despegue, una navegación en tres dimensiones y por último, una fase de aterrizaje. Se utilizará un co-procesador a bordo del drone real para realizar todo el procesamiento y incrementar la autonomía del drone con respecto a técnicas anteriores.

Para llegar a él, ha sido fundamental dividir el proyecto en objetivos más pequeños, que sumados, dan forma a todo el conjunto.

- **Reimplementación y desarrollo del módulo de autolocalización visual:**

Este módulo proporciona la posición relativa del dron basándose en la detección de balizas visuales y cálculos geométricos. A pesar de que existía un módulo previo debido al TFM de Alberto y al PFC de Manuel, se ha reimplementado el algoritmo por motivos de rendimiento y lenguaje de programación.

- **Mejora y refactorización de los módulos de despegue y de aterrizaje:** Estos módulos se encargan de las tareas de aterrizaje y despegue controlado. Existía una primera versión del TFG de Jorge Vela, de la cual se ha mejorado el rendimiento y refactorizado el código para su adaptación dentro de un autómata de estados finito.
- **Diseño y desarrollo de una aplicación para la calibración de balizas bicolor arlequinadas:** Esta aplicación es fundamental para acelerar el proceso de calibración y de operaciones morfológicas necesarias, a través de una interfaz de usuario sencilla. Genera un fichero de configuración fácilmente transferible que será utilizado por los módulos de despegue, búsqueda y aterrizaje.
- **Reimplementación y desarrollo de módulos de búsqueda:** Se han generado dos módulos de búsqueda. El primero ha sido reimplementado, a pesar de que existía una primera versión de la búsqueda en espiral en el TFG de Jorge, este algoritmo no permitía la configuración e integración con un autómata de estados finito. El segundo tipo de búsqueda es de tipo rotacional y está basada en el módulo de autolocalización. El dron girará sobre sí mismo hasta que encuentre la baliza que tiene como objetivo para comenzar la navegación hacia su posición.
- **Desarrollo de la inteligencia del dron materializándola en un autómata de estados finito:** La aplicación final debe estar dividida en diferentes estados. Esto permitirá que se puedan añadir o quitar funcionalidades de manera sencilla. Se podrá configurar a través de variables para así evitar la alteración del código.
- **Configuración del co-procesador a bordo del dron:** Será necesaria la preparación del entorno para poder correr la aplicación, un sistema de lanzamiento y detención de las pruebas experimentales y configurar la conectividad entre todos los componentes implicados (drone, co-procesador y ordenador).
- **Validación experimental en el cuadricóptero real** Se realizarán varias pruebas para demostrar el correcto funcionamiento de la solución desarrollada.

Adicionalmente, se realizarán pruebas unitarias y se comparará la diferencia entre la utilización del co-procesador frente a un ordenador.

2.2. Requisitos

Se deberán satisfacer, adicionalmente, los siguientes requisitos:

- Los componentes y aplicaciones desarrollados han de estar integrados en la plataforma JdeRobot-5.6.4.
- El control de navegación del cuadricóptero ha de ser fluido y ágil, de modo que pueda mantenerse estable al menos 5 segundos en cada baliza, evitando en todo momento perder del campo de visión el objetivo.
- Los componentes y aplicaciones desarrollados han de ser computacionalmente eficientes y deben ser modulares.
- El sistema operativo debe estar basado en la distribución GNU/Linux Ubuntu 16.04.
- La aplicación debe poder ser fácilmente transferible y ejecutada tanto en el co-procesador como en un ordenador.
- Una vez iniciado el algoritmo, la comunicación se realizará exclusivamente entre co-procesador y drone.
- Programado en el lenguaje Python, versión 2.7.

2.3. Metodología

Para poder materializar los objetivos y requisitos, previamente mencionados, es necesario aplicar algún método que defina las distintas etapas y estados. En este Trabajo de Fin de Grado se aplica el método de desarrollo en espiral. Este modelo,

creado por Barry Boehm en 1986, se utiliza frecuentemente en la ingeniería de software. Se basa en una serie de iteraciones en bucle. En cada ciclo, se realiza un conjunto de cuatro actividades:

1. **Determinar los objetivos:** Poner limitaciones definidas en forma de objetivos o requisitos. Dividir el proyecto en partes más pequeñas.
2. **Análisis del riesgo:** Estudiar los riesgos de cada uno de los objetivos que se abordan. Evaluar las alternativas posibles en caso de amenazas.
3. **Desarrollar y probar:** Verificación de la tarea actual. Al mismo tiempo, se realiza un análisis para encontrar nuevos factores de riesgo, como errores que se podrían arrastran a la próxima iteración.
4. **Planificación:** Establecer y definir las fases anteriores.



Figura 2.1: Representación del desarrollo en espiral.

Durante el desarrollo de este proyecto, se han establecido reuniones periódicas con el tutor. En ellas, revisábamos los objetivos anteriormente fijados y los resultados obtenidos. Si alguno de los objetivos generaba algún problema o no se llegaba al resultado deseado, se aplazaban o se profundizaba en la raíz del problema. A continuación, se determinaban los subobjetivos de nuestro próximo encuentro.

Como parte de la evaluación de los objetivos propuestos, ha sido fundamental la utilización del mediawiki¹ de la plataforma JdeRobot. En el están publicados, a modo de cuaderno de bitácora, los éxitos y progresos, haciendo uso además de contenido multimedia como imágenes o vídeos.

Para el seguimiento y almacenamiento del software desarrollado se ha empleado la herramienta de control de versiones GIT. Todo el código relacionado con este proyecto se encuentra alojado en el repositorio².

2.4. Planificación

Para conseguir los objetivos fijados anteriormente se ha seguido el siguiente plan de trabajo:

- **Formación y familiarización con el entorno de JdeRobot:** Incluye el preparación de las dependencias necesarias para la instalación del entorno. Estudio de las diferentes bibliotecas, interfaces y componentes. Aprendizaje y profundización de lenguajes de programación como Python y C++, así como la herramienta para las comunicaciones ICE y la biblioteca de visión OpenCV.
- **Aprendizaje de la herramienta VisualStates:** Necesaria para la generación de autómatas de estado finito. Se han generado varios ejemplos para conocer las diferentes secciones para la inserción de variables, funciones y nuevos estados.
- **Configuración del co-procesador:** Ha sido necesaria la investigación de posibles métodos de conexión (USB, ethernet, Wi-Fi), instalación del sistema operativo, entorno JdeRobot y bibliotecas adicionales necesarias como April Tags. Se ha realizado la instalación de un servidor SSH para realizar el lanzamiento de comandos en remoto.

¹<http://JdeRobot.org/Andresjhe-tfg>

²<https://github.com/RoboticsURJC-students/2014-tfg-Andres-Hernandez>

- **Familiarización con Gazebo:** Se han estudiado los plugins ya existentes en JdeRobot y a su vez, la creación otros nuevos a través de la API de Gazebo. El aprendizaje de Blender ha sido necesario para generar el modelos virtuales específicos para este TFG.
- **Aprendizaje e implementación del componente de despegue, búsqueda en espiral y aterrizaje:** Necesario para conocer el funcionamiento del componente ya existente para las balizas de color y como obtener las diferentes coordenadas a partir de su detección. Se ha adaptado el código para ganar rendimiento y para poder ser implementado en una máquina de estados finito.
- **Diseño de la herramienta de calibración:** Necesario para acelerar el tiempo de calibración y el despliegue de la aplicación final en el co-procesador.
- **Aprendizaje e implementación del componente de autolocalización y búsqueda rotacional:** Necesario para conocer el funcionamiento de las balizas de tipo AprilTags y como obtener las diferentes coordenadas a partir de su detección.
- **Validación experimental:** Se validará el funcionamiento de las fases anteriores en un dron real ayudado por un co-procesador a través de pruebas unitarias como global. Se consiguió detectar problemas de rendimiento, caracterizarlo y conseguir así resolver, dónde ha sido posible, los diferentes problemas encontrados durante las pruebas.

Capítulo 3

Infraestructura

En cada uno de los siguientes apartados se detallará la función de los programas o dispositivos necesarios para la elaboración de este proyecto. Debido a la naturaleza de la plataforma JdeRobot, el sistema operativo que se ha elegido para el desarrollo y ejecución de los componentes ha sido Linux. En concreto, la distribución Ubuntu 16.04.

3.1. Parrot Ar.Drone 2

Este es el drone que se utilizará durante las pruebas reales. Parrot¹ es un fabricante de dispositivos de diferente naturaleza, que van desde manos libres para teléfonos pasando por todo tipo de robots. Fue uno de los fabricantes que más popularizaron los drones a partir de 2010 con su primer Ar.Drone.

Este drone está dotado de una API de comunicaciones que forma parte de un SDK² que proporciona el fabricante de manera gratuita para obtener los datos de los sensores y/o control de los motores del cuadricóptero. Se ha utilizado la versión 2.4.

Posee dos cámaras, una ventral y otra frontal, incluye un acelerómetro y todo el procesado se realiza en un ARM de dos núcleos. Dado que tiene un puerto USB, lo

¹<https://www.parrot.com/global/>

²<http://developer.parrot.com/>

utilizaremos para alimentar al co-procesador que montaremos a bordo. Por último, está dotado de Wi-Fi como canal de comunicaciones por defecto y generará un punto de acceso sin contraseña para que los dispositivos se conecten y comuniquen con él.

3.2. ICE

ICE³ es un middleware de Código Abierto orientado a objetos que proporciona las herramientas, APIs y librerías necesarias para simplificar las comunicaciones entre modelos basados en cliente y servidor. En JdeRobot es la plataforma elegida como infraestructura para todos los procesos de comunicación entre componentes y plugins. Proporciona una capa transparente que se encarga de abrir y cerrar conexiones, la serialización de información, retransmisión de paquetes perdidos, etcétera. La versión utilizada en este proyecto es la 3.6

3.3. Biblioteca AprilTags

En este proyecto, se utilizará una librería basada en visualización virtual denominada *AprilTags*⁴. Es un sistema de visualización fiduciaria. Estos sistemas se basan en símbolos diseñados para ser fácilmente reconocidos del resto del entorno. Puede detectar uno o varios símbolos en la misma imagen, además de proporcionar información como la identificación y posición del símbolo dentro de una imagen de cada uno. Es un sistema robusto cuyo funcionamiento es independiente del ángulo y diferentes situaciones de luminosidad en la imagen.

³<https://zeroc.com/>

⁴<https://april.eecs.umich.edu/software/apriltag/>



Figura 3.1: Ejemplo de detección en AprilTag

Sus aplicaciones son muy variadas, desde la captura de movimiento en objetos hasta sistemas de navegación basada en balizas. Otra de sus aplicaciones es la de realidad aumentada, sustituyendo el símbolo por una imagen virtualizada.

Los símbolos se dividen en diferentes familias. Estas familias utilizan un número de bits y de distancia de Hamming predefinidos. Dentro de cada familia, se generan los diferentes símbolos, asignando un único ID o identificador. Esto permite el reconocimiento en caso de tener varias balizas al mismo tiempo en el campo de visión.

Originalmente está escrita en C y Java pero Ed Olson de Massachusetts Institute of Technology(MIT) ha creado una adaptación en C++. El código⁵ es abierto y está protegido bajo la GPLv2.1. Entre sus dependencias se encuentran OpenCV y Eigen3, ambas son bibliotecas de tratamiento de imagen en Linux.

A través de la utilización de un wrapper⁶ para Python, ha sido posible su integración con la aplicación final.

⁵<https://svn.csail.mit.edu/apriltags>

⁶<https://github.com/swatbotics/apriltag/tree/master/python>

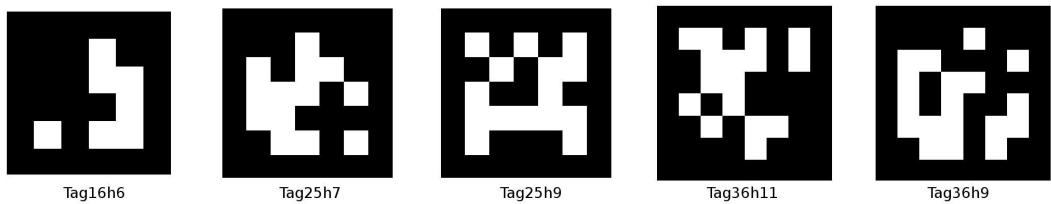


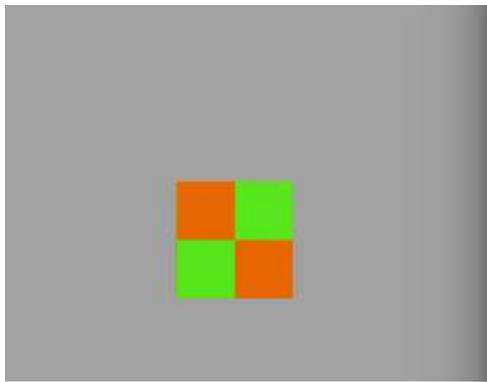
Figura 3.2: Ejemplos de familias en AprilTag

3.4. Biblioteca OpenCV

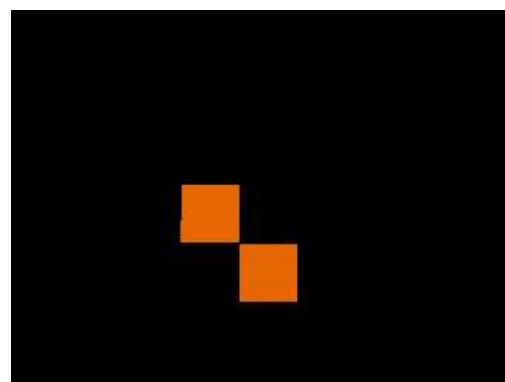
OpenCV⁷ es una biblioteca de visión artificial de Código Abierto, que tiene un conjunto de transformaciones y operaciones con imágenes o matrices que facilitan el procesamiento de las mismas. Está programada en C++ y Python y en este TFG se ha utilizado la versión 3.4.

En este proyecto se ha utilizado para realizar filtros de color en imágenes y así extraer las características que nos interesan de una imagen. Otro caso es para realizar transformaciones morfológicas en imágenes como la erosión y la dilatación, que permiten eliminar la sombra que proyecta el drone. Por último, se han utilizado transformaciones geométricas de matrices para estimar la posición relativa del drone a partir de la información de balizas en una imagen de dos dimensiones.

⁷<https://opencv.org/>



(a) Imagen antes de aplicar filtro de color en OpenCV



(b) Imagen resultante al aplicar filtro de color en OpenCV

Figura 3.3: Ejemplo filtro de color en OpenCV

3.5. JdeRobot

En el mundo de la robótica, existen diferentes plataformas que simplifican y aportan las herramientas necesarios para el desarrollo de aplicaciones en robots. JdeRobot es una de ellas y consiste en una colección de aplicaciones robóticas, domóticas y de visión artificial. Estas aplicaciones están escritas en diferentes lenguajes como C++ o Python y su interoperación se realiza a través de interfaces ICE. En ella participan desarrolladores de diferentes niveles desde profesionales del sector, profesores, alumnos de la Universidad Rey Juan Carlos y de otras universidades de todo el mundo. Durante el ciclo de vida este proyecto ha servido como plataforma de exposición de los progresos y logros conseguidos. El código fuente es libre y está bajo la licencia GPLv3 y la documentación se encuentra protegido bajo la licencia de Creative Commons by-SA.

Durante el desarrollo de este TFG, componentes como uav_viewer, uav_viewer_py, slam_markers y ardrone_server han servido de referencia y han tenido una gran relevancia para el aprendizaje de la plataforma. La versión utilizada en este proyecto es la 5.6.4⁸

⁸<https://github.com/RoboticsURJC/JdeRobot>

3.5.1. Ardrone_Server

Este componente fue desarrollado en el TFG de Alberto Martín⁹ y permite a partir de un protocolo basado en interfaces ICE el envío y lectura de comandos específicos del SDK del Ar.Drone 2. Como resultado, podemos modificar la velocidad de los motores para cambiar la posición del drone, recibir las imágenes de las cámaras, envío de órdenes predeterminadas como el aterrizaje o despegue, recibir la información de sensores, etcétera.

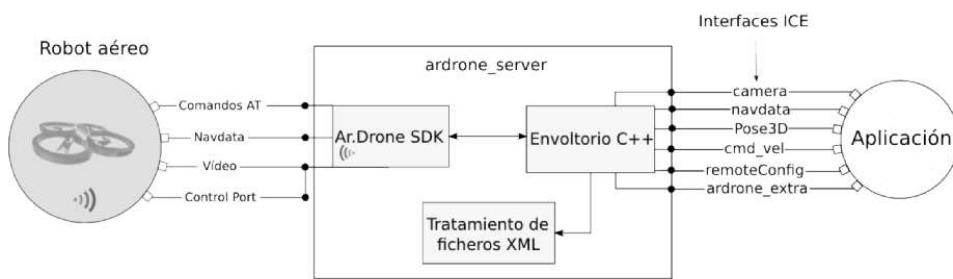


Figura 3.4: Estructura de ardrone_server

Está programado en C++ y es absolutamente necesario para cualquier comunicación con el drone real.

3.5.2. Teleoperadores uav_viewer y uav_viewer_py

Ambos son componentes de JdeRobot y su función es la de ofrecer una GUI para enviar comandos tanto al cuadricóptero real, como al Ardrone virtual creado por Daniel Yagüe o mostrar la información de los sensores y cámaras. Los comandos se envían a través de interfaces ICE al componente ardrone_server, que los transforma a su vez en comandos para el SDK del Ar.Drone 2. Esto permiten el desarrollo de programas independientemente del tipo de cuadricóptero (real o simulado). La principal diferencia entre ambos es el lenguaje en el que han sido desarrollados: uav_viewer_py está escrito en Python mientras que uav_viewer está en C++.

⁹<https://jderobot.org/Amartinflorido-tfg>

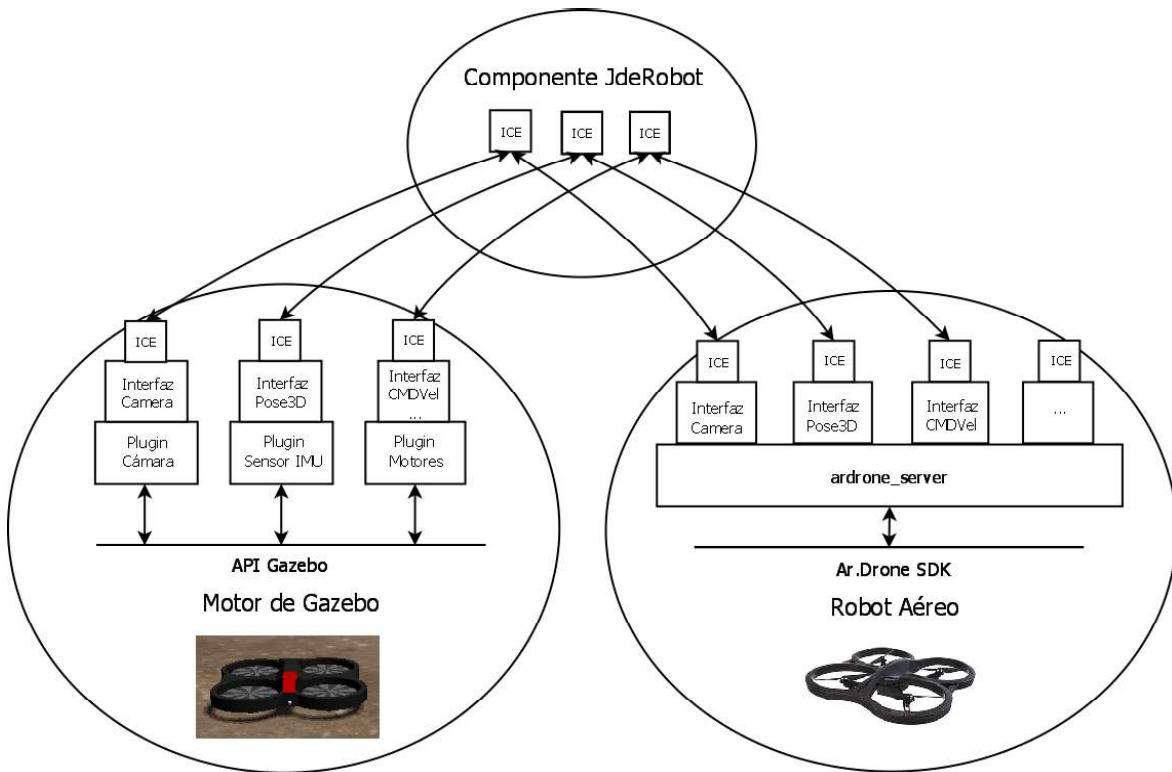


Figura 3.5: Interfaz de JdeRobot para el AR.Drone

3.5.3. Color Tuner

Este componente facilita la configuración de filtros de color utilizando OpenCV. Una vez lanzamos la aplicación especificando la configuración de la interfaz de cámara ICE a la que queremos conectarnos, seleccionaremos en una interfaz gráfica la base de color que queremos utilizar, RGB, YUV y HSV, siendo esta última la utilizada por nuestras aplicaciones. Dentro de la aplicación, podemos encontrar las ventanas *Source image* y *Filtered image* que mostrarán la imagen recibida por las interfaces y su versión filtrada respectivamente. Para especificar los valores que se aplicarán para filtrar, se modifica la posición deslizadores o *sliders* que representan los valores máximos y mínimos de H (*hue* o tinte), S (saturación) y V (value o luminosidad).

3.5.4. Slam_Markers

Esta herramienta permite mediante la aplicación de una serie de algoritmos de autolocalización, la estimación de una cámara tanto relativa como global. Este algoritmo analiza las imágenes en 2D recibidas por la cámara del drone y aplicando tanto OpenCV como AprilTags. Primero identifica si existen balizas. Una vez localizada, aplica funciones para calcular la posición y orientación en tres dimensiones de la cámara con respecto a la baliza. En el siguiente paso se ejecuta un proceso de fusión temporal y fusión espacial de la estimación obtenida. Por último, devuelve a través de una interfaz ICE las coordenadas obtenidas a lo largo de todo el proceso. Fue una aplicación desarrollada por Felipe Pérez en su TFM¹⁰. La versión actual ha sido programada en C++ y actualmente se encuentra en desarrollo. Para nuestro TFG se ha reimplementado el algoritmo en Python para facilitar la integración con la aplicación final y mejorar el rendimiento encontrado.

¹⁰<http://jderobot.org/Flperez-tfm>

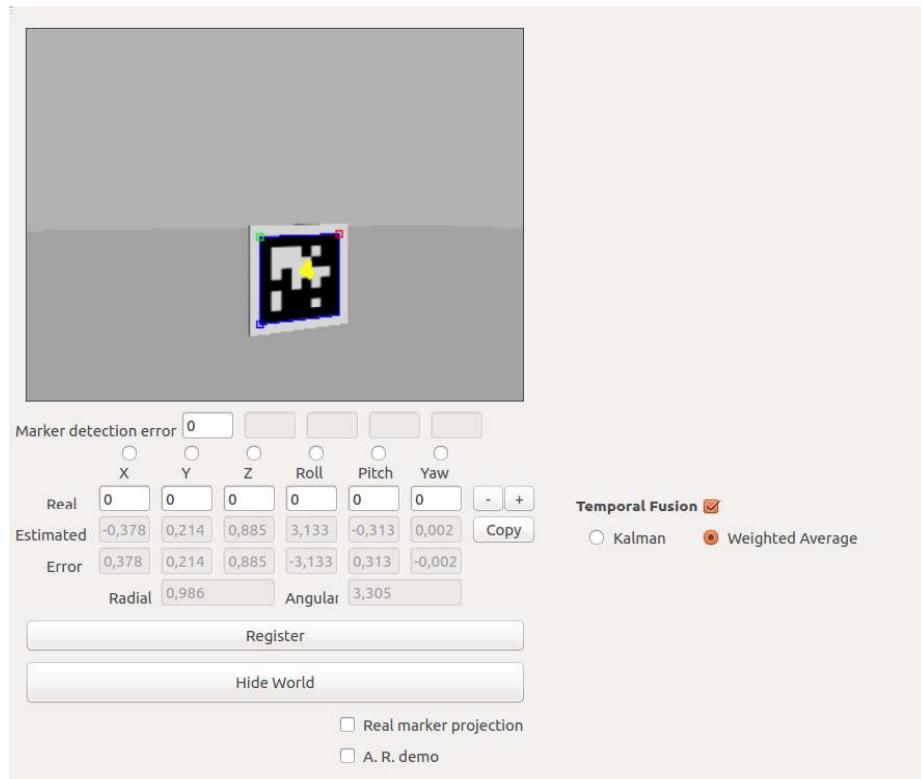


Figura 3.6: Ejemplo de Slam_Markers identificando una baliza

3.5.5. VisualStates

Esta herramienta¹¹ forma parte de la infraestructura de Jderobot y su principal función es la de facilitar la creación de programas basados en máquinas de estados finito para robots soportados.

Se caracteriza por tener una interfaz de usuario en la que podemos generar o modificar estados, teniendo siempre uno como principal y a partir del cual comenzará la ejecución. Cada estado se compone por un código que será ejecutado en bucle hasta que se realice una transición a otro estado diferente. Puede estar escrito tanto en Python como en C++.

Las transiciones se dibujan entre los diferentes estados existentes especificando las

¹¹<http://jderobot.org/VisualStates>

condiciones temporales o basadas en variables que ejecutarán el cambio de estado.

Adicionalmente proporciona un menú de configuración de interfaces ICE compatibles con JdeRobot, una sección de variables y funciones para que se compartan entre los diferentes estados y la modificación del ciclo marcará la duración del estado a ejecutar.

Por último, tiene la capacidad de generar ejecutables y sus respectivos ficheros de configuración ICE. Esto facilita el empaquetado y el despliegue de los programas en un único fichero ejecutable.

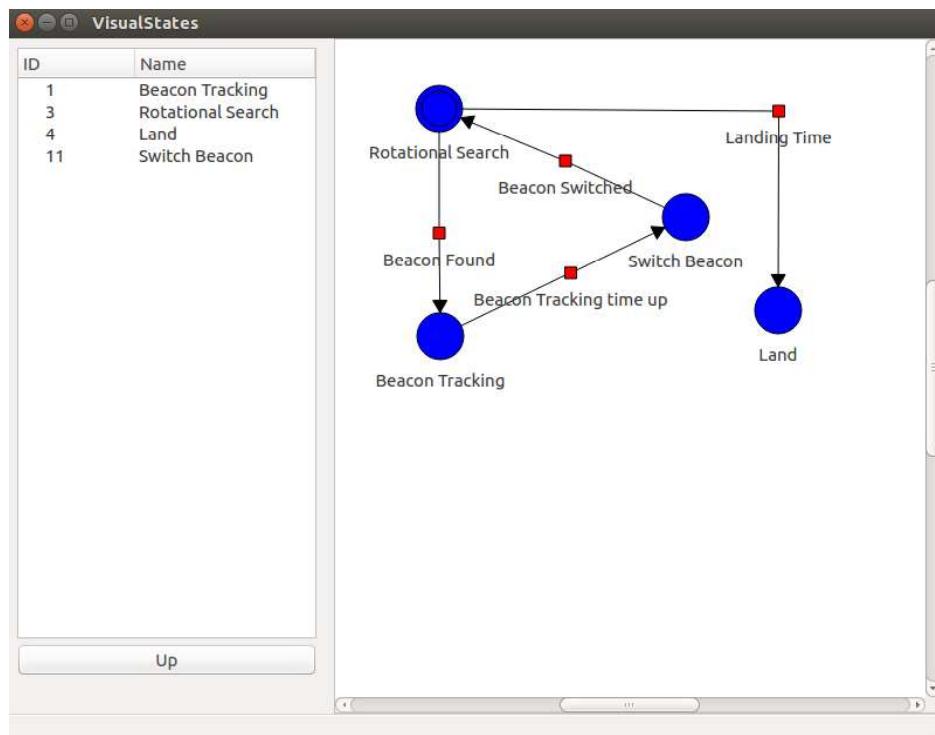


Figura 3.7: Ejemplo de VisualStates

3.6. Gazebo

Este simulador de Código Abierto es la herramienta en la que se realizarán todas las pruebas. En este TFG se ha utilizado la versión Gazebo 7.12 para simular al drone en diferentes escenarios. De este modo, podremos evaluar previamente el código antes

de ejecutarlo en el drone real. Los escenarios simulados o mundos se crean con la propia aplicación y se definen con la extensión “.world“. Están escritos mediante SDF (Simulation Description Format) que a su vez, está basado en el lenguaje XML y es muy popular en entornos de simuladores para robots. Estos mundos contienen modelos virtuales que pueden tener un papel activo como un drone o pasivo como las balizas que no necesitan cambiar de posición. El comportamiento activo se materializa mediante plugins, que permiten la ejecución de código, interacciones con el motor de físicas del simulador, la obtención de imágenes desde cámaras virtuales, etcétera.

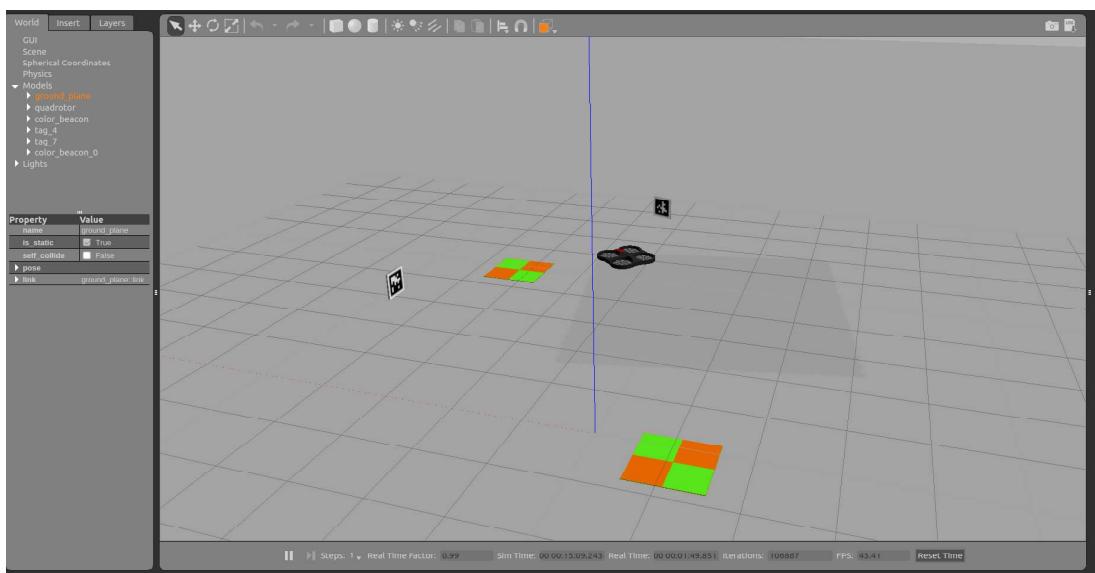


Figura 3.8: Ejemplo de simulador Gazebo

3.7. Intel Compute Stick

Para dotar de autonomía y potencia de procesado al Ar.Drone 2, se ha decidido utilizar un co-procesador a bordo se ha utilizado este dispositivo que entra dentro de la categoría de *Mini PC* u ordenadores de tamaño reducido. La principal ventaja es su relación peso y rendimiento, ya que está equipado con un procesador de dos núcleos, capaz de ejecutar 4 hilos simultáneamente. Cuenta con Wi-Fi integrado, además de un puerto USB, lector de tarjetas SD y HDMI como salida de vídeo.



Figura 3.9: Imágen de Intel compute Stick

Se ha instalado la versión de Ubuntu 16.04 para ser compatible con los requisitos anteriormente citados. Es necesario añadir que se ha instalado JdeRobot en su versión más reciente y que se ha configurado un servidor SSH para realizar las comunicaciones con el dispositivo cuando esté operando y no esté conectado el HDMI a un monitor externo.



Figura 3.10: Intel Compute Stick acoplado en Ar.Drone 2

3.8. OpenSSH

Es una herramienta de código abierto para el acceso remoto a través de una autenticación utilizando el protocolo SSH¹². El tráfico se envía de forma cifrada para evitar que terceros puedan intervenir o escuchar el intercambio de información. Dispone de una variedad de opciones, métodos de autenticación y la capacidad de abrir túneles punto a punto de forma segura. En este TFG se ha utilizado su versión 7.7 y se ha empleado para intercambiar información entre el co-procesador y el ordenador desde el que queramos iniciar la aplicación final.

¹²<https://www.openssh.com/>

Capítulo 4

Navegación autónoma para seguimiento de rutas 3D

En este capítulo se describen los pasos seguidos para lograr una solución a los objetivos planteados, utilizando la infraestructura mencionada anteriormente y cómo se ha implementado.

Ha sido necesaria la combinación de una solución al problema a través de un algoritmo de navegación sobre el cual se dará una visión global y la puesta a punto de la infraestructura. A continuación se explicará en detalle el diseño y el funcionamiento de cada uno de los componentes utilizados. Por último, se detallará cómo ha sido el proceso de integración y cual es la estructura del producto final.

4.1. Diseño

El objetivo de este proyecto es diseñar un algoritmo para dotar a un drone de un comportamiento completamente autónomo desde el despegue, hasta el aterrizaje, ambos controlados, pasando por la localización y aproximación a diferentes posiciones desconocidas. Todo esto basándose únicamente en balizas de apoyo visual. El vuelo no sería completamente autónomo sin añadir que la ejecución del algoritmo se ha de realizar en la unidad de procesamiento externa o co-procesador, que llevará a cabo el

control de posición mediante visión artificial.

En la solución final se diferencian dos partes principales: por un lado tenemos la aplicación encargada de generar el comportamiento a partir de la información recibida por las cámaras y por otro lado se encuentra la infraestructura que se compone del drone real junto con el co-procesador a bordo.

Adicionalmente y con el motivo de facilitar la configuración de las balizas basadas en filtros de color, en este TFG se ha desarrollado una aplicación llamada *Calibration Tool* que genera un fichero xml llamado *calibration.xml*. Este fichero almacena los parámetros necesarios para la detección robusta de balizas arlequinadas y facilita tanto el despliegue en el co-procesador como la modificación de estos parámetros.

En la figura 4.1 se puede ver una explicación de las entradas y salidas de flujos de información. Adicionalmente, se han sido incluido los ficheros imprescindibles en cada modulo para su correcto funcionamiento. Esto nos dará una imagen de alto nivel de la solución. Las comunicaciones entre procesos se llevan a cabo mediante interfaces de la biblioteca ICE.

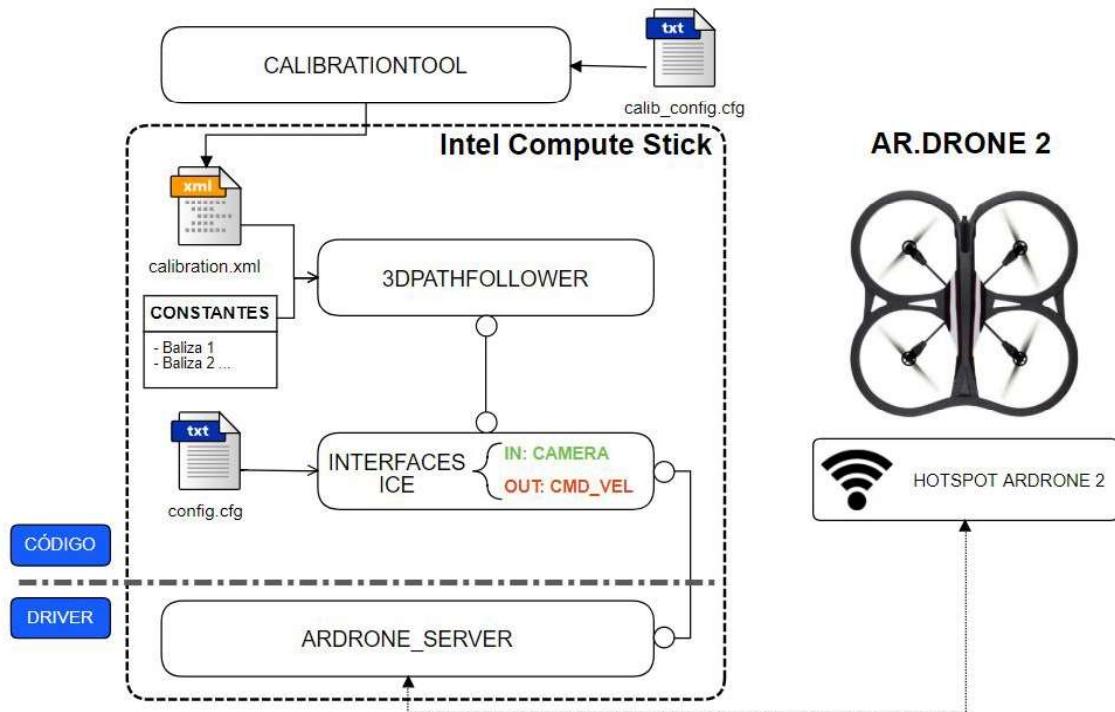


Figura 4.1: Diseño de la solución final.

El componente 3DPahtFollower es la aplicación mencionada anteriormente. Está compuesta por los diferentes estados del autómata, tal y como se puede apreciar en la figura 4.2. Se han agrupado los diferentes estados para una mejor comprensión del tipo de balizas empleadas por cada uno. Adicionalmente, podemos clasificar estos estados en función de los siguientes algoritmos: despegue controlado, navegación y búsqueda rotacional y por último, búsqueda en espiral y aterrizaje controlado. Cada uno de los estados se componen de una capa de percepción, que llevará a cabo la tarea de identificar las balizas y otra capa de control, que calculará y generará el comportamiento que se enviará al dron a través de las interfaces ICE.

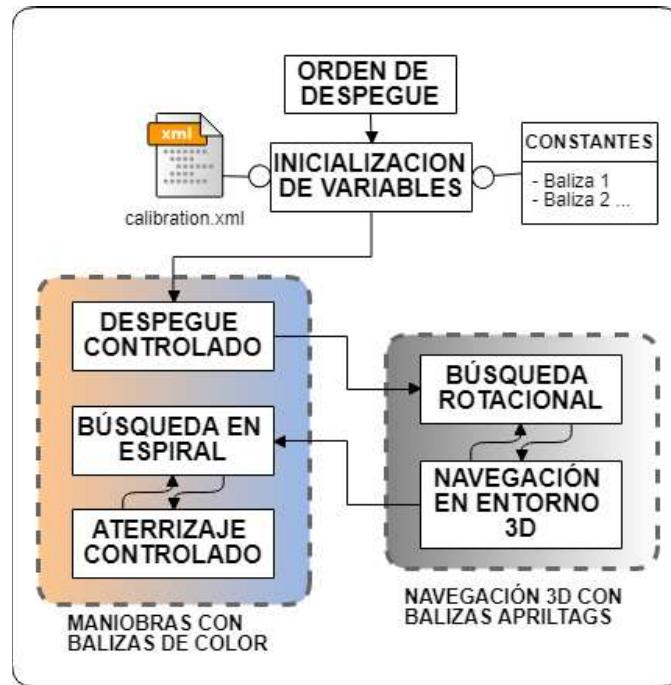


Figura 4.2: Diseño del componente 3DPathFollower.

A continuación vamos a explicar cada estado y sus respectivas transiciones de las que se compone *3DPathFollower* con mayor profundidad, siendo la creación de un algoritmo de navegación, el diseño de la infraestructura y la aplicación *CalibrationTool* las mayores aportación de este TFG, por lo que serán los apartados en los que haremos mas hincapié. Sin embargo, al tratarse de un TFG de integración también explicaremos los módulos en los que nos hemos basado y los cambios que hemos aplicado para su correcto funcionamiento en el la aplicación final.

4.2. Componente CalibrationTool

Durante la realización de este TFG ha sido necesaria la configuración de los parámetros de las balizas en los que se basa principalmente el despegue y aterrizaje controlado de la aplicación principal, *3DPathFollower*. Esta aplicación está escrita en

Python y utiliza la biblioteca de OpenCV tanto para realizar las operaciones sobre imágenes como para la generación de la interfaz gráfica.

Se ha escogido utilizar una baliza de color arlequinada 4.3 compuesta por cuatro cuadrantes y 2 colores lo más distantes posibles en el espacio de color HSV (como por ejemplo naranja y verde), colocados de forma no contigua. Esto permitirá aumentar la robustez y reducir los posibles errores que se produzcan debido al ruido de otros colores en el ambiente.

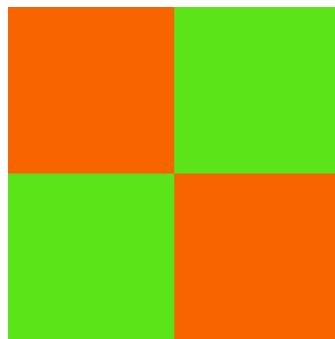


Figura 4.3: Ejemplo de baliza de color arlequinada.

Para facilitar esta tarea de calibración, nos hemos basado en la aplicación *Color Tuner* 3.5.3 de JdeRobot para aplicar los filtros a la imagen y la hemos enriquecido con un par de funcionalidades. Dado que *3DPATHFOLLOWER* utiliza la suma de dos filtros de color, llamados *Primary* y *Secondary*, la principal funcionalidad añadida de este componente es la de permitir la modificación simultánea de ambos filtros de color de manera que podremos visualizar al mismo tiempo la suma de las dos imágenes filtradas en la ventana *filtered_image*. La modificación de estos filtros se realizará a través de deslizadores o *sliders* tal y como se puede apreciar en la figura 4.4.

La segunda funcionalidad añadida es la capacidad de generar o leer de un fichero de configuración en formato xml, que contendrá los diferentes valores máximos y mínimos de los componentes HSV y de las transformaciones morfológicas sobre las imágenes filtradas que explicaremos a continuación. Estas transformaciones son la erosión y dilatación. La combinación de estas técnicas permite la eliminación de impurezas y

el suavizado de la imagen, dotando de mayor robustez al filtro de color.

4.2.1. Algoritmo de calibración

El algoritmo se basa en *adquisición-procesado-resultado* para poder revisar en tiempo real las modificaciones deseadas. La adquisición se realiza a través de la interfaz de cámara ICE que contiene el fichero de configuración *calib_config.cfg* 4.1. Para poder procesar la imagen, primero es necesario verificar si ya existe un archivo de calibración (*calibration.xml*) o crearlo con valores por defecto en caso negativo. Se leerán los datos del fichero de calibración y se aplicará el procesado para cada uno de los dos colores, llamando a la función *hsvFilter* (importada de Color Tuner) y acto seguido se realizarán las transformaciones morfológicas a la imagen filtrada en HSV:

```
Pmask , PmaskHSV = hsvFilter (PH_max , PS_max , PV_max ,
                                PH_min , PS_min , PV_min , image , hsv )
PmaskHSV = cv2 . erode (PmaskHSV , kernel , iterations = PErode )
PmaskHSV = cv2 . dilate (PmaskHSV , kernel , iterations = PDilate )
```

Donde *kernel* es el tamaño de píxeles al que se aplicará y *iterations* se corresponde con la intensidad. El resultado consistirá en la suma de ambas imágenes filtradas:

```
filterImage = PmaskHSV+SmaskHSV
```

Una vez finalizados los cambios que queramos efectuar, pulsando la tecla *Escape* del teclado cerrará la aplicación y generará o modificará el fichero de configuración.

En cuanto a la interfaz de usuario, para la creación de los *sliders* se ha utilizado la función *createTrackbar* de OpenCV:

```
cv2 . createTrackbar ( 'PH_max' , ' filtered_image ' , 0 , 180 , nothing )
cv2 . createTrackbar ( 'PS_max' , ' filtered_image ' , 0 , 255 , nothing )
cv2 . createTrackbar ( 'PV_max' , ' filtered_image ' , 0 , 255 , nothing )
cv2 . createTrackbar ( 'PH_min' , ' filtered_image ' , 0 , 255 , nothing )
cv2 . createTrackbar ( 'PS_min' , ' filtered_image ' , 0 , 255 , nothing )
cv2 . createTrackbar ( 'PV_min' , ' filtered_image ' , 0 , 255 , nothing )
```

```
cv2.createTrackbar( 'PErode' , ' filtered_image ' ,0 ,100 ,nothing )
cv2.createTrackbar( ' PDilate ' , ' filtered_image ' ,0 ,100 ,nothing )
```

Para mostrar las imágenes en pantalla se ha utilizado la función *imshow* que mostrará la imagen deseada como muestra el siguiente ejemplo:

```
cv2.imshow(" filtered_image " , filterImage )
```

CAPÍTULO 4. NAVEGACIÓN AUTÓNOMA PARA SEGUIMIENTO DE RUTAS
3D

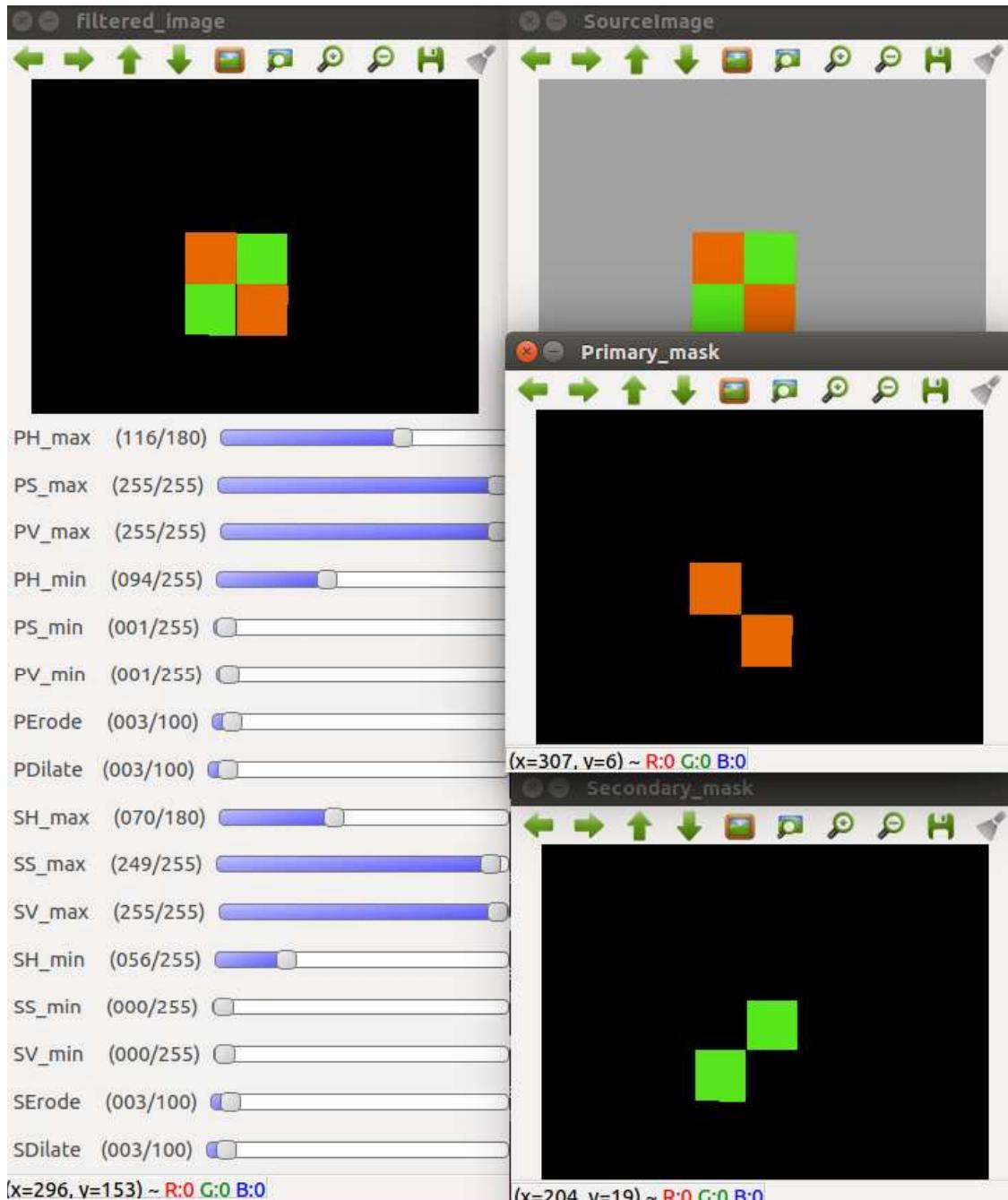


Figura 4.4: Ejemplo del componente CalibrationTool.

4.3. Componente 3DPathFollower basado en estados

Este componente está formado por un algoritmo de navegación autónoma basado en un control representado por un autómata de estados finito. Ha sido realizado con la herramienta VISUAL STATES, la cual nos ha permitido tanto desarrollar el código, como la integración con las diferentes bibliotecas y partes del sistema en un solo programa.

Tal y como hemos explicado en la sección de Infraestructura 3.5.5, VISUAL STATES facilita la creación de estados, que serán ejecutados en bucle mientras permanezcan activos. El cambio de estado se realizará a través de transiciones, que podrán ser tanto condiciones temporales como basadas sentencias condicionales lógicas de *verdadero* o *falso*. Esto permite añadir, modificar o quitar estados, sin afectar al resto y centrarse en el código a ejecutar. Cuenta con otras dos secciones en las que se especifican las constantes globales y otra para las funciones, ambas compartidas por todos los estados y transiciones para permitir su reutilización. Por último, VISUAL STATES cuenta con dos secciones relacionadas con las bibliotecas, una dedicada para facilitar las conexiones con interfaces ICE de JdeRobot y otra sección, dedicada para importar las bibliotecas utilizadas por los estados y transiciones.

CAPÍTULO 4. NAVEGACIÓN AUTÓNOMA PARA SEGUIMIENTO DE RUTAS
3D

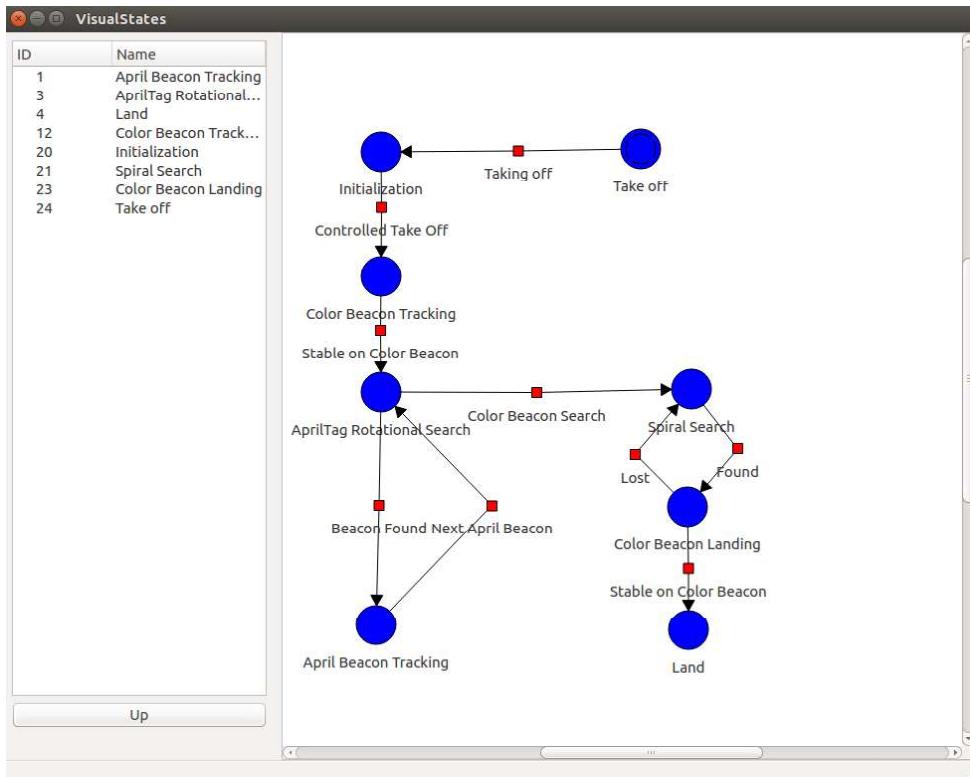


Figura 4.5: Estados que forman de la aplicación 3DPathFollower en Visual States

En la figura 4.5 se observan los diferentes estados y transiciones que forman la aplicación. El primer estado es el de *Take-off*, en el que se envía un comando al drone para iniciar los motores en modo despegue para ganar altura y despegarse del suelo. Dado que esta fase tiene una duración de unos 2 segundos, el siguiente estado es el de *Initialization* en el que, junto a otras tareas de inicialización, se realiza la lectura del archivo de configuración *calibration.xml* mostrado en la Figura 4.2, del que obtendremos los parámetros para el filtro de color. *Color Beacon Tracking* se encargará de mantener estable y de forma contralada al drone encima de la baliza de color. Transcurridos 4 segundos en el objetivo, damos por estable el despegue y procedemos al estado *AprilTag Rotational Search*, en el que el drone buscará mientras rota sobre sí mismo la baliza que actualmente se considera el objetivo. Tras encontrarla pasamos a *April Beacon Tracking*, el cual navegará y se situará a una distancia predeterminada durante

8 segundos, dando por satisfactoria la navegación y marcando como activa la siguiente baliza almacenada en memoria. Una vez finalizada la lista de balizas AprilTags, se activa el estado *Spiral Search*, que realizará un movimiento en espiral con el objetivo de buscar nuestra baliza de aterrizaje. Si ha sido encontrada, entra en acción el estado *Color Beacon Landing*, que se encargará de aterrizar de forma controlada, es decir, alineado encima de la baliza durante segundos. Tanto en *April Beacon Tracking* como en *Color Beacon Landing*, en el momento en el que se pierda el campo de visión con el objetivo, se volverá al estado de búsqueda respectivo. Por último, *Land* envía el comando de aterrizaje al drone y así dar por finalizado el ejercicio.

La Figura 4.6 muestra el fichero de configuración (*config.cfg*) de las interfaces ICE que aparece en la Figura 4.1, que la herramienta genera para realizar las comunicaciones necesarias con el drone.

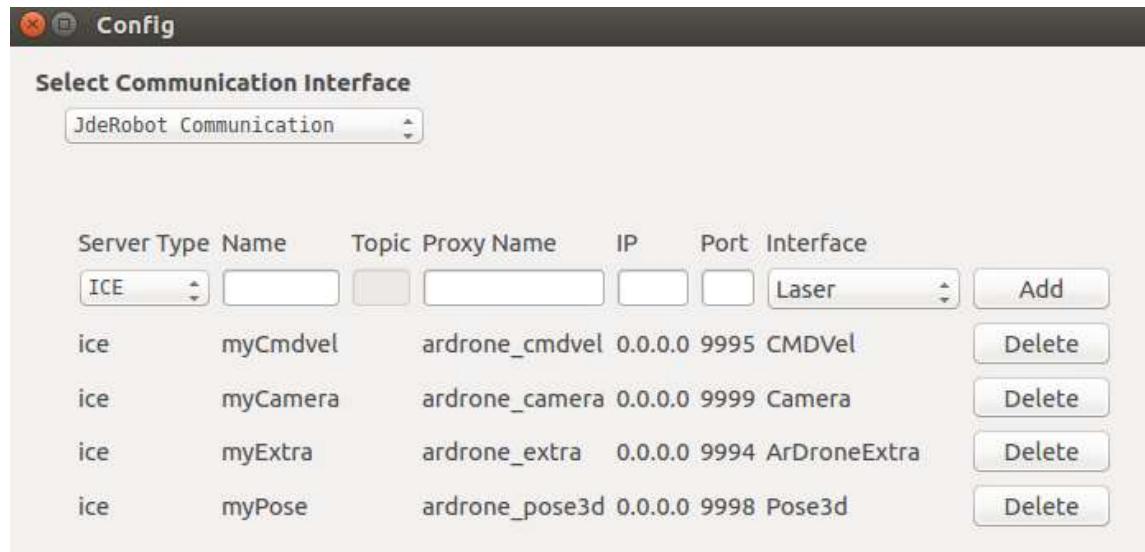


Figura 4.6: Fichero de configuración de interfaces ICE.

4.3.1. Algoritmo de Despegue

Este componente se basa en el TFG de Jorge Vela, el cual se ha refactorizado y acoplado dentro del estado *Color Beacon Tracking* en VISUAL STATES. Este estado se

inicia una vez hemos enviado al motor la orden de iniciar el despegue e inicializado los parámetros de configuración para las balizas de color. El algoritmo se emplea una fase de percepción que contiene el procesado de la imagen y otra de comportamiento en la que se aplica un PID (Proporcional, Integral y Derivativo) (a diferencia del PD empleado originalmente por Jorge Vela), una detección de bandas muertas y un limitador de velocidad como medidas de control.

Estableceremos como necesaria la condición de que el drone debe despegar encima de una baliza arlequinada 4.3 para comenzar el ejercicio satisfactoriamente. Por lo tanto, debemos asegurarnos de que la cámara ventral del drone esté activa y no la frontal para evitar comportamientos no deseados.

El procesado de la imagen se basa en el mismo que realiza la aplicación *Calibration-Tool* 4.2.1. Una vez obtenemos la imagen resultante filtrada, se aplica un procesado para encontrar la cruceta que forman los cuadrantes de la baliza y encontrar así el punto central que será nuestro objetivo.

La adición de un PID se debe a que el comportamiento no era lo suficientemente ágil con un PD y se ha refactorizado y reimplementado esta parte. Ésta función de PID se aplicará en todos los algoritmos en los que este tipo de control sea necesario:

```
#Proporcional
vp = kp * error
#Derivada
vd = kd * ((error-pError)/cycle)
#Integral
viModified = ki * (vi+(error*cycle))
#Total
result = vp + vd + viModified
return result , viModified
```

El desarrollo de este PID se ha basado en la siguiente fórmula matemática que lo describe:

$$PID(t) = (P(t) + I(t) + D(t))$$

$$P(t) = K_p e(t); \quad I(t) = K_i \int e(t) dt; \quad D(t) = K_d \frac{de(t)}{dt}$$

4.3.2. Algoritmo de navegación

Con el drone estable y ya en el aire, el siguiente paso es cambiar a la cámara delantera y ejecutar una búsqueda rotacional y aproximación a las diferentes balizas de tipo AprilTags 3.3. La posición de las balizas es desconocida y el orden viene dado por una lista con los identificadores de las balizas predefinida en la sección de constantes globales de VISUAL STATES 4.2.

Para la identificación de las balizas, tanto durante la búsqueda como la aproximación, se utilizarán las funciones nativas de AprilTags. Necesitaremos crear un detector para nuestra familia (36H11 3.2), para más adelante aplicarlo sobre una imagen convertida a escala de grises:

```
self.options = apriltag.DetectorOptions()
self.detector = apriltag.Detector(self.options)
detections = self.interfaces.detector.detect(gray)
```

El estado de búsqueda rotacional iniciará un movimiento de giro en el sentido a las agujas del reloj y continuará girando hasta que encuentre la baliza que tiene como objetivo. Una vez encontrado y mientras que el objetivo no se escape del campo de visión de la cámara, se ejecutará el estado de aproximación. Éste mantendrá la baliza objetivo a una altura y posición relativa centradas y una distancia preconfigurada. Para ello, necesitaremos estimar la posición relativa de la cámara del drone con respecto a la baliza en tres dimensiones. Para obtener esta estimación hemos tomado como referencia el algoritmo utilizado por la aplicación Slam_Markers 3.5.4 y lo hemos implementado en el lenguaje Python.

El algoritmo para estimar la posición relativa en 3D a partir de una imagen en 2D, serie de transformaciones y cálculo de matrices que a partir de las cuatro esquinas

CAPÍTULO 4. NAVEGACIÓN AUTÓNOMA PARA SEGUIMIENTO DE RUTAS 3D

detectadas por AprilTags obtiene el vector basado en las coordenadas X,Y,Z:

```
retVal, rvec, tvec = cv2.solvePnP(self.interfaces.m_MarkerPoints,  
        detection.corners  
        , self.interfaces.cameraMatrix  
        , self.interfaces.distCoeffs)  
rodri = cv2.Rodrigues(rvec)  
#We get X,Y and Z  
cameraPosition = -np.matrix(rodri[0]).T * np.matrix(tvec)  
self.interfaces.x = cameraPosition.item(0)  
self.interfaces.y = cameraPosition.item(1)  
self.interfaces.z = cameraPosition.item(2)
```

Para calcular conocer la rotación relativa de nuestro drone con respecto a la posición baliza, se realiza una serie de transformaciones que se basan en los ángulos de euler:

```
#We get roll, pitch and yaw from Euler Angles  
eulerAngles =  
    self.interfaces.rotationMatrixToEulerAngles(rodri[0])
```

Una vez tenemos las estimaciones de las coordenadas y nuestra rotación con respecto a la baliza, aplicaremos un control PID, banda muerta y límites de velocidad para corregir la altura, distancia y rotación con respecto a la baliza. Este sería el código para cada una de estas componentes:

```
error_xy = [self.interfaces.center[0] - self.interfaces.x,  
            self.interfaces.center[1] - self.interfaces.y]  
#VX  
if (abs(error_xy[0]) < self.interfaces.dead_band_x):  
    vx=0  
else:  
    vx, vxiMod = self.interfaces.getPIDSpeed(error_xy[0],  
                                              self.interfaces.error_xy_anterior[0])
```

```

        , self.interfaces.vxi
        , self.interfaces.cycle
        , self.interfaces.kp
        , self.interfaces.kd
        , self.interfaces.ki)
    self.interfaces.vxi=vxiMod
vx=self.interfaces.limitSpeed(vx)

```

Para finalizar, enviaremos las velocidades combinadas a los motores para corregir al mismo tiempo las tres componentes y conseguir un comportamiento ágil y fluido. Una vez nos encontramos delante del objetivo durante más de ocho segundos, pasaremos a buscar al siguiente identificador que haya en la lista, hasta que lleguemos al final y pasemos al siguiente algoritmo.

4.3.3. Algoritmo de aterrizaje

Para finalizar, se cambia de nuevo a la cámara ventral para dar paso a los tres últimos estados que componen el aterrizaje: *Spiral Search*, *Color Beacon Landing* y *Land*. El estado *Spiral Search* se corresponde con la búsqueda previa al aterrizaje controlado, para así asegurar que se encontrará de forma autónoma la baliza arlequinada. El drone describirá un movimiento en espiral, ampliando el radio de giro en función del periodo que establezcamos, hasta que encuentre la baliza:

```

if (self.interfaces.cycleCounter>self.interfaces.cyclePeriod):
    self.interfaces.cycleCounter=0
    self.interfaces.xSearchSpeed+=self.interfaces.searchIncrement
xSpeed=-self.interfaces.xSearchSpeed
wSpeed=self.interfaces.wSearchSpeed
self.interfaces.cycleCounter+=1

```

En cuanto la baliza sea detectada y mientras no se pierda el contacto visual con la baliza, se cambiará de estado para fijar la baliza en el centro del drone, aplicando

las mismas técnicas que en el *Algoritmo de Despegue* 4.3.1. Una vez encontramos la cruceta y permanezcamos durante más de cuatro segundos en el objetivo, se activará el siguiente estado. En último lugar, procederemos a ejecutar el estado de *Land* que enviará la señal al drone de que se debe realizar un aterrizaje. El drone aterrizará y detendrá los motores al llegar al suelo.

4.4. Configuración del Co-procesador

Una parte fundamental de este proyecto ha sido la preparación del Intel Compute Stick 3.7 para encargarse de todo el procesado y algoritmos de la aplicación 3DPATHFollower 4.3. Para ello necesitaremos cumplir con los requisitos mencionados en el capítulo de Objetivos 2.2 y al mismo tiempo facilitar la comunicación de manera que no afecte al rendimiento o el comportamiento autónomo del drone. Se ha instalado Ubuntu en la versión 16.04, junto a todas las dependencias y bibliotecas necesarias para correr la aplicación como por ejemplo, JdeRobot 3.5 y AprilTags 3.3. Se ha configurado el asistente de la red Wi-Fi para que se conecte de manera automática cuando detecte que la red que genera el drone. Configuraremos la IP como estática para poder acceder de forma remota y conocer la dirección exacta de nuestra unidad de computación externa. Por último, se ha configurado un servidor utilizando la tecnología OpenSSH 3.8 de manera que se inicie durante el lanzamientos del Sistema Operativo y para montar en el puerto 22998 y la IP estática que hemos definido anteriormente nuestro servidor SSH. Esto aportará una capa de seguridad, actualmente no existente además de habilitar el acceso remoto.

Para iniciar la aplicación, necesitaremos acceder remotamente mediante el siguiente comando:

```
ssh 192.168.1.3 -p 22988
```

Una vez dentro, lanzaremos la aplicación de manera que la ejecución se realice en el *Intel Compute Stick*.

Para prevenir cualquier accidente, se ha desarrollado un programa muy sencillo,

CAPÍTULO 4. NAVEGACIÓN AUTÓNOMA PARA SEGUIMIENTO DE RUTAS
3D

cuya única misión es la de enviar la señal de aterrizaje al drone. Este comando evita la ejecución de futuras órdenes y asegura que el aterrizaje se realizará en el menor tiempo posible.