

**CONVOCATORIA INTERNA PARA PROYECTOS DE INVESTIGACIÓN - 2025**  
Facultad de Ingeniería  
**FORMULARIO PARA LA PRESENTACIÓN DE PROYECTOS**

**Nombre del Proyecto:** Detección de centros ópticos en patrones de referencia móviles aplicados a escenarios reales

**Resumen**

En el presente proyecto se propone el desarrollo y ensayo de un software de procesamiento de imágenes que permita la detección robusta de marcadores ópticos y el cálculo preciso de sus centros ópticos. Dichos marcadores son tipo LEDs infrarrojos y desempeñan el papel de patrones ópticos de referencia. El software debe ser capaz de funcionar en escenarios más próximos a los que experimenta la cabina de una aeronave, cubriendo el mayor rango posible dentro del espectro de condiciones de iluminación, el cual abarca desde luz diurna con exposición solar directa, hasta la nocturna. El software debería ser capaz de operar en tiempos compatibles con la dinámica de operación del trackeo de un HMD (Helmet Mounted Display) típico.

**Carreras involucradas: Ingeniería Informática**

**Tipo de Investigación:**

Informática Aplicada. Procesamiento de imágenes

**Duración:** 12 (DOCE) meses

INTEGRANTES		Dedicación semanal Hs	
		Existentes	Requieren nombramiento
<b>Director/a</b>	<p>Apellido y Nombre: Dominguez, Alfredo Eduardo</p> <p>Regímenes de investigación y categorización:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>UNDEF: Categoría A. (2018)</li> <li>Régimen del Personal de Investigación y Desarrollo de las Fuerzas Armadas: I i – Grupo C - Categoría 1 ( año 2011).</li> <li>Programa Nacional de Incentivos correspondiente convocatoria 2009: Categoría III.</li> </ul> <p>DNI: 17.845.279 Mail: <a href="mailto:adominguez@iua.edu.ar">adominguez@iua.edu.ar</a> Celular: +543515 283028</p>	10	0
<b>Codirector/a</b> (opcional)	<p>Apellido y Nombre: Mazzini, Lucas Horacio</p> <p>Régimen de investigación y categorización: RPIDFA Clasificado en Clase Id, Grupo F, Categoría 2 DNI: 29714129 Mail: <a href="mailto:lmazzini@iua.edu.ar">lmazzini@iua.edu.ar</a> Celular: +543514435048</p>	10	0
<b>Docentes Investigadores</b> (mínimo 2 )	<p>Apellido y Nombre: Porchietto, Claudio Anibal</p> <p>Régimen de investigación y categorización: RPIDFA Clase Id Grupo E categoría 3. IUA/FAA DNI: 30.470.134. Mail: <a href="mailto:cporchietto@iua.edu.ar">cporchietto@iua.edu.ar</a> Celular:3516769632</p>	10	0
	<p>Apellido y Nombre: Palacios, Diego</p> <p>Régimen de investigación y categorización: NC DNI: 27.121.009 Mail: <a href="mailto:dpalacios@iua.edu.ar">dpalacios@iua.edu.ar</a> Celular:3514684022</p>	0	5
<b>Estudiantes</b> (mínimo 2 )	<p>Apellido y Nombre: A designar</p> <p>Carrera: Ingeniería Informática</p>	5	
	<p>Apellido y Nombre: A designar</p> <p>Carrera: Ingeniería Informática</p>	5	

**La dedicación horaria de los estudiantes no puede superar la prevista para las ayudantías de investigación.**

**Se debe adjuntar el Currículum actualizado de todos los integrantes del proyecto. Los docentes deben presentar su CVar.**

## DESARROLLO DEL PROYECTO

### 1. Fundamentación

La determinación precisa y robusta de la pose (posición y orientación) de un objeto en movimiento respecto de un sistema de referencia global, externo al objeto, es un problema crucial en el contexto de la Realidad Aumentada (RA). Numerosas soluciones basadas en técnicas ópticas han sido propuestas a lo largo de los años para resolver este problema, siendo las más conocidas las siguientes:

*Trackeo óptico monocular:* Utiliza la imagen capturada por una sola cámara, obtenida por la proyección 3D a 2D de marcadores ópticos, cuyas posiciones son conocidas respecto de un dado entorno o respecto de un sistema de referencia móvil, solidario al objeto en movimiento (SRO). A partir de las posiciones puntuales de los centros ópticos de los marcadores en el plano de la cámara, los distintos algoritmos Solve PnP permiten calcular la pose del objeto en movimiento respecto del entorno. Dependiendo de la particular aplicación de Realidad Aumentada (RA) de que se trate, dicho entorno puede estar representado por un sistema de referencia fijo a la Tierra (SRT) o un sistema de referencia móvil (SRM), distinto de SRO. En la aplicación HMD (Helmet Mounted Display), por ejemplo, el entorno es un SRM solidario a la cabina de una aeronave. En los casos en que se utilizan SRM, la pose del objeto respecto de SRT se obtiene por la composición de la pose calculada por SolvePnP (respecto de SRM) con la transformación que relaciona SRM y SRT.

*Trackeo Externo Multicámara:* Usa múltiples cámaras calibradas, con poses fijas y conocidas respecto del entorno. Los marcadores están montados en el objeto a trackear. Las cámaras observan los marcadores desde diferentes ángulos y los triangulan para obtener sus coordenadas 3D globales, respecto del entorno. La Triangulación multivista permite entonces reconstruir las posiciones de los centros ópticos de los marcadores respecto del entorno. Posteriormente, se usa un algoritmo como Kabsch (SVD) para calcular la transformación entre SRO y SRT o SRM, dependiendo de la aplicación. Las soluciones comerciales más conocidas en este tipo de trackeo son VICON y OptiTrack.

*Trackeo por SLAM:* SLAM (Simultaneous Localization and Mapping) es una técnica que permite a un sistema estimar su propia pose respecto del entorno que la rodea, mientras construye un mapa del entorno en tiempo real, utilizando datos visuales (de cámaras) y, opcionalmente, sensores inerciales. Existen variantes como SLAM monocular, estéreo o RGB-D, según el tipo de cámara utilizada, y también versiones con fusión inercial (VIO), que mejoran la precisión y la estabilidad. En sistemas SLAM visuales puros, la profundidad debe inferirse por paralaje, lo que puede provocar errores en escala o pérdida de tracking en escenas poco estructuradas. Aunque SLAM es útil en entornos interiores o controlados, su desempeño se degrada en exteriores con mucha luz, superficies brillantes o entornos sin textura. Por eso, en aplicaciones exigentes como HMDs o realidad aumentada al aire libre, SLAM suele combinarse con sensores adicionales o se reemplaza por sistemas híbridos más robustos.

El presente proyecto se enmarca dentro del Programa de desarrollo de un HMD montado sobre el casco del piloto de una aeronave. En el estado actual de avance de este desarrollo, está previsto el uso de trackeo óptico monocular, basado en una sola cámara y varios marcadores o referencias ópticas. La cámara se instala de manera solidaria al casco del piloto y los marcadores fijos a la cabina de la aeronave, o viceversa. El primer paso entonces para esta solución adoptada en la estimación de la pose del casco respecto del entorno (que en este caso es el sistema de referencia móvil, fijo a la cabina de la aeronave -SRC-), consiste en determinar de manera precisa y robusta el centro óptico de la imagen de cada marcador sobre el plano de la cámara. Dado que las imágenes de los marcadores (usualmente LEDs infrarrojos), en general, no poseen la forma de una figura plana regular y, además, la iluminación no es uniforme sobre todo el interior de las mismas, resulta un problema en sí mismo

tanto la detección de los marcadores, como la determinación de los centros ópticos. También debe considerarse el hecho de que los marcadores deben poder ser detectados en escenarios diversos, cubriendo situaciones que van desde cabina de aeronave expuesta a plena luz solar, hasta condición de iluminación nocturna.

Al presente, se ha desarrollado un software de procesamiento de imágenes que es capaz de detectar marcadores ópticos con muy baja tasa de falsos positivos y negativos [1]. Sin embargo, este programa tiene dos limitaciones: a) funciona de manera eficiente bajo condiciones controladas tanto del movimiento de los marcadores ópticos, como de iluminación del entorno en el que se encuentran los mismos; b) si bien identifica los centros ópticos de cada marcador detectado de manera visualmente correcta, no establece una métrica que permita determinar el valor del error en la estimación de la posición de los mismos en el plano de la imagen de la cámara.

Dado que las coordenadas de los centros ópticos en el plano de la cámara alimentan la entrada del algoritmo Solve PnP que calcula la pose del casco [2], resulta muy importante conocer el error asociado a la determinación de las mismas para poder calcular el error final en la estimación de la pose.

#### Referencias:

[1] “Detección de centros ópticos en patrones de referencia en movimiento”, Informe técnico N°2 del Proyecto de la Convocatoria Interna: “Estudio exploratorio de carácter descriptivo e implementación de SolvePnP para la Determinación de la Pose de Cámara aplicado al proyecto HMD”

[2] “Análisis Comparativo de Algoritmos Perspective-n-Point (PnP) para la Estimación de Pose mediante Datos Sintéticos”, Informe técnico N°1 del Proyecto de la Convocatoria Interna: “Estudio exploratorio de carácter descriptivo e implementación de SolvePnP para la Determinación de la Pose de Cámara aplicado al proyecto HMD”

## **2. Objetivos**

### Objetivo General:

Desarrollar y validar un software de detección robusta de imágenes de marcadores ópticos tipo LEDs y cálculo preciso de sus centros ópticos, en condiciones lumínicas variables, simulando escenarios similares a los presentes en la cabina de una aeronave.

### Objetivos Específicos:

- 1) Diseñar un software capaz de detectar de manera robusta la imagen de un LED y calcular su centro óptico de manera precisa, bajo diversas condiciones de iluminación.
- 2) Diseñar un protocolo de ensayos que permita evaluar el error asociado a la determinación del centro óptico del LED, considerando la variabilidad de los posibles escenarios lumínicos.
- 3) Ejecutar los ensayos definidos previamente y elaborar un informe técnico con los resultados obtenidos y el análisis del error de detección.

## **3. Metodología**

La metodología de trabajo en el presente proyecto se dividirá en tres etapas:

- 1) Análisis de las herramientas disponibles de procesamiento de imágenes que puedan ser utilizadas para la detección de marcadores y el cálculo de sus centros ópticos. Este análisis

debe conducir a la confección o acondicionamiento de softwares para tal fin. El resultado de esta etapa de trabajo será uno o más softwares que posean la más baja tasa posible de falsos positivos y negativos en la detección de marcadores y además una determinación visualmente correcta de sus centros ópticos. Los software deberán operar en tiempos compatibles con la dinámica de trackeo de un HMD (video en tiempo real). A continuación, se enumeran métodos y recursos que pueden emplearse, solos o combinados, para mejorar la detección de LEDs y el cálculo de sus centros ópticos:

- a) **Conversión a escala de grises:** Simplifica el análisis y reduce dimensiones cuando se trabaja con cámaras RGB que capturan señal IR.
- b) **Espacio de color HSV:** Permite segmentar regiones con alto brillo y saturación asociadas a LEDs, mejorando el rendimiento bajo condiciones de luz variable.
- c) **Filtrado espacial (Gaussiano, mediana):** Reduce el ruido de la imagen sin perder estructuras relevantes como bordes de LEDs.
- d) **Umbralización adaptativa o segmentación por histograma local:** Aísla regiones intensas incluso en entornos con iluminación no uniforme.
- e) **Detección de blobs brillantes:** Localiza agrupaciones de píxeles con alta intensidad compatibles con la forma y tamaño esperados de los LEDs.
- f) **Detección de bordes (Canny):** Resalta contornos definidos, útil en combinación con transformada de Hough para delimitar la geometría del LED.
- g) **Transformada de Hough (círculos/elipses):** Detecta estructuras circulares o elípticas en los bordes que corresponden al borde físico de la máscara del LED.
- h) **Filtro contextual (validación de vecindad):** Verifica condiciones geométricas e intensidad en torno al LED, como la presencia de un anillo negro o fondo oscuro.
- i) **Cálculo del centro geométrico:** Precisión subpixel mediante ajuste de círculo/elipse o cálculo de centroide ponderado por intensidad dentro del contorno del LED.
- j) **Corrección de perspectiva:** Ajuste geométrico en caso de deformaciones por ángulo de cámara, especialmente si se espera obtener posiciones en un sistema de referencia 3D.
- k) **Detección de parpadeo sincronizado:** Permite aumentar el contraste frente al fondo restando frames "LED apagado" y "LED encendido", útil en entornos con ruido IR.
- l) **Tracking predictivo (filtro de Kalman u otros):** Mejora la robustez temporal ante oclusiones o detección intermitente, y permite operar a menor FPS sin perder continuidad espacial.

- 2) Definir el conjunto de ensayos que permitirán estimar el error en la determinación de las coordenadas de los centros ópticos de los marcadores. La experiencia obtenida durante el desarrollo del software anterior, permite afirmar que la determinación del centro óptico es afectada por las condiciones ambientales del entorno que rodea a los marcadores. Esto hace que el centro óptico tenga inherentemente asociado un error en su estimación. El resultado de esta etapa será un informe que detalle el conjunto de ensayos al que será sometido cada uno de los softwares obtenidos en la etapa anterior
- 3) Ensayo del o los softwares obtenidos en la etapa 1 del proyecto con el conjunto de ensayos diseñados en la etapa 2 del proyecto y el análisis de los resultados. El análisis estadístico sobre el conjunto de datos obtenidos como resultado de los ensayos permitirá calcular el error cometido por cada uno de los algoritmos propuestos. El resultado de esta etapa será un informe que contenga un análisis comparativo de los softwares obtenidos en la etapa 1, pudiéndose entonces determinar el software que resulte más apropiado para la detección robusta de marcadores ópticos y el cálculo más preciso de sus centros ópticos.

#### 4. Cronograma de actividades

Actividades	Meses											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
I Análisis de las herramientas disponibles	X	X										
II Confección o acondicionamiento de un software para la detección de centros ópticos			X	X	X	X	X					
III Definición de ensayos								X	X			
IV Ensayos y análisis de los resultados										X	X	
V Informe y documentación		X			X		X				X	X

Meses 1 al 2: Análisis de las herramientas disponibles

- Mes 1: Definir los detalles técnicos. Revisar y seleccionar las herramientas a utilizar.
- Mes 2: Configurar el entorno de desarrollo. Reclutar o asignar al equipo de investigación.

Meses 3 al 7: Confección o acondicionamiento de un software para la detección de centros ópticos

- Mes 3: Diseñar el modelo 3D paramétrico que refleje la anatomía ocular y el casco HMD.
- Mes 4: Implementar el diseño del modelo 3D.

Meses 8 al 9: Definición de ensayos

- Mes 8: Diseño de ensayos considerando iluminación, posición, oclusiones, etc.
- Mes 9: Revisión y rediseño, si fuera necesario.

Meses 10 al 11: Ensayos y análisis de los resultados

- Mes 10: Ejecución del conjunto de ensayos en los distintos software desarrollados.
- Mes 11: Análisis de los resultados.

Meses 2 al 12: Informe y documentación

- Mes 2: Confección de informe resultado de la actividad I.
- Mes 5: Confección de informe resultado parcial de la actividad II.
- Mes 7: Confección de informe resultado de la actividad II.
- Mes 11: Confección de informe resultado de la actividad III y IV.
- Mes 12: Confección de informe final.

## **6. Alcances de la contribución del proyecto:**

El presente proyecto contribuye al desarrollo de herramientas precisas y eficientes para la detección automática de marcadores ópticos, enfocándose particularmente en el cálculo de sus centros ópticos en condiciones variables de iluminación y dinámica. Esta tecnología tiene aplicación directa en sistemas de realidad aumentada o virtual, especialmente aquellos que dependen del seguimiento preciso de la posición y orientación de un HMD (Head-Mounted Display) en tiempo real.

La principal contribución técnica reside en el análisis comparativo y la implementación de diversos métodos de procesamiento de imágenes que permiten mejorar la robustez y precisión del sistema, minimizando la tasa de falsos positivos/negativos y garantizando la compatibilidad con procesamiento en tiempo real.

Además, el proyecto aborda la necesidad de establecer un protocolo riguroso de ensayos para la evaluación objetiva del error en la determinación de los centros ópticos. Esto permite cuantificar el rendimiento de diferentes algoritmos y generar criterios de selección que pueden ser replicados en otros desarrollos o entornos.

Los resultados del proyecto pueden ser aprovechados tanto por investigadores como por desarrolladores de soluciones tecnológicas en el campo de la visión por computadora, el seguimiento óptico y la interacción hombre-máquina. Asimismo, se deja sentada una base sólida para futuras mejoras, adaptaciones o integraciones en sistemas más complejos, como el seguimiento multimarcas o el análisis en entornos tridimensionales con múltiples fuentes de interferencia visual.

**Firma**  
**Director/a del Proyecto**

**Firma**  
**Director/a de Departamento**

**Firma**  
**Decano FI**