

UNIVERSIDAD COMPLUTENSE DE MADRID

FACULTAD DE INFORMÁTICA

Máster en Ingeniería de Sistemas y de Control



TRABAJO FIN DE MÁSTER

Diseño e implementación de un sistema fotogramétrico multi-cámara e
integración en un brazo robótico

Curso académico 2017-2018

David Ruiz Osés

Director:

Dr. Gonzalo Pajares Martinsanz (UCM)

Colaborador externo de dirección:

Dr. Alberto Mendikute Garate (Ideko)

AUTORIZACIÓN DE DIFUSIÓN

Junio, 2018

El abajo firmante, matriculado en el Máster en Ingeniería de Sistemas y de Control de la Facultad de Informática, autoriza a la Universidad Complutense de Madrid (UCM) a difundir y utilizar con fines académicos, no comerciales y mencionando expresamente a su autor el presente Trabajo Fin de Máster: *“Diseño e implementación de un sistema fotogramétrico multi-cámara e integración en un brazo robótico”*, realizado durante el curso académico 2017-2018, bajo la dirección de Gonzalo Pajares Martinsanz (UCM) y de Alberto Mendikute Garate (Ideko), y a la Biblioteca de la UCM a depositarlo en el Archivo Institucional E-Prints Complutense con el objeto de incrementar la difusión, uso e impacto del trabajo en internet y garantizar su preservación y acceso a largo plazo.

Fdo. David Ruiz Osés

Agradecimientos

Gracias a Gonzalo por su tiempo, dedicación, consejos y correcciones.

Al equipo de Ideko por abrirme las puertas de sus laboratorios. En especial a Alberto por la confianza y las oportunidades, a Ibai e Imanol por la predisposición y echarme un cable y a Pablo, Iñaki y Beñat por desprender buen rollo.

Sin Javi de Invar, Akixe de SGSmap e Iván de Atelei la ecuación seguiría teniendo incógnitas.

A mis hermanos por pisar el camino y señalarlo.

A padre y madre.

A Lexuri.

Contenido

Agradecimientos.....	5
Resumen	11
Abstract.....	12
1. Introducción	13
1.1 Objetivos del proyecto.....	13
1.2 Organización de la memoria	15
2. Estado del arte	17
2.1 Laser tracker.....	17
2.1 Optical CMM	20
2.3 Sistemas multicámara.....	21
3. Antecedentes y fundamentos teóricos del proyecto.....	25
3.1 Geometría interna de las cámaras	25
3.2 Distorsiones en la imagen	32
3.3 Fotogrametría.....	34
3.4 Información básica sobre brazos robóticos	35
4. Propuesta de solución y análisis de resultados.....	39
4.1 Fases del proyecto	39
4.2 Diseño y selección de componentes.....	41
4.3 Calibración y evaluación del sistema	48
4.4 Desarrollo del sistema multicámara	52
4.5 Integración en brazo robótico	57
5. Conclusiones y líneas futuras	73
6. Apéndices	75
6.1 Tecnologías utilizadas	75
○ Halcon (MVTEC)	75
○ OpenCV	75
○ DirectShow.....	76
○ QT Project	76
○ ImagingSource SDK	76

6.2 Brazo robótico.....	77
○ Modelo Kuka LBR iiwa 14 R820	77
7. Bibliografía y referencias.....	79

Lista de figuras

FIGURA 1. APLICACIONES DESARROLLADAS EN IK4-IDEKO EN FUNCIÓN DEL VOLUMEN DE MEDIDA.	15
FIGURA 2. LOS LÁSERES TRACKER MIDEN LA ORIENTACIÓN ANGULAR DE LOS DOS EJES MECÁNICOS DEL TRACKER.....	18
FIGURA 3. EJEMPLO DE VISIÓN <i>TRACKER</i>	21
FIGURA 4. MODELO PINOLE O DE APERTURA INFINITESIMAL.....	26
FIGURA 5. MODELO DE PROYECCIÓN PERSPECTIVA.....	28
FIGURA 6. DISTORSIÓN RADIAL EN EFECTO BARRIL Y EN EFECTO COJÍN A LA DERECHA.....	32
FIGURA 7. DISTINTOS <i>FRAMES</i> DE TRABAJOS.....	37
FIGURA 8. VISTA DE LA IDEA INICIAL DE LAYOUT CON PIEZA DE REFERENCIA.....	41
FIGURA 9. SIMULACIÓN DEL PLANO PERPENDICULAR QUE ABARCA TODA LA ESCENA VISIBLE.	42
FIGURA 10. DIFERENTES TIPOS DE MARCADORES.	45
FIGURA 11. HISTOGRAMA DE UNA ZONA DE LA IMAGEN CON MARCADOR.	46
FIGURA 12. LA HERRAMIENTA DEL ROBOT ENTRANDO EN EL OBJETO BASE.....	47
FIGURA 13. CALIBRACIÓN DEL SISTEMA MEDIANTE FOTOGRAMETRÍA.....	48
FIGURA 14. CALIBRACIÓN UTILIZANDO EL PATRÓN DE EDMUND OPTICS.....	49
FIGURA 15. CALIBRACIÓN EN CMM.....	50
FIGURA 16. IGLÚS DISPUESTOS PARA LA CALIBRACIÓN DE EXTRÍNSECOS.....	51
FIGURA 17. EFECTOS VISIBLES CON LA BAYERIZACIÓN.....	54
FIGURA 18. ARQUITECTURA DEL CONTROLADOR DE LUCES.....	56
FIGURA 19. ZONAS DE TRABAJO DIBUJADAS CON ROTULADOR.....	60
FIGURA 20. DIAGRAMA DE FLUJO DE LA COMUNICACIÓN.....	61
FIGURA 21. ROBOT EN POSICIÓN DE INSERCIÓN DESPUÉS DE ITERAR.....	65

Lista de abreviaturas

CMM: (*Coordinate-measuring machine*) Máquina de medición tridimensional o por coordenadas.

CMOS: (*Complementary metal-oxide-semiconductor*) Semiconductor de óxido complementario.

CCD: (*Charge-coupled device*) Dispositivo de carga acoplada.

TCP: (*Tool center point*) Punto de centro de herramienta.

Wobj: (*Work Object*) Objeto de trabajo.

WCS: (*World coordinate system*) Sistema de coordenadas mundo.

TCP/IP: Protocolo de control de transmisión

Resumen

La fotogrametría es una técnica que permite la obtención de información acerca de objetos físicos y su entorno mediante procesos de medición e interpretación de imágenes fotográficas. Nos permite la reconstrucción espacial de la superficie observable de una escena u objeto mediante una serie de imágenes tomadas desde diferentes puntos de vista. Con el procesamiento de dichas imágenes se pueden obtener medidas o reconstrucciones del objeto observado.

En este trabajo se propone el diseño e implementación de un sistema multicámara que mediante técnicas de fotogrametría sea capaz de corregir los movimientos de un brazo robótico para alcanzar un mayor grado de precisión en sus movimientos. Como resultado, dicho brazo robótico será capaz de insertar su herramienta en un objeto colocado en su espacio de trabajo con una holgura lo suficientemente pequeña para ser una tarea imposible si no contara con el sistema multicámara.

Palabras clave: sistema multi-cámara, fotogrametría, robótica, ingeniería de precisión.

Abstract

Photogrammetry is a technique that allows obtaining information about physical objects and their environment through processes of measurement and interpretation of photographic images. It allows the spatial reconstruction of the observable surface of a scene or object through a series of images taken from different points of view. With the processing of that images, measurements or reconstructions of the observed object can be obtained.

In this dissertation, it is proposed the design and implementation of a multi-camera system that using photogrammetry techniques is able to correct the movements of a robotic arm to reach a greater accuracy in its movements. As a result of the process, the robotic is able to insert its tool into an object placed in its workspace with a clearance small enough to be an impossible task if it did not have the multi-camera system.

Palabras clave: multi-camera system, photogrammetry, robotic arm, precision engineering.

1. Introducción

1.1 Objetivos del proyecto

El principal objetivo de este proyecto es el desarrollo de un sistema multicámara capaz de medir la localización y orientación de un elemento dado (*tracking 6D*).

Se propone una solución basada en un conjunto de cámaras situadas sobre una estructura conocida que con una única medición simultánea realizada por cada cámara sobre las referencias fiduciales ofrecerá el potencial de medir la localización y orientación de las mismas con precisión.

Para validar el funcionamiento, se propone integrar el sistema desarrollado en un brazo robótico y diseñar una herramienta para el robot que encaje en un objeto base previamente conocido que se dispondrá a lo largo del espacio de trabajo del robot. El brazo robótico, con ayuda del sistema multicámara, deberá ser capaz de introducir su herramienta en el objeto base respetando las tolerancias definidas.

A continuación se detallan los objetivos concretos del presente proyecto:

O1: Desarrollar un sistema multicámara fijo capaz de realizar la detección de forma de uno o varios fiduciales (situados en un patrón) respecto a un sistema de coordenadas solidario a utillaje. Para el desarrollo se reutilizará en la medida de lo posible el material disponible (software y hardware) perteneciente a proyectos del mismo ámbito en Ideko.

O2: Integrar el sistema multicámara en un brazo robótico y corregir la posición del mismo hasta entrar dentro de tolerancias en las que el robot no es capaz de trabajar. Se diseñará una herramienta previamente calibrada que se acoplará a la

brida del robot, y de la misma manera se diseñará un objeto previamente calibrado que permitirá la inserción de la herramienta del robot en diferentes localizaciones y ángulos de entrada. El sistema deberá de ser capaz de guiar al robot a introducir su herramienta en el objeto entrando en tolerancias que para el robot son imposibles de alcanzar por sí mismo.

A modo de resumen, se muestra en la Tabla 1 un listado de las tareas identificadas en el proyecto y el tipo de tarea ejecutada en cada caso con el fin determinar la contribución realizada en el marco del presente proyecto. Cada tarea coincide con las descritas en *Propuesta de solución y análisis de resultados*.

Tabla 1 - Resumen de las tareas realizadas en la ejecución del presente proyecto.

<i>Tarea</i>	<i>Tipo de tarea realizada</i>
<i>Diseño y selección de componentes</i>	Tareas de gestión.
<i>Calibración y evaluación</i>	Integración de las cámaras con el software de Ideko ya existente.
<i>Implementación del sistema multicámara</i>	Desarrollo e implementación de rutinas de adquisición de imágenes. Integración de las rutinas y librerías de fotogrametría pertenecientes a Ideko.
<i>Implementación del sistema de iluminación</i>	Desarrollo del firmware necesario.
<i>Integración en brazo robótico</i>	Desarrollo e implementación del software de gestión del brazo robótico. Desarrollo e implementación de las comunicaciones entre el sistema multicámara y el brazo robótico.
<i>Resultados de las medidas y repetitividad del sistema</i>	Estudio e interpretación de los resultados obtenidos.

En la Figura 1, se muestran algunos desarrollos actuales relativos al desarrollo de aplicaciones específicas en la línea de producción de IK4-Ideko.

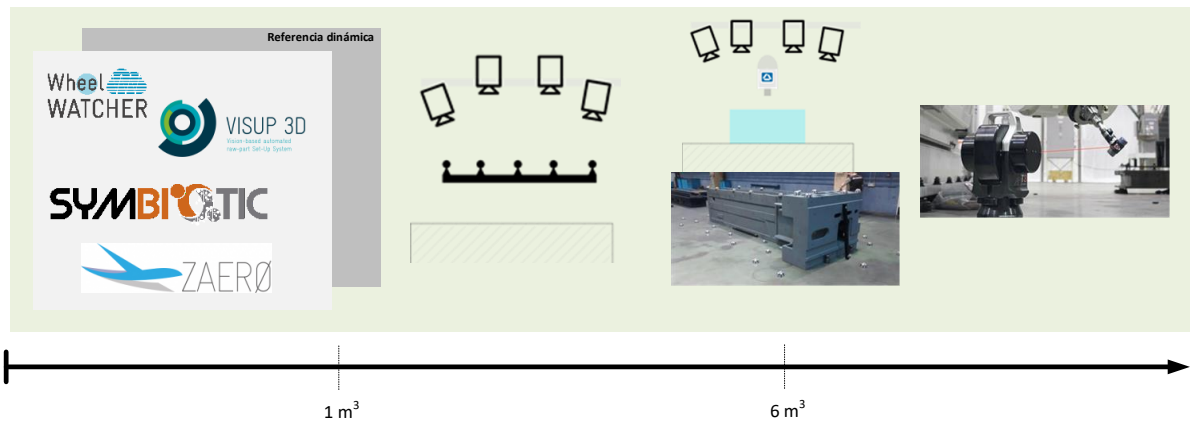


Figura 1. Aplicaciones desarrolladas en IK4-Ideko en función del volumen de medida.

1.2 Organización de la memoria

La presente memoria se estructura de la siguiente manera:

En el primer apartado se han expuesto los objetivos que persigue el presente proyecto.

El segundo apartado detalla el estado del arte actual en el ámbito de la medida. Se detallan las alternativas existentes en mercado a los sistemas multicámara y se detalla brevemente la manera de funcionar de cada uno.

En el tercer apartado se profundizan los principios teóricos necesarios para la resolución del proyecto. Se describen los parámetros internos de las cámaras, las distorsiones tratadas, técnicas utilizadas o conocimientos básicos sobre robótica para poder abordar la problemática del proyecto.

El cuarto apartado describe en profundidad los pasos realizados para conseguir los objetivos del proyecto. Se presentan los resultados y conclusiones obtenidas a lo largo del proyecto.

Finalmente se exponen las líneas futuras y conclusiones del proyecto.

2. Estado del arte

Los sistemas de visión donde el posicionamiento 6D (sistemas con seis grados de libertad) se realiza mediante procesado de imagen han experimentado un gran auge en los últimos años en el sector industrial con la idea de ir sustituyendo a los *láseres tracker*. Si bien es cierto que estos últimos alcanzan unos niveles de precisión cercanos a las $10\mu\text{m}$ y que su manejo cada vez es más sencillo se aprecian sin embargo ciertos puntos débiles. Por una parte se tratan de sistemas de alto coste económico. Por otro lado, por ser la interferometría el principio de medida, las distancias medidas son relativas, así que si el haz se ve interrumpido, el proceso de medida debe reiniciarse. Es requisito asimismo que tanto *tracker* como objeto se encuentren completamente estáticos. Y finalmente, al igual que las *Coordinate Measuring Machines* (CMMs), si se quiere conocer la situación 6D, para calibrar un robot por ejemplo, es necesario tomar tres medidas bien con el objeto fijo, un sólo *tracker* y tres medidas consecutivas, o bien, usando tres *láseres trackers*.

2.1 Laser tracker

Los *láseres tracker* son sistemas que presentan un alto nivel de precisión para mediciones de tamaños de objetos de gran tamaño debido a su alto rango de trabajo (0.025 mm a una distancia de varios metros).

El principio de medida de un *láser tracker* consiste básicamente en medir dos ángulos y una distancia. Se envía un rayo láser a un marcador retro-reflectante sujeto en el objeto que se desea medir. La luz reflejada del marcador vuelve a su trayectoria entrando en la misma posición que salió. A medida que la luz vuelve a

entrar en el *tracker*, parte de esa luz va a un telémetro láser. Por otro lado, el telémetro láser puede ser de dos tipos, interferómetro o medidor de distancia absoluta, este último también conocido como *Absolute Distance Meter (ADM)*.

Un *láser tracker* contiene dos codificadores angulares. Estos dispositivos miden la orientación angular de los dos ejes mecánicos del *tracker*. Uno es el eje azimutal y otro el de elevación (o cenit). Los ángulos de los codificadores y la distancia desde el medidor de distancia son suficientes para calcular con precisión el centro del marcador. Se puede ver una representación de los principios básicos de funcionamiento en la Figura 2 [1].

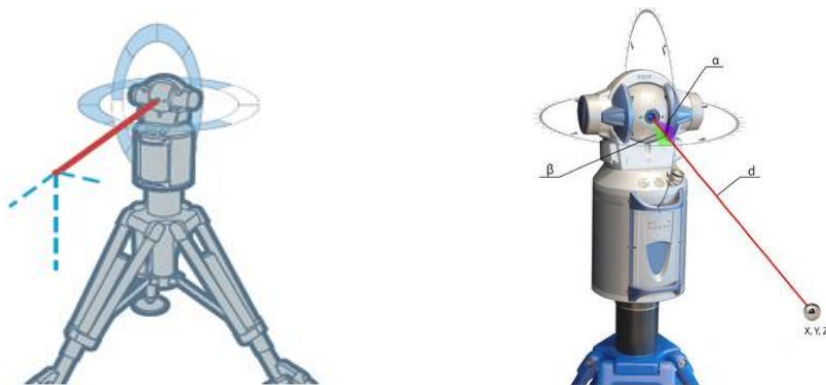


Figura 2. Los láseres tracker miden la orientación angular de los dos ejes mecánicos del tracker.

Los marcadores retro reflectantes varían según la aplicación, pero el más popular es una esfera retro reflectante conocida como *Spherically Mounted Retro-reflector (SMR)*. Debido al diseño esférico de estos elementos, su centro está siempre a una distancia de desplazamiento fija con respecto a cualquier superficie que se esté midiendo, de manera que las coordenadas de las superficies o puntos medidos con el *SMR* se obtienen fácilmente. La medición de distancia, una función importante del *láser tracker*, puede ser incremental o absoluta. La medición de distancia incremental se realiza con un interferómetro y un láser de helio-neón estabilizado en frecuencia.

La luz láser se divide en dos haces. Uno viaja directamente al interferómetro. El otro haz se desplaza del tracker, se refleja en el *SMR* y, en el trayecto de retorno, pasa al interferómetro. Dentro del interferómetro, los dos haces de luz interfieren, dando lugar a un cambio cíclico cada vez que el *SMR* se acerca o se aleja del tracker en una distancia igual a un cuarto de la longitud de onda de la luz ($\sim 0,0158$ micras). El circuito electrónico cuenta los cambios cíclicos (conocidos como "recuentos de franjas") para determinar la distancia recorrida.

En una medición, el operador coloca el *SMR* en la posición inicial del tracker y restablece el interferómetro a la distancia conocida. A medida que el operador mueve el *SMR* a la posición deseada, el láser sigue a lo largo, permaneciendo fijo al centro del *SMR*. Este procedimiento funciona siempre y cuando el haz del rastreador al *SMR* no se rompa por una oclusión en la trayectoria del haz. Sin embargo, si el haz se rompe, la distancia se desconoce. Para solucionarlo, el operador debe colocar el *SMR* a un punto de referencia, como la posición inicial del *tracker*.

La capacidad de medición de distancia absoluta ha existido durante mucho tiempo. Sin embargo, en los últimos años, los sistemas *ADM* han experimentado una mejora drástica, ofreciendo una precisión comparable a los interferómetros.

La ventaja de la medición de *ADM* sobre la medición de distancia incremental es la capacidad de simplemente apuntar el haz en el objetivo y disparar. El sistema *ADM* mide la distancia al objetivo automáticamente, incluso si el haz se ha ocluido previamente. En un tracker con *ADM*, la luz infrarroja de un láser semiconductor se refleja en el *SMR* y vuelve a entrar en el tracker, donde se convierte en una señal eléctrica. Los circuitos electrónicos analizan la señal para determinar su tiempo de vuelo, multiplicando este valor por la velocidad de la luz en el aire para determinar la distancia desde el tracker hasta el *SMR*.

Finalmente, cabe destacar que existe una serie de láser tracker que incorporan un equipo de visión. Estos sistemas se dan a conocer como laser tracker híbridos que calculan la posición XYZ con interferometría y la rotación por fotogrametría. La cámara de visión identifica unos marcadores incorporados en el elemento a medir. El mayor inconveniente de este tipo de soluciones es que incorporan una sola cámara y la precisión de giro no es precisa en rangos de trabajo grandes. En concreto, tienen una limitación en cuanto al posicionamiento de marcadores, más concretamente en la falta de precisión en los giros (0.18/100m). Un ejemplo práctico de este tipo de soluciones la ofrece el sistema Leica con su producto Varizoom [2].

2.1 Optical CMM

Entre las alternativas que surgen a los tracker láser están los *Optical CMMs*, también conocidos como *visión trackers*. Esta opción comercial es la más extendida a día de hoy en el campo de la metrología por visión. Un tracker por visión está formado por dos o tres cámaras pre-calibradas, que recogen la posición de múltiples marcadores colocados sobre la pieza y/o sonda de medición, y que es capaz de reconocer y procesar su posición.

Esta tecnología, en auge por el desarrollo de las cámaras y el software de control y procesamiento, incluye muchas mejoras que la hacen adecuada para multitud de soluciones. En primer lugar y de forma muy relevante por su potencial, destaca la posibilidad de *trackeo* (se mantiene la terminología inglesa para indicar seguimiento y monitorización) en 6D de múltiples objetivos, y no sólo de uno y en 3D como en otras tecnologías. Además, por primera vez se consigue que un sistema de estas prestaciones sea inmune a movimientos, vibraciones y oclusiones a través de la referenciación dinámica, puesto que hay muchos puntos *trackeados* que sirven como referencia y el sistema se actualiza constantemente, lo cual lo convierte en un sistema muy flexible y robusto capaz de medir con precisión

objetos con movimiento relativo, aunque se debe indicar que no todos los *trackers* por visión cuentan con esta característica.

Existen varias compañías que comercializan estos *trackers*. Entre ellas cabe destacar Kreon [3] o Steinbichler [4], siendo esta segunda a su vez adquirida y comercializada por Zeiss [5], Nikon K Series [6], Aicon MoveInspect [7] o Creaform [8]. Este último caso, mostrado en la Figura 3, correspondiente a un proyecto interno de IK4-Ideko.



Figura 3. Ejemplo de Visión *Tracker*.

Además de los *trackers* que tienen las compañías, un aspecto muy importante son las sondas que incorporan. De este modo cabe destacar el uso de los precisos palpadores y de los más flexibles escáneres láser, con los que se puede aprovechar todo el potencial de estos CMM ópticos.

2.3 Sistemas multicámara

Los sistemas multicámara consisten en un conjunto de cámaras situados estratégicamente alrededor de un volumen. Destacan principalmente por la flexibilidad que permite el poder disponer de un número indefinido de cámaras situados de la forma que mejor convenga a cada aplicación. Debido a esto, ofrecen una alta flexibilidad/personalización existe una enorme variedad de soluciones, muy superior a otras tecnologías como pueden ser los *Optical CMMs* o

Trackers por visión. Sin embargo, las implementaciones industriales son asimismo muy reducidas todavía, y no tienen dispositivos comerciales asociados. En cuanto a la exactitud que ofrecen, por ser sistemas basados en fotogrametría, depende de una gran cantidad de factores, entre los que pueden destacar la calibración de las cámaras, la calidad de los marcadores, las técnicas de procesamiento de imagen empleadas y los métodos de cálculo escogidos para su resolución [9].

Igualmente cabe destacar que, los costes se ven reducidos porque en principio estos sistemas se basan en un conjunto de cámaras y un software para procesar lo que ven.

Aicon 3D Systems [7]

Empresa alemana proveedora de sistemas de medición ópticos, recientemente fue adquirida en 2016 por la empresa de metrología Hexagon Manufacturing Intelligence [10]. Cuentan con la plataforma multicámara Aicon 3D Arena y el software Move Inspect para su calibración. Para su funcionamiento, colocan las cámaras en una estructura estable y usan marcadores retroreflectantes. La calibración se realiza tanto con referencias fijas para conocer las posiciones relativas, como barras escaladas para definir dimensiones. Con ello se consigue una referenciación dinámica en la que se permite alternar entre diferentes objetos de referencia.

En cuanto a niveles de precisión se refiere, depende del tipo de configuración, situándola en 50 $\mu\text{m}/\text{m}^3$ con palpador, aunque se subraya que existen aplicaciones que reducen la precisión a la mitad.

Zeiss [5]

Esta empresa alemana involucrada en la metrología por visión, ha mostrado su interés en los sistemas multicámara a través del Zeiss AIMax.

Esta solución está orientada para la implantación en líneas de producción, como la industria del automóvil, en forma de una célula de trabajo más para realizar inspecciones de forma rápida y precisa. Es capaz incluso de medir formas complicadas como remaches, agujeros o líneas de diseño. El sistema de posicionamiento está compuesto por un conjunto de cámaras y unos marcadores en la herramienta del robot. En este sentido las medidas no se basan en los codificadores de los robots, que tienen baja repetitividad y están sujetos a dilataciones por temperatura y desajustes, sino que sistema conoce en todo momento la posición de las cámaras y los robots. Los marcadores están codificados en una escala de grises y cuentan con retroiluminación para ser visibles incluso en ambientes agresivos. Al tomar medidas de una manera tan eficiente y automatizada (con un rápido sistema de luz estructurada), los datos se pueden comunicar a otras células para cerrar el lazo y conseguir una producción óptima.

Optitrack [11]

Esta empresa está focalizada en la óptica para su aplicación en realidad virtual, robótica, cinemática gestual y animación. Cuentan con dos *trackers* por visión, *V120 Duo* y *Trio*, pero su actividad se centra en los sistemas multicámara personalizados. Cuentan con varias cámaras según la aplicación y destacan por la baja latencia, alto nivel de *trackeo* y adecuación para captación de marcadores retroreflectantes utilizando luz infrarroja.

Utilizando algunas herramientas de calibración de su gama de productos, defienden una precisión inferior a los 20 μm en condiciones óptimas. En su implementación en drones, el error era inferior a 0.3mm y 0.05°. En cuanto a software, el *Camera SDK* es un paquete de desarrollo libre con interfaz C++ que permite un control total de las cámaras, con sincronización, *vector tracking* y herramientas para crear aplicaciones nuevas o integrarlas con otras ya existentes.

Teniendo en cuenta las consideraciones anteriores es claro que en los últimos años, y con el aumento de capacidad de las cámaras digitales, han proliferado las soluciones de *tracking 6DoF*. El punto fuerte de este tipo de soluciones es su diferencia de precio respecto del láser *tracker*. Estos últimos más sofisticados y precisos, pero con un coste y utilización mucho más compleja.

Con todas estas razones, el centro tecnológico Ideko, y más concretamente la línea de Ingeniería de Precisión, está desarrollando soluciones en el ámbito de la fotogrametría y sigue aumentando así su oferta en este ámbito. Con este proyecto se sumaría a la nueva generación de sistemas estéreo o multicámara, ofreciendo soluciones que aportan valor a las empresas del entorno en el ámbito de la medida de precisión. El presente trabajo se sitúa exactamente en esta misma línea.

3. Antecedentes y fundamentos teóricos del proyecto

Para lograr los objetivos propuestos, es necesario plantear las bases teóricas que los preceden. Es por ello que a continuación se mostrarán los principios básicos adquiridos para los procesos de gestión de una cámara, calibración del sistema o movimientos del brazo robótico.

En primer lugar se explica la geometría interna de las cámaras, las posibles distorsiones y los métodos de corrección utilizados en el apartado de calibración de las cámaras.

En siguiente lugar se explica la formación de una imagen RGB, de su adquisición y tratamiento por software. Y por último, se describe el funcionamiento básico de un robot y la programación utilizada para poder moverlo con precisión.

3.1 Geometría interna de las cámaras

Para poder comprender la gran importancia que tiene la calibración dentro del mundo de la fotografía y en consecuencia dentro de la fotogrametría, es imprescindible conocer la geometría y el comportamiento interno de las cámaras.

En el interior de cualquier cámara, existen dos elementos que se pueden definir como elementos indispensables para obtener fotografías; el obturador y el diafragma. Variando la configuración de estos dos elementos, se define la cantidad de luz que incide en la cámara. Esta cantidad de luz es capturada por unos sensores desarrollados con tecnología *CCD (Charged Coupled Device)* o

CMOS (*Complementary Metal Oxide Semiconductor*) y una vez convertida en carga eléctrica queda almacenada en celdas, también conocidas como “píxeles”. La intensidad de carga almacenada en cada uno de los píxeles depende de la cantidad de luz incidente y así queda definida la imagen final.

En la formación de imágenes, el modelo más común para representar la proyección perspectiva es el “modelo pinhole” [12], Figura 4, el cual se utiliza para describir el proceso de formación de imágenes de una cámara real. En definitiva, se trata de un modelo de cámara simple, sin ninguna lente, y con un solo punto de apertura (el pinhole). Los rayos de luz pasan a través del pinhole y reproducen una imagen invertida del objeto en dos dimensiones. La calidad de la imagen está directamente relacionada con la apertura del diafragma, es decir, una apertura pequeña reproduce una imagen nítida, y a medida que la apertura es más grande la imagen pierde nitidez pero gana en profundidad de campo y se ve más borrosa pero con más luz.

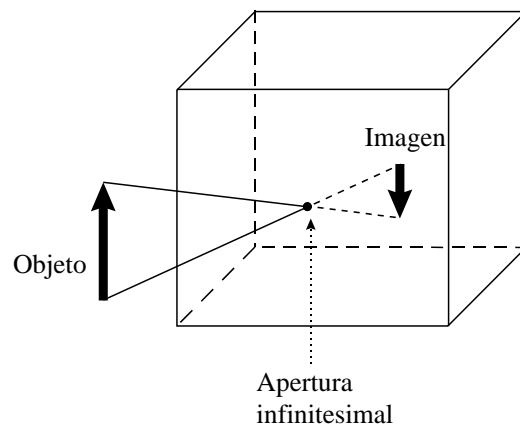


Figura 4. Modelo pinole o de apertura infinitesimal.

Tal y como sucede con las cámaras reales, hay varios aspectos técnicos que necesariamente hay que tener en cuenta. El modelo pinhole representa una cámara donde se diferencian dos grupos de parámetros: los parámetros intrínsecos y los extrínsecos. Los primeros (intrínsecos) representan las características internas de una cámara, mientras los extrínsecos definen la posición y orientación de la cámara respecto al objeto fotografiado.

- *Parámetros intrínsecos*

Estos parámetros describen la geometría del conjunto cámara (con la óptica) y tarjeta de adquisición de imágenes. Afectan al proceso que sufre un rayo luminoso desde que alcanza la lente del objetivo hasta que impresiona el elemento sensible. Estos mismos, modelan el proceso óptico de formación de imágenes (ignorando los efectos de distorsión), el cual es invariante frente a la ubicación de la cámara en el espacio.

El modelo pinhole, se puede describir también como modelo de “proyección central”. Este modelo está compuesto por el Centro de Cámara (CoP, “Centre of Projection”) y un plano, que se encuentra a una distancia f del punto CoP. Dicho plano se denomina como “plano imagen” o “plano focal”. Con el objetivo de evitar la inversión de la imagen, se utiliza una configuración geométrica equivalente a la del modelo pinhole original, trasladando el centro óptico a la parte posterior del plano imagen.

Por lo tanto, en este caso, el origen del plano imagen se encuentra en las coordenadas $(0, 0, f)$, siendo f una distancia diferente a 0.

La proyección generada en este modelo es la intersección entre el plano imagen y la línea que une el punto con el centro de cámara $Q_i = (X_i, Y_i, Z_i)$ con el centro de cámara (CoP).

Dicho de otra manera, en este proceso de formación de imágenes, conocido como “proyección central”, el punto tridimensional $Q_i = (X_i, Y_i, Z_i)$ es proyectado a un punto de la imagen a través de un rayo que pasa por Q_i y por un punto C , fijo del espacio. Este rayo se cruza con un plano específico (plano imagen), determinando el punto proyectado $q_i = (x_i, y_i)$ [9].

La distancia f (medida en mm) corresponde a la distancia focal del sistema y es uno de los parámetros intrínsecos más relevantes. Como se ha comentado anteriormente, el punto Q_i se proyecta en la posición donde el rayo que une dicho punto y el centro de la cámara, intersecta con el plano imagen. De la Figura 5 se puede deducir que, por semejanza de triángulos se cumple lo descrito en la ecuación (1).

$$x_i = f \cdot \frac{Y_i}{Z_i}, \quad y_i = f \cdot \frac{Y_i}{Z_i} \quad (1)$$

Bajo la asunción de que las coordenadas de la cámara y las coordenadas mundo (el punto que ha de ser proyectado) están perfectamente alineadas, el plano X, Y en el que se encuentra la cámara es paralelo al plano imagen y se denomina como plano principal. Además, el eje Z coincide con el eje principal por el que pasa el centro óptico (CoP). La intersección entre el eje principal y el plano imagen se denomina como punto principal (p), Figura 5.

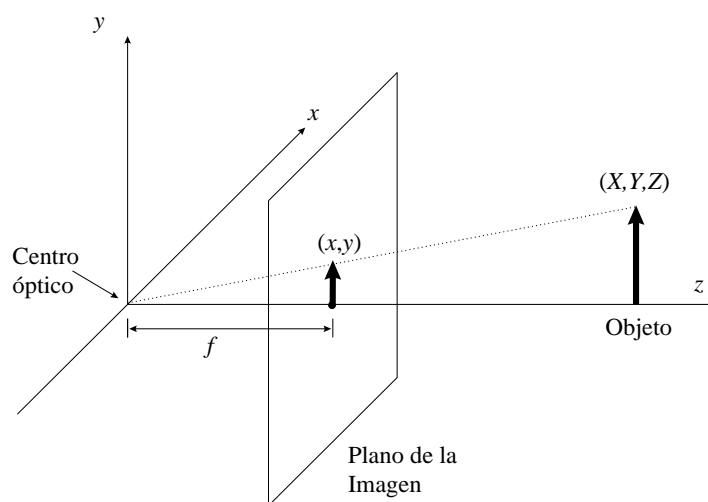


Figura 5. Modelo de proyección perspectiva

- Coordenadas homogéneas

La proyección de un punto en el espacio puede representarse matemáticamente como la multiplicación de una matriz y un vector siempre que se empleen “coordenadas homogéneas”. Es decir, el proceso de formación de imágenes se puede expresar como un sistema lineal. Las coordenadas homogéneas agregan una dimensión adicional con un valor escalar k , de manera que un punto homogéneo $(x, y, 1)$ es equivalente a (kx, ky, k) para cualquiera valor de $k \neq 0$. A partir de las coordenadas homogéneas de un punto es posible recuperar sus coordenadas originales dividiendo por k . De esta forma, un punto bidimensional (x, y) pasa a ser (kx, ky, k) en coordenadas homogéneas y un punto tridimensional $(X,$

Y, Z) pasa a ser (kX, kY, kZ, k) . Mediante esta notación, el sistema puede ser representado de forma matricial tal y como se presenta en la ecuación (2).

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f & 0 & 0 & 0 \\ 0 & f & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

De esta manera los rayos que inciden en el plano imagen pueden describirse de manera compacta con la matriz homogénea denominada como matriz de proyección de cámara \mathbf{P} .

$$q = \mathbf{P} * Q = \mathbf{K} * \mathbf{P}_N * Q \quad (3)$$

Atendiendo a la anterior ecuación, la letra q hace referencia al punto del plano imagen representado como vector $(x, y, 1)$ y la letra Q se refiere al punto en el espacio representado también como vector $(X, Y, Z, 1)$. La matriz de proyección de cámara (\mathbf{P}) por su parte se divide en dos matrices diferentes. Por una parte se obtiene la matriz de calibración o matriz de parámetros intrínsecos (\mathbf{K}) y por otro lado, la matriz de proyección de la cámara normalizada (\mathbf{P}_n).

- Punto principal

En la geometría proyectiva es de particular interés el punto principal denominado p . Hasta el momento se ha asumido que el origen de las coordenadas del plano imagen se encuentra en el punto principal, lo cual no siempre sucede de esta forma. Es muy común en el ámbito de la visión artificial que para definir la situación del punto principal se escojan sistemas de coordenadas centrados en la esquina superior izquierda del plano imagen. En consecuencia, el sistema adquiere la forma de la ecuación (4).

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f & 0 & p_x \\ 0 & f & p_y \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

Los dos nuevos términos que aparecen en la matriz de parámetros intrínsecos, (p_x , p_y) hacen referencia a las coordenadas del punto principal cogiendo como origen la esquina superior izquierda del plano imagen. La dirección X va de izquierda a derecha en el plano imagen y la dirección Y, de arriba hacia abajo (ambas mirando desde el centro óptico). Esto hace que las coordenadas del punto principal tengan valores muy grandes, más o menos iguales a la mitad de las dimensiones del plano imagen en píxeles.

- Sensor de imagen

Existen varios factores a tener en cuenta a la hora de definir el sensor de imagen. Por una parte, es importante analizar la perpendicularidad del sensor. Debido a una perpendicularidad entre los ejes de cada píxel, el sensor puede quedar inclinado respecto a la posición de la lente.

Esta inclinación se mide con el “factor de torcedura” o *skew*, el cual se denomina con la letra *s* y se calcula siguiendo la relación dada por la ecuación (5).

$$s = \tan \alpha \cdot \frac{f}{s_y} \quad (5)$$

En dicha relación, la constante *f* hace referencia a la distancia focal, S_y es la altura del sensor de la imagen y α es el ángulo de inclinación del píxel.

Además del *skew*, otro aspecto importante a tener en cuenta es que los píxeles del sensor no son necesariamente cuadrados y pueden tener dimensiones diferentes a lo alto y a lo ancho. En consecuencia, el factor de escala que se introduce en cada una de las direcciones (S_x, S_y) es diferente. Provocando que haya dos focales distintas, una para cada una de las direcciones (ver ecuación 6).

$$f_x = \frac{f}{s_x}, f_y = \frac{f}{s_y} \quad (6)$$

Teniendo en cuenta estos factores, la matriz de calibración o matriz de intrínsecos queda definida de la manera expuesta en la ecuación (7):

$$\mathbf{K} = \begin{bmatrix} f_x & s & p_x \\ 0 & f_y & p_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (7)$$

Por lo tanto el sistema final quedaría como se muestra en la ecuación (8).

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_x & s & p_x \\ 0 & f_y & p_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix} \quad (8)$$

- *Parámetros extrínsecos*

Hasta el momento los únicos parámetros descritos son los que intervienen directamente en el proceso de formación de imágenes pero no se ha comentado nada de los parámetros extrínsecos. Estos últimos son los que van a definir la ubicación de la cámara respecto del objeto fotografiado y cambiarán dependiendo de dónde y cómo se sitúe la cámara.

Se ha asumido desde un principio que, el centro de la cámara se encuentra alineada con el origen de la escena (objeto fotografiado). A pesar de ello, los puntos 3D en el espacio se expresan en coordenadas mundo y, en caso de querer representar dichos puntos en un sistema de coordenadas diferente (origen en el centro de la cámara) es necesario realizar una transformación de coordenadas. Esta transformación se compone de una rotación y un desplazamiento. Es denominada "Transformación Euclídea".

Finalmente, el sistema completo (parámetros intrínsecos y extrínsecos) se representa según las ecuaciones 9 y 10.

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_x & s & p_x \\ 0 & f_y & p_y \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} R & \vec{t} \\ \vec{O}_3^T & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix} = K \cdot P_N \cdot \begin{bmatrix} R & \vec{t} \\ \vec{O}_3^T & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix} \quad (10)$$

3.2 Distorsiones en la imagen

Tal y como se ha comentado en el apartado anterior, en el proceso de adquisición de imágenes, se pueden apreciar distorsiones en las imágenes. Estas distorsiones son debidas a errores y aberraciones en la lente que hacen que al formarse las imágenes estas no sean geoméricamente perfectas. Es decir, si se atiende al proceso de proyección de un punto en el plano imagen, el punto en el espacio, el punto de imagen y el centro óptico puede que no estén perfectamente alineados, es por eso que aparecen las distorsiones. A continuación se presentan los distintos tipos de distorsión que pueden aparecer y la manera de corregir dichas distorsiones mediante un modelo matemático.

- Distorsión radial

El primer tipo de distorsión que puede aparecer se denomina como Distorsión Radial. Este fenómeno ocurre por un error en la lente que hace que las líneas rectas aparezcan curvadas en el borde del plano imagen. Se pueden diferenciar dos efectos diferentes en la imagen debido a este fenómeno. Cuando la distorsión radial es positiva, las líneas adquieren una curvatura hacia fuera y se denomina como “efecto barril”. Cuando la distorsión radial es negativa en cambio, las líneas adquieren una curvatura hacia dentro y se denomina como “efecto cojín”. En la parte izquierda de la Figura 6 se puede ver el mencionado efecto barril y en la parte derecha el efecto cojín.

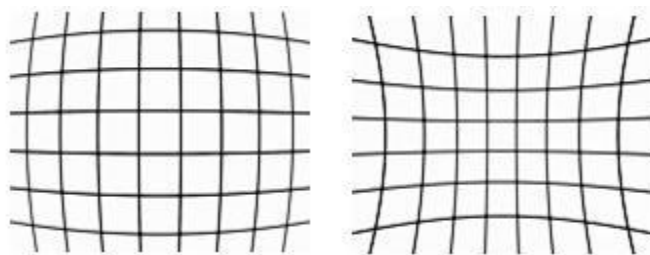


Figura 6. Distorsión radial en efecto barril y en efecto cojín a la derecha

- *Distorsión tangencial*

La distorsión tangencial ocurre como consecuencia de que la lente y el plano imagen (sensor de la cámara) no son perfectamente paralelas. Es decir, existe una falta de alineamiento entre los elementos físicos de la lente.

- *Corrección de distorsiones (Modelo de Brown)*

En la década de los años sesenta, D. Brown divulga las investigaciones llevadas a cabo por su compañía sobre calibraciones de cámaras balísticas [13]. En estas publicaciones formulan los modelos de distorsión radial simétrica y distorsión por descentrado (distorsión tangencial) que actualmente se siguen usando. Estos modelos en un principio no están pensados para sensores digitales, que son los usados actualmente, pero debido a la similitud en el proceso de formación de imágenes, se siguen utilizando estos modelos para corregir dichas imágenes [14].

La expresión matemática que se utiliza para corregir la distorsión radial es la mostrada en la ecuación (11).

$$\begin{aligned}\hat{x} &= (1 + k_1 \cdot r^2 + k_2 \cdot r^4 + k_3 \cdot r^6 + \dots) \cdot (x - c_{ox}) \\ \hat{y} &= (1 + k_1 \cdot r^2 + k_2 \cdot r^4 + k_3 \cdot r^6 + \dots) \cdot (y - c_{oy})\end{aligned}\quad (11)$$

La distorsión tangencial, en cambio, se corrige aplicando la ecuación (12).

$$\begin{aligned}\hat{x} &= (x - c_{ox}) + [p_1 \cdot (r^2 + 2 \cdot (x - c_{ox})^2) + 2 \cdot p_2(x - c_{ox}) \cdot (y - c_{oy})] \\ \hat{y} &= (y - c_{oy}) + [p_1 \cdot (r^2 + 2 \cdot (y - c_{oy})^2) + 2 \cdot p_2(x - c_{ox}) \cdot (y - c_{oy})]\end{aligned}\quad (12)$$

donde:

- (x, y) es el punto distorsionado, detectado por el sensor de imagen.

- (\hat{x}, \hat{y}) es el punto corregido al aplicar el modelo de corrección de distorsiones.
- (c_{ox}, c_{oy}) es el centro de distorsión
- $r = \sqrt{(x - c_{ox})^2 + (y - c_{oy})^2}$
- k_1, k_2, k_3 etc... son los coeficientes de distorsión radial. Destacar que estos coeficientes son parte de una serie de Taylor. Comúnmente se considera que con los dos primeros términos de la serie se consigue una buena corrección.
- p_1 y p_2 son los coeficientes de distorsión tangencial.

Teniendo en cuenta ambas (tangencial y radial), el sistema completo que representa el modelo estándar de corrección de distorsiones de Brown queda definido por la ecuación (13).

$$\begin{aligned}\hat{x} &= (x - c_{ox}) \cdot (1 + k_1 \cdot r^2 + k_2 \cdot r^4) + p_1 \cdot (r^2 + 2 \cdot (x - c_{ox})^2 + 2 \cdot p_2 \cdot (x \\ &\quad - c_{ox}) \cdot (y - c_{oy})) \\ \hat{y} &= (y - c_{oy}) \cdot (1 + k_1 \cdot r^2 + k_2 \cdot r^4) + p_1 \cdot (r^2 + 2 \cdot (y - c_{oy})^2 + 2 \cdot p_1 \cdot (x - \\ &\quad c_{ox}) \cdot (y - c_{oy}))\end{aligned}\tag{13}$$

3.3 Fotogrametría

La fotogrametría es una técnica para el estudio de la forma, dimensión y posiciones en el espacio de uno o más objetos. La Sociedad Americana de Fotogrametría y Teledetección (ASPRS) lo define como “el arte, ciencia y tecnología para la obtención de medidas fiables de objetos físicos y su entorno, a través de grabación, media e interpretación de imágenes y patrones de energía electromagnética radiante y otros fenómenos” [15].

En la fotogrametría industrial, se le adhieren una serie de marcadores ópticos a la pieza que se va a medir. Así, el proceso se orienta exclusivamente a la medida precisa de las coordenadas 3D de los marcadores adheridos a la superficie del objeto [16] [17].

A través de la detección de las coordenadas 2D de los marcadores ópticos dispuestos en el objeto, se termina la posición y orientación relativa de las cámaras (parámetros extrínsecos y se han definido anteriormente) junto con el cálculo de las coordenadas 3D de los marcadores ópticos mediante la triangulación de los mismos desde las múltiples imágenes obtenidas.

Se establece un sistema de coordenadas de referencia para la expresión de los resultados para poder referenciar todos los puntos obtenidos a través de un sistema común para todas las cámaras.

3.4 Información básica sobre brazos robóticos

- *Localización espacial del robot y sus componentes*

El primer paso necesario para comenzar a utilizar un brazo robótico es la comprensión de los diferentes sistemas de coordenadas utilizados por los robots.

Cualquier tarea o trabajo que se desee realizar con un robot vendrá dado por un desplazamiento o una rotación de la herramienta del robot, por lo que la definición de una serie de sistemas de coordenadas y espacios de trabajo se hace imprescindible.

Por lo general, para la localización de un cuerpo rígido en el espacio, se necesitan tres componentes (x , y , z) que indican su posición a lo largo de los tres ejes. De todos los tipos de coordenadas existentes, el más extendido es el uso de coordenadas cartesianas en donde un punto está definido en un plano por las distancias a los orígenes de cada eje. Estando un objeto situado en (a,b,c) a una distancia "a" del origen del eje X, a una distancia "b" del origen del eje Y, y a una distancia "c" del origen del eje Z.

Para representar la orientación del objeto es necesario disponer de las llamadas matrices de rotación; que define la orientación de un sistema OUVW con respecto al sistema OXYZ y que transforma las coordenadas de un vector perteneciente a un sistema en las del otro.

Si consideráramos que el sistema OUVW se gira un ángulo α respecto del sistema OX, un ángulo β respecto OY y un ángulo ϕ respecto OZ, obtendremos la siguiente composición de rotaciones:

$$\begin{aligned}
 & R(z, \phi)(y, \beta)(x, \alpha) \\
 &= \begin{pmatrix} \cos \phi & -\sin \phi & 0 \\ \sin \phi & \cos \phi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos \beta & 0 & -\sin \beta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \beta & 0 & \cos \beta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha & -\sin \alpha \\ 0 & \sin \alpha & \cos \alpha \end{pmatrix}
 \end{aligned}
 \tag{14}$$

Comúnmente un robot suele trabajar con al menos cuatro sistemas de coordenadas diferentes que funcionan de una manera jerarquizada. Los niveles inferiores dependen de los superiores por lo que un cambio de posición u orientación en un sistema deriva en cambios en los sistemas inferiores. Las posiciones relativas entre el sistema cambiado y sus inferiores se mantienen, pero no ocurre lo mismo con las posiciones relativas a los sistemas de jerarquía superior.

Los cuatro sistemas de coordenadas comúnmente utilizados son:

- TCP (*Tool Center Point*): Corresponde a la herramienta del robot.
- Wobj (Work Object): Corresponde al objeto de trabajo.
- BF (Base Frame): Corresponde a la base del robot.
- WCS (World Coordinate System): Corresponde al sistema de coordenadas mundo.

En la Figura 7 se puede observar una representación de dos robots y los sistemas de coordenadas asociados a ellos [18].

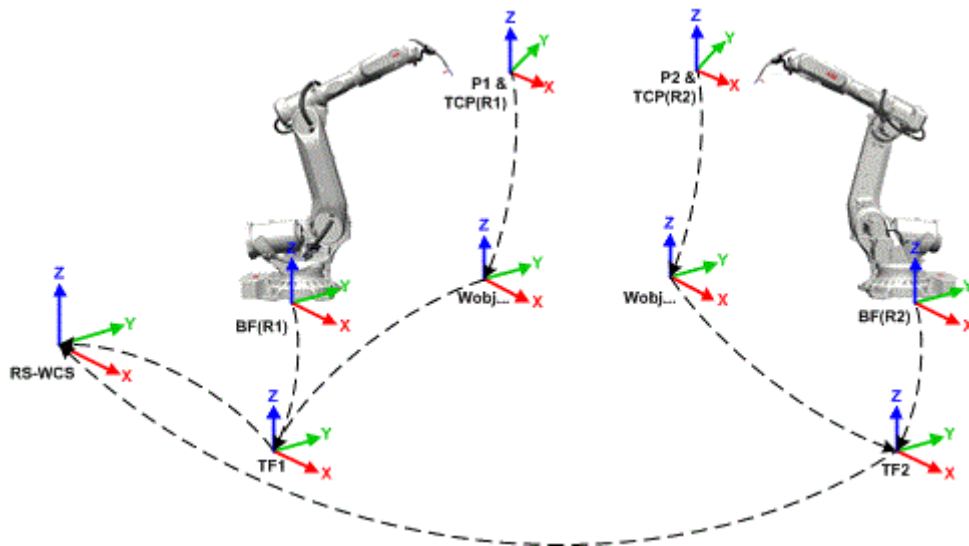


Figura 7. Distintos *frames* de trabajos

- *Programación*

Se define la programación de un robot como el procedimiento mediante el cual se le indica la serie de acciones que tendrá que realizar. La mayoría de las instrucciones programadas en el robot supondrán el movimiento de la herramienta de un punto a otro. La capacidad de reprogramación es lo que permite su multifuncionalidad.

Además de instrucciones programadas, cada vez hay más robots capaces de aprender a realizar movimientos por repetitividad guiando su herramienta de un punto a otro.

Para poder programar un robot son necesarias una serie de herramientas y conocimientos tales como un entorno de desarrollo, conocer los tipos de datos que el robot es capaz de manejar, controlar las entradas y salidas (tanto analógicas como digitales) que el robot puede soportar, los diferentes tipos de comunicación que puede implementar o los controles de movimiento y de flujo disponibles.

4. Propuesta de solución y análisis de resultados

4.1 Fases del proyecto

El trabajo que se presenta se ha dividido en diferentes fases y tareas.

Una primera fase consistió en la documentación teórica y el estudio de los principios básicos de medida y fotogrametría. Además, en la parte de integración se tuvo que realizar un aprendizaje sobre sistemas robóticos. Todo ello ha dado lugar a la sección dos que incluye el estado del arte y los fundamentos teóricos del proyecto.

Las siguientes fases fueron la selección del material, desarrollo e integración del software necesario para la implementación del sistema, calibración de las cámaras y del sistema, pruebas y evaluación de los resultados obtenidos e integración con el brazo robótico.

A continuación en la Tabla 3 se resumen las fases y el grado de desarrollo e integración realizado en el presente proyecto.

Tabla 2 - Tareas del proyecto, tipos y descripción

Tarea	Tipo de tarea realizada
Diseño y selección de componentes	
<i>Selección de material: Componentes de visión</i>	Tareas de gestión con proveedores.
<i>Selección de material: Herramienta del robot y objeto base</i>	A cargo del departamento de Diseño e Ingeniería de precisión.
Calibración y evaluación del sistema	
<i>Calibración de las cámaras mediante patrón comercial</i>	Integración de las cámaras con el software ya existente propiedad de Ideko. Interpretación y análisis de los resultados.
<i>Calibración en CMM</i>	
<i>Calibración mediante fotogrametría</i>	
Desarrollo del sistema multicámara	
<i>Implementación del sistema de comunicación/adquisición</i>	Desarrollo de las rutinas de gestión de las cámaras. Integración de las librerías de fotogrametría pertenecientes a Ideko.
<i>Implementación del sistema de control de la iluminación</i>	Desarrollo del firmware necesario para la gestión de las lámparas LED. Desarrollo de la comunicación entre el sistema multicámara y el controlador de luces.
Integración en brazo robótico	
<i>Primeros pasos con el robot</i>	Desarrollo de aplicaciones para la gestión del robot. Desarrollo del software necesario para la comunicación entre el robot y el sistema multicámara.
<i>Implementación de las correcciones</i>	Desarrollo de las rutinas que devolvían las correcciones.
<i>Resultados de medidas y</i>	Estudio de los resultados obtenidos.

4.2 Diseño y selección de componentes

- Selección de material: componentes de visión

- a) *Procedimiento*

Para seleccionar los diferentes componentes se contactó con los principales proveedores de cámaras, ópticas y luces del entorno. Después de recibir sus catálogos y filtrar los resultados según las posibilidades económicas que ofrecía el proyecto, se realizaron diferentes simulaciones con el software Blender [19].

Lo que se buscó con esas simulaciones era disponer un conjunto de cámaras repartidas a lo largo de una mesa óptica de 900x1500mm.

En la Figura 8 se puede observar uno de los primeros bocetos con los que se empezó a trabajar la estructura.

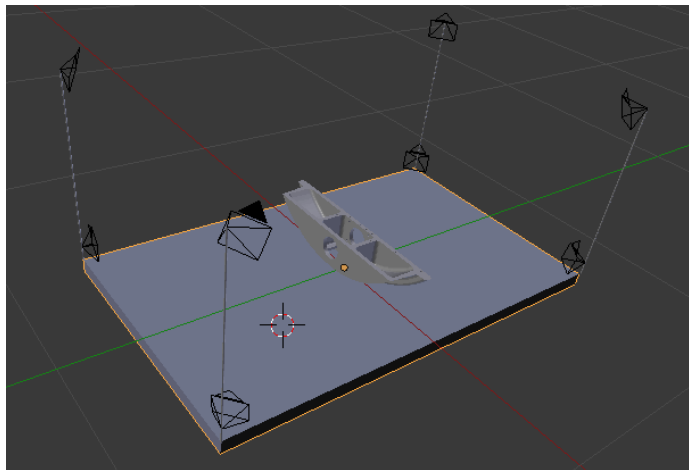


Figura 8. Vista de la idea inicial de layout con pieza de referencia

El objetivo de estas simulaciones era determinar qué posicionamiento y qué objetivo era el idóneo para abarcar una pieza arbitraria y conseguir que los

marcadores retro reflectantes ocuparan el mayor número de píxeles posible para su detección en la etapa de medición. Una imagen para medida cuyos marcadores ocupan muchos píxeles, será una imagen más precisa a la hora de determinar el epicentro de dicho marcador.

Por cada cámara primero se hicieron simulaciones de campo de visión para calcular cuántos milímetros ocuparía el plano perpendicular a la cámara que intersectara al objeto a medir. Con ello se obtiene la densidad de píxeles por milímetro y de ahí calcular los píxeles de ancho que tendrá un marcador retro-reflectante de 10mm (tomado como estándar). Podemos observar un ejemplo de simulación en la Figura 9.

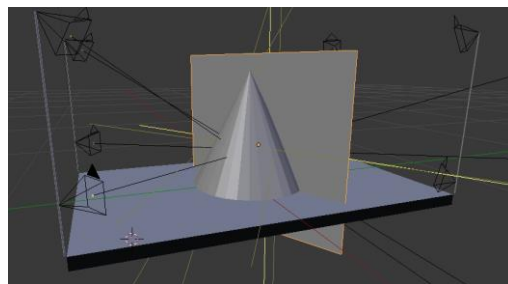


Figura 9. Simulación del plano perpendicular que abarca toda la escena visible.

b) *Resultados*

A continuación se muestran diferentes combinaciones de cámaras y objetivos enfocando a un objeto a 500mm de distancia. Dicha distancia ha sido considerada la distancia estándar entre la cámara y el objeto a medir teniendo en cuenta las medidas del área de trabajo disponible.

Tabla 3 - Análisis de las cámaras estudiadas

Modelo	MPíxeles	Sensor	Óptica	Píxel / mm	Marcador de 10 mm	Pros	Contras
DALSA Genie M4020	12MP 4112x3012	14.16x10.3 8mm (1.1")	12mm	5,87	58px	GigE	Poca resolución
DALSA Genie Nano XL- M5100	26MP 5120x5120	27.90*18, 60mm (APS-H)	22mm	11,37	113px	GigE Alta resolución	Precio
IDS UI-5200 Rev. 4	12MP 4104x3006	14.16x10.3 8mm (1.1")	12mm	5,47	54px	GigE	Poca resolución
ImagingSource DFK AFU420	42MP 7728x5368	8.80x6,60 mm (2/3")	7mm	12.8	128px	Alta resolución	USB 3.0 Color No trigger & IO
ImagingSource DMK 33GJ003E	10MP 3856x2764	6,17x4.55 mm (1/2.3")	5mm	5,5	55px	GigE	
ImagingSource DMK 38UX253	12MP 4096x3000	14.16x10.3 8mm (1.1")	12mm	4,12	41px		Poca resolución USB 3.1

Una vez realizados los cálculos y las simulaciones correspondientes, se llegó a la conclusión de que la cámara ImagingSource DFK AFU420 [20] era la cámara que más se acercaba a las necesidades del proyecto. Si bien, es una cámara con una resolución muy por encima de las cámaras accesibles en mercado, pero planteaba tres hándicaps identificados desde este punto:


- Se trata de una cámara con conectividad USB 3.0. Al tratarse de un sistema multicámara, la escalabilidad del sistema se verá comprometida por la capacidad de la CPU para poder gestionar diversas cámaras con imágenes de gran tamaño.
- El sensor que incorpora esta cámara (cuya información es escasa en la web de la marca) es RGB. Para un sistema de fotogrametría se suele trabajar con sensores en escala de grises. Si se decide trabajar con un

sensor RGB habrá que tener en cuenta que la iluminación podrá afectar en gran medida a la excitación que haga sobre cada canal del sensor.

- Esta cámara no dispone todavía de señales de entrada y salida por lo que el flash deberá de ser activado por software y calibrado a mano.

En la Tabla 4 se resumen las principales características del modelo de cámara escogida.

Tabla 4 - Características de la cámara DFK AFU420

ImagingSource DFK AFU420	
Imagen	
Resolución	42MPíxeles (7728x5368px)
Sensor	2/3" (8.80x6.60mm) Rolling shutter
Flash	No
Precio	990€
Frecuencia	Up to 110fps
Óptica	No
Link	https://www.theimagingsource.com/products/industrial-cameras/usb-3.0-color/dfkafu420ccs
Contacto	Iberoptics
Observaciones	-USB 3.0

La óptica que más se ajustaba a este sensor y al layout diseñado es la en la Tabla 5.

Tabla 5 - Características de la focal HF8XA-5M

HF8XA-5M	
Distancia focal	8mm
Rango de apertura	F1.6-F16
Compatibilidad en sensor	2/3"
Precio	
Link	http://www.fujifilm.com/news/n170214.html
Contacto	Iberoptics

En cuanto a la iluminación, se hicieron pruebas con varios modelos de luces LED disponibles en los laboratorios de Ideko las cuales en su mayoría eran luces LED rojas que alteraban la calidad de la imagen resultante al no excitar correctamente las partes del sensor de la cámara que corresponden a los canales verde y azul. Finalmente se adquirieron nuevos modelos de anillos LED que ofrecen una salida de luz perpendicular a la cámara y hacen que los marcadores retro-reflectantes se exciten y emitan su luz de manera clara y directa hacia el objetivo de la cámara.

En la Figura 10 se pueden ver los diferentes marcadores retro-reflectantes usados en el proyecto.



Figura 10. Diferentes tipos de marcadores.

Con todo el equipo montado, se hicieron las primeras pruebas para comprobar si las simulaciones eran correctas y el marcador ocupa los píxeles calculados en la etapa de diseño. En la Figura 11 se observa un histograma del área alrededor de un marcador retro-reflectante. Vemos cómo la intensidad de la imagen es completamente negra y sube abruptamente a niveles cercanos al blanco absoluto gracias a una rápida velocidad de obturación y una iluminación intensa sobre el área de trabajo.

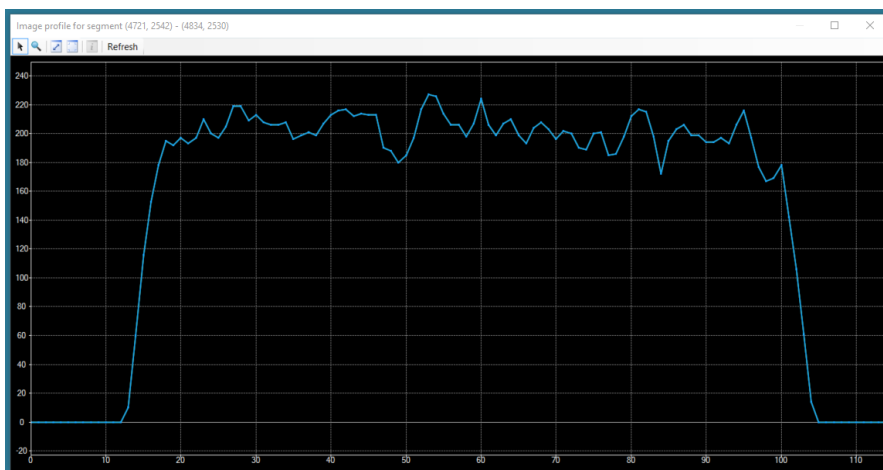


Figura 11. Histograma de una zona de la imagen con marcador.

○ *Selección de material: herramienta del robot y objeto base*

a) Procedimiento

El departamento de Diseño e Ingeniería de precisión de Ideko diseñó y fabricó las piezas necesarias para obtener una herramienta del robot y objeto base precisos y fácilmente localizables mediante fotogrametría.

b) Resultados

Se fabricó una herramienta para el robot a utilizando tecnología aditiva en plástico (PLA) que servía de soporte para cuatro iglús con marcadores referenciados. El mismo soporte servía también para anclarlo a la brida del robot y para sujetar con precisión una pieza macho con chaveta realizada en aluminio.

Además, se fabricó el objeto base imantado con una superficie suficientemente amplia para colocar diversos marcadores codificados que ayudaran al sistema a conocer su ubicación, giros e inclinaciones.

La parte superior constaba de una apertura por la que se colocaba una pieza hembra de aluminio sobre la que se introduciría el macho de la herramienta del robot.

Entre las dos piezas la holgura que se dejó inicialmente fue de 0.30 mm en el diámetro.

A continuación, en la Figura 12 se puede observar una imagen con los objetos fabricados y ensamblados. Se puede apreciar, además, la disposición de los marcadores retro-reflectante que distribuidos por toda la superficie de los elementos nos ayudaran a identificar los giros e inclinaciones existentes en el objeto base.



Figura 12. La herramienta del robot entrando en el objeto base

4.3 Calibración y evaluación del sistema

La parte más sensible del proyecto ha sido la calibración del sistema. De dicha calibración saldrán posteriormente medidas que difícilmente podrán ser mejoradas si no es a través de una mejor calibración.

Se identificaron tres posibles métodos para calibrar las cámaras y la estructura. Se comenzó calibrando las cámaras con un patrón de calibración comercial de Edmund Optics [21]. Se continuó con una calibración basada en CMM y para finalizar se realizó una calibración utilizando el software de fotogrametría portable de Ideko (VISUP3D [23]).

En la Figura 13 se puede ver la disposición de los elementos pertenecientes a VISUP3D a lo largo de la mesa de trabajo.



Figura 13. Calibración del sistema mediante fotogrametría

- Calibración de las cámaras mediante patrón comercial

- a) *Procedimiento*

Para calcular los parámetros intrínsecos de la cámara se utilizó el software propiedad de Ideko y el patrón comercial mencionado previamente.

Dicho software genera un fichero con los datos calculados que luego es fácilmente manejable para ser utilizado bajo la librería de fotogrametría que ha desarrollado Ideko.

Para realizar esta calibración se coloca el patrón en varias posiciones cambiando de giros y profundidad y se toman fotos del patrón calibrado de Edmund Optics. Con ello se realiza una búsqueda de los marcadores de ese patrón y se calcula el epicentro de dicho círculo. Dicho patrón tiene una información conocida: la distancia entre sus círculos y el número de ellos.

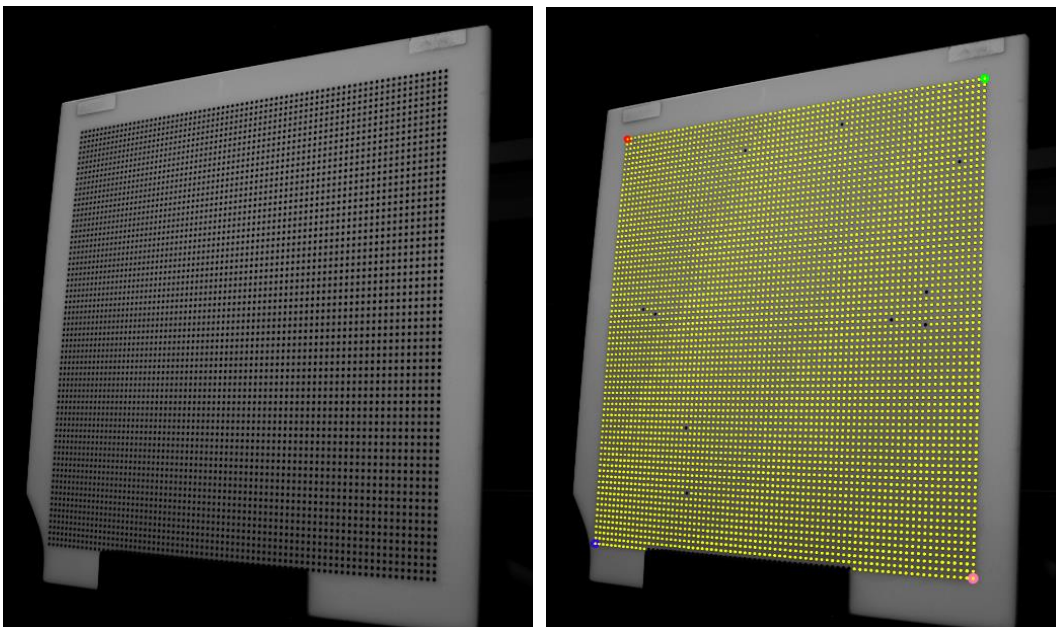


Figura 14. Calibración utilizando el patrón de Edmund Optics

- Calibración en CMM

- a) *Procedimiento*

La calibración en la máquina tridimensional es tediosa y debe ser realizada por un técnico con conocimientos en la materia. Se fija un origen en la mesa que se establece como punto de referencia (usualmente se establece en una esfera que es palpada desde diferentes orientaciones). A partir de ahí se mueve con precisión micrométrica un marcador retro-reflectante (movido por la propia máquina) a una serie de posiciones conocidas y se toman imágenes con el sistema. Una vez terminado el recorrido de la máquina tridimensional, se procesan las imágenes resultantes. Dicho proceso consiste en emparejar los marcadores retro reflectantes encontrados en cada imagen, con la posición que devuelve la máquina tridimensional. En la Figura 15 se ve un momento de la calibración en CMM.

Mediante una calibración en la CMM también es posible conocer los parámetros intrínsecos.

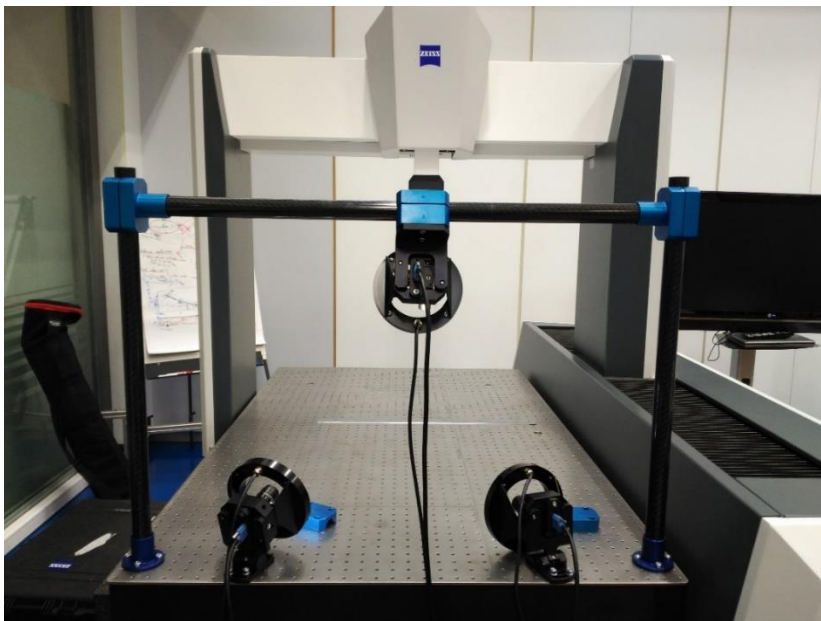


Figura 15. Calibración en CMM

- Calibración utilizando fotogrametría

- a) *Procedimiento*

Gracias a diferentes productos fotogramétricos desarrollados por Ideko, se abrió una nueva posibilidad de calibrar los parámetros extrínsecos del sistema que no estaba planteada desde el principio. Se trata de una calibración de cámaras y demás material necesario utilizando el producto VISUP3D a día de hoy perteneciente al centro tecnológico.

VISUP3D se trata de un sistema de fotogrametría portable consistente en una serie de marcadores, barras y crucetas previamente calibradas que se despliegan a lo largo de la escena y con una cámara de ámbito profesional (y ahí radica su sencillez, la no dependencia de un sistema de cámaras industriales) y se realizan una serie de fotografías a lo largo de la zona de trabajo. VISUP3D será capaz de ir recibiendo las imágenes “al vuelo” y resolviendo los puntos existentes.

Una vez terminado, se saca una imagen por cada cámara del sistema multicámara y se procesan. En la calibración se realizarán los cálculos pertinentes que ayuden a corresponder los puntos encontrados desde VISUP3D con el sistema multicámara, Figura 16.

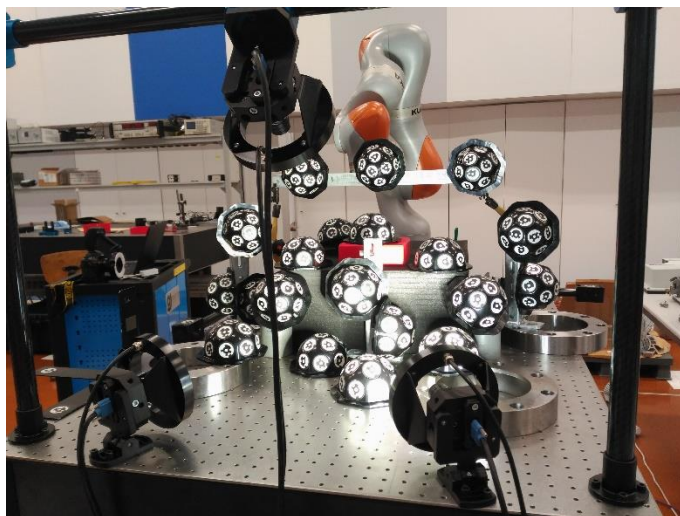


Figura 16. Iglús dispuestos para la calibración de extrínsecos

4.4 Desarrollo del sistema multicámara

En este apartado se documentan los pasos seguidos para el desarrollo del sistema multicámara.

Se parte de la librería inicial de fotogrametría desarrollada por Ideko. Dicha librería contiene una serie de funciones capaces de recibir imágenes y resolver la búsqueda de marcadores retro-reflectantes y hacer una serie de cálculos que devuelven su posición en el espacio.

Dicha librería, unida a otras también desarrollada por el mismo departamento, es capaz de devolver distancias absolutas y relativas respecto de los sistemas de coordenadas que se definan. Con una serie de mejoras, la librería fue capaz de devolver como resultado las distintas matrices de rotación necesarias para encajar la nube de puntos que conforma la herramienta del robot (macho del sistema) con el objeto base colocada en la mesa óptica (hembra del sistema).

- *Implementación del sistema de comunicación/adquisición multicámara*

- a) Procedimiento*

El objetivo en esta etapa del proyecto era elegir el método más conveniente para la adquisición de una imagen de cada cámara en un tiempo predeterminado. Teniendo en cuenta en todo momento la escalabilidad del sistema para que la adquisición de nuevas unidades de cámaras no afectaran a la programación ya realizada.

Se tuvieron en cuenta los siguientes aspectos antes de elegir sobre qué plataforma y librerías desarrollar:

- Decisión del tamaño y formato de la imagen resultante.

- Decisión de la plataforma y librerías que se utilizarían durante el desarrollo de las rutinas de adquisición

b) Resultados

- Decisión del tamaño y formato de la imagen resultante.

Las primeras pruebas de tamaños, resolución y calidad de imagen obtenida se realizaron desde el software facilitado por ImagingSource denominado ICCapture [24].

Con dicho software puedes ver a tiempo real el campo de visión e ir configurando los diferentes parámetros de la cámara.

Una opción interesante de la cámara era la posibilidad de realizar una conversión automática de RGB a escala de grises mediante algoritmos de Bayerización. La Bayerización consiste en extraer tres canales a partir de un único dispositivo formado por elementos sensibles alternativamente a las bandas espectrales R, G y B. El proceso se realiza mediante interpolación de los valores exclusivos y sensibles a cada canal.

El problema de esos algoritmos es que aparecen varios fenómenos ópticos que sin ninguna duda complicarían el proceso de medida en posteriores etapas.

En Figura 17 se pueden observar un ejemplo los problemas de la Bayerización donde se aprecia la disminución de la calidad de la imagen.

De esta manera se decidió ni aplicar ni desarrollar algoritmos para la conversión de RGB a escala de grises Y800 y se optó por saturar todos los canales para que la información que recibieran fuera la misma. De esta manera, la incidencia de luz blanca sobre retro marcadores hace que tanto el canal R, G y B se saturen y obtengan un valor de blanco puro mientras que el resto de la imagen torne a negro.

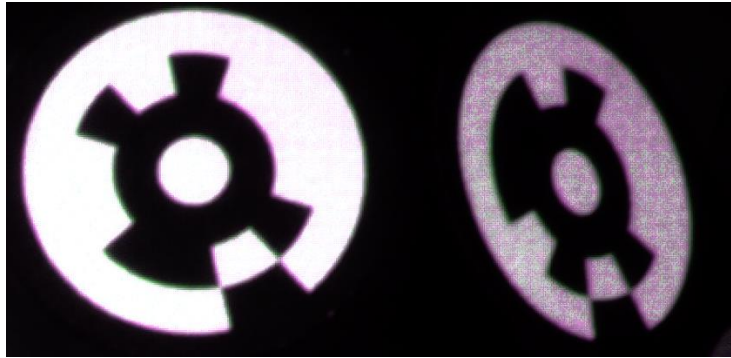


Figura 17. Efectos visibles con la Bayerización

El formato elegido para guardar la imagen fue BMP o TIFF en el caso de requerir ser guardada en disco.

Para los casos en los que no sea necesario salvar la información en disco, se ha optado por utilizar la clase `cv::Mat` de la librería OpenCV [22] como estándar de tipo de variable imagen.

Dicho tipo de variable permite guardar la información relativa a una imagen en formato matricial.

En cuanto a la resolución, se optó por aprovechar la resolución máxima de la cámara.

- Decisión de la plataforma y librerías que se utilizarían durante el desarrollo de las rutinas de adquisición.

Siguiendo la tónica habitual de los proyectos de Ideko, se decidió tomar como referencia otros proyectos desarrollados en C++ y Qt para la visualización de pantallas.

El siguiente paso fue elegir qué librería sería la óptima para la adquisición de imágenes. Los requisitos en esta etapa se centraban en el tiempo de proceso y en el formato de entrega de la imagen a las rutinas de medición (pertenecientes a la librería de medida de Ideko).

Para ello se realizó un estudio con la plataforma Halcon, con el SDK propietario de las cámaras y con las librerías DirectShow de Windows.

Se ha agregado una explicación de cada una de ellas en el apartado de Apéndices.

Finalmente se escogió realizar esta fase del proyecto utilizando el SDK de ImagingSource que nos proveía de múltiples ejemplos para su desarrollo. Aunque a lo largo del proyecto se han ido sumando errores en sus procesos y hacen casi indispensable que en algún momento del proyecto se baje a más bajo nivel y se utilicen las librerías de DirectShow.

- *Implementación del sistema de control de iluminación*

- a) *Procedimiento*

La gestión de la iluminación de un sistema multicámara es una tarea tediosa y compleja. Los anillos LED adquiridos para el proyecto disponen de una vida útil cuantificada en 50000 horas (unos 5 años funcionando de manera ininterrumpida). A pesar de tener una vida útil lo suficientemente larga para finalizar el proyecto con ellas, se propuso un sistema de gestión de la iluminación para con ello alargar la vida útil en la medida de lo posible. También es un detalle importante la necesidad de reajustar el sistema cada vez que la luz cambie de intensidad, por lo que hace más necesario si cabe gestionar de manera inteligente las mismas.

Al no disponer ni de controlador de luces comercial ni de salidas digitales en las cámaras, se optó por utilizar un microcontrolador que controlara el encendido y apagado de las luces.

b) Resultados

Se ideó un sistema sencillo, ágil y escalable para el encendido y apagado de las luces en el sistema.

El sistema propuesto consta de una fuente de alimentación que alimenta las luminarias. Entre la fuente de alimentación y las luminarias colocamos un relé que se controlará mediante un microcontrolador. El microcontrolador esperará recibir la señal de activación o desactivación haciendo uso de una comunicación vía puerto serie. Dicha comunicación es comenzada por el ordenador controlador del sistema que lanzará la señal de activación al relé cuando se disponga a mandar a una cámara a realizar una captura. Esperará un tiempo razonable para encender el anillo LED y esperará hasta que la cámara responda con la señal de captura realizada. En ese momento desactivará el relé y esperará a la siguiente acción.

En la Figura 18 se muestra la arquitectura escogida para resolver el sistema de iluminación.

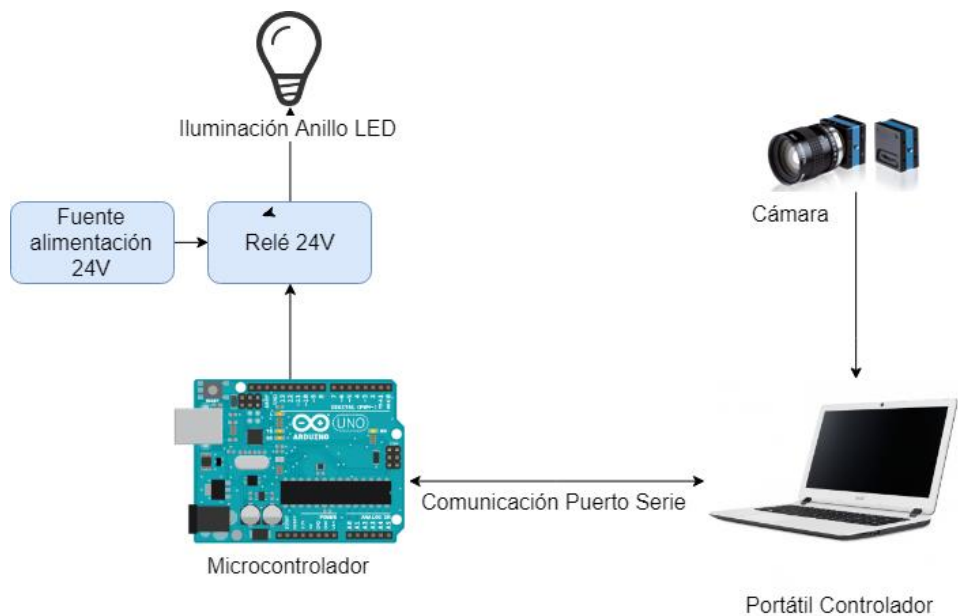


Figura 18. Arquitectura del controlador de luces

4.5 Integración en brazo robótico

Como caso práctico de uso de un sistema multicámara, se decidió integrar el sistema multicámara en un brazo robótico industrial cedido a Ideko por Kuka LBR iiwa R820 (más información en el Apéndice).

Este robot, preparado para la colaboración entre personas y robots, tiene capacidad sensitiva por lo que es idóneo para trabajos de cierta repetitividad y tareas colaborativas humano-robot.

Con una capacidad de carga de 14 kg y un alcance de 820mm, se trata de un robot apto para tareas de desplazamiento de piezas pequeñas o para trabajos manuales repetitivos con cierta precisión.

Pero es en este último punto donde los robots todavía no son capaces de responder con grandes capacidades y prestaciones. Si bien es cierto, el robot Kuka posee una repetitividad de posición de $\pm 0.15\text{mm}$. Esta repetitividad no tiene por qué ir ligada con la precisión del robot. Sino que se refiere a la capacidad de ir una y otra vez al mismo punto cuando se obliga al robot a ir a unas coordenadas concretas, pero esto no quiere decir que el robot llegue a dichas coordenadas, sino que repite la misma precisión con $\pm 0.15\text{mm}$.

Para dotar de precisión a este robot, el sistema multicámara irá corrigiendo la posición del robot un número determinado de veces hasta entrar en precisiones que el robot no es capaz de llegar por sí mismo.

- *Primeros pasos con el robot*

En esta primera etapa de integración del sistema con el robot se profundizó en conocer bien la cinemática del robot, definir los rangos de trabajo en la mesa óptica disponible e ir familiarizándose con el entorno de trabajo del que disponía el robot.

a) Procedimiento

En un primer momento se trabajó en conocer las posibilidades que ofrecía el robot facilitado. Se dieron los primeros pasos moviendo el robot en modo manual y poco a poco se fue estudiando el entorno de trabajo del que disponía el brazo robótico, los sistemas de referencia disponibles, maneras de calibrar la herramienta y cómo programar las seguridades pertinentes.

b) Resultados

Los movimientos manuales del robot se pueden ejecutar respecto de la brida del robot o respecto a las herramientas (TCP) que se hayan definido (utilizando el software nativo del propio robot). Además, permite realizar movimientos seleccionando el eje individual que se quiere mover o simplemente moverse respecto el sistema de coordenadas mundo; siendo esta última la manera más intuitiva de moverse por el espacio de trabajo.

Para calibrar la herramienta que se quiera utilizar existen dos maneras de hacerlo. La primera consiste en utilizar el programa manual del que dispone el robot y que consiste en acercar la herramienta del robot a un punto físico desde diferentes orientaciones y posiciones. Con ello el robot es capaz de calcular los parámetros internos necesarios para conocer la posición exacta del robot.

La segunda manera disponible consiste en escribir un fichero de configuración con los siguientes valores calculados:

- Distancias en X, Y y Z respecto de la brida del robot.
- Orientaciones en α , β , γ respecto de la brida del robot.
- Momentos de inercia, pesos y distancias laterales de seguridad.

Se optó por esta última manera de configurar la herramienta del robot. Se calcularon dichos valores y se introdujeron en el archivo de configuración, encontrando una limitación en el número de decimales que deja introducir el sistema de control del robot.

Para definir los rangos de trabajo se acotaron dos zonas de trabajo:

- La zona hábil de movimientos del robot. Esta zona se consiguió moviendo el eje 1 (correspondiente a los movimientos laterales del robot) que define una parábola en el eje Y. Haciendo variaciones de la orientación de la herramienta y de la altura de trabajo se acabó definiendo la zona de trabajo útil del robot.
- La zona de enfoque de las cámaras del sistema. Para definirla se fijó por software el número de marcadores necesarios para validar un punto y cuántas cámaras tienen que ver al menos ese punto. Esta decisión afecta a la distancia a la que el sistema empezará a referenciar marcadores. Además lateralmente hay que definir cuál es el ángulo de visión de las cámaras.

Tal como se puede apreciar en la imagen (Figura 19) se ven en verde las parábolas que permite hacer el eje 1 dependiendo de la orientación y altura de la herramienta del robot y en rojo las zonas donde el sistema multicámara tiene un enfoque y resolución óptima.

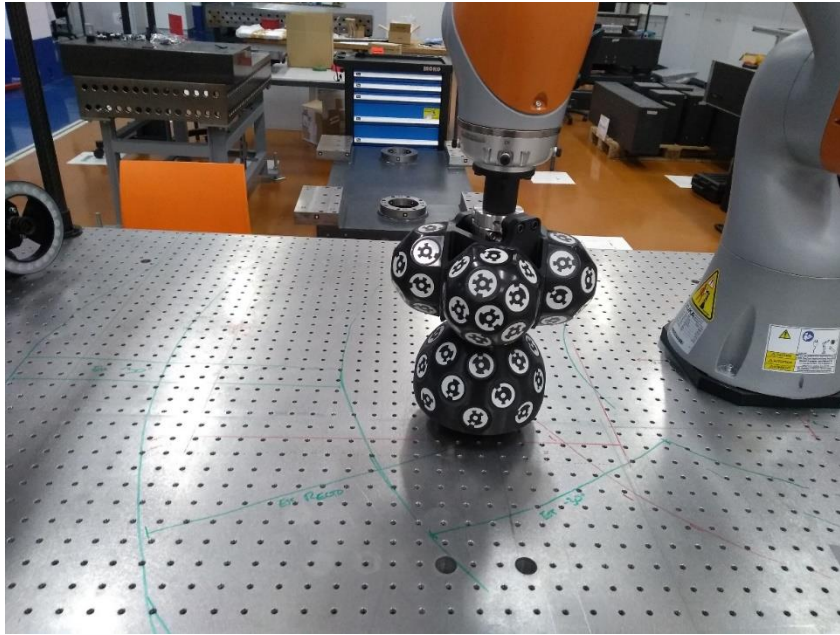


Figura 19. Zonas de trabajo dibujadas con rotulador

- *Implementación de la comunicación entre sistema multicámara y controlador del robot*

- a) *Procedimiento*

El robot utilizado permite la programación de comunicaciones TCP/IP que nos facilita la comunicación entre el robot y el sistema multicámara. Se decidió programar un servidor en el software del multicámara y que el robot abriera una comunicación TCP en el momento que necesitara ser corregido para recibir ese nuevo movimiento incremental.

- b) *Resultados*

Dado que el robot es el que controla cuándo acaba su movimiento, se ideó una comunicación que sería abierta por él y recibida por el sistema multicámara. El sistema se encargaría de realizar una medida, ver la distancia relativa que le separa al brazo robótico de su objetivo y pasarle dicha información al brazo

robótico de manera que el robot corrija su posición y vuelva a preguntar al sistema por otra corrección hasta entrar en la holgura definida.

A continuación (Figura 20) se muestra un esquema y un diagrama de flujo de la comunicación entre el sistema y el brazo robótico.

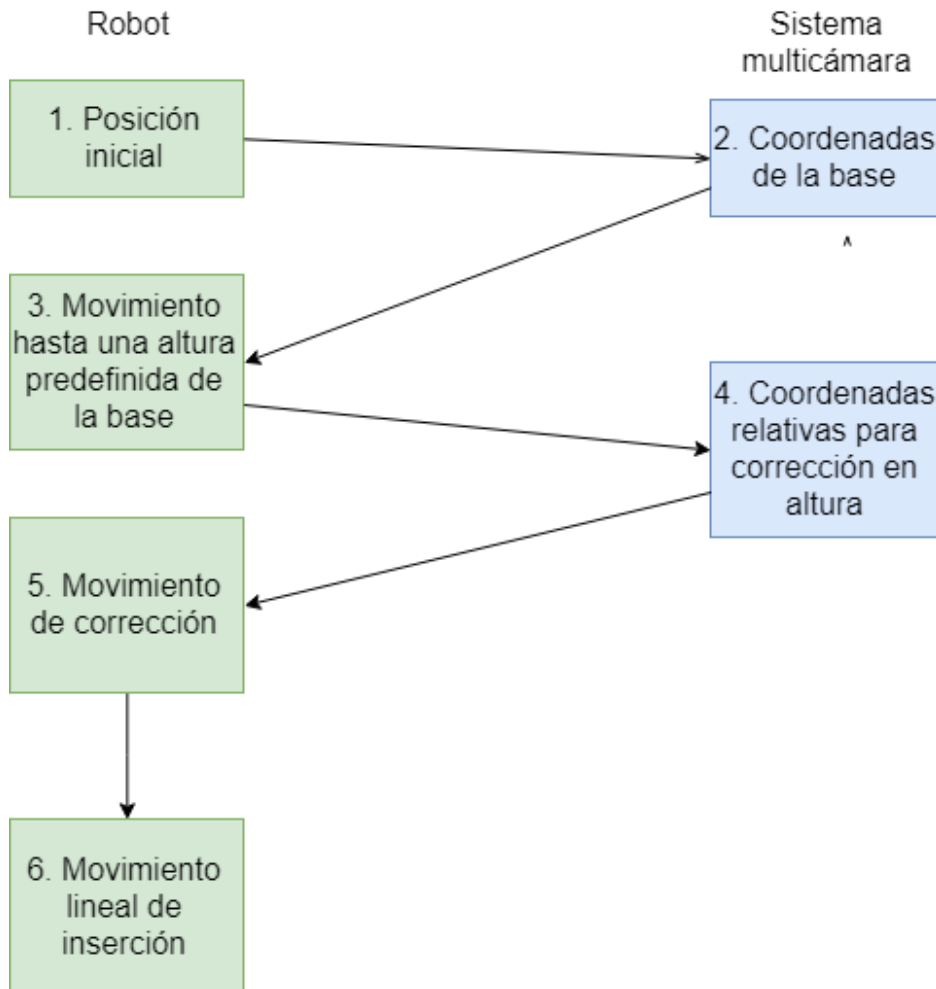


Figura 20. Diagrama de flujo de la comunicación

Inicialmente el robot se mueve a una posición de origen conocida de antemano. Esta posición se sabe que está fuera del campo de visión de las cámaras.

Hace una petición al sistema multicámara donde se le devuelven entre otros datos las coordenadas donde se encuentra la base a la que acercaremos el brazo robótico.

El robot, en un movimiento absoluto se aproxima a la base aplicando una altura sobre el eje Z del sistema de coordenadas del objeto. Con esta transformación, conseguimos que el brazo robótico se coloque a una altura Z del objeto a pesar de que el mismo esté con cierta inclinación.

Cuando alcance esa posición, el robot habrá llegado con la precisión que le ofrece su propia cinemática.

En este punto, el robot vuelve a hacer una petición al sistema multicámara (Paso 3 y 4 en el diagrama de la Figura 20) y el sistema le corrige la posición de manera relativa. El robot aplicará esa corrección. Se le habrán definido al robot el número máximo de iteraciones y la tolerancia mínima para aplicar dichas correcciones. En cuanto la condición de tolerancia se cumpla, el robot comenzará a descender en el eje Z la altura establecida y la herramienta del robot se irá insertando en el objeto definido como base.

En el caso de no conseguir converger, el robot volverá a la posición original indicando por pantalla que no puede realizar dicho movimiento.

- *Implementación de las correcciones del robot*

- a) *Procedimiento*

Mediante una calibración previa, el sistema de “coordenadas mundo” relacionado con el robot es conocido. Por lo que el sistema es capaz de devolver distancias y giros absolutos capaces de ser ejecutados por el robot.

Además, una vez llegada a una posición denominada “de aproximación”, el sistema debería de ser capaz de responder con correcciones de posición de manera relativa o incremental para que el robot se corrija a la posición en la que debería estar (y de hecho, cree que está).

Para todo esto era necesario conocer bien los diferentes sistemas de coordenadas que tienen lugar y las matrices de roto-traslación necesarias para realizar esos cambios de posición.

b) Resultados

Después de trabajar en el modo manual del robot, se confirmó la manera de trabajar del robot, tal y como se describe a continuación:

Por cada posición y orientación que se le pasaba, el robot primero trasladaba en X, luego en Y y más tarde en Z. Luego aplicaba los giros primero en el eje X, luego en el eje Y y finalmente en el eje Z. Además, su convención de giros era dextrógira (comúnmente llamada la regla de la mano derecha).

Cabe resaltar que el robot lo ejecutaba en un solo movimiento, pero su manera interna de trabajar reflejaba el comportamiento anteriormente explicado.

Esta manera de trabajar era independiente del sistema de coordenadas aplicado (mundo, brida o herramienta).

Finalmente se pensó que la manera más sencilla de pasar las coordenadas al controlador del robot era en el “sistema de coordenadas mundo” del robot. Esta manera facilitaba la secuencia de traslaciones y giros a comandar desde el sistema multicámara. Pues si se elegía el sistema de coordenadas respecto a la brida y a la herramienta, sus giros y traslaciones harían que hubiera que aplicar una nueva matriz de retro-traslación respecto de su nuevo origen (posición de la herramienta en cada medida) añadiendo algo de incertidumbre al sistema.

Una de las ventajas que ofrece el robot Kuka, es la posibilidad de realizar movimientos absolutos o incrementales respecto de la herramienta pero utilizando coordenadas mundo. Es decir, toda esa matemática de cambios de sistemas de coordenadas es gestionada internamente por el robot y nos facilita su resolución.

Una vez entendida la mecánica y el procedimiento para pasar los datos al robot, se trabajó en programar las funciones de la librería de fotogrametría (propiedad de Ideko) necesarias para que las medidas resultantes se pasaran de manera correcta.

Se desarrollaron dos funciones que calculaban los datos expuestos a continuación:

- Posición absoluta del objeto base sobre la mesa óptica. Con esta función se calculaba la posición, giro e inclinación del objeto base respecto de las coordenadas mundo del robot. Se calculaban siempre en coordenadas absolutas. Es decir, el resultado es la matriz de roto-traslación de la posición del objeto respecto al sistema de coordenadas del robot.
- Posición relativa de la herramienta del robot respecto del objeto base. Esta función devolvía la distancia y giros relativos necesarios para llegar a encajar la pieza macho en el objeto base. Es decir, se trataba del error de posicionamiento que tenía la herramienta de robot respecto del objeto base.

Una vez desarrolladas las funciones de corrección, se pudo implementar un sistema de control que corregía la posición de la herramienta durante un número determinado de veces a una cota en altura conocida, y cuando el robot se encontraba dentro de la tolerancia, se movía esa cota en un movimiento lineal para insertar el macho en el objeto base.

En la Figura 21 se puede observar cómo el objeto base se ha colocado en el espacio de trabajo de manera inclinada y con cierto giro. El robot se encuentra en una cota superior (respecto al *frame* del objeto base) y ha realizado todas las correcciones necesarias para entrar en tolerancia.

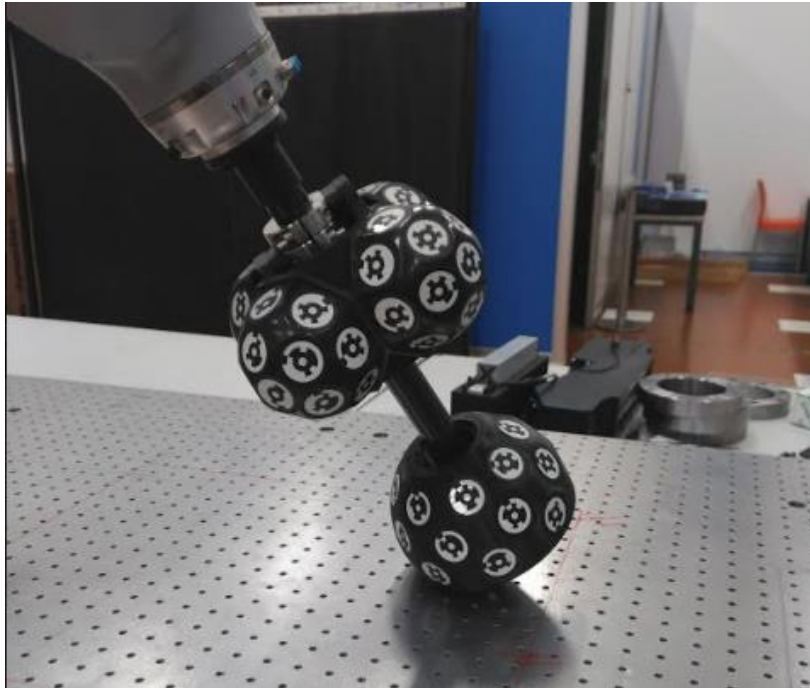


Figura 21. Robot en posición de inserción después de iterar

- *Resultados de medidas y repetitividad del sistema*

- a) *Procedimiento*

Una vez implementado el sistema y testeado su correcto funcionamiento, se realizaron diferentes pruebas moviendo la pieza base a lo largo de la mesa para estudiar la repetitividad de sistema y del robot.

La primera parte de la prueba consistía en conocer cuánto oscilaba la propia medida del sistema multicámara. Para ello se colocó la pieza base en lugares determinados y se realizaron 10 medidas en cada uno.

La segunda parte de la prueba se centró en evaluar la repetitividad del posicionamiento del robot dentro de los parámetros de tolerancia establecidos. Estas pruebas se realizaron dejando el objeto base en un punto fijo y ver cuántas iteraciones necesita el robot para entrar en convergencia

b) Resultados de la repetitividad y convergencia

Las siguientes tablas resumen las coordenadas del espacio de trabajo y el número de iteraciones necesarias para converger en tolerancias.

Tabla 6 - Tolerancias en traslaciones: **0.07 mm** y en giros de **0.0005 radianes** con el objeto base sin **ninguna inclinación**.

<i>X (mm)</i>	<i>Y (mm)</i>	<i>Nº Iteraciones (media)</i>
639.63	0.6	2
543.96	-163.83	3
696.2	-156.02	3
713.73	31.13	4
722.14	265.69	2
518.54	253.05	3
374.24	235.14	2

Tabla 7 - Tolerancias en traslaciones: **0.07 mm** y en giros de **0.0005 radianes** con el objeto base en **inclinación media**.

<i>X (mm)</i>	<i>Y (mm)</i>	<i>Nº Iteraciones (media)</i>
639.63	0.6	13
543.96	-163.83	6
696.2	-156.02	9
713.73	31.13	8
722.14	265.69	No converge
518.54	253.05	6
374.24	235.14	6

Tabla 8 - Tolerancias en traslaciones: **0.07 mm** y en giros de **0.0005 radianes** con el objeto base en **inclinación alta**.

<i>X (mm)</i>	<i>Y (mm)</i>	<i>Nº Iteraciones (media)</i>
639.63	0.6	3
543.96	-163.83	3
696.2	-156.02	3
713.73	31.13	4
722.14	265.69	No converge
518.54	253.05	7
374.24	235.14	13

Tabla 9 - Tolerancias en traslaciones: **0.07 mm**, menos en Z ($z \leq 0.10\text{mm}$) y en giros de **0.0005 radianes** con el objeto base en **sin inclinación**.

<i>X (mm)</i>	<i>Y (mm)</i>	<i>Nº Iteraciones (media)</i>
639.63	0.6	3
543.96	-163.83	2
696.2	-156.02	3
713.73	31.13	4
722.14	265.69	2
518.54	253.05	4
374.24	235.14	5

Tabla 10 - Tolerancias en traslaciones: **0.07 mm**, menos en Z ($z \leq 0.10\text{mm}$) y en giros de **0.0005 radianes** con el objeto base en **inclinación media**.

<i>X (mm)</i>	<i>Y (mm)</i>	<i>Nº Iteraciones (media)</i>
639.63	0.6	3
543.96	-163.83	5
696.2	-156.02	3
713.73	31.13	5
722.14	265.69	5
518.54	253.05	4
374.24	235.14	3

Tabla 11 - Tolerancias en traslaciones: **0.07 mm**, menos en Z ($z \leq 0.10\text{mm}$) y en giros de **0.0005 radianes** con el objeto base en **inclinación alta**.

<i>X (mm)</i>	<i>Y (mm)</i>	<i>Nº Iteraciones (media)</i>
639.63	0.6	5
543.96	-163.83	4
696.2	-156.02	3
713.73	31.13	5
722.14	265.69	5
518.54	253.05	4
374.24	235.14	5

De esta primera tanda de resultados, se observa cómo el giro afecta notablemente al número de iteraciones a realizar en el proceso para converger. Pero tal y como se pensaba a priori, los giros no representan un nivel de complejidad diferente gradual. Sino que las inclinaciones y giros que se puedan dar al objeto base se verán fuertemente ligados a la posición del objeto base en la mesa.

Es decir, el mayor problema para la convergencia de los movimientos viene dada por la propia cinemática del robot y de cuántas articulaciones haya que interpolar

a la vez para poder realizar los movimientos lineales relativos que suponen las correcciones.

Es por ello que se observa cómo para posiciones del objeto sobre la mesa es más sencillo que el robot converja si el objeto base tiene cierto giro e inclinación. Estos casos se dieron más en las zonas limítrofes del espacio de trabajo.

Además, se exigía al sistema una convergencia en 0.07 mm para entrar en tolerancia (recordemos que la tolerancia entre hembra y macho era de 0.30 mm en diámetro). Dicha tolerancia se modificó en la segunda batería de pruebas para dejar que en el eje Z (correspondiente a la cota superior que se le da al robot antes de insertar el macho) tuviera una tolerancia mayor que luego se corregiría en el movimiento de inserción. Como se pueden observar en las tablas los resultados mejoraron rebajando el número de iteraciones necesarias.

En los resultados anteriores se han mostrado las medias de iteraciones realizadas para llegar a converger. A continuación se va a profundizar en la repetitividad de posicionamiento del robot para llegar a converger en la misma posición del objeto base. Para ello se fue moviendo el objeto base a cuatro posiciones conocidas (correspondiendo a las aristas del espacio de trabajo).

Tabla 12 - Tolerancias en traslaciones: **0.07 mm**, menos en Z ($z \leq 0.10\text{mm}$) y en giros de **0.0005 radianes** con el objeto base en **sin inclinación**.

<i>X (mm)</i>	<i>Y (mm)</i>	<i>Nº Iteraciones</i>
724.38	-157.52	3, 2, 9, 3
387.32	-166.15	5, 6, 4, 3
363.33	156.46	4, 3, 3, 4
713.73	31.13	4, 6, 6, 5

Tabla 13 - Tolerancias en traslaciones: **0.07 mm**, menos en Z ($z \leq 0.10\text{mm}$) y en giros de **0.0005 radianes** con el objeto base en **inclinación media**.

<i>X (mm)</i>	<i>Y (mm)</i>	<i>Nº Iteraciones</i>
724.38	-157.52	2, N.C., 3, N.C.
387.32	-166.15	5, 5, 9, 7
363.33	156.46	4, 3, 2, 7
713.73	31.13	12, 7, 4, 5

Tabla 14 - Tolerancias en traslaciones: **0.07 mm**, menos en Z ($z \leq 0.10\text{mm}$) y en giros de **0.0005 radianes** con el objeto base en **inclinación alta**.

<i>X (mm)</i>	<i>Y (mm)</i>	<i>Nº Iteraciones</i>
724.38	-157.52	N.C., 5, 5, N.C.
387.32	-166.15	3, 5, 5, 4
363.33	156.46	4, 3, 5, 11
713.73	31.13	7, 8, 6, 5

Con esta batería de datos lo que se observa es la baja repetitividad en algunos casos respecto del número de convergencias. Estos datos arrojan resultados ya esperados pues en las zonas limítrofes del espacio de trabajo se ve cómo el robot realiza movimientos bruscos y con poca precisión (observables a ojo). El posicionamiento inicial del robot a la cota superior al objeto base no era repetitivo en varias decenas de milímetros por lo que la convergencia final dependía en exceso de ese movimiento inicial íntegramente ligado a la cinemática del robot.

a) Resultados de las medidas

Además de la cinemática del robot, un factor que afecta a conseguir o no la convergencia es la repetitividad en la medida realizada.

Cada vez que el sistema multicámara lanza una foto, reconoce una serie de marcadores codificados. Si realizamos la misma captura varias veces seguidas sin mover el objeto base de esa localización, podremos observar los resultados de repetitividad del sistema de medida.

A continuación se muestran los resultados de esa prueba encontrando un marcador codificado durante diez medidas.

Tabla 15 - Resultados de la medida continuada sobre un mismo punto durante 10 veces.

<i>X (mm)</i>	<i>Y (mm)</i>	<i>Z (mm)</i>
152.971	-39.057	-160.885
152.964	-39.048	-160.861
152.966	-39.034	-160.887
152.981	-39.047	-160.899
152.97	-39.043	-160.897
152.978	-39.042	-160.875
152.955	-39.054	-160.895
152.967	-39.051	-160.890
152.976	-39.048	-160.869
152.977	-39.053	-160.886

De la tabla se extraen que los rangos por cada eje son bastante similares y están en el orden de las centésimas (0.02mm de rango máximo).

5. Conclusiones y líneas futuras

Una vez concluida la fase de desarrollo e implementación del proyecto, se procede a analizar los resultados de manera global y a enumerar las conclusiones extraídas del proyecto.

Primeramente concluiremos que el proyecto de integración se ha cerrado satisfactoriamente y que el robot ha conseguido mejorar su posicionamiento en unos rangos que por su propia iniciativa es incapaz de conseguir. Se puede observar cómo integrando la librería de fotogrametría de Ideko, el robot consigue mejorar su posicionamiento en al menos un orden de magnitud y llegan a las centésimas de milímetro.

A lo largo del proyecto se han podido ir visionando los siguientes pasos e hitos que podría plantearse en el desarrollo del sistema multicámara. A continuación se listan los más representativos.

Una vez terminada la integración, es tiempo de volver a realizar un estudio de mercado sobre las cámaras e iluminación. Han aparecido demasiados problemas relacionados con la adquisición de la imagen y este problema tiene visos de seguir escalando en complejidad según el sistema vaya adoptando nuevas cámaras. En cuanto a la iluminación, sería un buen momento para estudiar cómo poder iluminar toda la escena sin requerir que cada cámara contenga su propia iluminación.

Un paso interesante consistiría en realizar un estudio profundo de las distintas posibilidades de marcadores y fiduciales disponibles en el mercado. Según lo leído en diferentes artículos, la medida con marcadores de otros tipos podría mejorar el rendimiento del sistema.

Por último, se estima que el volumen de medida debería de incrementarse y poder abarcar piezas más grandes que el metro cúbico que se puso como referencia al comienzo del proyecto.

6. Apéndices

6.1 Tecnologías utilizadas

- Halcon (MVTEC)

Halcon es una aplicación desarrollada por la compañía alemana MVTEC. Actualmente es un entorno ampliamente utilizado en el ámbito de la visión artificial.

Tiene una interfaz muy intuitiva y programar aplicaciones es sencillo gracias a su gran documentación y multitud de ejemplos. Finalmente, su código se puede ejecutar directamente desde su entorno de trabajo o bien se puede exportar el código a los lenguajes de programación más extendidos.

Enlace del producto: <http://www.mvtec.com/products/halcon/>

- OpenCV



Se trata de una librería libre, gratuita y multiplataforma que en un primer momento desarrolló Intel. Actualmente es el proyecto más estable en el ámbito del desarrollo de aplicación de visión artificial. Su numerosa comunidad, extensa documentación y facilidad de uso han hecho que actualmente goce de mucha popularidad.

Enlace del proyecto: <https://opencv.org/>

○ DirectShow

Es un framework multimedia creado por Microsoft para facilitar las operaciones con ficheros multimedia. Entre sus aplicaciones están las operaciones de captura de imágenes con webcams compatibles.

Se prevee que Windows vaya abandonando el uso de DirectShow en sus próximos proyectos por lo que su uso irá bajando de manera gradual.

○ QT Project



Se trata de un entorno de trabajo (framework) de desarrollo de software utilizado comúnmente para el desarrollo de interfaces gráficas de usuario (GUI). Uno de los puntos fuertes de esta serie de librerías es que se trata de un framework multiplataforma capaz de ser compilado tanto en Windows, MAC o sistemas Linux.

Además de utilizar dicho proyecto para las interfaces gráficas, se han utilizado otras librerías como la correspondiente a comunicaciones TCP/IP y comunicaciones por puerto serie.

Enlace del proyecto: <https://www.qt.io/>

○ ImagingSource SDK

La empresa, distribuidora de cámaras industriales, facilita una serie de funciones que trabajan como una capa superior a DirectShow. Su uso es más sencillo que la anterior librería y la propia empresa provee de multitud de ejemplos para su uso.

6.2 Brazo robótico

○ Modelo Kuka LBR iiwa 14 R820

Por cortesía de Kuka, el robot modelo LBR iiwa 14 R820 fue cedido a Ideko a través de una colaboración con la empresa Aldakin.

Dicho robot es un robot de los llamados colaborativos, capaz de coexistir con un humano en una cierta zona de trabajo. Dotado con sensores de fuerza y presencia, tiene la capacidad de bloquearse ante el mínimo contacto o salirse de unas determinadas zonas de trabajo llamadas “vallas virtuales”.

A continuación se muestran las características técnicas del robot extraídas de su hoja de producto [25]:

<i>Especificaciones</i>	<i>LBR iiwa 14 R820</i>
<i>Categoría</i>	Pequeño robot
<i>Carga</i>	14 Kg
<i>Max. Alcance</i>	820 mm
<i>Nº ejes</i>	7
<i>Repetitividad</i>	$\pm 0.15mm$
<i>Peso</i>	30 kg
<i>Unidad de control</i>	Sunrise Cabinet
<i>Tipo de protección</i>	IP 54

7. Bibliografía y referencias

1. Faro (2018). Soluciones y productos. Disponible on-line: <https://www.faro.com/es-es/> (accedido Mayo 2018)
2. Leica (2018). Soluciones y productos. Disponible on-line: <https://leica-geosystems.com> (accedido Mayo 2018)
3. Kreon (2018) Disponible on-line: <https://kreon3d.com> (accedido Mayo 2018)
4. Steinbichler (2018) Disponible on-line <http://optotechnik.zeiss.com/> (accedido Mayo 2018)
5. Zeiss (2018) Disponible on-line <https://www.zeiss.com/> (accedido Mayo 2018)
6. Nikon K Series (2018) Disponible on-line <https://www.nikonmetrology.com/> (accedido Mayo 2018)
7. Aicon MoveInspect (2018) Disponible on-line <http://www.aicon3d.com/> (accedido Mayo 2018)
8. Creaform (2018) Disponible on-line <http://www.creaform3d.com/> (accedido Mayo 2018)
9. Hartley, R., Zisserman, A. (2006). Multiple View Geometry en Computer Vision. Cambridge University Press, Cambridge.
10. Hexagon (2018) Disponible on-line <http://www.hexagonmi.com/> (accedido Mayo 2018)
11. Optitrack (2018) Disponible on-line <https://www.optitrack.com/> (accedido Mayo 2018)
12. Pajares, G., de la Cruz (2007). Visión por Computador: imágenes digitales y aplicaciones. RA-MA, Madrid.
13. Brown, D.C. (1971) Close-range camera calibration.
14. Aguirre de Mata, J. (2016) Calibración geométrica de cámaras no métricas. Estudio de metodologías y modelos matemáticos de distorsión.
15. Mcglone, Chris. (2013). Manual of photogrammetry. 79.
16. Luhmann, Thomas. (2010). Close range photogrammetry for industrial applications. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing. 65. 558-569. 10.1016/j.isprsjprs.2010.06.003. (2010).
17. M. Mikhail, E & S. Bethel, J & Mcglone, Chris. (2001). Introduction to Modern Photogrammetry. John Wiley & Sons. (2001).
18. Robotstudio (2018) Disponible on-line <http://www.robotstudio.com/> (accedido Mayo 2018)

19. Blender (2018) Disponible on-line <https://www.blender.org/> (accedido Junio 2018).
20. ImagingSource AFU420 (2018) Disponible on-line <https://www.theimagingsource.com/products/autofocus-cameras/usb-3.0-color/dfkafu420l62/> (accedido Mayo 2018)
21. EdmundOptics (2018) Disponible on-line <http://www.edmundoptics.es/> (accedido Mayo 2018)
22. OpenCV (2018) Disponible on-line <https://opencv.org/> (accedido Junio 2018).
23. Visup3D (2018) Disponible on-line <https://www.ideko.es/es/oferta-industria/proyectos/visup-3d> (accedido Mayo 2018)
24. IC Capture (2018) Disponible on-line <https://www.theimagingsource.com/support/downloads-for-windows/end-user-software/iccapture/> (accedido Mayo 2018)
25. Kuka (2018) Disponible on-line <https://www.kuka.com/es-es/productos-servicios/sistemas-de-robot/robot-industrial/lbr-iiwa#> (accedido junio 2018).