



Trabajo de Fin de Grado

Manipulador robótico con visión artificial

Alberto López Germán

Grado en Ingeniería Electrónica Industrial y Automática

Tutor: Pere Martí Puig
Vic, Septiembre de 2014

INDICE

Resumen	6
Abstract	7
1. Introducción	8
1.1. Objeto	9
1.2. Alcance	9
1.3. Motivaciones	10
2. Estado del arte	11
2.1. Antecedentes	11
2.1.1. SkyCam	12
2.1.2. IPAnema	13
2.1.3. CoGiRo	14
2.1.4. ReelAX 8	15
2.2. Retos tecnológicos	16
2.2.1. Robótica con cables	16
2.2.2. Visión artificial	17
2.2.3. Problemática en cámaras	19
2.2.4. Calibración de la cámara	22
2.2.5. Iluminación artificial	26
3. Metodología de trabajo	29
3.1. Características principales	29
3.1.1. Vista general	30
3.2. Diagrama de bloques del hardware	31
3.3. Funcionamiento	31
3.3.1. Control del sistema	36
3.3.2. Cinemática del robot	38
3.3.3. Control de velocidad	40
3.3.4. Secuencia de movimientos	45
3.4. Estructuras	46
3.4.1. Estructura central	46
3.4.2. Estructuras complementarias	47
3.4.3. Componentes	49
3.5. Electrónica de control	49
3.5.1. Vista general	50
3.5.2. Características de la electrónica	51
3.5.3. Diagrama de bloques	52
3.5.4. Componentes	52
3.5.5. Firmware	53
3.6. Software de visión artificial	55
3.6.1. Vista general	55
3.6.2. Características del software	56

3.6.3.	Diagrama de flujo	57
4.	Resultados obtenidos	58
4.1.	Iluminación y zona de trabajo	58
4.2.	Procesado digital de la imagen	62
4.2.1.	Cámara de visión artificial	62
4.2.2.	Detección del color	63
4.2.3.	Detección de posición	65
4.2.4.	Identificación de formas	66
4.2.5.	Detección de la orientación	69
4.3.	Diseño de electrónica de potencia	70
5.	Discusión de los resultados	71
5.1.	Mejoras posibles	71
5.1.1.	Posicionamiento por visión	71
5.1.2.	Control de tensión en cables	72
5.1.3.	Orientación del objeto	72
5.1.4.	Posicionamiento del sistema (Zero)	73
6.	Conclusiones	75
6.1.	Ventajas e inconvenientes	75
6.1.1.	Ventajas	75
6.1.2.	Inconvenientes	76
6.2.	Estudio de mercado	76
6.3.	Objetivos alcanzados	78
6.4.	Valoración personal	79
7.	Documentos anexos	80
7.1.	Manual de usuario de la aplicación software	80
7.2.	Código fuente	80
7.3.	Planos	80
7.4.	Lista de materiales	80
7.5.	Presupuesto	80
7.6.	Anexos	80
8.	Galería de fotografías	81
9.	Bibliografía	88

LISTADO DE FIGURAS

Figura 2.1.1	Imágenes de la SkyCam	12
Figura 2.1.2	Imagen del IPAnema	13
Figura 2.1.3	Simulación de robot de cables en una factoría aeronáutica	13
Figura 2.1.4	Robot CoGiRo trabajando	14
Figura 2.1.5	Robot ReelAx 8 en la Escuela superior de Bellas Artes de Montpellier	15
Figura 2.2.1	Partes fundamentales de un robot paralelo convencional	16
Figura 2.2.2	Esquema de robot de cable paralelo	17
Figura 2.2.3	Representación matricial de una imagen a color	18
Figura 2.2.4	Problemática de medida	19
Figura 2.2.5	Sistemas de coordenadas implicados	19
Figura 2.2.6	Posición del centro de la imagen	20
Figura 2.2.7	Parámetros de visión artificial (distancia focal)	20
Figura 2.2.8	Ejemplo de resolución de nuestra imagen	20
Figura 2.2.9	Factor Skew en una imagen	21
Figura 2.2.10	Distorsiones	22
Figura 2.2.11	Modelo PIN-HOLE	22
Figura 2.2.12	Descripción e identificación de los parámetros	23
Figura 2.2.13	Patrón de calibración	24
Figura 2.2.14	Pasos para la obtención de los parámetros de calibración	25
Figura 3.1.1	Identificación de componentes	30
Figura 3.2.1	Diagrama de bloques principal	31
Figura 3.3.1	Espacio de trabajo tridimensional accesible por el robot	32
Figura 3.3.2	Diagrama de movimientos del robot	32
Figura 3.3.3	Piezas a identificar	33
Figura 3.3.4	Cotas del carrete fabricado para el arrollamiento de cable	34
Figura 3.3.5	Vista básica de un robot de 4 cables	38
Figura 3.3.6	Estudio cinemático del robot con la herramienta MATLAB	40
Figura 3.3.7	Ejemplo diagrama de flujo de un control PID	41
Figura 3.3.8	Representación gráfica de una traslación en un espacio 3D	42
Figura 3.3.9	Ejemplo de traslación de un punto a otro en el espacio de trabajo	43
Figura 3.3.10	Representación 3D de una traslación	44
Figura 3.3.11	Transferencia de datos	45
Figura 3.3.12	Posible secuencia de movimientos	46
Figura 3.4.1	Superficie general y zona de trabajo	47
Figura 3.4.2	Estructura de fijación de webcam principal	48
Figura 3.4.3	Foco en estructura de webcam	48
Figura 3.4.4	Estructura de una columna	49
Figura 3.4.5	Fijación de un foco y la webcam auxiliar	49
Figura 3.5.1	Vista general de la electrónica de control	50
Figura 3.5.2	Diagrama de bloques del controlador electrónico	52
Figura 3.5.3	Diagrama de flujo del firmware	54
Figura 3.6.1	Imagen de la ventana principal de la aplicación	55
Figura 3.6.2	Diagrama de flujo del software	57
Figura 4.1.1	Desarrollo electrónico para mejora de iluminación	61
Figura 4.2.1	Resultado de la detección de color Rojo/Amarillo	64
Figura 4.2.2	Resultado de la detección de posición de las piezas	66
Figura 4.2.3	Resultado de la identificación de formas	69
Figura 4.2.4	Forma teórica de detección de ángulos	69
Figura 4.3.1	Vista del diseño del controlador de motores PaP	70
Figura 5.1.1	Posicionamiento con 2 cámaras	71
Figura 5.1.2	Célula de carga en columna	73
Figura 5.1.3	Cuarto grado de libertad del robot	73
Figura 5.1.4	Funcionamiento de un servo motor de aeromodelismo	74
Figura 5.1.5	Tracking del efector mediante visión artificial en las 2 webcam	75
Figura 5.1.6	Recreación de posicionamiento mediante finales de carrera	75
Figura 5.1.7	Principio de funcionamiento de un encoder absoluto	76
Figura 6.2.1	Ejemplo de proceso de producción con visión artificial	78
Figura 6.2.2	Simulación de instalación de robot de cables	78

LISTADO DE TABLAS

Tabla 1	Tabla de resultados de calibración (parámetros extrínsecos)	25
Tabla 2	Tabla de resultados de calibración (parámetros intrínsecos)	26
Tabla 3	Tipos de iluminación más comunes	27
Tabla 4	Tecnologías de iluminación más utilizadas	28
Tabla 5	Características principales del sistema	29
Tabla 6	Componentes del sistema	30
Tabla 7	Características del efector final	33
Tabla 8	Características del motor seleccionado	34
Tabla 9	Tabla de la verdad para movimientos del efector	35
Tabla 10	Características del material de la estructura	42
Tabla 11	Componentes de la caja de control	46
Tabla 12	Características principales de la electrónica de control	47
Tabla 13	Características principales del μ controlador	48
Tabla 14	Características principales del driver de motores PaP	48
Tabla 15	Características principales de la aplicación de visión artificial	51
Tabla 16	Resumen de algunas pruebas de iluminación realizadas	56
Tabla 17	Características del foco	56
Tabla 18	Características del material de la zona de trabajo	57
Tabla 19	Características de la cámara de visión artificial	58

GLOSARIO

Término	Definición
Efector	En robótica, un efector final es el dispositivo en el extremo de un brazo robótico, diseñado para interactuar con el medio.
Grados de libertad	Número de movimientos básicos del terminal del robot en el espacio de trabajo.
PDI	Procesado Digital de Imagen
PIN-HOLE	Método de calibración de cámaras digitales.
PID	Tipo de control Proporcional, Integral, Derivativo
White Paper	Es un documento o guía con el objetivo de ayudar a los lectores a comprender un tema, resolver o afrontar un problema.
PaP	Siglas para nombrar un motor Paso a Paso
Front-end	En diseño de software el <i>front-end</i> es la parte de la aplicación que interactúa con los usuarios y de recoger los datos de entrada.

DOCUMENTOS DE REFERENCIA USADOS EN LA MEMORIA

- 1. Manual de usuario:** Documento descriptivo en el cual se explica la forma de proceder para el manejo del CableBot. Se explica el manejo del interfaz de usuario desarrollado con MATLAB y el control manual para su funcionamiento.
- 2. Código fuente:** Documento en el cual se explican de forma detallada los códigos fuente implementados en este proyecto. Consta de dos partes, código fuente de la aplicación de usuario y código fuente del firmware del controlador hardware.
- 3. Planos:** Colección de planos de fabricación y montaje realizado para el diseño previo a la fabricación de la maqueta.
- 4. Lista de materiales:** Documento en el cual se enumeran y detallan todos los componentes usados en el montaje del *CableBot*.
- 5. Presupuesto:** Documento en el cual se detalla el presupuesto de los materiales empleados en el diseño, fabricación y puesta a punto del sistema completo
- 6. Anexos** Documento en el cual se encuentran las hojas de características de todos los componentes usados en el montaje del sistema.

Resumen de Trabajo Final de Grado
Grado en Ingeniería Electrónica Industrial y Automática
Manipulador robótico con visión artificial

Resumen

En los tiempos que corren la **robótica** forma uno de los pilares más importantes en la industria y una gran noticia para los ingenieros es la referente a las ventas de estos, ya que en 2013, unos 179.000 robots industriales se vendieron en todo el mundo, de nuevo un máximo histórico y un 12% más que en 2012 según datos de la IFR (*International Federation of Robotics*).

Junto a esta noticia, la **robótica colaborativa** entra en juego en el momento que los robots y los seres humanos deben compartir el lugar de trabajo sin que nos veamos excluidos por las máquinas, por lo tanto lo que se intenta es que los robots mejoren la calidad del trabajo al hacerse cargo de los trabajos peligrosos, tediosos y sucios que no son posibles o seguros para los seres humanos.

Otro concepto muy importante y directamente relacionado con lo anterior que está muy en boga y se escucha desde hace relativamente poco tiempo es el de la fábrica del futuro o "**Factory Of The Future**" la cual intenta que los operarios y los robots encuentren la sintonía en el entorno laboral y que los robots se consideren como maquinaria colaborativa y no como sustitutiva, considerándose como uno de los grandes nichos productivos en plena expansión.

Dejando a un lado estos conceptos técnicos que nunca debemos olvidar si nuestra carrera profesional va enfocada en este ámbito industrial, el tema central de este proyecto está basado, como no podía ser de otro modo, en la **robótica**, que junto con la **visión artificial**, el resultado de esta fusión, ha dado un manipulador robótico al que se le ha dotado de cierta "*inteligencia*". Se ha planteado un sencillo pero posible proceso de producción el cual es capaz de almacenar piezas de diferente forma y color de una forma autónoma solamente guiado por la imagen capturada con una webcam integrada en el equipo.

El sistema consiste en una estructura soporte delimitada por una zona de trabajo en la cual se superponen unas piezas diseñadas al efecto las cuales deben ser almacenadas en su lugar correspondiente por el manipulador robótico.

Dicho manipulador de cinemática paralela está basado en la tecnología de cables, comandado por cuatro motores que le dan tres grados de libertad ($\pm X$, $\pm Y$, $\pm Z$) donde el efector se encuentra suspendido sobre la zona de trabajo moviéndose de forma que es capaz de identificar las características de las piezas en situación, color y forma para ser almacenadas de una forma ordenada según unas premisas iniciales.

Palabras clave: Robot de cables, Fábrica del futuro, Colaborativa, Inteligencia Artificial.

Abstract of Final Project
Degree in Industrial Electronics and Automation
Robotic manipulator with artificial vision

Abstract

In current times robotics is believed to be one of the main pillars of the industry and great news for engineers is the reference to the sales of these robots. In 2013, around 179,000 industrial robots were sold worldwide, hence setting a new record, 12% higher than in 2012, according to the IFR (International Federation of Robotics).

Along with this news, collaborative robotics comes into play when robots and humans must share the workplace and humans run the risk of being excluded by machines. So the challenge consists of making robots improve work quality and take care of dangerous, tedious and dirty jobs that are not possible or safe for humans

Another important concept, which is directly connected to the previous point, is a popular issue these days and has first been used quite recently: "**Factory Of The Future**". It tries to make operators and robots work in harmony in their working environment so that robots can be considered as collaborative machinery and not as a substitute for human workers. This fast expanding area is now considered as one of the great productive niches.

Leaving aside these technical concepts that must never be forgotten if our professional career is centered on this industrial area, the focus of this project is undoubtedly based on robotics. The latter combined with computer vision results in a robotic manipulator which was gifted with some kind of "*intelligence*". A simple yet feasible production process has been designed so as to store pieces of different shapes and colors in an autonomous way and only guided by the image captured with a built-in webcam.

The system consists of a support structure defined by a work area in which some pieces designed for this purpose are stored in their proper place by the robotic manipulator.

This parallel kinematics robot is based on cable technology, controlled by four stepper motors that give three degrees-of-freedom ($\pm X$, $\pm Y$, $\pm Z$) so that the end-effector is suspended over the work area and moves, thus being able to identify the characteristics of the pieces (position, color and shape) to be stored in an orderly manner according to the initial premises.

Keywords: Cable-driven robots, factory of the future, collaborative, artificial intelligence.

1. Introducción

En los últimos años, en el mundo de la robótica se han hecho enormes avances en las industrias de fabricación y montaje, sin embargo, para la robótica de largo alcance como la inspección y reparación en grandes plantas de producción como hangares de aviones o trabajos a gran escala de otra índole, la aplicación de la robótica está todavía dando sus primeros pasos.

Los robots convencionales con estructuras en serie o paralelos no son prácticos para estos requerimientos, ya que los requisitos de espacio de trabajo son más elevados de lo que los robots convencionales pueden proporcionar. Así que, por estas razones, los robots suspendidos por cables han recibido mayor atención y se están estudiando en la actualidad.

Centrándonos ya en el presente trabajo, se pretende dar a conocer el funcionamiento de un robot paralelo controlado por cables, así como las ventajas frente a los robots convencionales y exponer el diseño de una maqueta de un manipulador robótico guiado mediante visión artificial en el cual se pone en práctica parte de los conocimientos adquiridos durante los estudios del grado de electrónica y control automático.

En una ocasión leí que el nivel de industrialización de un país y unas políticas y programas específicos de apoyo son unos pilares fundamentales en el desarrollo de la automatización y la robótica de un país, por lo tanto, este es un tema que todo ingeniero debe tener presente.

Un **robot industrial** se puede definir como un manipulador multipropósito reprogramable, automáticamente controlado, de tres o más grados de libertad que puede moverse o permanecer fijo en un lugar, para uso en aplicaciones de automatización industrial.

La evolución de la robótica está yendo a una velocidad descontrolada cuya trayectoria comienza en los años 50.

- Primera generación:
 - Manipuladores (1950)
 - Brazos articulados (1960)
- Segunda generación:
 - Robot con sensores avanzados (visión, tacto, etc.)
- Tercera generación:
 - Robot con capacidad de toma de decisiones

Así que teniendo en cuenta que la robótica y automatización industrial, cada vez está teniendo más fuerza en el entorno laboral, qué duda cabe que este es el momento de “subir al carro” de la robótica viendo el prometedor futuro que le augura a la automatización industrial.

Si además, al robot se le añade una cámara de visión artificial que proporciona una gran cantidad de información sensorial, las posibilidades aumentan.

Los desarrollos en visión artificial permiten mejorar la automatización de muchos procesos y en función de la resolución de la cámara somos capaces de analizar con detalle múltiples defectos. Ya son muchos los sectores que ya trabajan compaginando la robótica con la visión artificial analizando el 100% de su producción.

1.1. Objeto

Como forma de introducción a la robótica dotada de visión artificial, a mi escala particular, se ha implementado una maqueta de un sistema manipulador robótico controlado por cables el cual es guiado a través de un sistema de visión artificial.

Se ha planteado un supuesto caso de cadena de fabricación, que bien puede trasladarse al mundo industrial real con el fin de construir físicamente una maqueta y con ello poner la idea teórica original en práctica.

1.2. Alcance

El alcance de este proyecto puede llegar a ser muy amplio debido a la temática tratada y toda la información disponible en libros de texto, en la web y la proporcionada por los diversos fabricantes, pero siendo realistas, se ha acotado de forma que sea capaz de abarcar los puntos más importantes con la claridad y profundidad necesaria.

Los temas más importantes que se han determinado son:

- Diseño en programa CAD 3D con sus correspondientes planos de construcción para evaluar la fabricación.
- Búsqueda de los componentes que a priori parecen más adecuados para la fabricación.
- Fabricación de una maqueta con materiales sencillos para poner en práctica los conocimientos desarrollados.

- Trabajo de investigación sobre visión artificial basada en MATLAB con el motivo de realizar una aplicación software para el procesamiento digital de las imágenes.
- Trabajos para solventar grandes retos dentro de la visión artificial como es el tema de la iluminación o el procesamiento de imágenes y diferentes tipos de programación.
- Realización del control de un manipulador robótico controlado por cables por ser mucho más difícil de realizar aunque más fácil de construir.

1.3. Motivaciones

La mayor motivación que he tenido a la hora de realizar este proyecto viene de la última clase recibida en la UVic en la cual se realizó una práctica de características similares a las premisas técnicas de este proyecto en la asignatura Sistemas Robotizados en la cual se discriminaban una serie de piezas mediante un software comercial de visión artificial cuya información es directamente transferida a un brazo robótico que actuaba en consecuencia. En el camino de vuelta a casa estuve pensando y decidí unir las únicas dos asignaturas relacionadas con la electrónica y la automática (tal y como indica el título del grado) que son impartidas en este curso, así que la fusión entre control discreto y sistemas robotizados dio como resultado un remix al que llamé “*CableBot*”.

Mi trayectoria profesional se había centrado en un ámbito eléctrico con poco hincapié en labores de procesos industriales y mucho menos electrónicas y/o robóticas pero hace unos años tuve la oportunidad de entrar a formar parte de una gran fundación donde he tenido que reconvertir mi perfil a uno más electrónico. Desde enero de 2011 mi labor como profesional la desempeño en Fundación Tecnalía (<http://www.tecnalia.com>) en la cual he podido presenciar diferentes trabajos realizados con robótica sobre los procesos de fabricación ya que en la zona en la que se encuentra su sede, Euskadi, tiene un tejido empresarial muy vinculado con la automática en la industria.

Solamente el mero hecho de haber elegido este proyecto ha merecido la pena todo el dinero y esfuerzo dedicado, ya que otro de los motivos para esta elección ha sido mejorar como profesional usando tecnologías desconocidas para mí hasta este momento. Debido a esta reconversión del perfil profesional he tenido que comenzar a utilizar programas de análisis de datos, programación de μ controladores de 32bits, diseño electrónico, robótica, etc.... y por ello este proyecto me ha servido para iniciar los trabajos en una carrera profesional, espero que próspera y duradera.

2. Estado del arte

El estado del arte permite la circulación de la información, genera una demanda de conocimiento y establece comparaciones con otros conocimientos paralelos a este, ofreciendo diferentes posibilidades de comprensión del problema tratado.

Por lo tanto, antes de adentrarnos y profundizar en el trabajo realizado, se ha considerado oportuno realizar un pequeño trabajo de investigación con el fin de mostrar el uso de robots similares que actualmente se están usando en diferentes ámbitos de la vida real.

2.1. Antecedentes

Un mecanismo de cable paralelo, es un mecanismo paralelo convencional cuyos brazos rígidos han sido sustituidos por los cables. Estos se enrollan en un extremo controlados por motores y variando la longitud de los cables, se puede posicionar y orientar el efector en el espacio.

Los robots suspendidos por cables pueden ser considerados como manipuladores paralelos especiales en los que el efector final está suspendido por varios cables tensores con sus motores correspondientes. Estos robots pueden ser más ligeros, más rígidos, más seguros y más económicos que los tradicionales de cinemática paralela ya que su estructura es más sencilla y puede soportar mucho peso en comparación con la propia masa del robot.

Por otro lado, una desventaja importante es que los cables sólo pueden ejercer tensión y no pueden empujar el efector, por lo tanto, el modelado, análisis del espacio de trabajo y diseño de estos robots son diferentes de los convencionales.

El control de este tipo de robots ha atraído la atención de muchos grupos de investigadores, en su mayoría debido a su gran impacto en la eficiencia de estos sistemas robóticos y el gran potencial de rendimiento que aporta en los grandes espacios de trabajo.

Mientras que los brazos robóticos convencionales se han utilizado para manipular objetos pequeños dentro de los entornos reducidos, los robots de cable pueden servir para fines similares, pero cuyas tareas de manipulación se realizan en espacios de trabajo mucho más grandes.

Existen varias aplicaciones, aunque no muy extendidas todavía en la industria del uso de robots de cinemática paralela controlados por cables las cuales se exponen en los siguientes puntos.

2.1.1. SkyCam

Ya se sabe que una de las ventajas de este tipo de mecanismos es la gran área de trabajo que pueden abarcar, por lo tanto, estos mecanismos se utilizan en varias aplicaciones, principalmente en los casos en que se requiere un gran espacio de trabajo.

La aplicación más conocida es la *SkyCam*, una cámara que se usa para televisar partidos de eventos deportivos instalada sobre el propio estadio.

El sistema *SkyCam* es un sistema de transmisión de imágenes mediante una cámara robótica suspendida por cuatro cables e impulsada con un equipo computarizado.

Su peculiar diseño hace que el sistema de cámara *SkyCam* sea el único en el mundo con una cámara estabilizada que puede volar a cualquier lugar del espacio tridimensional en medio de un evento deportivo como es el fútbol, fútbol americano, baseball, tenis...

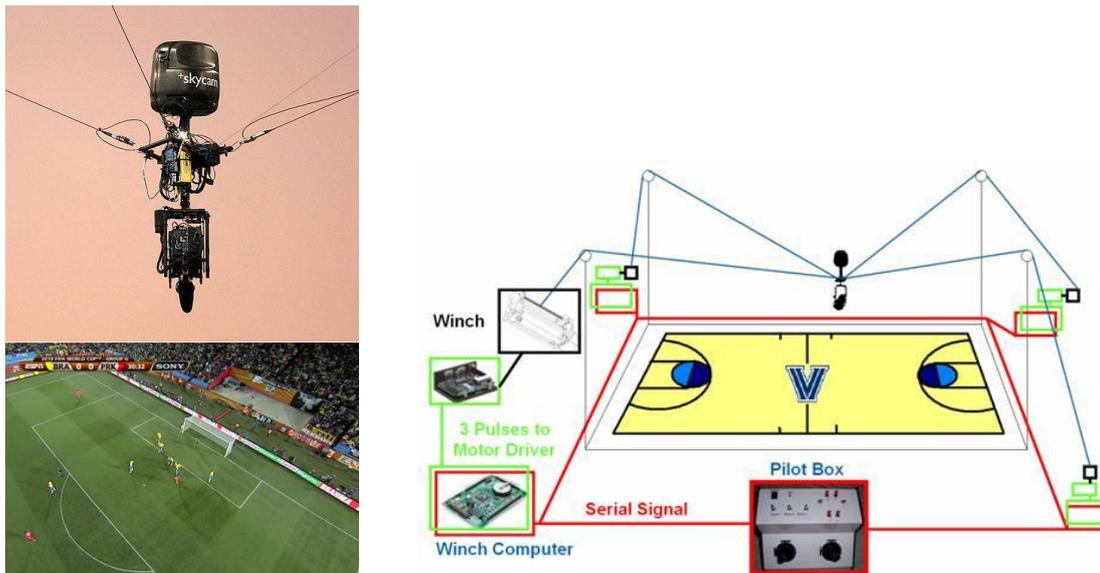


Figura 2.1.1. Imágenes de la SkyCam (www.skycam.tv)

2.1.2. IPAnema

La sociedad Fraunhofer, una organización de investigación alemana dedicada al campo de I+D+i ha desarrollado el robot IPAnema también basado en el control por cables que mueven un efector en todo el espacio de la estructura, donde gracias a la cinemática del robot permite un movimiento libre y totalmente controlable.

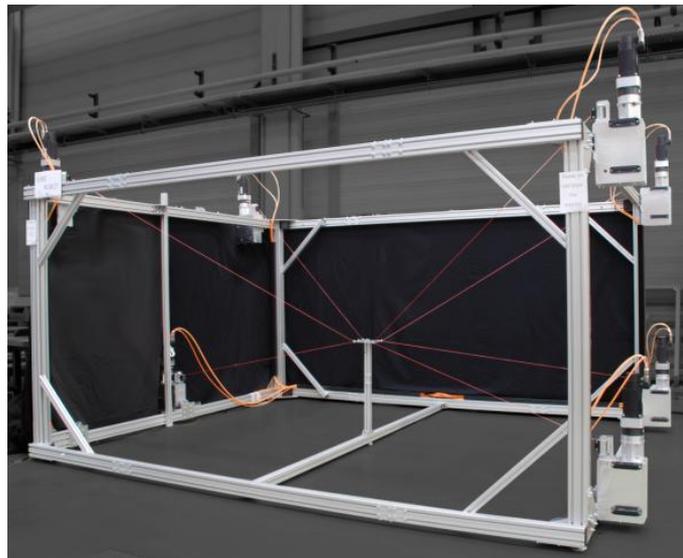


Figura 2.1.2. Imagen del IPAnema (Fraunhofer-Gesellschaft)

TecNALIA ha estado involucrado en este proyecto para integrar este tipo de robots en la *fábrica del futuro*, como vemos, este término está muy presente en la automatización actual de procesos. Una de las aplicaciones podría ser integrarlo en grandes factorías aeronáuticas.

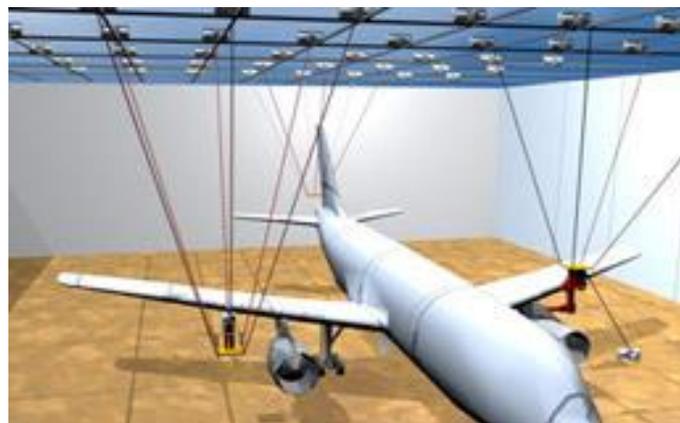


Figura 2.1.3. Simulación de robot de cables en una factoría aeronáutica

2.1.3. CoGiRo

El robot CoGiRo, de sus siglas en inglés *Control Giants Robots*, es otro proyecto de colaboración de TecNALIA el cual se ha diseñado para realizar trabajos de paletización en la industria logística.

Fue presentado en la feria Internacional Bienal de Máquina-Herramienta que tuvo lugar del 28 de mayo al 2 de junio de 2012 en el Bilbao Exhibition Centre. El robot ha sido desarrollado en estrecha colaboración con LIRMM (Laboratoire d'Informatique et de Robotique de Microélectronique de Montpellier).

El proyecto CoGiRo, se ocupa de los robots paralelos dirigidos por cable cuyo objetivo principal es proponer los medios para diseñar y validar metodologías innovadoras en robots paralelos de cables que tienen un gran espacio de trabajo y manipulan cargas pesadas.

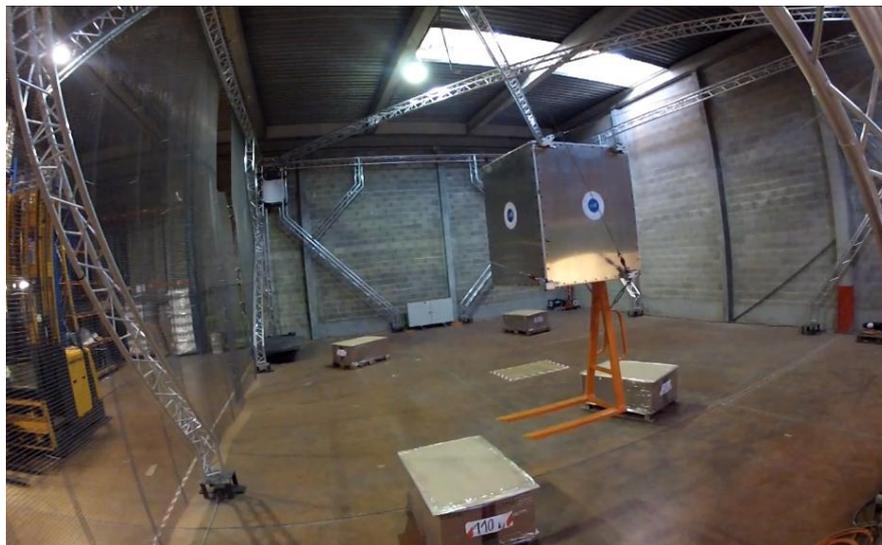


Figura 2.1.4. Robot CoGiRo trabajando (LIRMM/TECNALIA)

2.1.4. ReelAX 8

El robot ReelAx 8, es el hermano menor del robot por cables CoGiRo. Ha sido concebido para desplazar objetos relativamente pesados y es capaz de realizar traslaciones y rotaciones en los espacios previstos a muy alta velocidad, lo que abre nuevas posibilidades en operaciones de planta para aeronáutica y sector naval, entre otros sectores.

En una ocasión, este robot formo parte de una exposición en la Escuela superior de Bellas Artes de Montpellier y dentro de la exposición, **Ciencia, ficción, cultura, capital**, se pudo contemplar el Stand **Sphère tensions**, obra de Michel Sellam, para el cual se utilizó el robot por cables ReelAX 8. El robot, dentro de la obra global, fue programado para efectuar movimientos extremadamente lentos de una silla de metal moviéndose sobre una esfera imaginaria de 1,8m de diámetro dentro del espacio de la exposición.



Figura 2.1.5. Robot ReelAx 8 en la Escuela superior de Bellas Artes de Montpellier

Como se ha podido observar, en ocasiones la cultura y la ciencia están estrechamente ligadas con un nexo común como es la robótica.

2.2. Retos tecnológicos

Este punto pretende exponer los retos tecnológicos que han surgido a lo largo de este periodo de realización del proyecto con el fin de dejar constancia de la labor de investigación y ensayos realizada ya que el alcance del proyecto no se queda en el ámbito teórico, si no que se ha intentado poner en práctica muchas ideas con el trabajo que ello acarrea.

2.2.1. Robótica con cables

La implementación del manipulador robótico ha sido uno de los trabajos más duros de este proyecto y llegar a la conclusión de realizarlo mediante cables es por varios motivos:

- Debido a la proyección que este tipo de robots está teniendo en la industria.
- Fabricación más sencilla, ya que construir una plataforma que tenga 3 grados de libertad podría complicarse y encarecer la fabricación.
- Motivación personal para llevar a cabo un control nada trivial.

En cuanto a robots convencionales se refiere, según la estructura cinemática, se puede considerar que hay dos tipos de máquinas, las de cinemática serie y las máquinas de cinemática paralela. Los robots paralelos son utilizados principalmente en aquellas aplicaciones donde sus características los hacen ideales para resolver aquellos problemas que se presentan con los robots serie.

Un robot paralelo está formado por un soporte fijo o placa base sobre la cual se montan unos actuadores que mueven unos brazos articulados que se unen a una plataforma móvil, en la cual se dispone la correspondiente herramienta o manipulador. Estas plataformas están unidas por varias cadenas cinemáticas independientes en paralelo, formando cadenas cinemáticas cerradas.

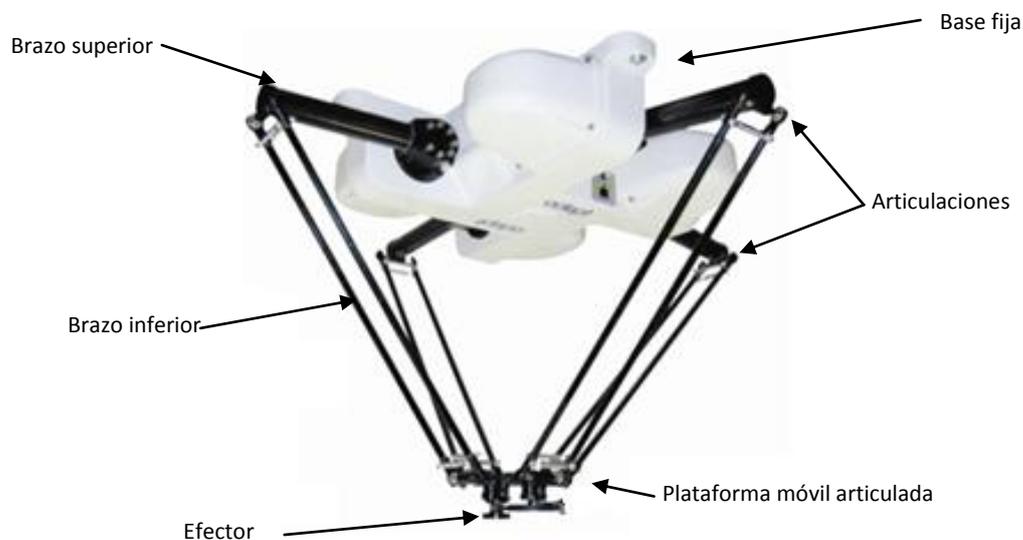


Figura 2.2.1. Partes fundamentales de un robot paralelo convencional

Como se ha comentado anteriormente, un mecanismo de cable paralelo, es un mecanismo paralelo convencional cuyos brazos son cables que se enrollan en un extremo permitiendo posicionar y orientar el efector en el espacio.

Estos mecanismos difieren de los paralelos convencionales en que sus brazos no son rígidos lo que lleva a dos ventajas principales como son la gran área de trabajo y la posibilidad de obtener fácilmente una redundancia con respecto a los actuadores. Sin embargo, los mecanismos con cable, tienen dos desventajas intrínsecas que deben ser consideradas. En primer lugar, los cables sólo producen fuerzas de tensión ya que un cable no puede empujar un objeto y por otra parte, los cables tienen una cierta flexibilidad o elasticidad que influirá en la precisión del mecanismo.

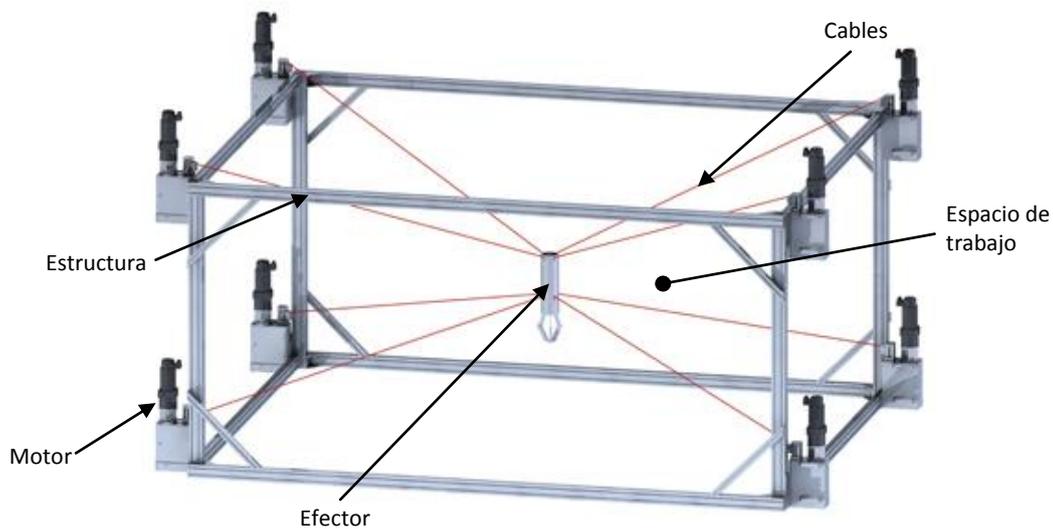


Figura 2.2.2. Esquema de robot de cable paralelo (Lab. de robótica universidad de Laval)

Los diseños son mucho más simples debido a pocas partes móviles por lo tanto permiten ser transportados fácilmente en caso de necesidad.

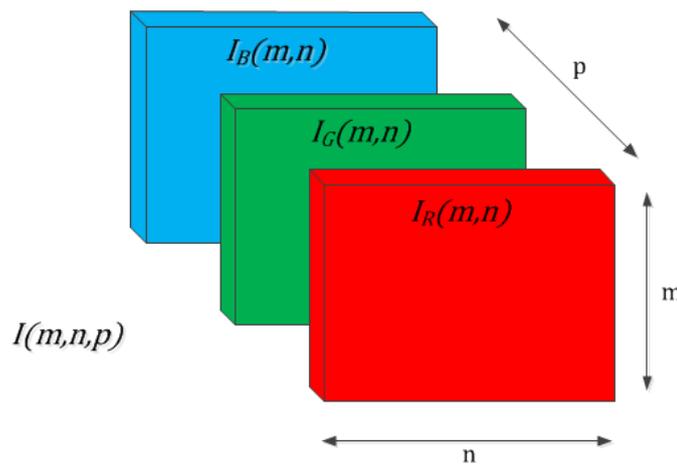
Además, el efector final puede consistir en una gran variedad de accesorios, como cámaras, electroimanes, ganchos, pinzas, ventosas...

2.2.2. Visión artificial

La visión artificial es una disciplina compleja que involucra otras ciencias e incluye estudios de física, matemáticas e ingeniería que pretende emular la capacidad que tienen algunos seres vivos para ver una escena, entenderla y actuar en consecuencia. El procesamiento digital de imágenes (PDI) lleva asociadas varias tareas según su implementación, como pueden ser captura y adquisición de la imagen, procesamiento, segmentación, descripción, reconocimiento e interpretación.

Para tratar el tema he tenido que leer libros y trabajos realizados por otros investigadores para adentrarme en el mundo del procesamiento digital de imágenes (PDI), pero tratar el tema de la visión artificial mediante un programa tan extendido en el entorno de la ingeniería como es MATLAB ha supuesto un duro esfuerzo y muchas horas de dedicación e investigación ya que las características son tan amplias que podrían dedicarse páginas y páginas describiendo sus posibilidades, pero no es el cometido de este trabajo, así que nos centraremos en una pequeña parte en la cual se realiza una procesamiento digital de una imagen adquirida.

Tratar las imágenes con MATLAB es posible debido a la forma que tiene de trabajar con ellas, donde es interpretada como una matriz de puntos, o en este caso pixeles. Una imagen en escala de grises es interpretada por una matriz bidimensional de $n \times m$ elementos (ancho x alto) donde cada elemento tiene un valor de 0 (negro) a 255 (blanco). Por otro lado, si se trata de imágenes RGB es representada por una matriz tridimensional $n \times m \times p$ donde 'p' representa el plano 1, 2 o 3 para los colores RGB.



$$I_R(m, n, 1) = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \dots & r_{1n} \\ r_{21} & r_{22} & \dots & r_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ r_{m1} & r_{m2} & \dots & r_{mn} \end{bmatrix} \quad I_G(m, n, 2) = \begin{bmatrix} g_{11} & g_{12} & \dots & g_{1n} \\ g_{21} & g_{22} & \dots & g_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ g_{m1} & g_{m2} & \dots & g_{mn} \end{bmatrix} \quad I_B(m, n, 3) = \begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} & \dots & b_{1n} \\ b_{21} & b_{22} & \dots & b_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ b_{m1} & b_{m2} & \dots & b_{mn} \end{bmatrix}$$

Figura 2.2.3. Representación matricial de una imagen a color

Para más información sobre las características y trabajo realizado sobre visión artificial ver punto **4. Resultados obtenidos** o el punto **3.4 Software de visión artificial**. En estos puntos se encuentra todo el proceso realizado con detalle y donde se pueden apreciar los escollos salvados hasta obtener nuestro resultado.

2.2.3. Problemática en cámaras

El objetivo de la calibración de la cámara, es la obtención de medidas reales a partir de una imagen adquirida con la webcam. Para ello es necesaria la conversión de las coordenadas entre el mundo real y la imagen.

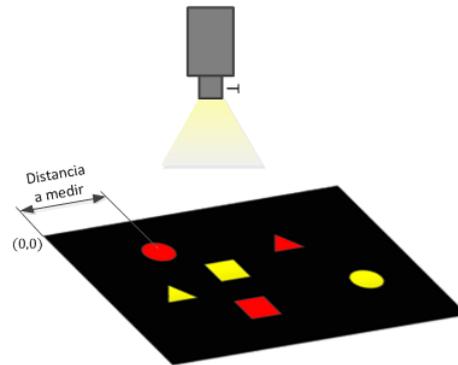


Figura 2.2.4. Problemática de medida

Tendremos en cuenta que se trabaja con dos sistemas, las coordenadas de la imagen y las coordenadas de la escena.

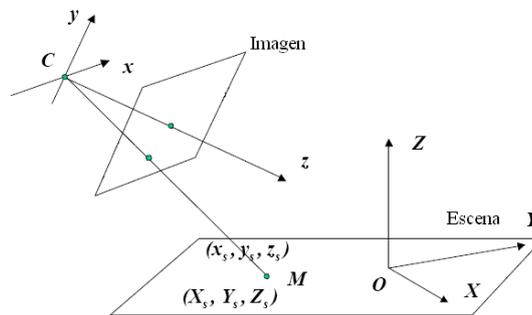


Figura 2.2.5. Sistemas de coordenadas implicados

Como se puede intuir, los resultados obtenidos dependen de la imagen adquirida, por lo tanto, tendríamos que evitar todos los fallos posibles e intentar corregir los defectos de la propia cámara.

Las principales características de una cámara que afectan al Procesado Digital de la Imagen son:

- Posición del centro de la imagen
- Distancia focal
- Resolución de la imagen.
- Factor (Skew).
- Aberraciones.
- Distorsión de la lente.

Respecto a la **posición del centro de la imagen** decir que no tiene porqué coincidir con la mitad de la distancia de las filas y las columnas ya que puede ser dependiente del montaje de la lente.

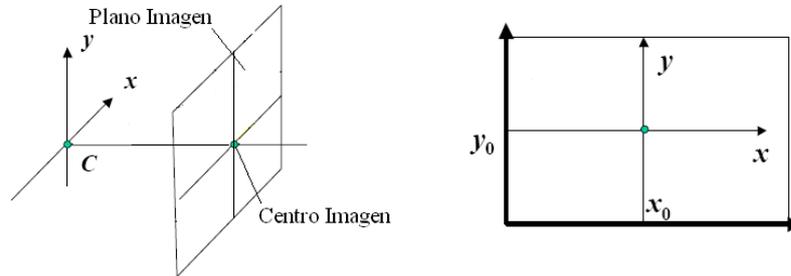


Figura 2.2.6. Posición del centro de la imagen

La **distancia focal** o longitud focal se define como la distancia en mm desde el centro óptico de la lente hasta el punto focal. Dependiendo si la lente es convergente o divergente esta distancia será positiva o negativa.

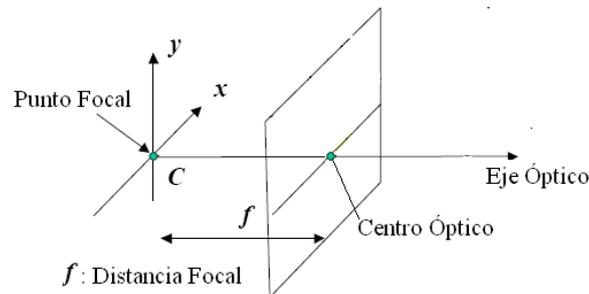
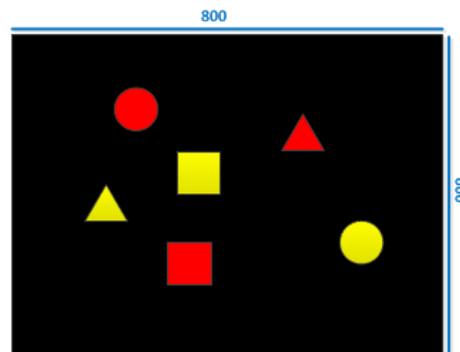


Figura 2.2.7. Parámetros de visión artificial (distancia focal)

Cuando nos referimos a **resolución** de la imagen quiere decir el número de píxeles que tiene, por ejemplo, la cámara de nuestro sistema está configurada en 800x600 píxeles.



Resolución 800x600=480000 píxeles

Figura 2.2.8. Ejemplo de resolución de nuestra imagen

El **factor Skew**, o coeficiente de asimetría es el ángulo real entre el eje X e Y del plano de imagen.

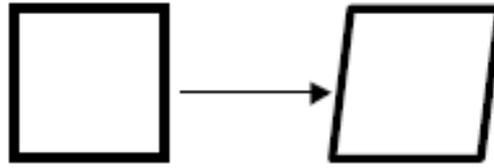


Figura 2.2.9. Factor Skew en una imagen

De las **aberraciones** contamos algo de teoría para tenerlo presente, la cual dice que los rayos de luz de un punto de la escena deben incidir sobre un único punto del plano de formación de la imagen y cuando esto no ocurre se tiene una aberración.

Se clasifican en:

- Esférica. (efecto de miope).
- Coma.
- Cromática.
 - o Diferente difracción de las diferentes longitudes de onda.
 - o Dependiente de la iluminación del sitio.

Estos defectos se suelen corregir ópticamente.

La **distorsión** es la deformación óptica de la imagen que es causada por la óptica de la cámara y que diferencian la imagen capturada de lo que realmente hay. La distorsión es algo que se debe evitar o al menos intentar corregirlas para no tener problemas con el PDI.

Las distorsiones pueden ser:

- **Distorsión de barril** (*barrel distortion*)
La distorsión de barril es la más común y suele darse por lo general en distancias focales cortas y se suele dar sobre todo en objetivos angulares.
- **Distorsión de cojín** (*pincushion distortion*)
La distorsión de cojín se da en los teleobjetivos y más frecuentemente en distancias focales largas, cosa que no nos atañe por lo tanto solamente nombramos.

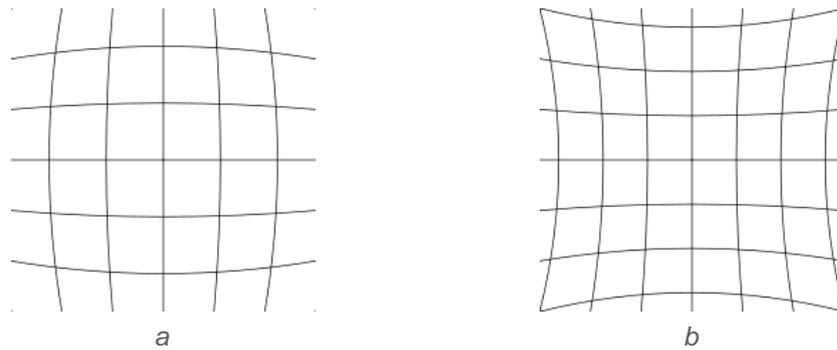


Figura 2.2.10. Distorsiones. a) Distorsión barril. b) Distorsión cojín

2.2.4. Calibración de la cámara

Como medida correctiva de algunos de estos defectos, se debe realizar una calibración de cámara.

La calibración usada se denomina PIN-HOLE que es un modelo de calibración básico y aunque se trata de una ejecución más simple que otras, es la base de los métodos de calibración más avanzados.

Aunque no es el más preciso y no trata las distorsiones, es ideal si la distorsión es despreciable, como es nuestro caso, ya que la distancia focal se encuentra en un punto intermedio, ni larga ni corta.

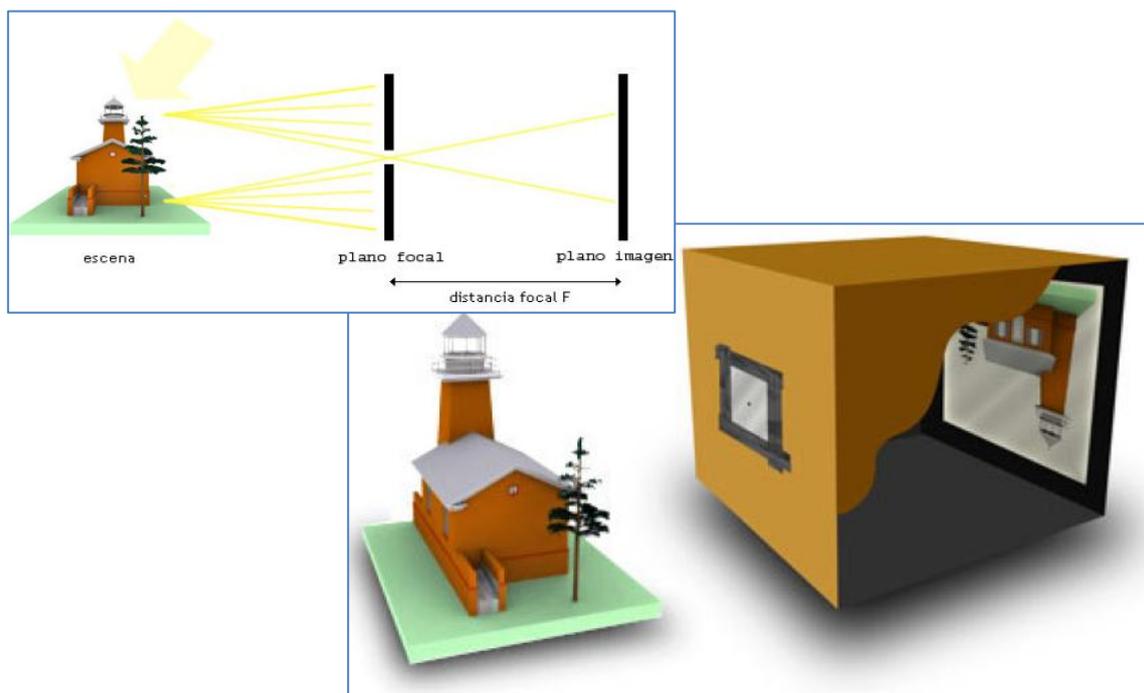


Figura 2.2.11. Modelo PIN-HOLE

Básicamente, este modelo aplica una matriz de proyección para transformar las coordenadas 3D de los puntos del objeto en coordenadas 2D de la imagen y necesita de unos parámetros intrínsecos y extrínsecos para caracterizar esta matriz.

Parámetros intrínsecos:

Describen la geometría de la óptica y del conjunto de la cámara.

- Centro del eje óptico.
- Factores de escalado.
 - Factores de conversión pixel-milímetros.
 - Distancia focal.
 - Factor de proporción.
- Asimetría de los ejes del plano de la imagen.

Parámetros extrínsecos:

Definen la posición y orientación de la cámara respecto al sistema de coordenadas conocido (Sistema de coordenadas del mundo), o sea, la traslación y rotación entre un sistema de coordenadas externo a la cámara y otro ligado a ella.

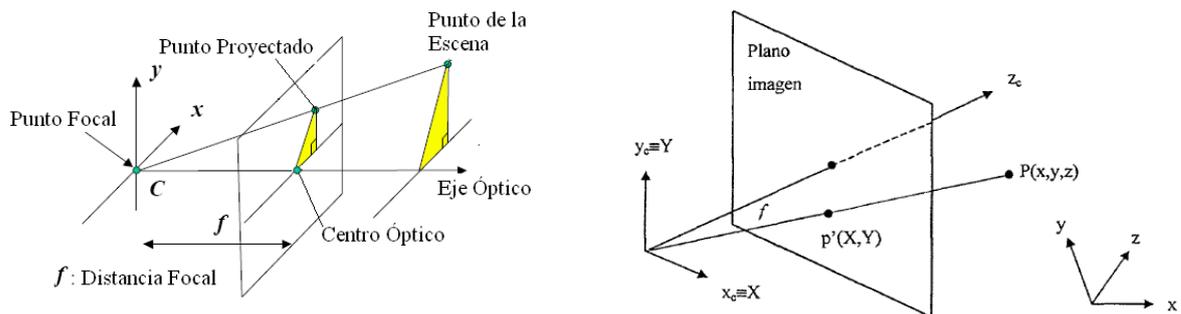


Figura 2.2.12. Descripción e identificación de los parámetros

Para el calibrado del modelo Pin-Hole se escribe la relación matemática entre los puntos de la escena y los puntos según el sistema de coordenadas de la cámara como:

$$\begin{bmatrix} x_c \\ y_c \\ z_c \end{bmatrix} = R \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} + T \tag{1}$$

Dónde R es la matriz de rotación del sistema de coordenadas de la cámara respecto al de la escena y T su traslación, es decir, R es la orientación de la cámara y T su posición.

$$R = \begin{bmatrix} r_1 & r_2 & r_3 \\ r_4 & r_5 & r_6 \\ r_7 & r_8 & r_9 \end{bmatrix} \quad T = \begin{bmatrix} t_x \\ t_y \\ t_z \end{bmatrix} \tag{2}$$

Matriz de rotación

Matriz de traslación

M_{int} pasa de las coordenadas de la cámara a las coordenadas de la imagen.

M_{ext} realiza la transformación entre las coordenadas de la escena y de la cámara.

Así que:

$$M_{int} = \begin{bmatrix} f_x & 0 & u_0 & 0 \\ 0 & f_y & v_0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \quad M_{ext} = \begin{bmatrix} R_{3 \times 3} & T_{3 \times 1} \\ 0_{1 \times 3} & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_1 & T_x \\ R_2 & T_y \\ R_3 & T_z \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

Parámetros intrínsecos

Parámetros extrínsecos

Donde:

$f_x f_y$ Parámetros de distancia focal

$u_0 v_0$ Coordenadas de centro de la imagen

Para realizar este proceso complejo me he ayudado de un *White Paper* localizado en la web que utiliza un proceso mediante una toolbox de MATLAB. “*Camera Calibration Toolbox for Matlab*” (http://www.vision.caltech.edu/bouquetj/calib_doc/)

Una vez explicada la teoría, se ha realizado un proceso de calibración de cámaras que se resume brevemente ya que este no es el cometido de nuestro proyecto, aunque debemos tener conocimiento de ello si deseamos realizar trabajos de mayor precisión que el que a nosotros nos atañe.

Se usa como patrón un tablero de ajedrez con cuadros de 20x20mm y un tamaño de 500x400mm:

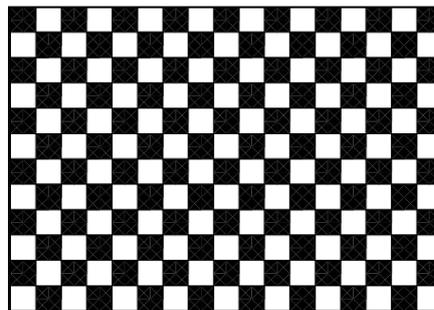


Figura 2.2.13. Patrón de calibración

- **Paso 1. Carga de fotografías:**

Se cargan una serie de fotografías previamente adquiridas con nuestro sistema tomadas con la plantilla en diferentes ángulos de inclinación.

- **Paso 2. Delimitar zona en todas las fotos:**

Delimitar una zona del tablero con las medidas conocidas, de forma que le indicamos al sistema cuantos cuadros y que dimensiones reales tiene.

- Paso 3. Detección de esquinas:**
 La *toolbox* detecta las esquinas con el fin pasar los datos reales en 3D a los de la foto en 2D.
- Paso 4. Parámetros extrínsecos:**
 Extrae los parámetros extrínsecos a la cámara. Se puede apreciar el grado de inclinación de las 4 imágenes tratadas.

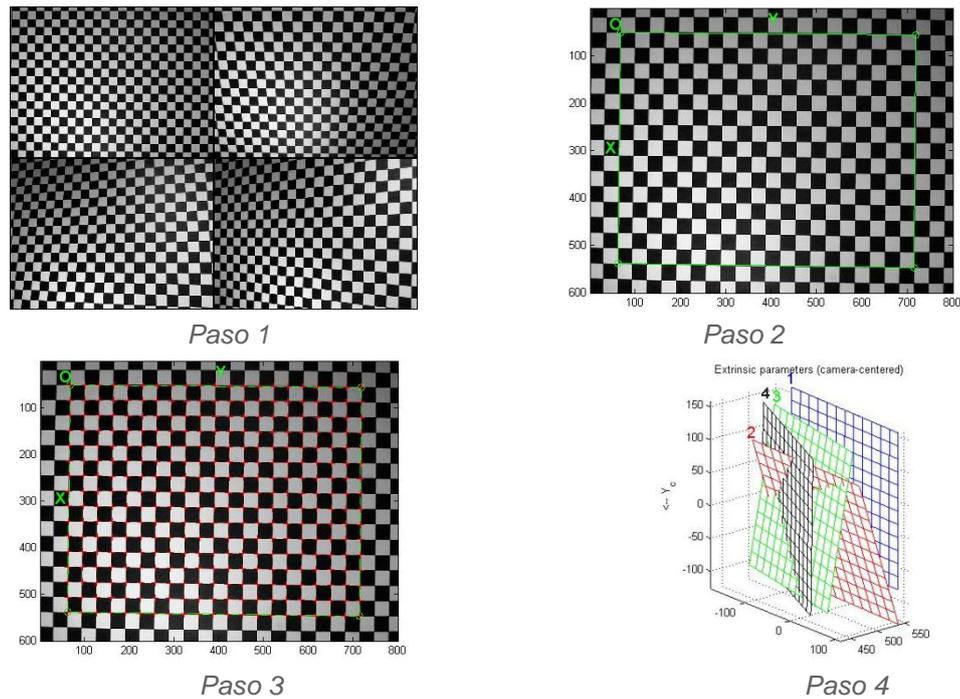


Figura 2.2.14. Pasos para la obtención de los parámetros de calibración

Por último, del software de calibración se obtienen los parámetros intrínsecos y extrínsecos para el cálculo de la matriz de rotación R y el vector de traslación T .

<ul style="list-style-type: none"> Extrinsic parameters: 				
Translation vector:	$T_{ext} =$	[-204.828542	-153.994708	2102.057974]
Rotation vector:	$omc_{ext} =$	[-2.198741	-2.221734	0.065609]
Rotation matrix:	$R_{ext} =$	[-0.010781	0.999131	-0.040254
		0.999766	0.010014	-0.019194
		-0.018775	-0.040452	-0.999005]
Pixel error:	$err =$	[0.10191	0.08948]	

Tabla 1. Tabla de resultados de calibración (parámetros extrínsecos)

<ul style="list-style-type: none"> Initialization of the intrinsic parameters - Number of images: 4 <ul style="list-style-type: none"> Calibration parameters after initialization: <p>Focal Length: $fc = [3359.82101 \quad 3359.82101]$ Principal point: $cc = [399.50000 \quad 299.50000]$ Skew: $alpha_c = [0.00000] \Rightarrow$ angle of pixel = 90.00000 degrees Distortion: $kc = [0.00000 \quad 0.00000 \quad 0.00000 \quad 0.00000 \quad 0.00000]$</p> <p>Main calibration optimization procedure - Number of images: 4 Gradient descent iterations: 1...2...3...4...5...6...7...8...9...10...11...12...13...14...15...16...17...18...19...20...done</p> Calibration results after optimization (with uncertainties): <p>Focal Length: $fc = [3425.21726 \quad 3428.27366] \pm [461.71292 \quad 461.65242]$ Principal point: $cc = [399.50000 \quad 299.50000] \pm [0.00000 \quad 0.00000]$ Skew: $alpha_c = [0.00000] \pm [0.00000] \Rightarrow$ angle of pixel axes = 90.00 ± 0.00 degrees Distortion: $kc = [0.3381 \quad -38.392 \quad 0.0047 \quad -0.0008 \quad 0] \pm [0.1217 \quad 21.275 \quad 0.0018 \quad 0.00168 \quad 0]$ Pixel error: $err = [0.10004 \quad 0.08887]$</p> <p>Note: The numerical errors are approximately three times the standard deviations (for reference).</p>

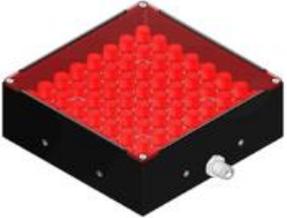
Tabla 2. Tabla de resultados de calibración (parámetros intrínsecos)

2.2.5. Iluminación artificial

Los resultados obtenidos en las aplicaciones PDI dependen de la calidad de la imagen original, por lo que se deben tomar todas las precauciones necesarias para tener una iluminación adecuada y uniforme en el momento de su adquisición.

La finalidad de la iluminación es optimizar el contraste, normalizar cualquier variación de la iluminación ambiente y simplificar el proceso PDI ya que cuantos más filtros por software se usen el tiempo de procesado se va incrementado.

Tipos de iluminación existente:

Tipos de iluminación	
 <p>Luces de área</p>	<p>Las luces de área se aplican para la iluminación directa del objeto en la zona de trabajo. Resulta la forma más sencilla de iluminar objetos planos con superficies no reflejantes. Su geometría suele ser cuadrada o rectangular de LEDs.</p>

 <p>Anillos de luz</p>	<p>Los anillos de luz se caracterizan por una iluminación homogénea en objetos que no reflejan. El centro del foco se encuentra alineado con el eje óptico de la cámara y todos LEDs están a la misma distancia. Por ello las sombras se reducen al mínimo trabajando en la zona de trabajo.</p>
 <p>Darkfield</p>	<p>La iluminación darkfield está diseñada para la detección de elementos que se encuentran a distinta profundidad de la superficie iluminada. Debido a la proyección casi paralela de los LEDs respecto a la superficie del objeto a inspeccionar, solo se producen reflejos hacia la cámara donde la pieza presenta un borde o desnivel.</p>
 <p>Luces Backlight</p>	<p>La iluminación Backlight, se encuentra detrás del objeto, es utilizada para resaltar el contorno de éste o bien realizar un control superficial en base a la radiación emitida por el material. Imágenes captadas mediante Backlight tienen un alto contraste y se usan para controlar los contornos exteriores de las piezas.</p>
 <p>Barras de luz</p>	<p>Son rectangulares de diferentes tamaños y longitudes. Se usan para iluminación de zonas lineales, sistemas Linescan donde se requiere una gran potencia en un espesor de línea muy reducido.</p>

Tabla 3. Tipos de iluminación más comunes

A parte de todo esto, también debemos seleccionar el tipo de tecnología usada y en el mercado podemos encontrar las siguientes:

Tecnologías de iluminación	
 <p>Luz halógena</p>	 <p>Luz incandescente</p>

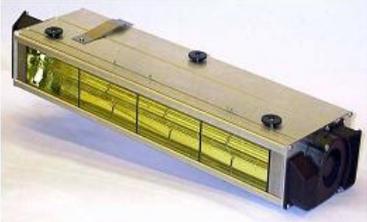
 <p>Luz fluorescente</p>	 <p>Luz laser</p>
 <p>Luz xenón</p>	 <p>Luz LED array</p>

Tabla 4. Tecnologías de iluminación más utilizadas

En este punto se han encontrado dos retos que están directamente relacionados uno con el otro, ya que el cometido de ambos es el mismo, conseguir una imagen nítida y sin reflejos.

- Color y material de la zona de trabajo.
- Tipo y cantidad de iluminación artificial.

Respecto a la zona de trabajo se hicieron diferentes pruebas para conseguir una imagen que fuese óptima para realizar un PDI sin problemas añadidos. Se emplearon dos colores de fondo, negro y blanco.

Respecto al material se emplearon diferentes tipos con el fin de obtener una imagen sin reflejos, ya que esto es uno de los mayores escollos a salvar debido a que un reflejo puede interpretarse como un objeto, siendo imposible de solucionar con un filtro software.

En la elección de una iluminación es necesario considerar no solo el color sino también la geometría de la luz o el efecto dado al incidir sobre el material. Según la geometría elegida, la luz proyectará sombras sobre la pieza a controlar o evitará su presencia creando un entorno de control uniforme, libre de brillos y sombras.

En el apartado **4. Resultados obtenidos** se pueden ver las pruebas realizadas y los resultados que se han obtenido después de aplicar varios métodos de iluminación y diferentes materiales base de la zona de trabajo.

3. Metodología de trabajo

En este punto se detallan las características y metodología empleada para llevar a cabo todo el proceso descrito a lo largo de este documento. Se realiza una descripción completa del equipo para que queden reflejadas todas las partes implicadas en el desarrollo.

3.1. Características principales

Las características más importantes del manipulador se describen a continuación:

Características del sistema robótico
• Estructura modular de aluminio extruido de 40x40mm
• Base se estructura de 1x1x1m fácilmente desmontable
• Superficie de trabajo de hasta 1m ²
• Robot de cinemática paralela controlado por cables
• Tres grados de libertad (GDL)
• Control mediante aplicación de visión artificial
• Recogida de piezas mediante electroimán
• Controlado por 4 motores PaP NEMA 17
• Sistema de visión desde 2 perspectivas
• Iluminación artificial mediante focos LED con difusor
• Control electrónico de reducidas dimensiones
• Posibilidad de control manual o automático
• Herramienta perfecta para desarrollar proyectos mecatrónicos
• Reconfigurable para modificar parámetros y/o requerimientos del sistema
• Posibilidad de aumentar o reducir el volumen de trabajo
• Alta capacidad de carga en relación al peso
• Pocas partes móviles reduciendo la posibilidad de averías y mantenimiento
• Fácil transporte
• Alta rigidez estructural
• Montaje simple y económico
• Efecto final fácilmente configurable

Tabla 5. Características principales del sistema

3.1.1. Vista general

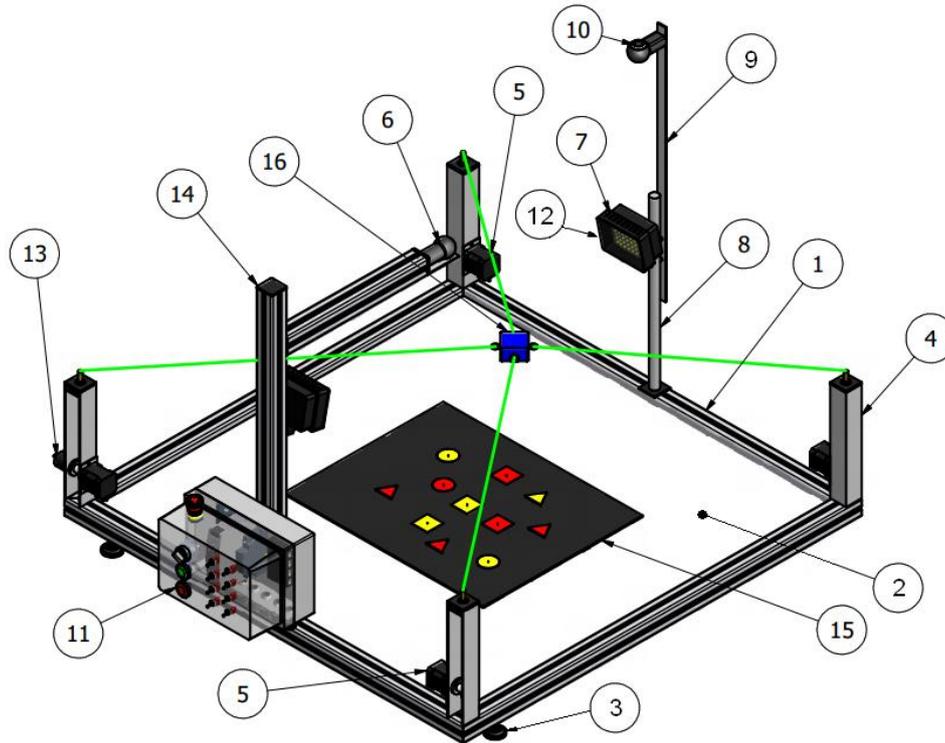


Figura 3.1.1. Identificación de componentes

Partes del sistema	
Referencia	Denominación
1	Estructura de aluminio extruido de 40x40mm
2	Superficie base de la estructura de panel de 1000x1000x3mm
3	Pata niveladora
4	Columna de soporte para motor
5	Motor paso a paso
6	Webcam acimutal
7	Foco de iluminación LED
8	Soporte para foco
9	Soporte de webcam panorámica
10	Webcam panorámica
11	Caja de controlador electrónico
12	Filtro para difuminar la luz del foco
13	Sensor de giro (encoder)
14	Soporte para webcam acimutal
15	Zona de trabajo de 500x400mm
16	Manipulador robótico (efector)

Tabla 6. Componentes del sistema

3.2. Diagrama de bloques del hardware

Esta imagen refleja de forma esquemática la interconexión general entre todos los dispositivos del sistema para que de esta forma se visualice y comprenda la disposición y el cometido de cada uno de ellos.

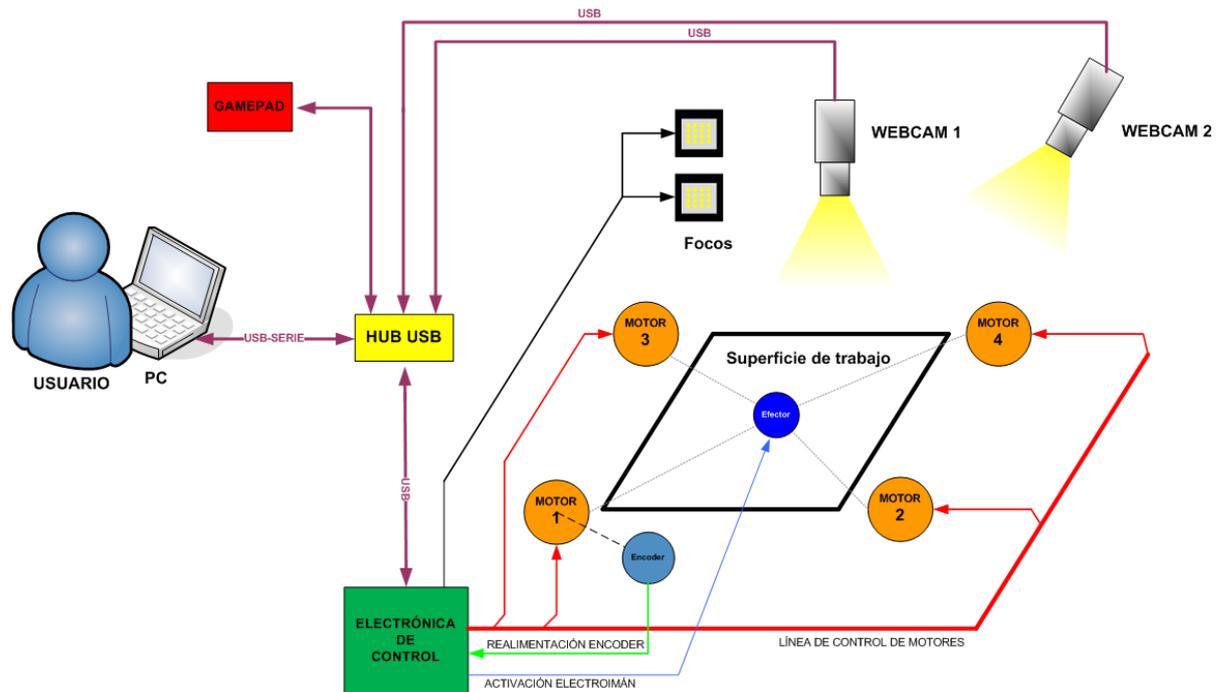


Figura 3.2.1. Diagrama de bloques principal

3.3. Funcionamiento

A grandes rasgos y viendo las características principales, este tipo de robots consisten en un efector que actúa con el medio, el cual es controlado por unos cables que están fijados a cuatro motores provistos de un carrete para enrollar o desenrollar el cable que según varía esta longitud, la posición y orientación del efector final también varía.

Según las características generales del sistema, el robot tiene 3 GDL, $\pm X$, $\pm Y$, $\pm Z$ lo cual hace que se tenga un control absoluto en todo el volumen de trabajo.

Un volumen de trabajo que teniendo en cuenta que los motores están dispuestos en las cuatro esquinas tiene una forma cúbica donde las dimensiones más importantes en milímetros son 1000x1000x300 aprox. (largo x ancho x alto). Dando un volumen de trabajo de $0,3m^3$.

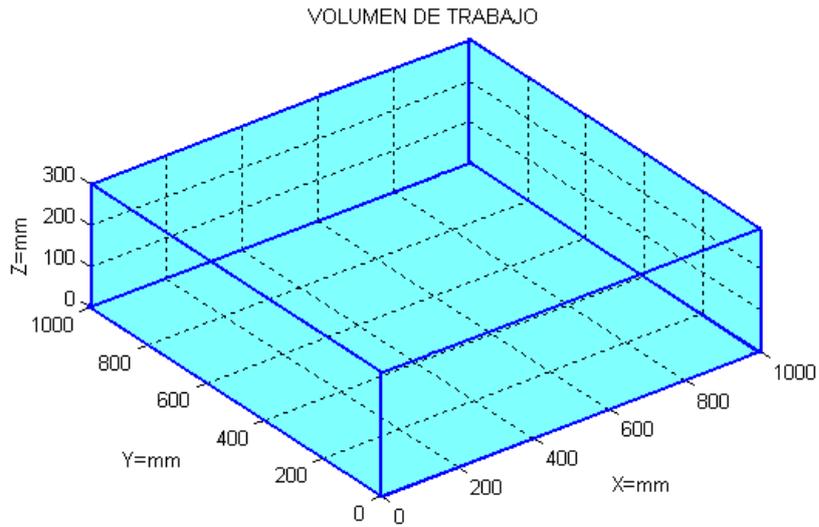


Figura 3.3.1. Espacio de trabajo tridimensional accesible por el robot

Para realizar movimientos en el efector, los cuatro motores se tienen que mover al unísono lo que implica una gran coordinación entre ellos, así que la tensión de los cuatro cables tiene que ser la misma para evitar holguras y no cometer errores de posición.

Al usar un controlador para cada motor PaP se hace necesaria una señal de sincronismo, es decir, que todos los controladores comparten la misma señal de *clock*.

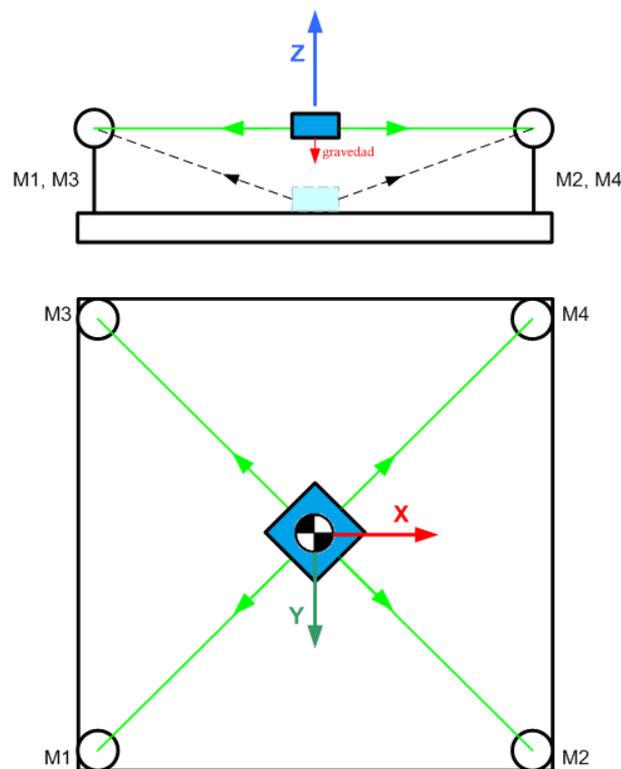


Figura 3.3.2. Diagrama de movimientos del robot

El diseño previo del efector consiste en una caja de aluminio presofundido pintada de color azul para realizar el tracking mediante visión artificial, en la cual se han mecanizado cuatro orificios para la colocación de las cuatro argollas empleadas para la fijación de los cables de forma simétrica.

El sistema de accionamiento en un principio se diseña con un pequeño electroimán con el fin de recoger las piezas preparadas para el trabajo.

Se ha elegido una caja con el fin de poder introducir la electrónica necesaria para la activación del electroimán. La conexión eléctrica con el sistema de control se realiza mediante un cable telefónico en forma de espiral, de esta forma no ocupa sitio y es capaz de estirarse hasta los límites de la zona de trabajo.

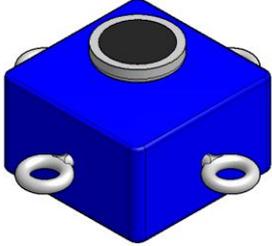
Efector final	
CARACTERISTICAS	
• Material aluminio presofundido	
• Tamaño 50x50x30mm	
• Color azul	
• 4 puntos de fijación mediante argolla	
• Sistema de acción mediante electroimán	
• Peso 500 gramos aprox.	
• Posibilidad de introducir control en el interior	

Tabla 7. Características del efector final

Se pretende que el sistema sea capaz de almacenar una serie de piezas preparadas al efecto con unas dimensiones y características concretas. Consisten en tres formas diferentes de dos colores diferentes las cuales poseen en su centro geométrico una pieza de material ferromagnético con el fin de ser atraídas por el efector.

Las piezas a detectar son:

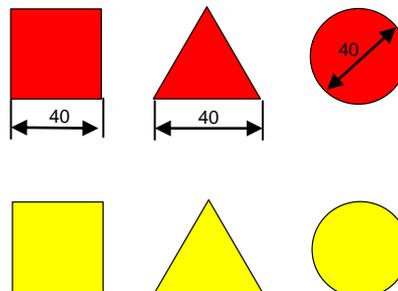


Figura 3.3.3. Piezas a identificar

Se pueden apreciar 3 formas, cuadrado, triángulo y círculo de dos colores diferentes, amarillo y rojo. Tienen un tamaño de 40mm y un grosor de 3mm.

El movimiento del robot, se realiza con 4 motores PaP con referencia 42BYGHM809 ya que realizar un control con este tipo de motores es más sencillo que con un motor de corriente continua y es mucho más económico que un sistema servomotor.

El par es excesivo para esta aplicación ya que el peso de la carga y la tensión de los hilos es mucho menor pero ello nos da pie a poder configurar el control y poder realizar aplicaciones que requieran mayor movimiento de carga.

Motor de accionamiento	
CARACTERISTICAS	
• Motor bipolar PaP	
• Tamaño NEMA 17	
• Par 48N-cm	
• Paso del ángulo de giro 0,9°	
• Corriente de fase 1,7A	
• Voltaje de alimentación 3V	
• Diámetro del eje 5mm	

Tabla 8. Características del motor seleccionado

A uno de estos motores, el motor 1, se le ha colocado un encoder de 200 ppr para cerrar el lazo de control, solamente se usa un solo sensor debido a que todos los motores van al unísono y poseen la misma señal de sincronismo.

Los motores se fijan solidarios a las columnas mediante una placa de acero y tornillería M4, haciendo la columna también las tareas de disipación térmica de los motores.

Para enrollar el cable se usa un carrete diseñado con unas medidas adecuadas para alojarlo en la columna y fabricado en plástico ABS blanco en una impresora 3D.

Los carretes se fijan al eje del motor mediante un tornillo prisionero para evitar deslizamientos indeseados.

El cable usado en el robot es un hilo de nylon usado para la pesca profesional el cual es capaz de soportar hasta 80kg de peso con un diámetro de tan solo 0,4mm.

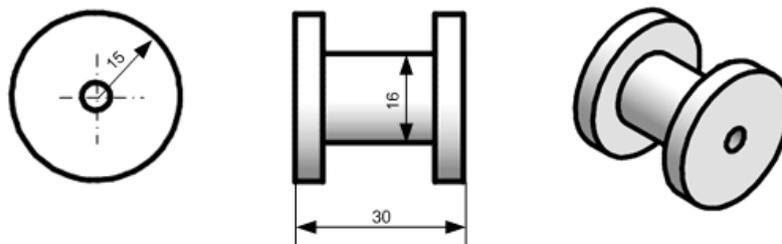


Figura 3.3.4. Cotas del carrete fabricado para el arrollamiento de cables

Teniendo en cuenta el diámetro de la zona del carrete que alberga el hilo y el paso en grados del motor PaP calculamos la resolución del movimiento lineal del robot.

$$L = \pi \cdot d = \pi \cdot 16 \approx 50,26mm \rightarrow 360^\circ \tag{4}$$

$$50,26mm \rightarrow 360^\circ$$

$$0,125mm \rightarrow 0,9^\circ$$

La resolución por paso es de 0,125mm más que suficiente para nuestros requerimientos, pero si necesitásemos mayor resolución existe la posibilidad de configurar el driver de los motores con micro-pasos 1/2, 1/4, 1/8 o 1/16.

Como se ha comentado en varias ocasiones, los motores giraran siempre a la misma velocidad para evitar holguras y/o sobre tensiones en los cables, pero el giro de estos determinará el movimiento del efector, de forma que siguiendo esta tabla se determina la dirección del efector en función del giro de los motores.

Movimientos del efector				
Dirección	M1	M2	M3	M4
+X	Atrás	Atrás	Adelante	Adelante
-X	Adelante	Adelante	Atrás	Atrás
+Y	Adelante	Atrás	Adelante	Atrás
-Y	Atrás	Adelante	Atrás	Adelante
+Z	Atrás	Atrás	Atrás	Atrás
-Z	Adelante	Adelante	Adelante	Adelante

Tabla 9. Tabla de la verdad para movimientos del efector

Cabe destacar, que el movimiento en el eje $-Z$ tiene su limitación en velocidad, al contrario que el resto de movimientos que si se pueden realizar con el movimiento del motor, el eje $-Z$ queda limitado a la fuerza de la gravedad, por lo tanto habrá que tener cuidado para no realizar una bajada demasiado brusca y destensar los cables.

Con estos giros de los motores se consiguen movimientos ortogonales en el efector, es decir, solo se moverá en un solo eje y no tiene la posibilidad de realizar movimientos combinados en los dos ejes, no realizando movimientos en diagonal.

Este motivo es debido a la complejidad del control y se ha optado por limitarlo en primera instancia, con la finalidad de aprender a controlarlo con estos movimientos y más adelante realizar una combinación de movimientos reduciendo así el tiempo de operación o dando la posibilidad de realizar movimientos circulares o en diagonal.

3.3.1. Control del sistema

Para la confección de este proyecto se han realizado consultas en diferentes medios sobre el funcionamiento de este tipo de robots. La realización de un buen control puede llegar a complicarse muchísimo y la obtención de un modelo matemático podría ser una tesis completa debido a las diferentes fuentes de incertidumbre en el proceso de ajuste como la complejidad de los movimientos coordinados entre todos los actuadores, los momentos de inercia del efector, la elasticidad de los cables o el centro de masas del mismo efector final.

Debido a que este proyecto está enfocado a un trabajo a corto plazo, en el cual se va a construir una maqueta para realizar trabajos didácticos a nivel personal no se tienen en cuenta todo este tipo de características por escaparse a las premisas finales del proyecto, pero se ha considerado oportuno dejar reflejados varios trabajos de investigación sobre el control de este tipo de robots que otros investigadores han realizado. Con esto se quiere exponer que el control a nivel industrial no es nada trivial pero para la realización de la maqueta se pueden obviar pero siempre se deben considerar si las premisas finales del proyecto se enfocan a un ámbito más profesional.

Artículos de investigación encontrados en IEEE los cuales han sido expuestos en diferentes conferencias de investigación robótica y publicados en la propia edición del IEEE. (<http://ieeexplore.ieee.org>):

- a) SO-RYEOK, Oh & AGRAWAL, S.K. Department of Mechanical Engineering, Delaware University, Newark, USA. 14-19 Sept. 2003.

Cable-suspended planar parallel robots with redundant cables: controllers with positive cable tensions.

Este artículo describe varios enfoques de control de un robot controlado por cables demostrando su eficacia a través de simulaciones sobre un robot de cables con tres grados de libertad y con cuatro, cinco y seis cables.

- b) KHOSRAVI, M.A. & TAGHIRAD, H.D. & OFTADEH, R. Industrial Control Center of Excellence (ICCE), K.N. Toosi University of Technology of Tehran. 18-22 Oct. 2010.

Forward kinematic analysis of a planar cable driven redundant parallel manipulator using force sensors.

Estudio de investigación sobre la cinemática directa de un manipulador paralelo con accionamientos redundantes. Estudio en el cual se han añadido sensores de fuerza en los cables para mantener la tensión. Para encontrar una solución adecuada, se analizan las características geométricas y físicas del robot. Se

muestra que el método propuesto proporciona la precisión requerida y mejora significativamente el tiempo de proceso en comparación con otros métodos más convencionales.

- c) KHOSRAVI, M.A. & TAGHIRAD, H.D. & OFTADEH, R. Industrial Control Center of Excellence (ICCE), K.N. Toosi University of Technology of Tehran. 13-15 Feb. 2013.

A positive tensions PID controller for a planar cable robot: An experimental study.

Este artículo realiza un estudio experimental de robots paralelos controlados por cables teniendo en cuenta las condiciones de tensión en los cables. Realiza un control PID para garantizar que todos los cables tengan la misma tensión y reducir los errores. Finalmente realizan experimentos con un robot de la universidad K.N. Toosi demostrando que la estructura de control propuesta es capaz de proporcionar un rendimiento adecuado en la práctica.

- d) DIAO, X & MA, O. *Vibration analysis of cable-driven parallel manipulators.* 2009.

Debido a la propia construcción del robot, el sistema puede conducir a la vibración y causar que todo el sistema sea incontrolable. La vibración de un robot accionado por cables es una preocupación para algunas aplicaciones que requieren gran amplitud de trabajo o alta rigidez del sistema y que es tratado en este otro artículo.

Existen varias herramientas para realizar controles PID o cualquiera de sus combinaciones que además tienen enlace directo con MATLAB y con *Simulink*, lo cual dota al sistema de una gran potencia ya que es conocido por todas las posibilidades que tiene este entorno para la implementación de controladores, pero el precio de los equipos son bastante caros, por lo tanto como forma de aprender y mejorar como profesional se ha optado por implementar un firmware en ANSI C en una placa de desarrollo que más adelante se describe, con el fin de realizar pruebas e ir mejorando día a día el control.

De esta forma se pueden ir modificando los controles y poner en práctica todo lo aprendido en la asignatura de Control Discreto impartida en este curso e introducir los resultados de distintas ecuaciones en diferencias que se pueden ir planteando en las pruebas a realizar.

En un futuro es posible que se sustituyan los controles actuales por una tarjeta de la firma americana *National Instruments* la cual puede ser comandada mediante el software LabView® con el cual se pueden hacer grandes controles, pero esto ya queda para mejoras a futuro.

3.3.2. Cinemática del robot

Para la realización del control se asume que la masa y elasticidad de los cables son nulas ya que son mucho más pequeñas y ligeras que el resto de las partes mecánicas y el peso que van a soportar, también que los cables están unidos al efector en un mismo punto, por lo tanto lo único a tener en cuenta si se desea realizar un estudio cinemático sería la masa del efector final y las longitudes y ángulos de los cables tal y como lo han estudiado en los anteriores artículos científicos.

La cinemática inversa se usa para realizar el control ya que pretende determinar las distancias de los cables a partir de la posición del efector, y la cinemática directa es necesaria para la simulación y el control basado en sensores ya que determina la posición del efector a partir de las longitudes y ángulos de los cables.

Suponemos siempre que la tensión en los cables es siempre igual en todos, de esta forma podemos realizar un estudio cinemático bastante aproximado a la realidad.

En la *Figura 3.3.5* se puede ver la configuración básica de un robot de cuatro cables con una vista en planta en la cual se muestran los cuatro motores y el espacio de trabajo cuadrangular abcd donde el efector se puede colocar en cualquier parte dentro del perímetro.

El origen de coordenadas cartesianas se coloca en el motor más cercano al vértice de origen que toma como referencia la cámara web.

La ubicación del efector se denota por (x,y,z) y las longitudes de los cables se miden desde el punto en el que salen de la guía pasacables de cada columna.

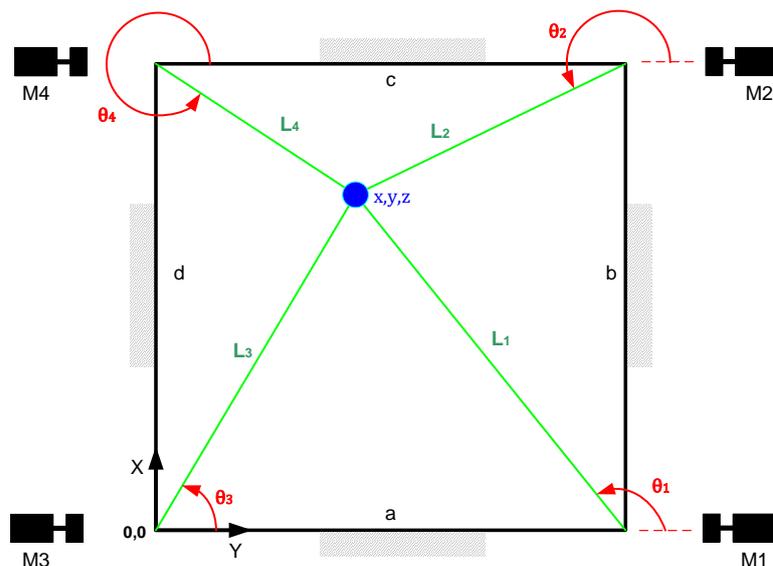


Figura 3.3.5. Vista básica de un robot de 4 cables

Conociendo las medidas de la estructura y las longitudes de los cables se puede llegar a calcular la posición del efector en el espacio realizando un pequeño estudio de cinemática directa e inversa.

Las longitudes de los cables se pueden expresar como:

$$L_i = L_{i0} + \delta_i \cdot r \quad (5)$$

Donde: $i = 1,2,3,4$

L_{i0} = Longitud inicial del cable

δ_i = Es el ángulo de rotación del motor (rad)

r = Es el radio del carrete del cable

Sabiendo que la rotación del motor es directamente proporcional a la cantidad de cable que se extiende o se retrae.

Así que las expresiones para L_i se pueden describir utilizando la siguiente fórmula:

$$L_i = \sqrt{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2 + (z - z_i)^2} \quad (6)$$

Donde x_i, y_i, z_i son las localizaciones que tomamos de origen para los cables:

$$(x_1, y_1, z_1) = (a, 0, 0) \quad (7)$$

$$(x_2, y_2, z_2) = (a, b, 0) \quad (8)$$

$$(x_3, y_3, z_3) = (0, 0, 0) \quad (9)$$

$$(x_4, y_4, z_4) = (0, d, 0) \quad (10)$$

Combinando las ecuaciones 6-10 se puede calcular la relación de cinemática inversa con las longitudes de los cables en relación a la posición del efector:

$$L_1 = \sqrt{(x - a)^2 + y^2 + z^2} \quad (11)$$

$$L_2 = \sqrt{(x - a)^2 + (y - b)^2 + z^2} \quad (12)$$

$$L_3 = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2} \quad (13)$$

$$L_4 = \sqrt{x^2 + (y - d)^2 + z^2} \quad (14)$$

Para realizar este estudio, es necesario conocer los ángulos de los cables:

$$\theta_i = \tan^{-1} \left(\frac{y - y_i}{x - x_i} \right) \quad (15)$$

Resolviendo las ecuaciones 11-15 se pueden obtener los valores de posición (x, y, z):

$$x = \frac{1}{2 \cdot d} \cdot (d^2 + L_3^2 - L_1^2) \tag{16}$$

$$y = \sqrt{L_3^2 - x^2} \tag{17}$$

$$z = -\sqrt{L_3^2 - x^2 - y^2} \tag{18}$$

En la actualidad existen programas matemáticos que te pueden ayudar a realizar el estudio de trayectorias en robots como por ejemplo MATLAB, con el cual se calculan los movimientos para saber la posición del efector en función de las longitudes de los cables y los ángulos de estos.

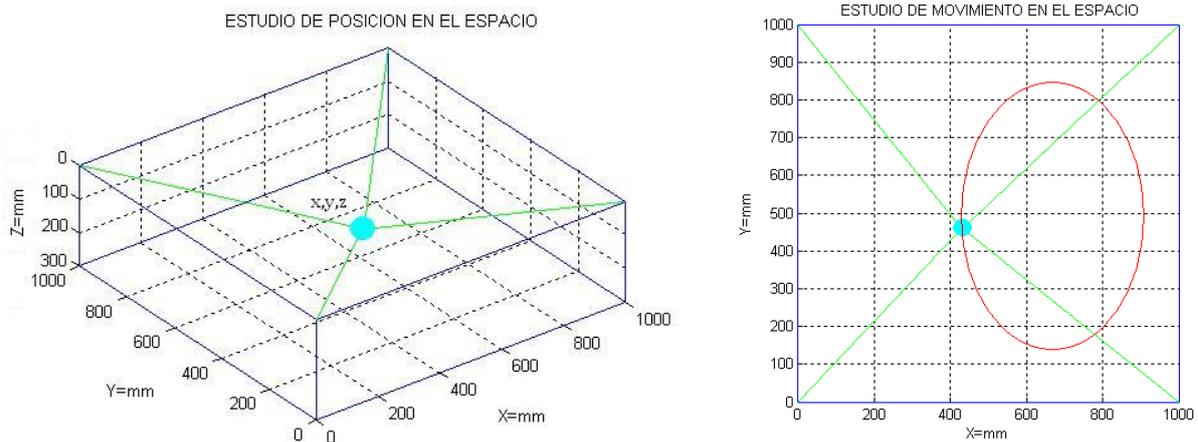


Figura 3.3.6. Estudio cinemático del robot con la herramienta MATLAB

3.3.3. Control de velocidad

Un gran problema o reto que se ha observado en los diferentes artículos e información visitada en las labores de investigación previa al diseño es desarrollar un sistema de control de la trayectoria del efector ya que es necesario calcular en tiempo real la velocidad de cada uno de los motores en función de la cinemática del robot.

Es necesario realizar un algoritmo de cálculo que permita al controlador de cada motor variar la velocidad de este en función del punto inicial y el punto final del efector, calculando la longitud de cable necesaria que debe extender o recoger.

Un gran trabajo relacionado con este tema es el que aportan unos investigadores del Instituto Fraunhofer el cual ponen en práctica sobre el robot IPAnema donde implementan un algoritmo en tiempo real para el cálculo de la trayectoria.

POTT, Andreas. *An algorithm for real-time forward kinematics of cable-driven parallel robots*. 12th International Symposium on Advances in Robot Kinematics, Springer, Piran Portoroz and Slovenio. 2010.

Se podrían considerar dos tipos de controles, uno para los movimientos ortogonales en los cuales los cuatro motores giran a la misma velocidad y en el sentido correspondiente al movimiento del efector (*Tabla 9*) y por lo tanto las longitudes de los cables varían con igual valor. Sin embargo, si una o varias longitudes de cable son diferentes al resto (ocurre con los movimientos diagonales o circulares) es necesario un control de velocidad individual en cada motor para asegurarse que no existen holguras en el cable en toda su trayectoria.

Un problema añadido a este control es la necesidad de instalar un sensor de velocidad o encoder en cada uno de los motores si se desea realizar un sistema de regulación en lazo cerrado y es algo que de momento no es factible debido al incremento de precio del sistema.

Si así se hiciese, se contemplaría un control por ejemplo PID o cualquiera de sus combinaciones, en el cual se podrían realizar pruebas con los valores de K_p , K_d y K_i hasta obtener un resultado óptimo con una rápida corrección del error.

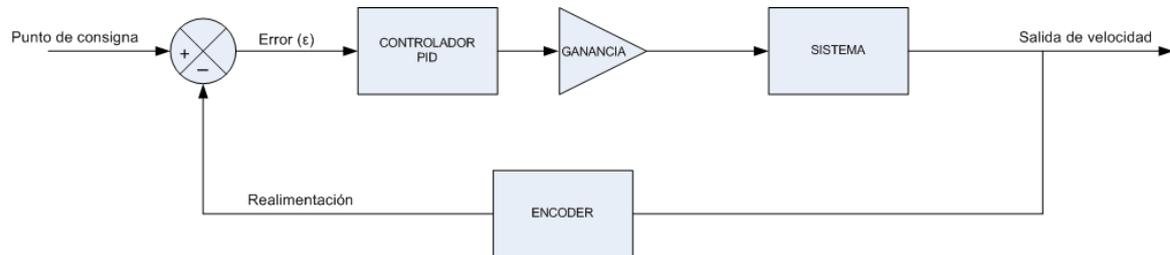


Figura 3.3.7. Ejemplo diagrama de flujo de un control PID

Este robot a diferencia de los de cinemática serie, solo realiza traslaciones y no rotaciones por lo tanto se pueden aplicar los movimientos de traslación de los robots tradicionales con el fin de calcular una trayectoria recta del efector sin necesidad de añadir la información relacionada con la orientación que viene dada por la siguiente ecuación:

$$\begin{bmatrix} r_x \\ r_y \\ r_z \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & p_x \\ 0 & 1 & 0 & p_y \\ 0 & 0 & 1 & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} r_u \\ r_v \\ r_w \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_u + p_x \\ r_v + p_y \\ r_w + p_z \\ 1 \end{bmatrix} \quad (19)$$

Así, un vector cualquiera r , representado en el sistema $O'UVW$ por r_{uvw} , tendrá unas coordenadas diferentes (r_{xyz}) desde el sistema de referencia $OXYZ$:

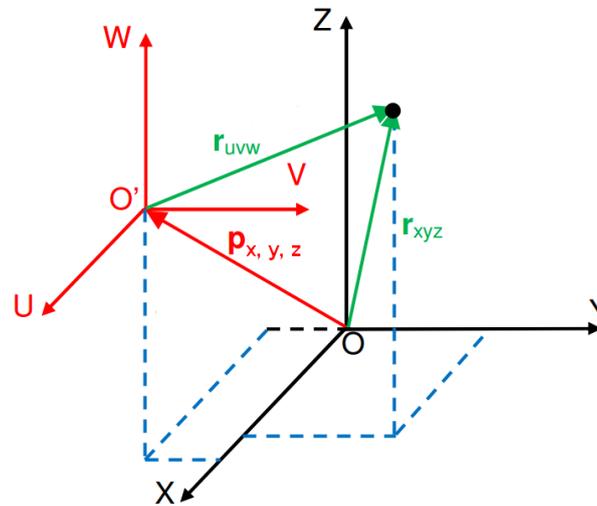


Figura 3.3.8. Representación gráfica de una traslación en un espacio 3D

Según lo aprendido en la asignatura de robótica, la cinemática del robot también trata la relación entre las velocidades de las articulaciones y de la posición del extremo. Esta relación queda definida por el llamado modelo diferencial.

A partir de este modelo, el sistema de control del robot puede decidir qué velocidades deben llevar cada articulación para conseguir que el extremo del robot siga una trayectoria concreta.

En general, la matriz jacobiana de un robot, relaciona el vector de velocidades articulares, en este caso los cuatro motores PaP, con otro vector de velocidades expresado en un espacio diferente como la utilización de la relación de las velocidades articulares con los vectores de velocidad lineal a la que se mueve el efector.

Para no seguir profundizando en el tema ya que daría para otro trabajo completo, lo que quiero expresar es que el control debe calcular la trayectoria y la velocidad de cada motor en función del punto inicial y el punto final.

En la figura 3.3.9 se aprecian los cálculos que se deben realizar para obtener la velocidad de cada motor teniendo en cuenta la combinación de los ejes X, Y, Z en el volumen tridimensional de trabajo.

Desde el punto x,y,z hasta el punto x',y',z' existe una traslación del vector r , por lo tanto las longitudes L_1, L_2, L_3 y L_4 varían hasta alcanzar las longitudes $L_{1'}, L_{2'}, L_{3'}$ y $L_{4'}$

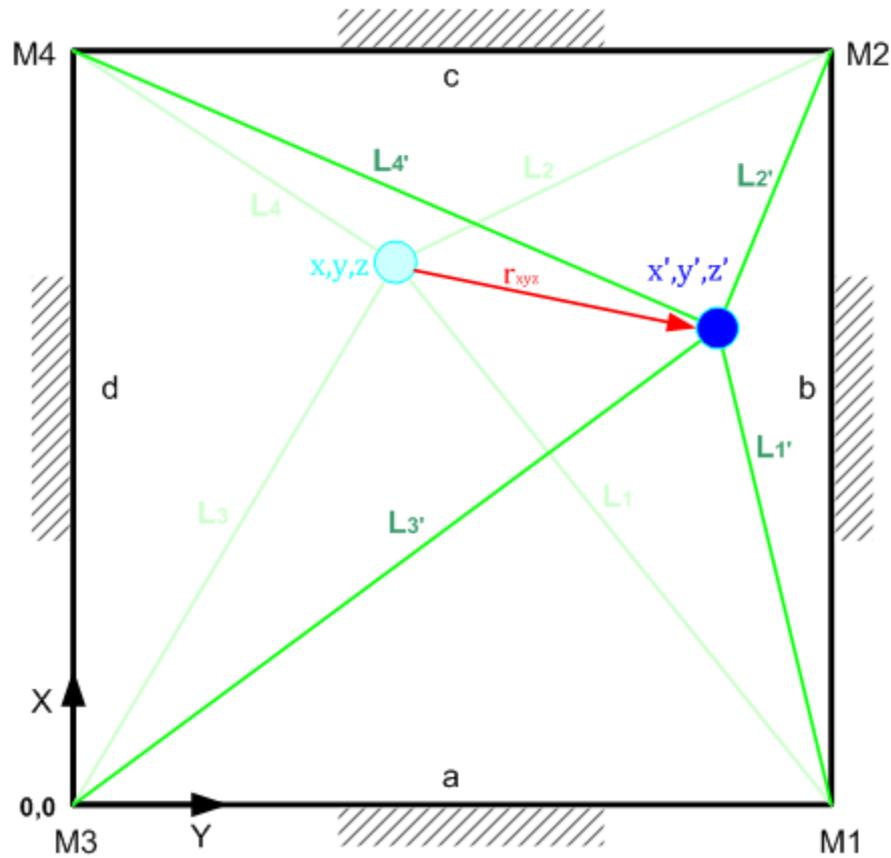


Figura 3.3.9. Ejemplo de traslación de un punto a otro en el espacio de trabajo

Conocidos los datos L_1, L_2, L_3 y L_4 y los puntos (x,y,z) y (x',y',z') se obtienen las longitudes de los cables L_1', L_2', L_3' y L_4'

$$L_1' = \sqrt{(x - a)^2 + y^2 + z^2} \tag{20}$$

$$L_2' = \sqrt{(x - a)^2 + (y - b)^2 + z^2} \tag{21}$$

$$L_3' = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2} \tag{22}$$

$$L_4' = \sqrt{x^2 + (y - d)^2 + z^2} \tag{23}$$

Con estas longitudes podemos calcular la diferencia de longitud de cable (L_f) que cada motor debe sacar o recoger hasta alcanzar la posición final.

$$L_f = L_i' - L_i \quad n = 1,2,3,4 \tag{24}$$

Conocidas ya estas longitudes se puede actuar sobre la frecuencia de la señal de *clock* de los drivers de los motores PaP, lo que implica que dicha señal de *clock* sea independiente para cada uno de los controladores.

Resumiendo, el controlador del robot que se mueve en coordenadas cartesianas, simplemente mueve al manipulador a los puntos especificados según sus ejes de coordenadas, pudiendo efectuar traslaciones según los tres ejes en forma sucesiva o simultánea.

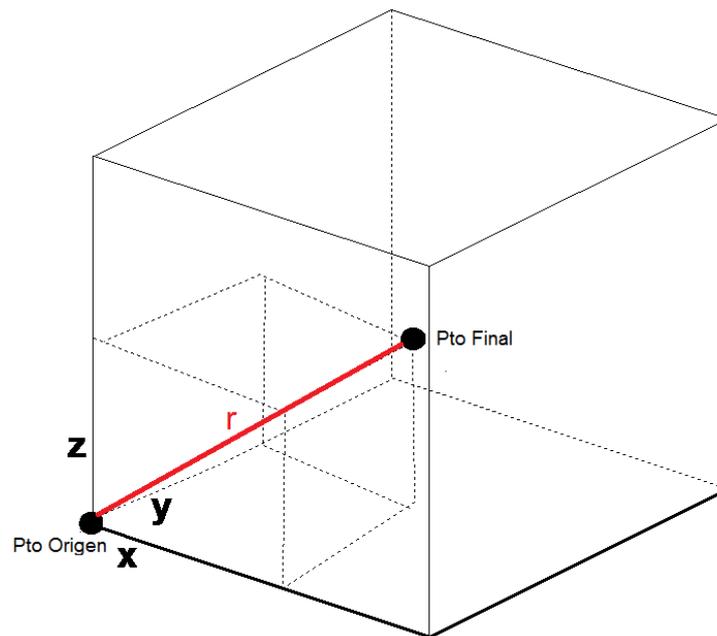


Figura 3.3.10. Representación 3D de una traslación

Un buen trabajo de investigación es el realizado y expuesto en este artículo en el cual realizan un control de velocidad en un robot de cinemática paralela controlado por cuatro cables pero en 2 ejes:

WILLIAM, R.L. & GALLINA, P. *Planar Cable-Direct-Driven Robots, Part I: Kinematics and Statics*. 2001 ASME Design Technical Conferences 2th Design Automation Conference September 9-12, 2001, Pittsburgh, PA

3.3.4. Secuencia de movimientos

La secuencia de movimientos está determinada por los datos recibidos desde el software de visión artificial, que se encarga de realizar el PDI de la imagen adquirida y obtener los datos necesarios para realizar los movimientos.

TABLE

Numero	Coordenada X	Coordenada Y	Forma	Color	Orientacion
1	116	291	Circulo	Amarilla	0
2	160	87	Cuadrado	Amarilla	11
3	225	287	Circulo	Amarilla	0
4	336	101	Triangulo	Amarilla	38
5	362	235	Circulo	Amarilla	0
6	147	188	Cuadrado	Roja	45
7	243	180	Triangulo	Roja	22
8	325	309	Circulo	Roja	0

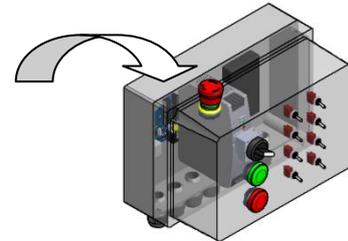


Figura 3.3.11. Transferencia de datos

- **Paso 1: Posicionamiento en origen.**

Gracias al trabajo realizado en el software de visión artificial, los datos de las coordenadas ya son transferidos en milímetros, así que en primer lugar hay que situar el efector en una posición conocida usada como referencia ($X=0$, $Y=0$, $Z=0$). Debido a la simplicidad del montaje esta posición se realiza de forma manual teniendo en cuenta que en posteriores revisiones se puede realizar de forma automática tal y como exponemos en el punto **5.1. Posibles mejoras.**

- **Paso 2: Movimiento en 2D.**

El siguiente paso es un movimiento en 2 dimensiones en los ejes X e Y desde la posición actual hasta la posición deseada.

- **Paso 3: Movimiento en eje Z.**

Una vez que el efector se encuentra en la posición X,Y deseada el siguiente paso es mover en el eje -Z una altura conocida hasta tener contacto con la pieza a recoger. En este momento actuamos sobre el electroimán agarrando la pieza y volvemos a elevar el efector en el eje +Z.

- **Paso 4: Almacenamiento de piezas.**

Cuando el efector esta en $Z=0$ éste se mueve de forma automática a unas coordenadas X,Y preestablecidas en función de las características de la pieza agarrada, es decir, cada tipo de pieza tiene asignada una localización de almacenamiento.

- **Paso 5: Retorno a posición inicial.**

Después de haber realizado un ciclo completo el efector se posicionará en el origen del volumen de la zona de trabajo ($X=0, Y=0, Z=0$) para volver a empezar.

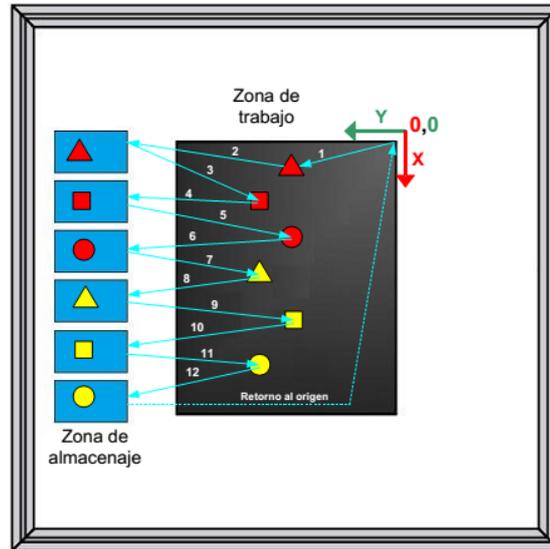


Figura 3.3.12. Posible secuencia de movimientos

3.4. Estructuras

Punto en el cual se detallan las estructuras planteadas para la fabricación del manipulador robótico y los elementos auxiliares asociados a ella.

3.4.1. Estructura central

El diseño de la estructura central pretende ser un sistema sencillo y robusto cuya facilidad de montaje permita la movilidad del sistema con la suficiente facilidad, por ello se ha optado por perfiles de aluminio extrusionado.

Las estructuras de perfil de aluminio son ligeras y resistentes y gracias a sus ranuras en T para soporte permiten anclar cualquier elemento con gran capacidad de regulación.

Entre la gran variedad de perfiles podemos encontrar los de ranura simple o doble y la geometría interior varía según pertenezcan a series ligeras o pesadas de carga.

Examinando las características suministradas por el fabricante elegimos para la fabricación de nuestra estructura el perfil de la marca RS:

Material de fabricación de las estructuras	
CARACTERISTICAS	
• Material aleación aluminio anodizado extruido	
• Perfil del puntal 40x40mm	
• Longitud 4x1m	
• Tamaño de ranura 8mm	
• Número de ranuras 4	
• Muy fácil de montar gracias a los accesorios	

Tabla 10. Características del material de la estructura

Gracias a las ranuras del interior se ha fijado una base de madera de 3 mm la cual nos ayuda a la colocación de la superficie de trabajo.

La superficie o zona de trabajo es la zona delimitada en la cual se colocan las piezas que se van a almacenar.

En un símil industrial podría considerarse como una zona en la cual una cinta transportadora envía las piezas para ser clasificadas.

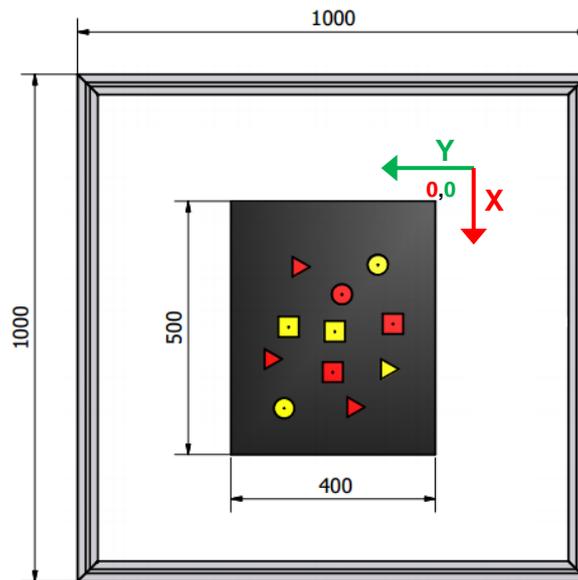


Figura 3.4.1. Superficie general y zona de trabajo

3.4.2. Estructuras complementarias

Cuando se habla de ¹estructuras complementarias, se refiere a las estructuras auxiliares que existen anejas a la estructura principal cuya función es también prioritaria dentro del funcionamiento del manipulador.

- a) **Soporte de webcam principal o acimutal:** Es la estructura usada para la fijación de la cámara web que realiza las instantáneas para el PDI. Dicha

¹Para más información de las estructuras y componentes del robot ver documento PLANOS.

estructura está diseñada para que el centro óptico de la Webcam quede aproximadamente en el centro de la zona de trabajo y la fijación debe ser férrea para que no se mueva por posibles golpes o vibraciones y para ello usamos varios elementos de fijación mecánica.

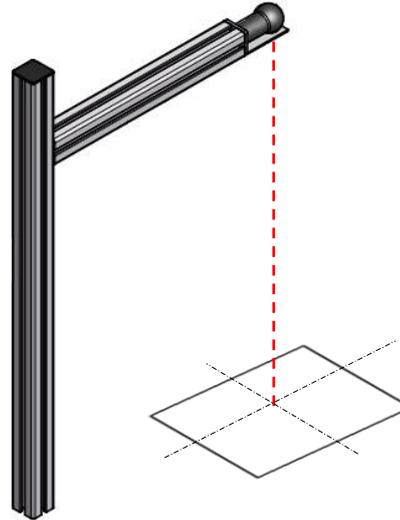


Figura 3.4.2. Estructura de fijación de webcam principal

- b) Soporte de focos de iluminación artificial:** Los focos están colocados de forma que generen el mínimo de sombras posible para no dificultar el PDI. Este modo de fijación permite ajustar la altura de los focos y además están provistos de un sistema de rotula para modificar la orientación según el requerimiento.

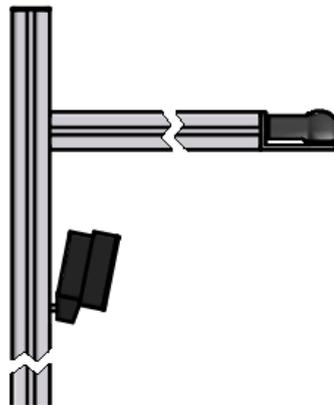


Figura 3.4.3. Foco en estructura de webcam

- c) Columnas base en las que se sostiene el efector:** El número de estas estructuras depende del número de puntos de fijación del efector final, en este caso se han usado cuatro por tema estético de simetría y por dar mayor movilidad al manipulador.

Las columnas son la estructura más compleja del sistema ya que en estas están instalados los motores, los carretes de enrollamiento del cable y las guías para que dicho cable circule sin problemas. En una de ellas se ha instalado un encoder usado para realizar el lazo de control.

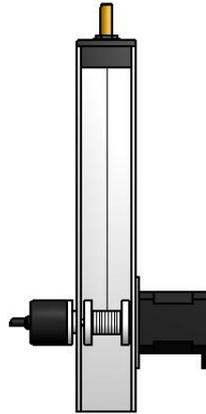


Figura 3.4.4. Estructura de una columna

- d) **Soporte para webcam secundaria o panorámica:** Como complemento se ha dotado al robot de una segunda cámara dando un punto de vista más panorámico mediante la cual se observa el recorrido que el efector realiza en su trabajo.



Figura 3.4.5. Fijación de un foco y la webcam auxiliar

3.4.3. Componentes

Para más información y detalle de todos los componentes implicados en el diseño y construcción de las estructuras del sistema robótico ver documento anexo **LISTA DE MATERIALES**.

3.5. Electrónica de control

La electrónica de control puede considerarse como el “*cerebro*” del sistema robótico ya que en ella se encuentra el μ controlador programable que le da las características de su comportamiento.

Estas funcionalidades son fácilmente configurables mediante programación, lo cual hace de este sistema un entrenador ideal para adentrarse en el mundo de la

programación de μ controladores en lenguaje C y realizar trabajos modificando las características que se consideren oportunas.

Se ha intentado realizar un diseño reducido y compacto que albergue todos los componentes necesarios en una sola envolvente, de este modo se puede montar y desmontar con facilidad.

Se ha dotado de elementos de control manual como un selector para el encendido general, varios interruptores para propósito general (usados para mover el manipulador de forma manual) y una parada de emergencia que corta la alimentación de todo el sistema evitando así posibles problemas a la hora de un mal funcionamiento del robot.

3.5.1. Vista general

Esta imagen muestra un listado de los componentes que forman la caja de la electrónica de control.

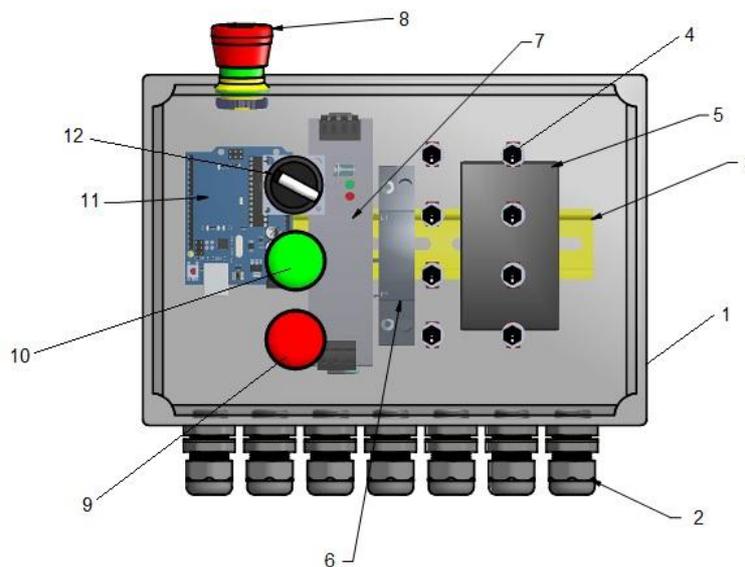


Figura 3.5.1. Vista general de la electrónica de control

Partes del sistema	
Referencia	Denominación
1	Caja de plástico ABS con tapa color humo de 255x180x150mm
2	Pasamuros para entrada/salida de cables de hasta 6mm ϕ
3	Carril DIN de 35mm para fijación de los elementos
4	Interruptores de palanca para accionamiento manual del robot
5	HUB de 7 puertos USB para interface de los elementos USB
6	Relé auxiliar como medida de seguridad
7	Fuente de alimentación 230Vac a 24Vdc 3A
8	Seta de seguridad de parada de emergencia
9	Indicador rojo de alarma por parada de emergencia
10	Indicador verde de funcionamiento
11	Tarjeta electrónica de control
12	Selector para el encendido general del equipo

Tabla 11. Componentes de la caja de control

3.5.2. Características de la electrónica

Características de la electrónica de control
• Tensión de alimentación a 230Vac
• Dimensiones reducidas
• Fácil fijación en la estructura mediante Dual Lock [®]
• Indicadores de estado para facilidad del manejo
• Mandos para accionamiento manual del robot
• Electrónica de control basada en la placa de desarrollo STM32F103RBT6
• Diseño de electrónica propietaria para el control de los motores
• Controladores basados en el chip de Allegro A4988
• Parada de emergencia para evitar destrucciones del robot
• Comportamiento fácilmente modificable mediante programación en C

Tabla 12. Características principales de la electrónica de control

3.5.3. Diagrama de bloques

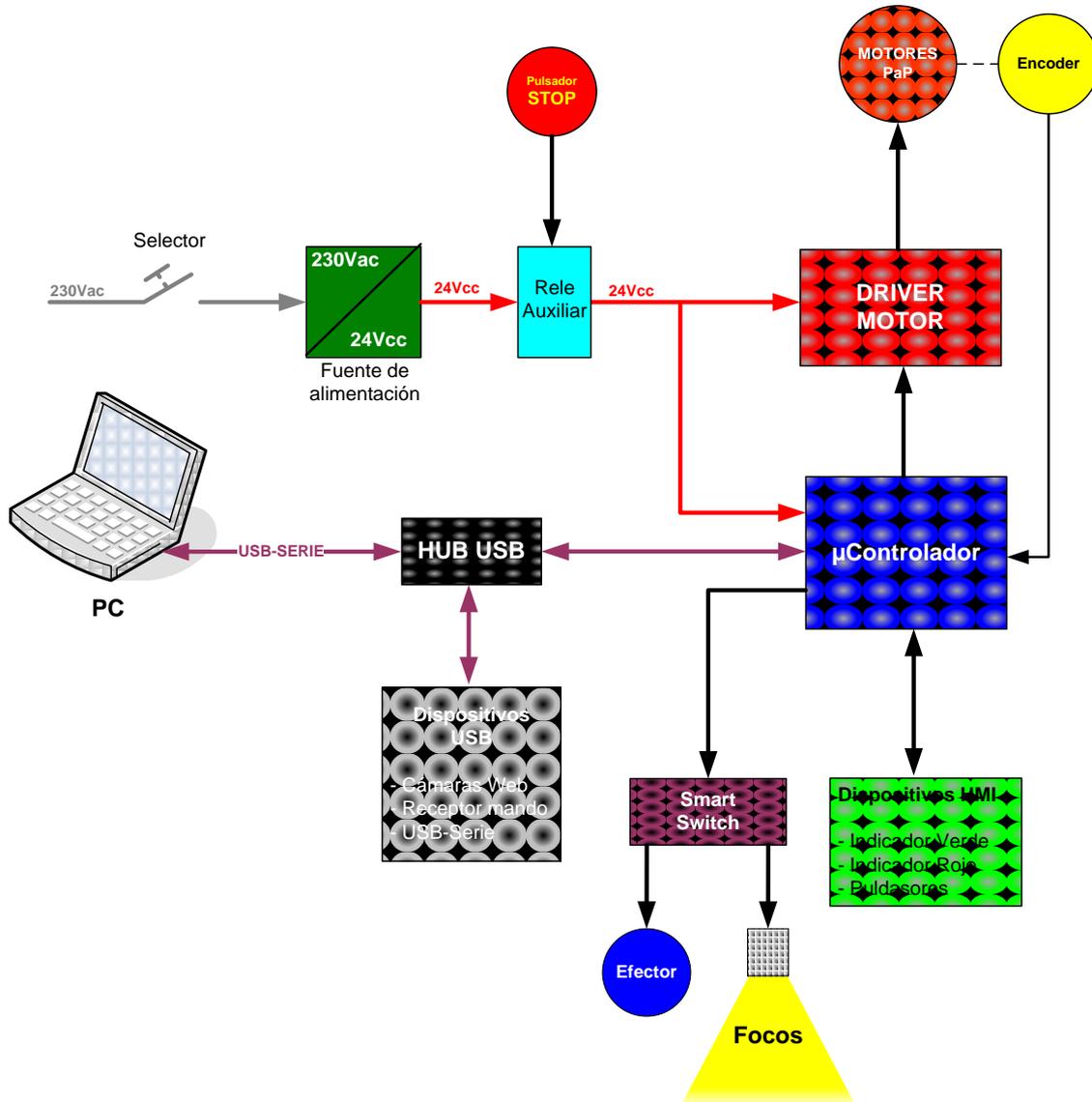


Figura 3.5.2. Diagrama de bloques del controlador electrónico

3.5.4. Componentes

En este punto se hace referencia a los componentes de la caja de control electrónico y se detallan los dos dispositivos principales de este módulo. Para más información sobre estos componentes ver el documento **LISTA DE MATERIALES**.

Básicamente, los 2 elementos en los que se basa esta electrónica son la placa de control y el driver de motores PaP que se detallan a continuación:

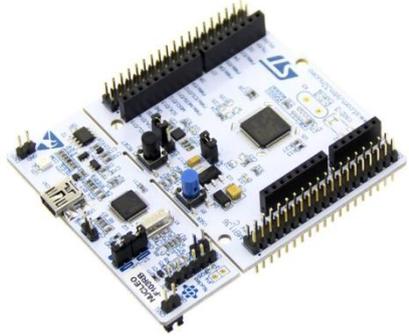
Placa de desarrollo para el control del robot	
CARACTERISTICAS	
• Arquitectura basada en ARM	
• μ Controlador STM32F103 de 32bits	
• Alimentación por USB	
• Pulsadores y LEDs programables	
• Programación a través de varias plataformas	
• Debugger integrado en la propia placa	
• Expansiones compatibles con Arduino®	
• Esquemáticos disponibles para adaptaciones	

Tabla 13. Características principales del μ controlador

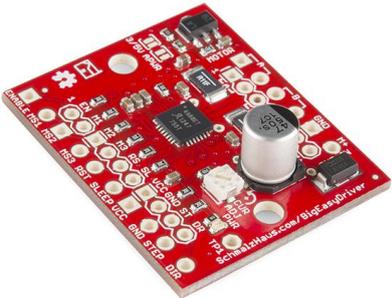
Driver de motor PaP	
CARACTERISTICAS	
• Basado en el chip de Allegro A4983	
• Uso para motores PaP bipolares	
• Corriente de salida 0...2A	
• Varias entradas de control	
• Posibilidad de control de micropasos	
• Limitación de corriente para no destruirlo	
• Entradas de señal a nivel TTL 3V	

Tabla 14. Características principales del driver de motores PaP

3.5.5. Firmware

Para que el controlador tenga las funcionalidades deseadas es necesaria una programación del dispositivo y para ello se ha implementado el firmware en ANSI C en el entorno de programación gratuito de IAR®. Para más información del código ver documento **Códigos Fuente**.

En esta imagen se puede apreciar el diagrama de flujo del firmware a implementar en la tarjeta de desarrollo del μ controlador.

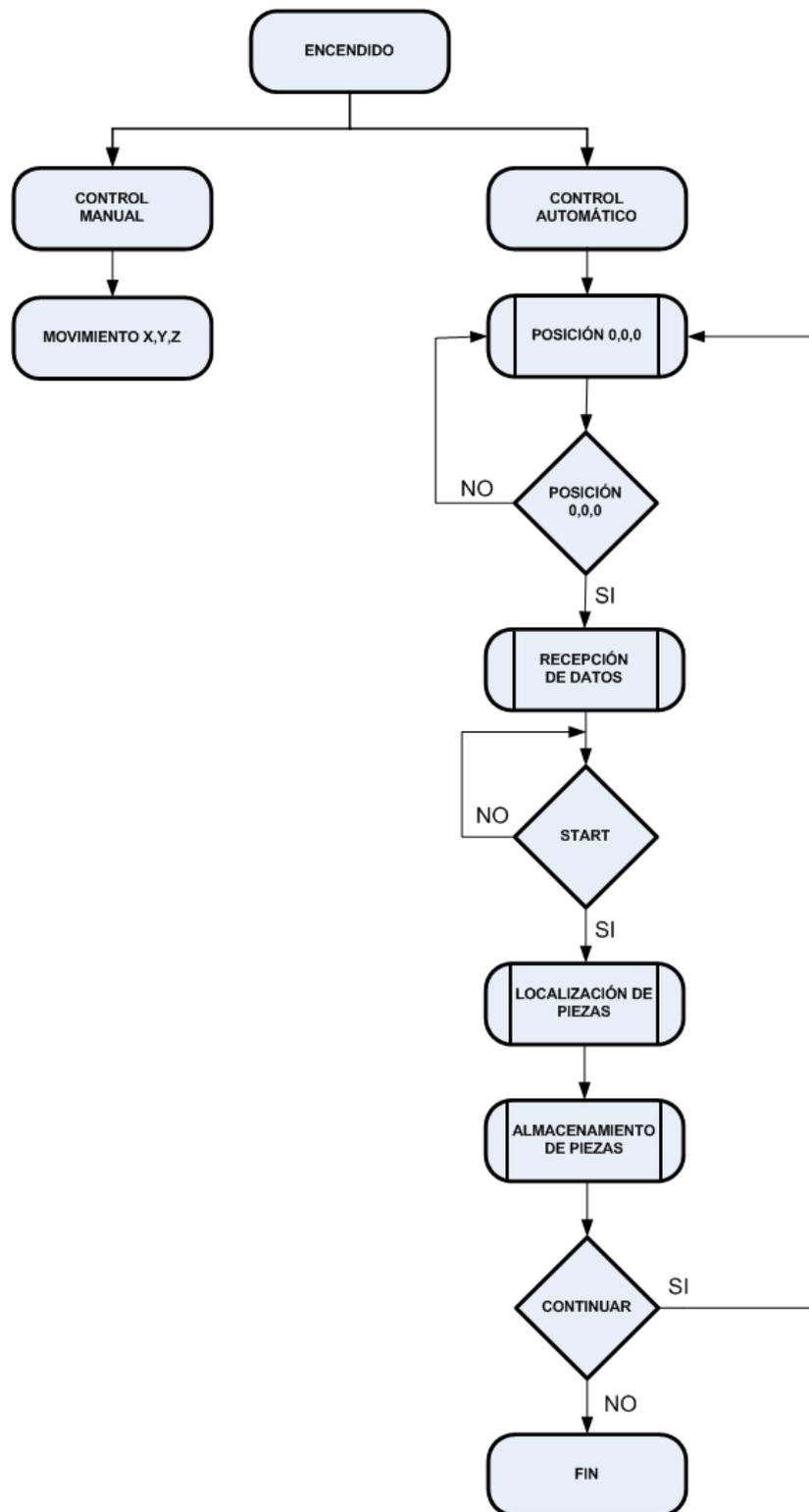


Figura 3.5.3. Diagrama de flujo del firmware

3.6. Software de visión artificial

Uno de los desarrollos realizados en este proyecto es una aplicación de visión artificial implementada bajo el programa MATLAB el cual consta de diferentes subrutinas o procedimientos con la extensión propia del programa *.m.

Para el manejo de dicha aplicación se ha desarrollado un *front-end* para facilitar las operaciones que es capaz de realizar. Para más información sobre este tema ver el documento **Manual de Usuario**.

3.6.1. Vista general

En esta ventana, se pueden realizar todas las operaciones necesarias para llevar a cabo nuestro cometido de visión artificial.

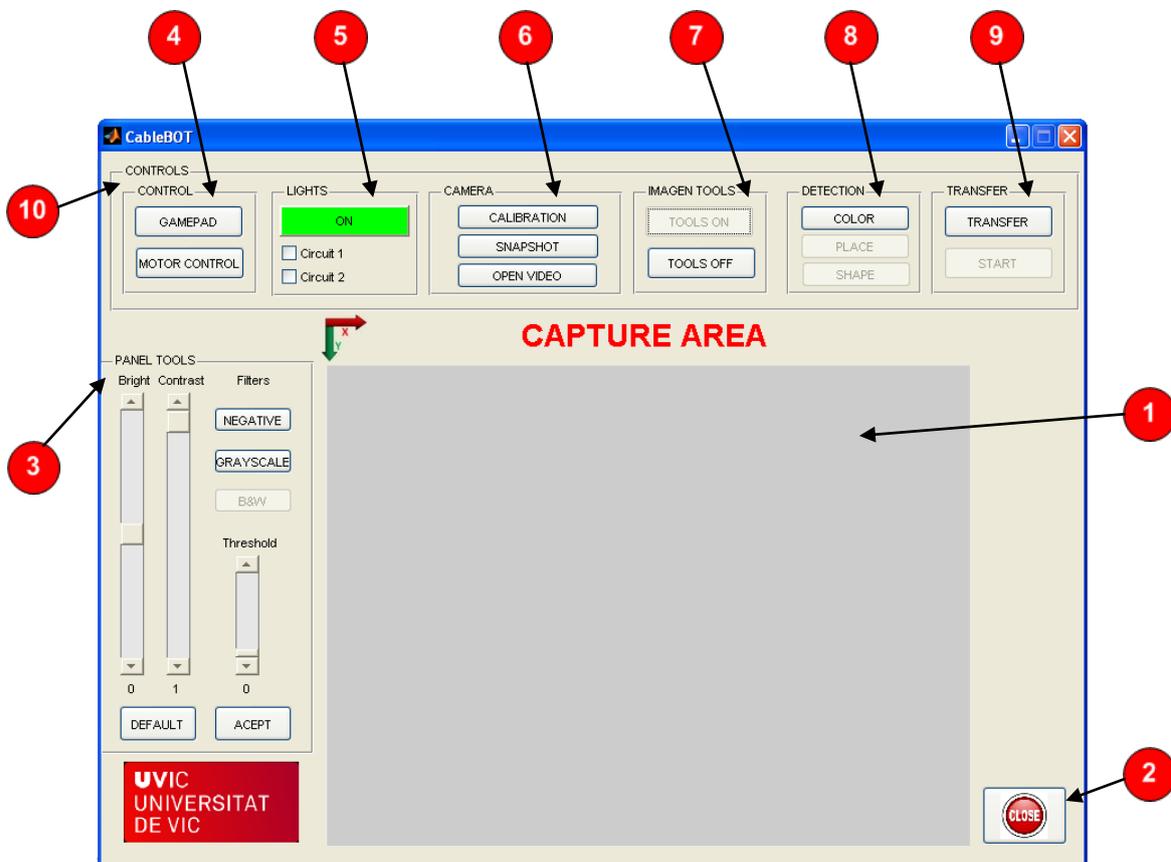


Figura 3.6.1. Imagen de la ventana principal de la aplicación

- 1: Zona de captura de la imagen
- 2: Botón SALIR
- 3: Panel de herramientas de imagen
- 4: Control del manipulador
- 5: Control de encendido de luces
- 6: Herramientas manejo de cámara
- 7: ON/OFF herramientas de imagen
- 8: Detección de propiedades
- 9: Herramientas de transferencia
- 10: Panel de controles

3.6.2. Características del software

Como resumen se describen una serie de características como forma de tener un mejor conocimiento de las posibilidades y dejar constancia del trabajo realizado.

Características de la aplicación de visión artificial
• Aplicación realizada en MATLAB.
• Front-end intuitivo para interactuar con el usuario.
• Mensajes de usuario para guía de funcionamiento.
• Desarrollado en diferentes subrutinas para diferenciar las operaciones.
• Método de calibración de imagen sencillo.
• Detección de características de piezas (color, posición, forma, orientación)
• Herramientas de PDI sencillas para realizar filtros de mejora de imagen.
• Transferencia de datos hacia el controlador electrónico de los motores PaP.
• Control directo con el hardware para encendido de luces.
• Mensajes de error cuando el procedimiento no es el correcto.
• Visualización de resultados de forma grafica y en modo texto con tabla.
• Control de los motores desde la misma aplicación.
• Interfaz de usuario para el control automático del manipulador robótico.

Tabla 15. Características principales de la aplicación de visión artificial

3.6.3. Diagrama de flujo

Con motivo de tener una mayor comprensión en el momento de ejecutar la aplicación, se expone el diagrama de flujo de la aplicación.

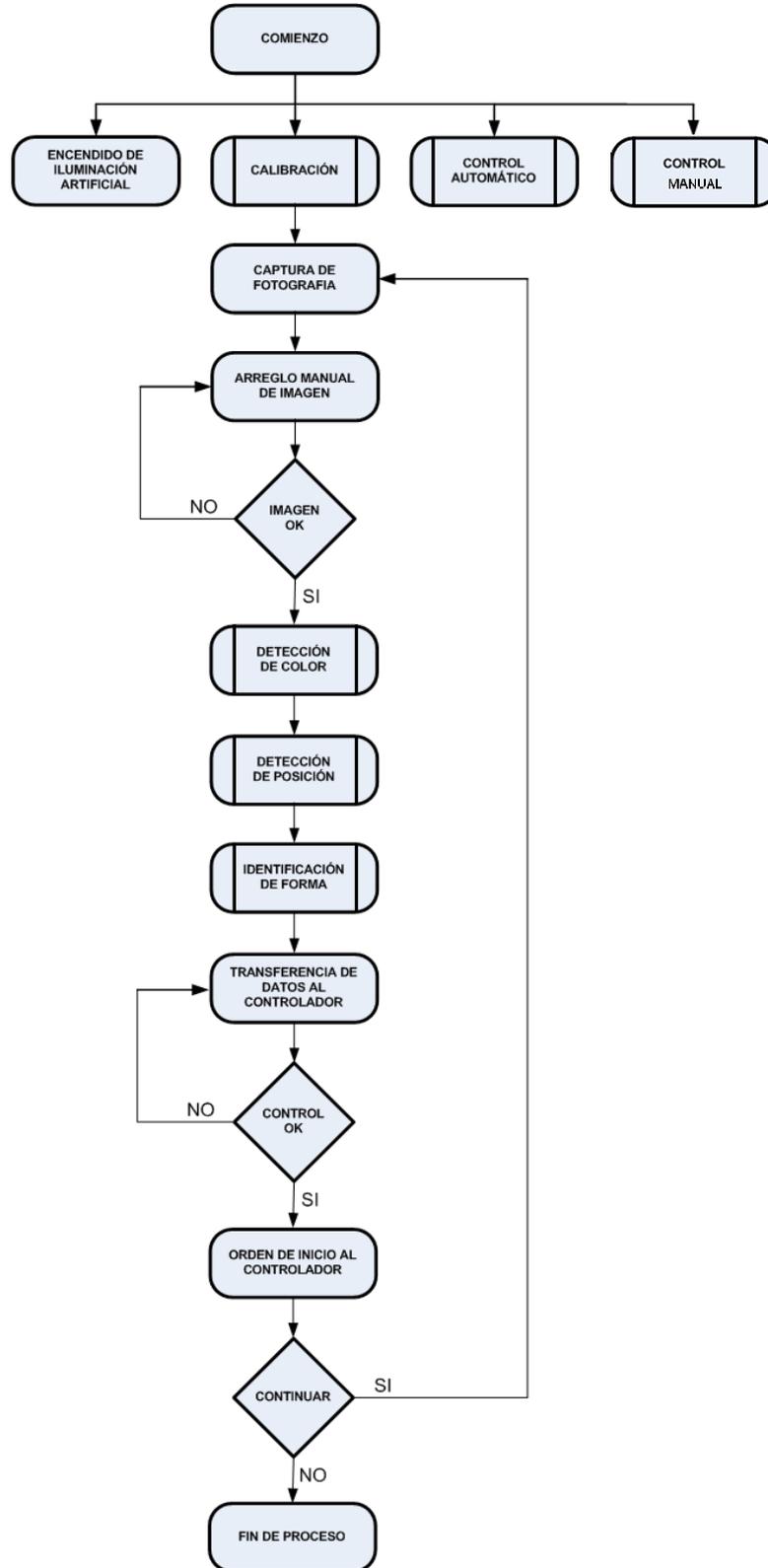


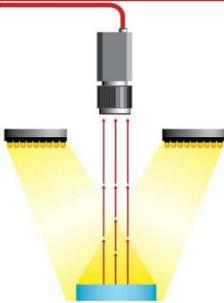
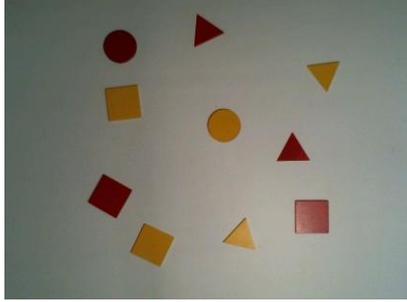
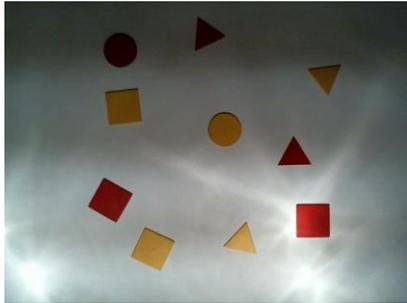
Figura 3.6.2. Diagrama de flujo del software

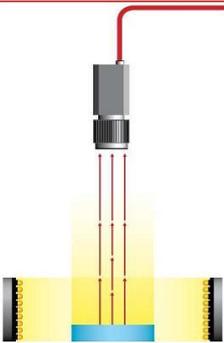
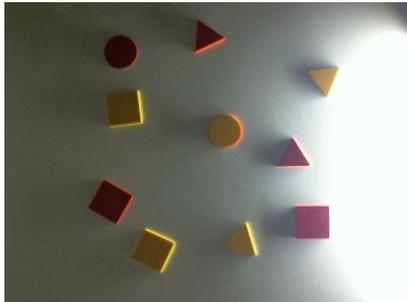
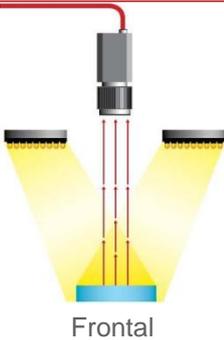
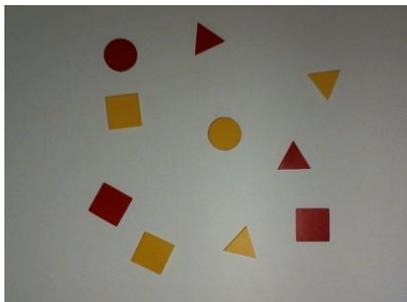
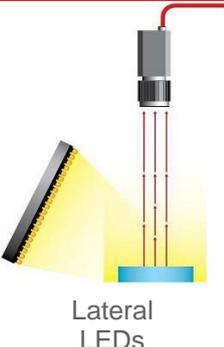
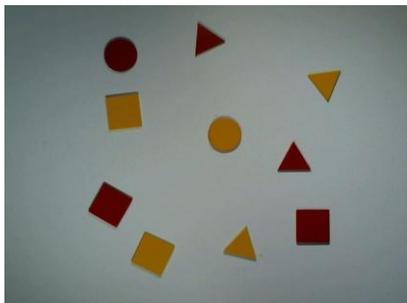
4. Resultados obtenidos

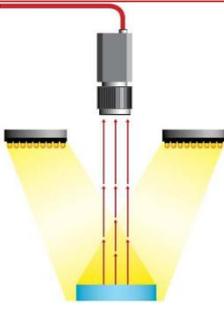
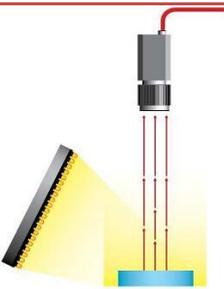
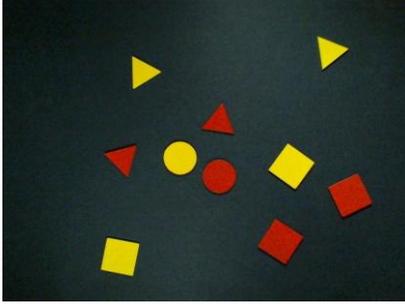
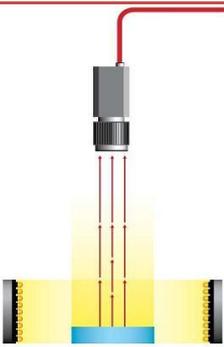
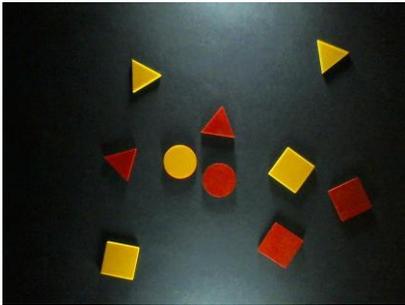
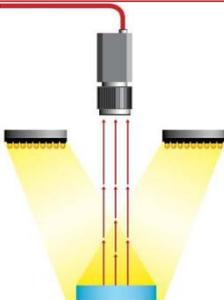
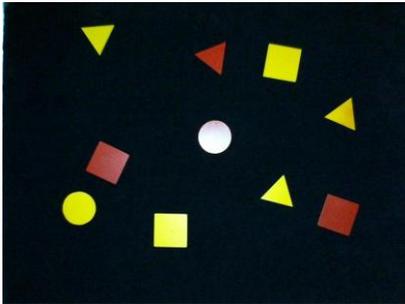
El presente punto 4 está directamente relacionado con el anterior punto 2. **Retos tecnológicos** ya que en este punto se exponen los resultados obtenidos en las diferentes pruebas realizadas para llegar a tener un sistema robótico óptimo.

4.1. Iluminación y zona de trabajo

En esta tabla resumen se indican algunas de las metodologías usadas hasta alcanzar la más óptima siendo esta la definitiva y usada en la maqueta. Hay que tener en cuenta que las pruebas realizadas se han hecho con materiales de bajo coste, y sin ánimo de ser reiterativo, destacar que no son materiales de ámbito industrial ya que los costes han sido sufragados por mi mismo pero el concepto se asemeja a lo que podrían ser unas pruebas más profesionales.

TABLA RESUMEN				
Iluminación	Base	Características	Resultados	Conclusión
 <p>Frontal Incandescente</p>	Blanca	<ul style="list-style-type: none"> Algunos reflejos Falta difusor Sombras indeseadas No es homogénea Difícil corregir por PDI 		<p style="text-align: center;">X</p> <p>Descartado</p>
 <p>Frontal Halógena</p>	Blanca	<ul style="list-style-type: none"> Muchos reflejos Muy focalizada Sombras indeseadas No es homogénea Imposible corregir por PDI 		<p style="text-align: center;">X</p> <p>Descartado</p>

 <p>Dark Field Fluorescente</p>	<p>Blanca</p>	<p>Muchos reflejos Sombras indeseadas No es homogénea Ruido de 50Hz Necesita 4 pts de luz Imposible corregir por PDI</p>		<p> Descartado</p>
 <p>Frontal Fluorescente</p>	<p>Blanca</p>	<p>Ruido de 50Hz Sombras alrededor No es homogénea Fácil corregir por PDI</p>		<p> Posible (Ruido 50Hz)</p>
 <p>Lateral LEDs</p>	<p>Blanca</p>	<p>Sombras alrededor No es homogénea Falta contraste Fácil corregir por PDI</p>		<p> Posible (Sombras)</p>
 <p>Frontal Incandescente</p>	<p>Cartón Negro</p>	<p>Sombras alrededor No es homogénea Muchos brillos y reflejos Imposible corregir por PDI</p>		<p> Descartado</p>

 <p>Anillo de luz LEDs</p>	<p>Cartón Negro</p>	<p>Focalizada en el centro Falta difusor Sombras alrededor Brillos en el centro Difícil corregir por PDI</p>		<p> Descartado</p>
 <p>Lateral LEDs</p>	<p>Cartón Negro</p>	<p>Algún brillo Buen contraste Muy fácil corregir por PDI</p>		<p> Posible (Brillo)</p>
 <p>Dark Field LEDs array</p>	<p>Cartón Negro</p>	<p>Zona de trabajo grande Muchos focos necesarios Muchas sombras Imposible corregir por PDI</p>		<p> Descartado</p>
 <p>Anillo de luz LEDs array</p>	<p>Filtro Negro</p>	<p>Foco muy centrado Brillo central Imposible corregir por PDI</p>		<p> Descartado</p>

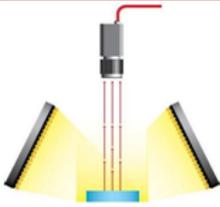
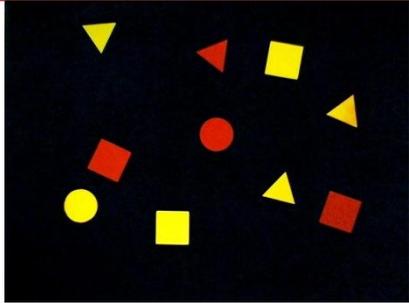
 <p>Doble lateral LEDs (difusor)</p>	<p>Filtro Negro</p>	<p>Muy homogéneo Mínimos brillos Excelente contraste Excelente para corrección</p>		 <p>APTO</p>
---	---------------------	--	--	---

Tabla 16. Resumen de algunas pruebas de iluminación realizadas

Las características de la base y foco elegido son:

Foco de iluminación seleccionado	
CARACTERISTICAS	
• Voltaje de operación 6...36V	
• Potencia hasta 2,9W	
• Regulación 10...100%	
• Tª del color 5400K	
• Nº de leds 76	
• Carcasa de plástico 109 x 107 x 52 mm	

Tabla 17. Características del foco

El foco seleccionado no dispone de regulación de intensidad por lo que se tuvo que diseñar un regulador e insertarlo en el interior con lo que sus características eléctricas fueron modificadas respecto a las de fábrica. El diseño se realizó en ORCAD basado en el chip AL8806 de la marca *Diodes* y se fabricó usando una maquina de prototipado rápido de PCBs *Protomat 91S*. Para controlar la regulación de intensidad se instaló un potenciómetro de panel en la parte posterior del mismo.

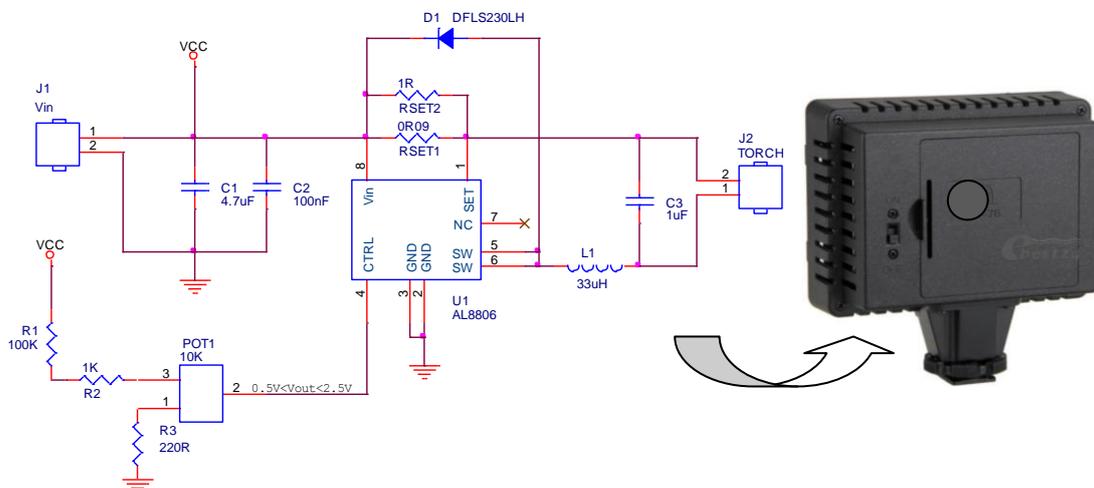


Figura 4.1.1. Desarrollo electrónico para mejora de iluminación

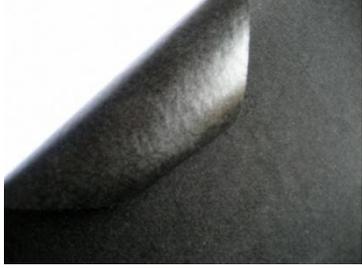
Material base de zona de trabajo	
CARACTERISTICAS	
• Tipo de material fieltro	
• Color negro	
• Material autoadhesivo	
• Tamaño 500x400mm	
• Elimina brillos indeseados	
• Muy fácil de conseguir	
• Muy económico	

Tabla 18. Características del material de la zona de trabajo

4.2. Procesado digital de la imagen

Descripción del proceso llevado a cabo en la aplicación de visión artificial en la cual partiendo de una imagen adquirida se realiza un PDI para obtener los resultados deseados.

En este punto se describen los procesos que mas trabajo han ocasionado y pueden catalogarse como retos tecnológicos como los de detección de las características deseadas tal como, detección de color, detección de posición e identificación de la forma y orientación. Para más detalle de la aplicación ver documento **Manual de Usuario**.

4.2.1. Cámara de visión artificial

La función de las cámaras de visión es capturar la imagen proyectada en el sensor para poder transferirla a un sistema electrónico. Las cámaras de video han evolucionado muy rápido desde las primeras cámaras equipadas con tubos vidicon hasta las más modernas cámaras provistas de sensores CCD. Las cámaras que se utilizan en visión artificial requieren una serie de características específicas, como el control del disparo de la cámara para capturar las piezas que pasan por delante de la cámara exactamente en la posición requerida, velocidad de obturación, sensibilidad...

En este caso no se han considerado todas las características ya que el precio de estas cámaras es elevado para la aplicación requerida pero dentro del catalogo se ha seleccionado una cámara de alta definición cuyo uso original es la de realizar video llamadas a través del ordenador y posee las siguientes características:

Cámara WEB para visión artificial	
CARACTERISTICAS	
• Captura de video HD 1280x720 pixeles	
• Fotografías hasta 8 MP	
• Óptica Logitech Fluid Crystal®	
• Enfoque automático	
• Conectividad USB 2.0 alta velocidad	
• Carcasa de plástico de gran dureza	
• LED indicador de encendido	

Tabla 19. Características de la cámara de visión artificial

Las instantáneas tomadas son de gran calidad si las condiciones ambientales como la iluminación o el enfoque son idóneas, así que tomando como base esta instantánea se realizan diferentes operaciones de PDI para obtener los resultados deseados. Debido a la inexperiencia previa en este tipo de trabajos, ha sido complicado obtener los resultados y la dedicación de tiempo y esfuerzo ha sido considerable aunque el conocimiento adquirido supera con creces todo ello.

4.2.2. Detección del color

En este punto se describe el algoritmo utilizado en la aplicación de visión artificial con el cual se discrimina entre los dos colores a detectar, el amarillo y el rojo. Antes de realizar este proceso la imagen ha sido filtrada para la mejora del tono, contraste y brillo ya que son unos aspectos muy importantes en los procesos PDI.

Para explicar este proceso, se recuerda la forma que tiene MATLAB de almacenar las imágenes a color en forma de matriz tridimensional, en la que cada capa corresponde a un color RGB.

En este caso, los colores amarillo y rojo corresponden a valores de:

- Amarillo R=255 G=255 B=0
- Rojo R=255 G=0 B=0

Cabe destacar, que al adquirir la imagen los valores de rojo y amarillo no son del todo puros, es decir, el valor RGB puede variar un pequeño rango y por eso se le añade un valor de tolerancia donde aceptamos como válido unos valores de $255 \pm 15\%$ y con esto evitamos la pérdida de pixeles.

Con este algoritmo se divide la imagen en las capas RGB, de forma que se obtienen 3 matrices independientes las cuales albergan solo los pixeles correspondientes a cada color:

```
valor_umbral=40; % Valor empírico

RGB_red = [255 255 0]; %RGB para el rojo
RGB_yellow = [255 0 0]; %RGB para el amarillo

% Cargar la imagen adquirida
I=imagen;
% Separar la matriz RGB en R(rojo), B (azul) y G (verde)
R=RGB(1);
G=RGB(2);
B=RGB(3);
% Realizar una comparación de cada pixel de la imagen de entrada con
% los valores de la matriz RGB
imagen_discriminada=(abs(I(:, :,1)-R)<valor_umbral)&(abs(I(:, :,2)-
G)<valor_umbral)&(abs(I(:, :,3)-B)<valor_umbral);

figure
subplot(1,2,1); imshow(imagen);
title('Imagen ORIGINAL');
subplot(1,2,2); imshow(imagen_resultado);
title('Piezas AMARILLAS / ROJAS');
```

El siguiente paso es discriminar cada pixel de forma que la matriz resultante “*imagen discriminada*” tendrá valor ‘1’ solo en los pixeles que correspondan al valor buscado obteniendo como resultado las imágenes deseadas.

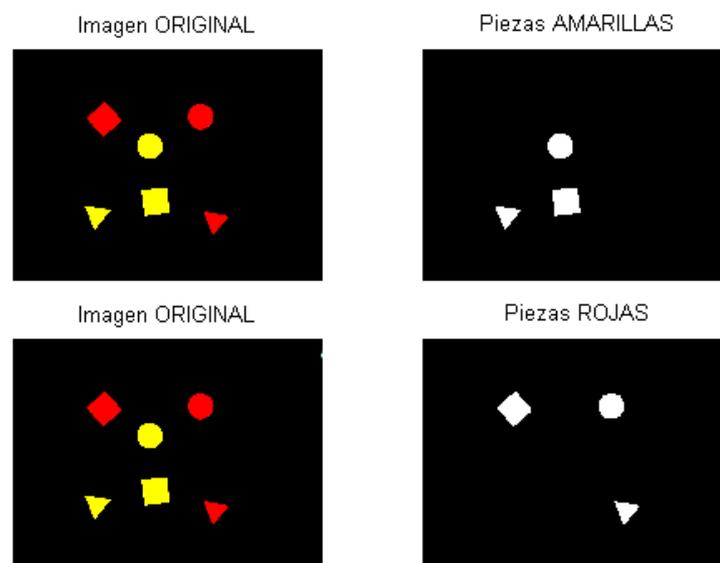


Figura 4.2.1. Resultado de la detección de color Rojo/Amarillo

Este proceso es muy configurable, ya que se pueden detectar piezas de cualquier color solamente conociendo el valor RGB de las mismas.

4.2.3. Detección de posición

Otra de las características a detectar es la posición de cada una de las piezas para que el robot sepa dónde ir a buscarlas y para ello realizamos una secuencia de procesamiento digital con cada una de las imágenes anteriormente obtenidas, piezas amarillas y piezas rojas.

```
%% Cargar la imagen adquirida
imagen=imagen_tratada;

%% Eliminar ruido
img_bn=bwareaopen(imagen,200);

%% Rellenar huecos vacios
se=strel('square',5);
img_br=imclose(img_bn,se);
se= strel('disk',5);
img_brl=imclose(img_br,se);
figure,imshow(img_brl);
title('Rellenada');

%% Etiquetar elementos
[L N]=bwlabel(img_brl);
figure,imshow(label2rgb(L));
title('Etiquetada');

%% Encontrar propiedades de los elementos
prop=regionprops(L,'all');
% Contar el número de objetos
np=length(prop);
% Matriz vacia para ir concatenando los centros de las figuras
centro=[ ];
figure,imshow(img_o);
title('Deteccion de centros');

%% Delimitar formas
hold on
for n=1:np
    rectangle('Position',prop(n).BoundingBox,'EdgeColor','r')
    x=prop(n).Centroid(1);
    y=prop(n).Centroid(2);
    centro=[centro;prop(n).Centroid];% Guardar el centro del objeto
    plot(x,y,'+')
end
hold off
```

En esta secuencia de PDI se observan los siguientes pasos:

- a) **Cargar la imagen adquirida:** Esta instrucción solamente toma la imagen adquirida por la webcam para realizar el PDI.
- b) **Eliminar ruido:** Elimina las áreas cuyo valor en píxeles es menor a 200 evitando así que se cuenten pequeños reflejos o sombras que no sean piezas.

- c) **Rellena huecos vacios:** Con esta parte de código se realiza un filtro morfológico también para eliminar ruido en el cual cierra la imagen binaria con dos elementos estructurantes, un cuadrado de lado 5 y un disco de radio 5.
- d) **Propiedades de los elementos:** Esta instrucción *regionprops* mide las propiedades de las regiones de una imagen y devuelve la medida de un grupo de propiedades para cada región etiquetada en la matriz L.
- e) **Delimitar formas:** Con esta parte del código se delimita cada forma dentro de un cuadrado para diferenciar cada pieza del fondo de la imagen.

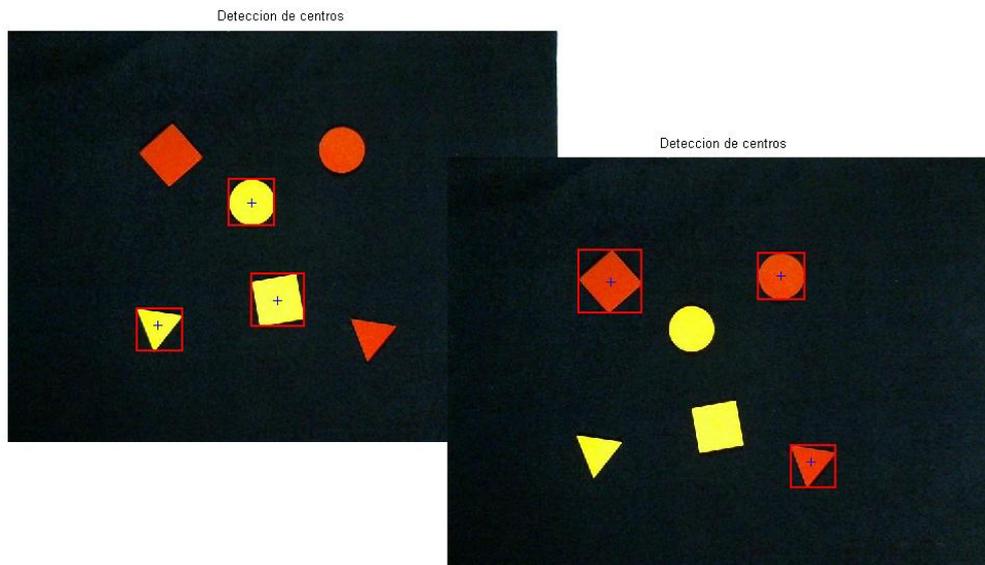


Figura 4.2.2. Resultado de la detección de posición de las piezas

4.2.4. Identificación de formas

Una característica del software de visión artificial es la identificación de formas y discriminar entre los tres tipos diferentes que hay, triángulo, cuadrado y círculo. Para ello se emplea un simple algoritmo en el cual detectamos los bordes con el uso de varios filtros morfológicos y se obtiene el área encerrada dentro de los bordes.

En este caso es posible debido a que el área de las figuras es diferente:

$$\text{Área del círculo:} \quad A = \pi r^2 \rightarrow 1256 \text{ mm}^2 \quad (25)$$

$$\text{Área del cuadrado:} \quad A = l \cdot l \rightarrow 1600 \text{ mm}^2 \quad (26)$$

$$\text{Área del triángulo:} \quad A = \frac{\sqrt{3}}{4} \cdot l^2 \rightarrow 693 \text{ mm}^2 \quad (27)$$

```
%% Muestra la imagen inicial
img=imagen_tratada;
figure,imshow(img_o,'InitialMagnification',200);
%% Pasar a escala de grises
img_g=rgb2gray(img);

%% Realzar los bordes
img_b=double(img_g)/255; % Convierte a double
h=firpm(80, [0 .1 .3 1], [1 1 1 1]); % Cálculo de un filtro
equiripple paso alto
h=ftrans2(h); % Convierte en filtro 2D
imf=filter2(h,img_b); % Filtrar la señal

%% Binarizar imagen
umb=graythresh(img_b+imf);
img_bw=im2bw((img_b+imf),(umb-umbral));

%% Eliminar ruido
img_bn=bwareaopen(img_bw,500);
figure,imshow(img_bn);
subplot(3,3,6),imshow(img_bn);
title('Sin ruido');
pause();%Espera a pulsar tecla

%% Rellenar huecos vacios
se=strel('square',5);
img_br=imclose(img_bn,se);

%% Etiquetar elementos
[L N]=bwlabel(img_br);

%% Encontrar propiedades de los elementos
prop=regionprops(L,'all');

% Contar el número de objetos
np=length(prop);

%% Marcar perimetro
hold on
B=bwboundaries(img_br);
for k = 1:np
    boundary = B{k};
    plot(boundary(:,2), boundary(:,1), 'c', 'LineWidth', 2)
    %disp(prop(k).Area);
end
hold off

%% Deteccion de formas amarillas
imagen_formas_amarillas=not(imagen_formas_amarillas);
imagen_formas_amarillas1 = bwareaopen(imagen_formas_amarillas,100);
[L N]=bwlabel(imagen_formas_amarillas1);
prop=regionprops(L,'all');
n_amarillas=length(prop);

figure, imshow(original_imagen_cam);
hold on
for k=1:n_amarillas
    if(prop(k).Area)>3900 && (prop(k).Area<5000)
```

```
        num_element(k,4)={'Circulo'};
        text(prop(k).Centroid(1)-50,prop(k).Centroid(2),'YELLOW
CIR','FontSize', 11,'Color','c','FontWeight', 'bold')
        disp(prop(k).Area);
        elseif (prop(k).Area)>5000 && (prop(k).Area<6500)
            num_element(k,4)={'Cuadrado'};
            text(prop(k).Centroid(1)-50,prop(k).Centroid(2),'YELLOW
SQ','FontSize', 11,'Color','c','FontWeight', 'bold')
            disp(prop(k).Area);
        elseif (prop(k).Area)>2000 && (prop(k).Area<3000)
            num_element(k,4)={'Triangulo'};
            text(prop(k).Centroid(1)-50,prop(k).Centroid(2),'YELLOW
TRI','FontSize', 11,'Color','c','FontWeight', 'bold')
            disp(prop(k).Area);
        end
    end
end

%% Deteccion de formas rojas
imagen_formas_rojas1 = bwareaopen(imagen_formas_rojas,100);
[L N]=bwlabel(imagen_formas_rojas1);
%figure, imshow(imagen_formas_rojas1)
prop=regionprops(L,'all');
n_rojas=length(prop);
x=1;
for k=n_amarillas+1:n_amarillas+n_rojas
    if(prop(x).Area)>4000 && (prop(x).Area<5000)
        num_element(k,4)={'Circulo'};
        text(prop(x).Centroid(1)-40,prop(x).Centroid(2),'RED
CIR','FontSize', 11,'Color','c','FontWeight', 'bold')
        disp(prop(x).Area);
    elseif (prop(x).Area)>5000 && (prop(x).Area<6500)
        num_element(k,4)={'Cuadrado'};
        text(prop(x).Centroid(1)-40,prop(x).Centroid(2),'RED
SQ','FontSize', 11,'Color','c','FontWeight', 'bold')
        disp(prop(x).Area);
    elseif (prop(x).Area)>2000 && (prop(x).Area<3000)
        num_element(k,4)={'Triangulo'};
        text(prop(x).Centroid(1)-40,prop(x).Centroid(2),'RED
TRI','FontSize', 11,'Color','c','FontWeight', 'bold')
        disp(prop(x).Area);
    end
    x=x+1;
end
end
```

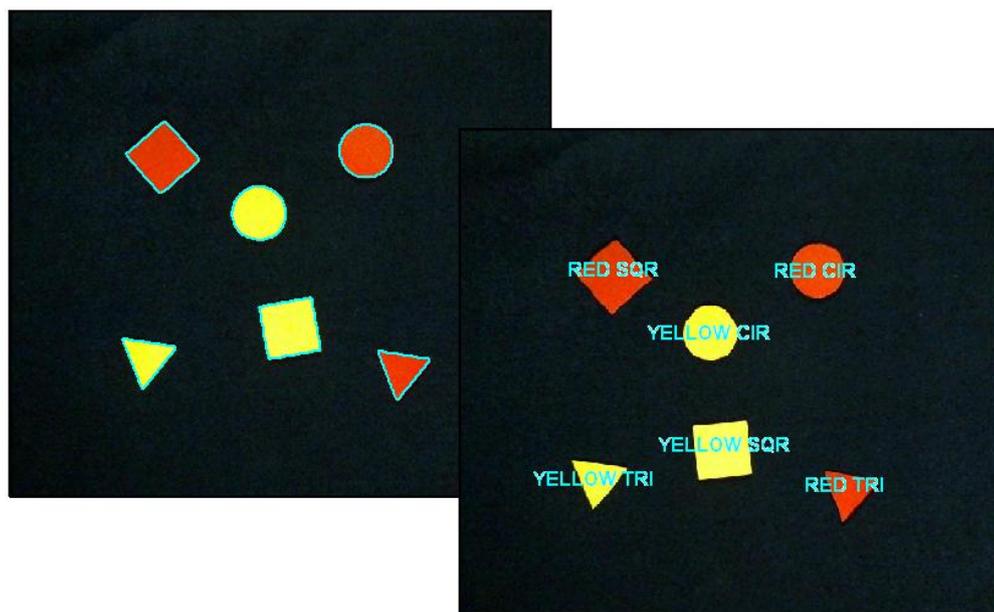


Figura 4.2.3. Resultado de la identificación de formas

4.2.5. Detección de la orientación

La detección de la orientación es una característica de la aplicación que realmente no está implementada debido a no haber conseguido dar estabilidad al sistema pero se ha considerado oportuno incluirla en este apartado por tenerlo casi conseguido y con un poco mas de trabajo estará ya disponible.

Consiste en utilizar la matriz de puntos obtenida en la identificación de formas y encontrar dos vectores representativos de cada figura para luego lanzar un algoritmo capaz de medir el ángulo entre ellos.

Con este ángulo conseguido se aplica la instrucción *imrotate*(α) y la figura se gira para dejarla con orientación 0° . Dicho ángulo se presenta en la tabla de resultados y ya tenemos la posibilidad en un futuro de poder girar la pieza mediante el efector y almacenarlas orientadas en la misma posición.

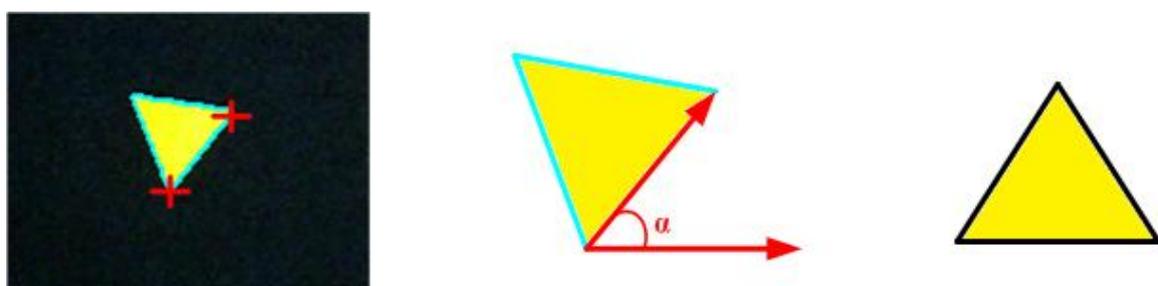


Figura 4.2.4. Forma teórica de detección de ángulos

4.3. Diseño de electrónica de potencia

Otro de los trabajos a destacar es el diseño y fabricación de la electrónica de potencia para realizar el control de los motores PaP que están colocados en cada una de las columnas encargadas del movimiento del efector.

En esta ocasión el diseño se ha realizado mediante el software de diseño electrónico Altium Designer, un software muy actual que todo electrónico dedicado al mundo del diseño debería conocer.

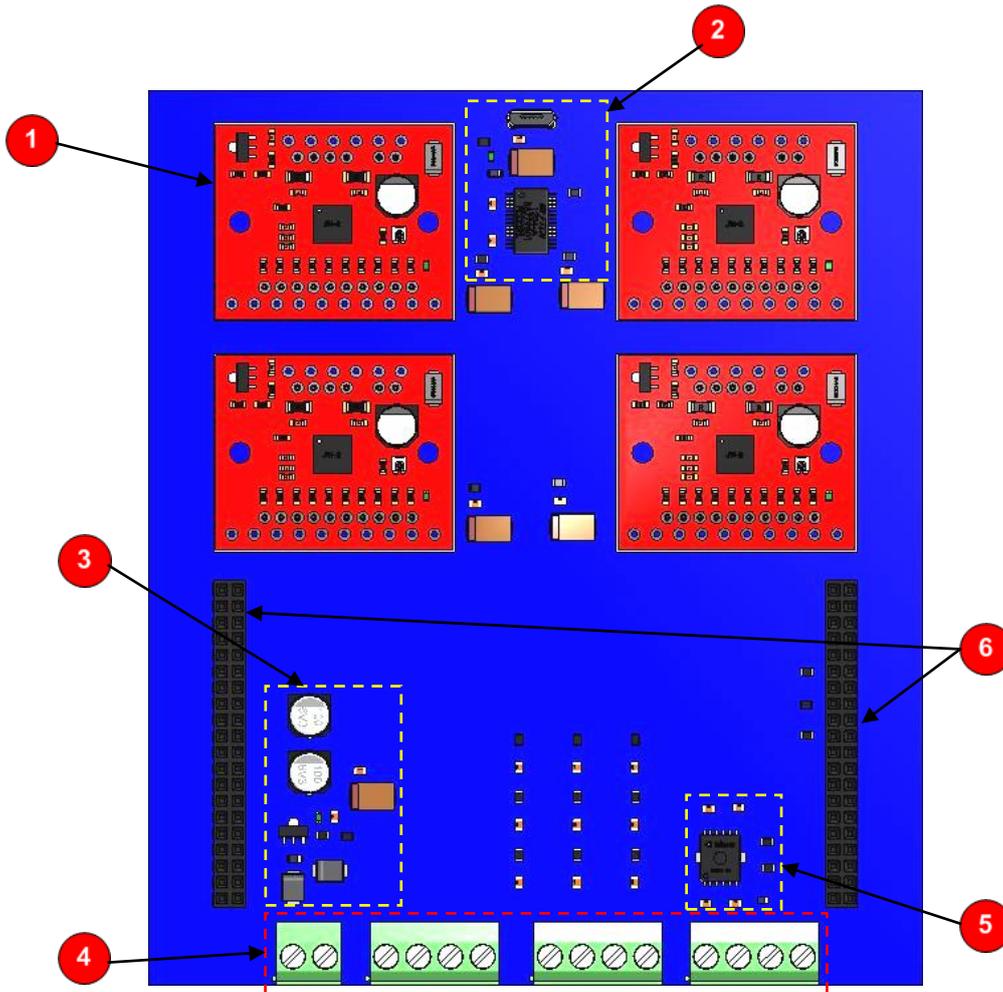


Figura 4.3.1. Vista del diseño del controlador de motores PaP

- 1: Drivers motores PaP
- 2: Conectividad USB-Serial
- 3: Zona de alimentación
- 4: Zona de conectores de IN/OUT
- 5: Zona SmartSwitch activación focos
- 6: Conectores interface con el micro

5. Discusión de los resultados

Como se ha explicado en varias ocasiones, este proyecto se ha diseñado con el cometido de fabricar una maqueta que ponga en práctica la idea teórica así que tanto la tecnología usada como los materiales empleados quizá no sean los más óptimos para la fabricación en procesos industriales.

Debido a esto se añade un punto en el cual contamos unas posibles mejoras que podrían añadirse con el fin tener más versatilidad y control del manipulador.

5.1. Mejoras posibles

En este punto se pretende dar a conocer varias posibles mejoras a llevar a cabo en el montaje con el fin de contemplar los posibles fallos que pudiesen surgir durante la manipulación del sistema.

5.1.1. Posicionamiento por visión

Objetivos:

- Mejorar la medida.
- Corregir la disposición de la zona de trabajo.

Actuación:

- Colocación de dos Cámaras.

Ventajas:

- Calculo de los puntos de referencia en 3D.
- Visión con profundidad.
- Aumento de la precisión.

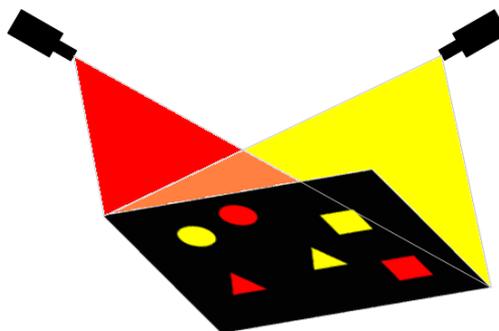


Figura 5.1.1. Posicionamiento con 2 cámaras

5.1.2. Control de tensión en cables

Existe la posibilidad como método de mejora colocar unos sensores de fuerza, también denominadas células de carga, en cada extremo del cable para controlar en cada momento la tensión del cable y mantener el efector siempre con la misma tensión. Esto nos permite corregir la posición de los motores de forma continua y estén sincronizados evitando así posibles problemas en el posicionamiento.

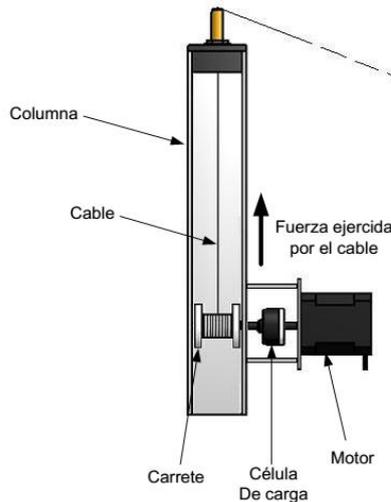


Figura 5.1.2. Célula de carga en columna

5.1.3. Orientación del objeto

Otra de las posibles mejoras y que tengo en mente realizar es la de orientar el objeto de modo que en la zona de almacenaje estén todas las piezas alineadas una con la otra. Se tenía previsto determinar la orientación de la pieza respecto al eje X de referencia pero por motivos de tiempo no se han conseguido los resultados esperados, así que cuando esa parte esté terminada se añadirá al efector una electrónica capaz de controlar un motor tipo servo que da la posibilidad de girar la pieza según la orientación obtenida en el PDI.

Esta mejora, además de dar mayor versatilidad al sistema dota a robot de un nuevo grado de libertad, pasando a tener cuatro GDL ampliando así su potencia.

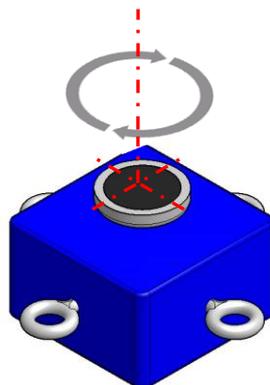


Figura 5.1.3. Cuarto grado de libertad del robot

Como se ha mencionado anteriormente, una buena alternativa es colocar una pequeña electrónica de control que gobierne el movimiento de un servo de modelismo el cual tiene un tamaño muy reducido ideal para alojarlo en la caja del efector, su control es muy sencillo y en la web se puede encontrar toda la información necesaria para el control de este tipo de actuadores. En esta imagen podemos hacernos una composición del sistema de control en la cual se aprecia que el ángulo de giro es directamente proporcional al ancho de pulso de una señal PWM establecida a una frecuencia fija.

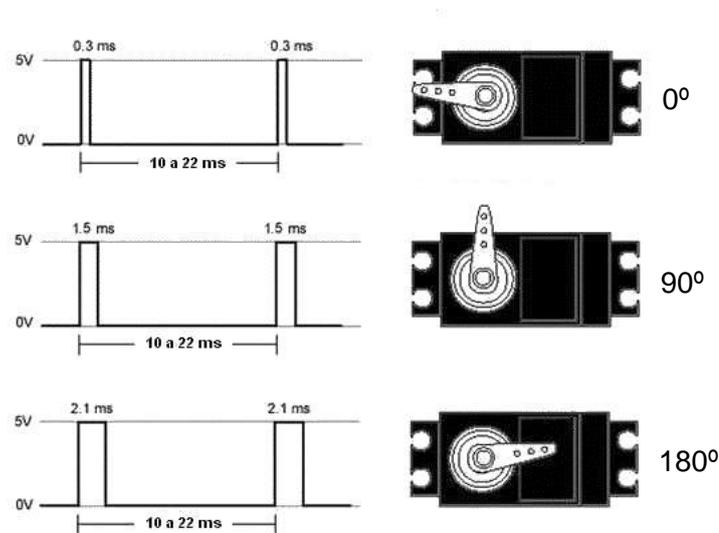


Figura 5.1.4. Funcionamiento de un servo motor de aeromodelismo

5.1.4. Posicionamiento del sistema (Zero)

Una de las grandes problemáticas del sistema es realizar un *zero* del manipulador, es decir, posicionar el efector en la coordenada 0, 0, 0. Actualmente se realiza de forma manual mediante el control realizado a través de la botonera o mediante el control remoto del joystick, de forma que se realiza un ensayo de prueba error hasta que dicho efector se centra en la posición deseada.

Debido al tiempo de implementación, este método aunque efectivo no es profesional por lo tanto caben mejoras para automatizar el proceso de posicionamiento en 0,0,0.

Posibles mejoras:

- Implementación mediante visión artificial:** Usando la parte de la aplicación en la que se realiza el tracking del efector se puede implementar en el firmware un lazo de realimentación con un sencillo control PID para lograr el objetivo.

En la imagen se aprecia el tracking del efector pudiendo realizarse un sistema de auto-posicionamiento.

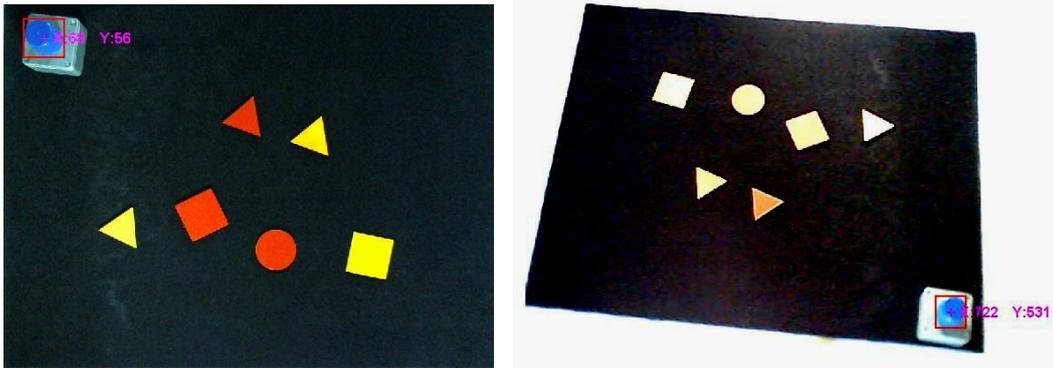


Figura 5.1.5. Tracking del efector mediante visión artificial en las 2 webcam

- b. Implementación mediante finales de carrera:** Al igual que las maquinas de coordenadas cartesianas disponen de unos sensores electromecánicos para posicionarlo en la coordenada 0,0, se puede realizar e mismo sistema colocando unos topes en el cable haciendo que los motores recojan cable hasta que todos los finales de carrera se han activado.

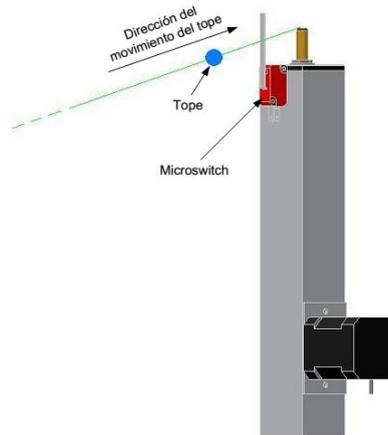


Figura 5.1.6. Recreación de posicionamiento mediante finales de carrera

- c. Implementación mediante encoder absoluto:** Uno de los sensores más usados en la industria y en la robótica son los encoder, de hecho, este equipo dispone de uno aunque no es de la misma tecnología a la que nos referimos. Usando un encoder absoluto en vez de incremental en cada uno de los motores se tiene un control total de la posición del mismo. Es un método que encarece el sistema pero si una aplicación requiere de una gran precisión se trata de una de las mejores opciones.

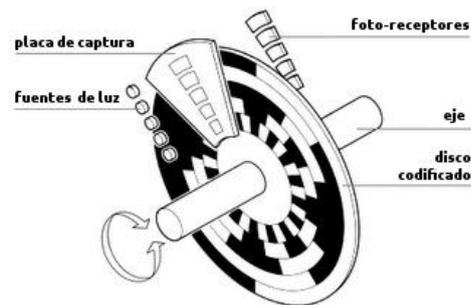


Figura 5.1.7. Principio de funcionamiento de un encoder absoluto

6. Conclusiones

Estos robots de cinemática paralela controlados por cables se están usando cada vez más en diversas aplicaciones debido a sus características, pero como todo, tiene sus limitaciones. En la actualidad los ingenieros están intentando resolver y encontrar soluciones a los diferentes problemas que puedan tener en cuanto a la programación de las trayectorias, nuevos controles, optimización de energía, nuevos materiales para dar mayor estabilidad y rigidez...

6.1. Ventajas e inconvenientes

6.1.1. Ventajas

- Gran espacio de trabajo que puede abarcar.
- Alta capacidad de carga en relación al peso.
- Pocas partes móviles reduciendo así el deterioro y el mantenimiento.
- Fácil transporte y reconfiguración de los equipos.
- Alta rigidez y velocidad.
- Más económicos y sencillos que los robots tradicionales.
- Mejora de la calidad y de la producción ya que la precisión y velocidad es mayor para trabajos sin cualificación técnica.
- Reducir costes operativos.
- Reducir costes de capital por consumibles y material de rechazo.
- Mejora de ratios de producción ya que pueden funcionar 24 horas, 7 días a la semana.
- Mayor precisión por cansancio del personal.
- Flexibilidad en los procesos de fabricación para poder realizar diversas tareas.

6.1.2. Inconvenientes

- Los cables solo pueden tirar y no empujar.
- Controles más sofisticados que los robots tradicionales.
- Problemas por elasticidad y vibración en los cables.
- Modelos dinámicos y cinemáticos más complejos.
- Inversión inicial. Uno de los mayores inconvenientes a la hora de realizar una automatización de un proceso productivo es el coste inicial que debe realizar el empresario.
- Es cierto que la robótica puede ayudar a crear más empleo pero actualmente también a quitarlos por la sustitución del personal por sistemas robotizados.
- Si no se crea un sistema óptimo de protección pueden ser peligrosos compartir entorno de trabajo con ellos.
- La amortización de la inversión realizada en ocasiones es a muy largo plazo.

6.2. Estudio de mercado

Cada día que leo un artículo, una revista, visito webs relacionadas con el tema o realizo visitas a ferias de maquinaria, te das cuenta de la importancia que está tomando en la industria la interacción directa entre ambos campos y a mi modo de ver, dentro de unos años será imposible encontrar una empresa con algún tipo de proceso productivo, por pequeña que sea, que no disponga de un robot con visión artificial.

Según estudios de la consultora *ARC Advisory*, “*la próxima ola de innovación en el control de la máquina supondrá un mayor nivel de integración entre los sistemas de visión, sistemas de automatización y herramientas de desarrollo asociadas*”.

Los fabricantes de maquinaria y de robots, están aumentando el uso de sensores de visión y cámaras inteligentes en sus equipos para hacer frente a la inspección en línea y fabricación adaptativa. Por otro lado, los proveedores de automatización, ofrecen soluciones que unifican, visión artificial, control de movimiento y control secuencial en los procesos de producción automatizados con el fin de reducir costes de integración y mejorar el rendimiento.



Figura 6.2.1. Ejemplo de proceso de producción con visión artificial (infoPLC.net)

Para que esta evolución en la integración de los sistemas siga su curso evolutivo, qué duda cabe que los fabricantes de sistemas de visión artificial tienen que seguir progresando. Esto queda reflejado en otro estudio de mercado que dice que el sector de los fabricantes de equipos de visión artificial creció el año 2013 con casi el 10% más de lo previsto originalmente y para 2014, la asociación espera un crecimiento mayor del 12%.

El Instituto Fraunhofer, está desarrollando para el año 2015 un robot para la construcción de un parque solar de 2.270 Km² en el Sahara instalando uno de sus robots de cinemática paralela manejado por cables (IPAnema), con el fin de trasladar reflectores solares.



Figura 6.2.2. Simulación de instalación de robot de cables

6.3. Objetivos alcanzados

Se ha creído oportuno añadir un capítulo para dejar reflejados los objetivos que se pusieron a principio del proyecto al igual que los alcanzados, de esta forma se puede ver el trabajo realizado y el que queda todavía por hacer.

- Objetivos marcados al comienzo del proyecto:
 - Diseño de un robot de cinemática paralela controlador por cables.
 - Representación en planos de fabricación.
 - Selección de componentes.
 - Compra de componentes.
 - Fabricación del entrenador para realizar demostración.
 - Diseño y fabricación de electrónica *custom*.
 - Programación de firmware para realizar movimientos sencillos.
 - Implementación de software de visión artificial.
 - Interconexión entre ambos sistemas (Software-Firmware).
 - Documentación reflejando el trabajo realizado.

- Hitos no alcanzados en este proyecto:
 - Programación de firmware para realizar movimientos sencillos.
 - Interconexión entre ambos sistemas (Software-Firmware).
 - Faltan algunos algoritmos de detección en el software (Identificación de formas independientemente del tamaño y orientación de las mismas).

Como se puede apreciar, casi se ha conseguido el trabajo final pero no me preocupa en exceso porque gracias a este proyecto he aprendido mucho y voy a continuar hasta su resolución final. Además, cabe destacar que hasta que no está en funcionamiento un equipo de esta envergadura no aparecen los posibles fallos que no se contemplan en la fase de diseño y detrás queda una ardua labor de puesta a punto.

6.4. Valoración personal

Soy consciente de que este ha sido un proyecto muy ambicioso y que este tipo de robots son novedosos y llevan muchísimo trabajo y por ello no he alcanzado el objetivo final que yo mismo me había marcado. Este ha sido un año muy duro ya que compaginar los estudios con el trabajo y además atender la vida familiar lo hace harto complicado pero no por ello he dejado de trabajar e intentar llegar al final hasta el último momento, motivo por el cual solicité la entrega del proyecto en una convocatoria diferida y he querido demorar la defensa del proyecto para poder llevar el demostrador a la exposición del mismo pero por motivos de cierres de actas no ha sido posible.

Comentando ya sobre el proyecto, no me cabe ninguna duda que el futuro prevé que incluso las pequeñas factorías estén provistas de líneas enteras de manipuladores y robots ya que en la actualidad prima la producción por encima de todo. Si las economías emergentes como están resultando ser las regiones de Asia o el grupo BRICS y que, además hay que destacar que la economía popular está aumentando, por lo tanto el consumo será mayor, hay que tener previsión de abastecer miles de millones de personas. Las factorías no pueden responder al ritmo de consumo esperado por lo tanto será obligatorio tener manipuladores de alta velocidad para dar salida a toda la demanda.

Esto podría considerarse como un arma de doble filo y como ejemplo pondría un programa de televisión que me encanta llamado "*How It's made*" en el cual nos muestran como se hacen todo tipo de cosas. Bien, en ocasiones, en el proceso de fabricación de la cosa más simple como pueda ser... una estantería metálica o un bastoncillo para los oídos, no aparece nadie en el proceso de producción y no puedo evitar pensar que si el trabajo lo realizan las maquinas... ¿donde quedamos nosotros?... Si nuestro trabajo lo hacen los robots y nosotros no tenemos trabajo para comprar los productos... ¿Qué podría ocurrir? Seguro que no tardaremos mucho en descubrirlo...

7. Documentos anexos

7.1. Manual de usuario de la aplicación software

Este documento describe el procedimiento de uso del software de visión artificial implementado en *MATLAB* para realizar el control del manipulador robótico. Para más información ver documento “*Manual de usuario*”.

7.2. Código fuente

Como bien se va podido ver a lo largo de esta memoria descriptiva, este proyecto consta de dos partes bien diferenciadas, la parte de visión artificial implementada en *MATLAB* y el control del propio manipulador robótico implementado en un microcontrolador en ANSI C, por lo tanto los códigos fuente están bien diferenciados en dos apartados independientes los cuales se pueden observar en el documento “*Códigos fuente*”.

7.3. Planos

Una de las mayores motivaciones de este proyecto ha sido intentar llevar a cabo su fabricación. Tal y como he aprendido en otras asignaturas estudiadas, el diseño previo de un elemento a fabricar es primordial si no se quieren cometer fallos en el momento de su construcción, así que teniendo en cuenta estos conceptos antes de su fabricación se han realizado unos planos que se plasman en el documento “*Planos*”.

7.4. Lista de materiales

Documento en el cual se enumeran y detallan todos los componentes que forman el sistema. Ver documento, “*Lista de materiales*”.

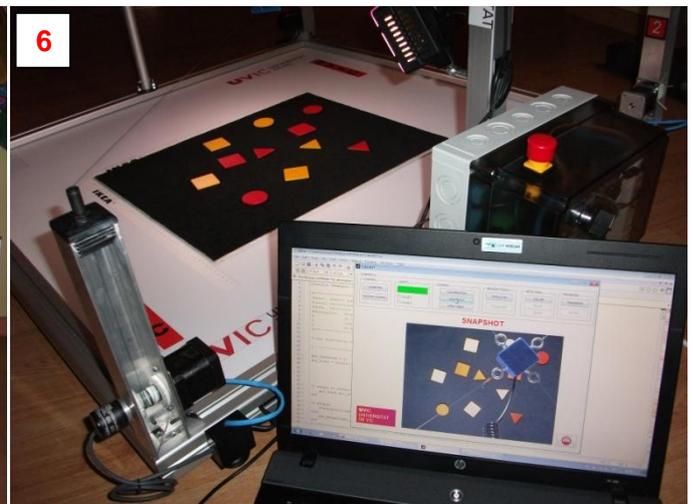
7.5. Presupuesto

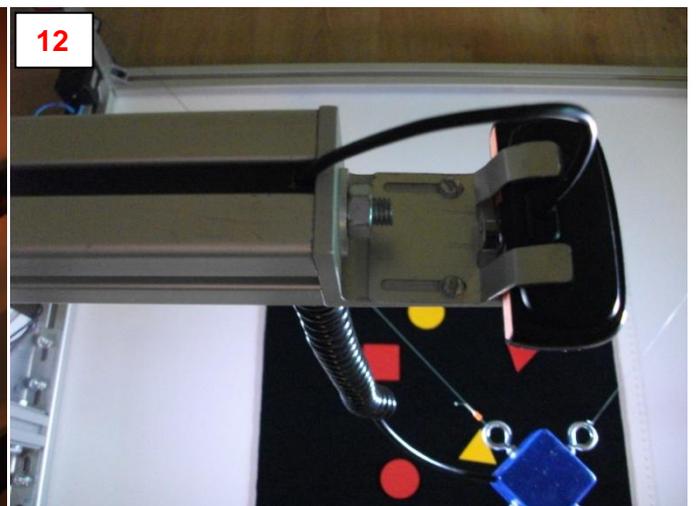
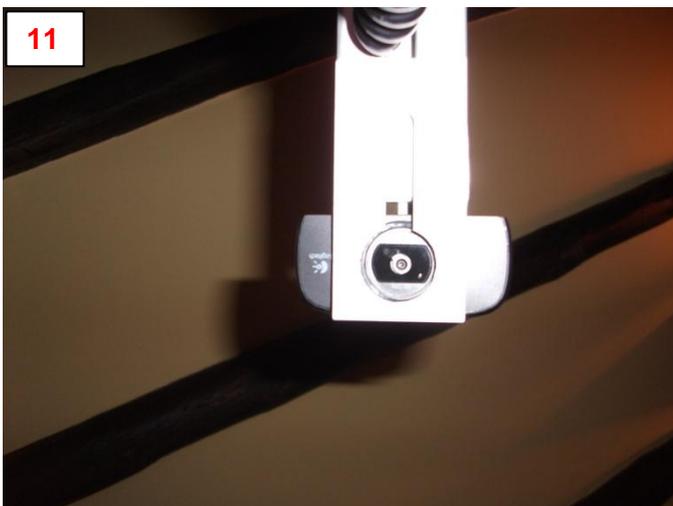
Documento en el cual se detalla el presupuesto de los materiales empleados en el diseño, fabricación y puesta a punto del sistema completo. Para más detalles ver el documento “*Presupuesto*”.

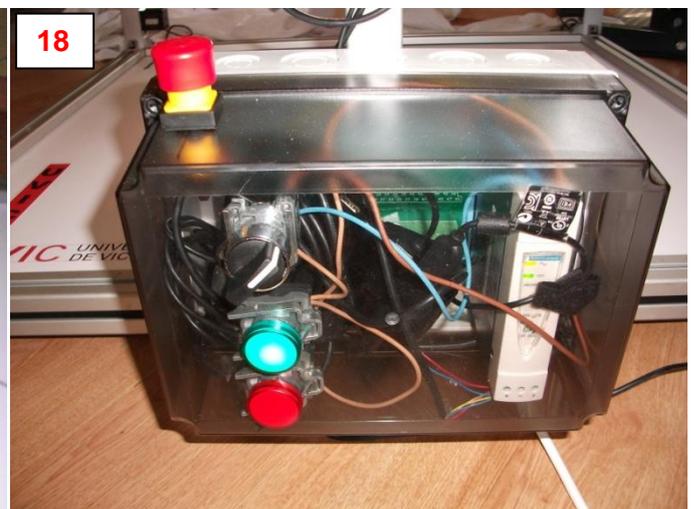
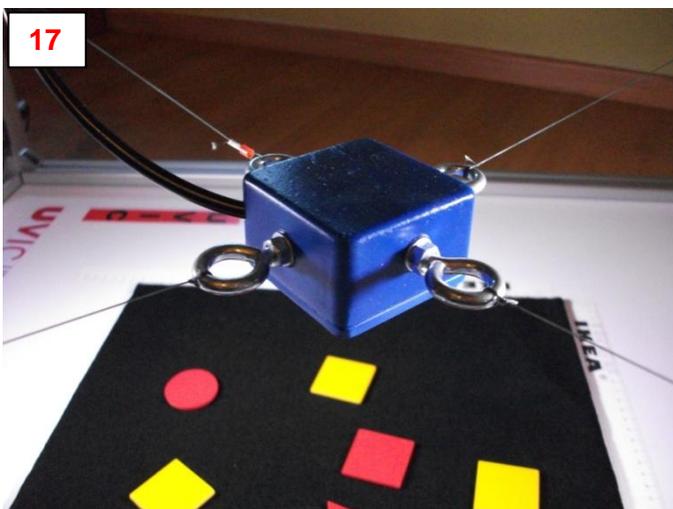
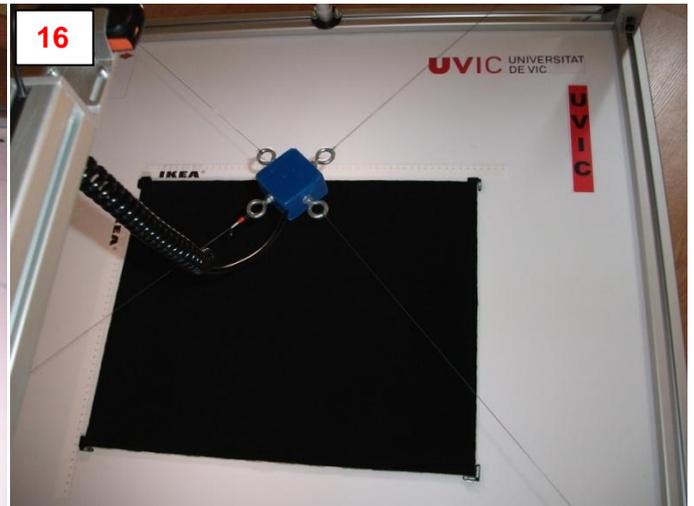
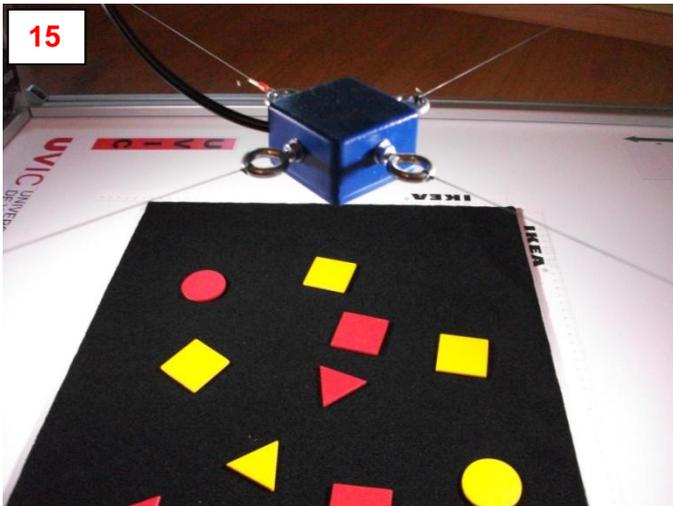
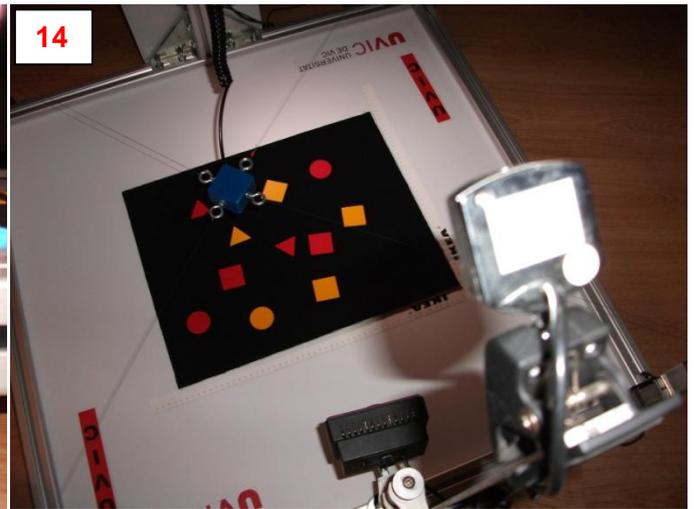
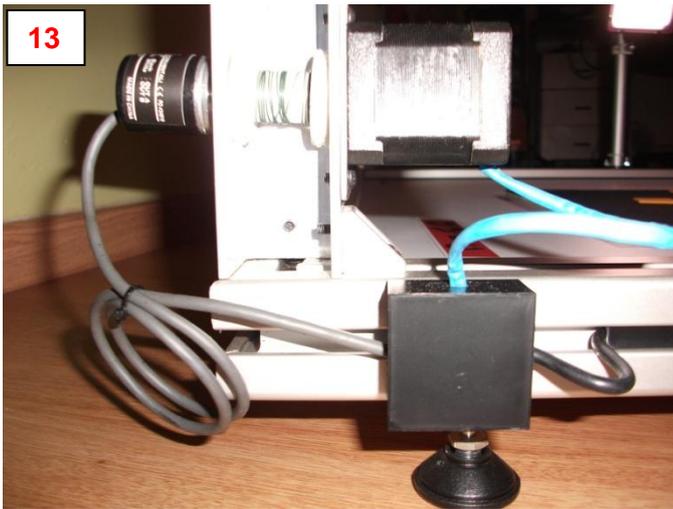
7.6. Anexos

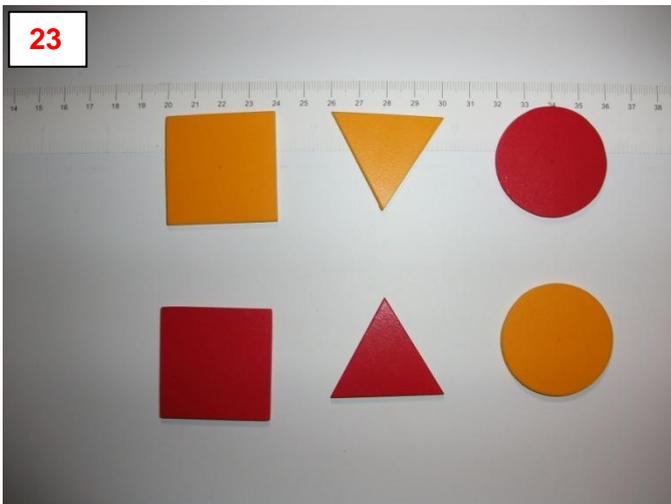
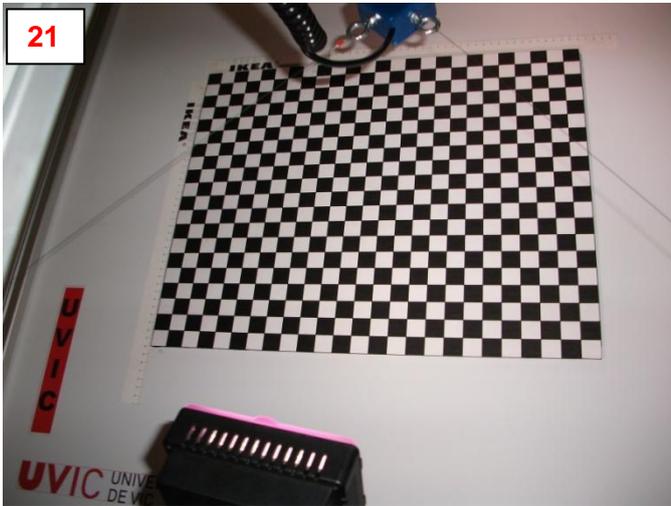
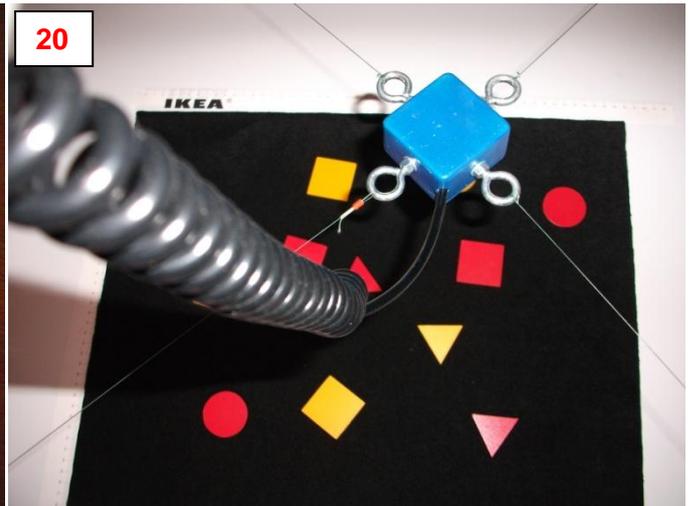
Documento en el cual se describen las características de todos los componentes según el propio fabricante con el fin de tener un documento de consulta rápida en caso de necesidad técnica. Para más detalles ver el documento “*Anexos*”.

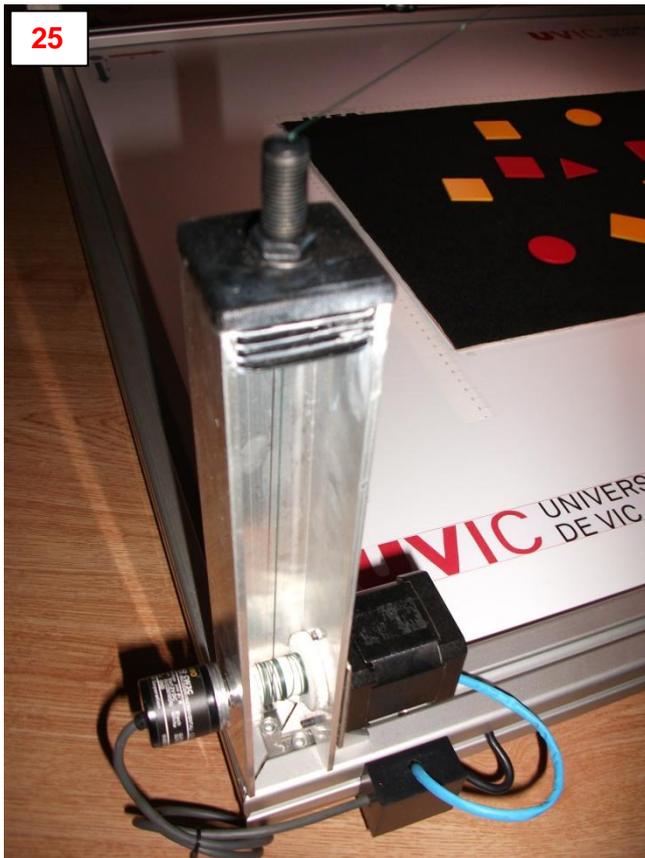
8. Galería de fotografías

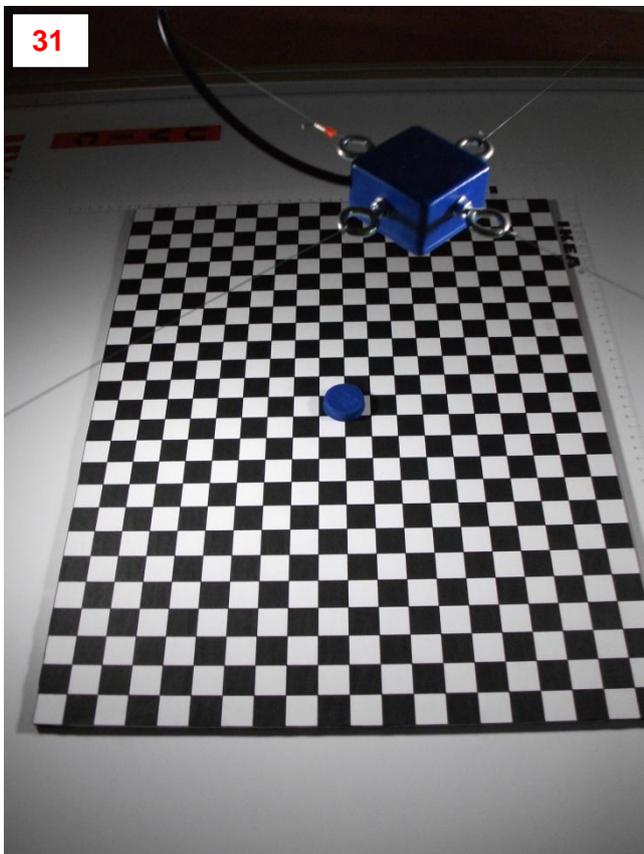
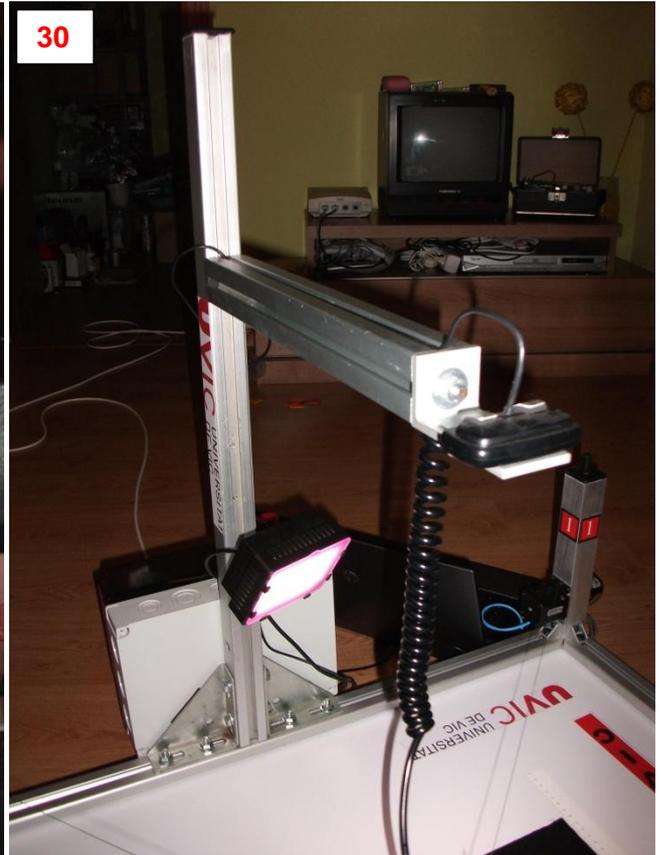
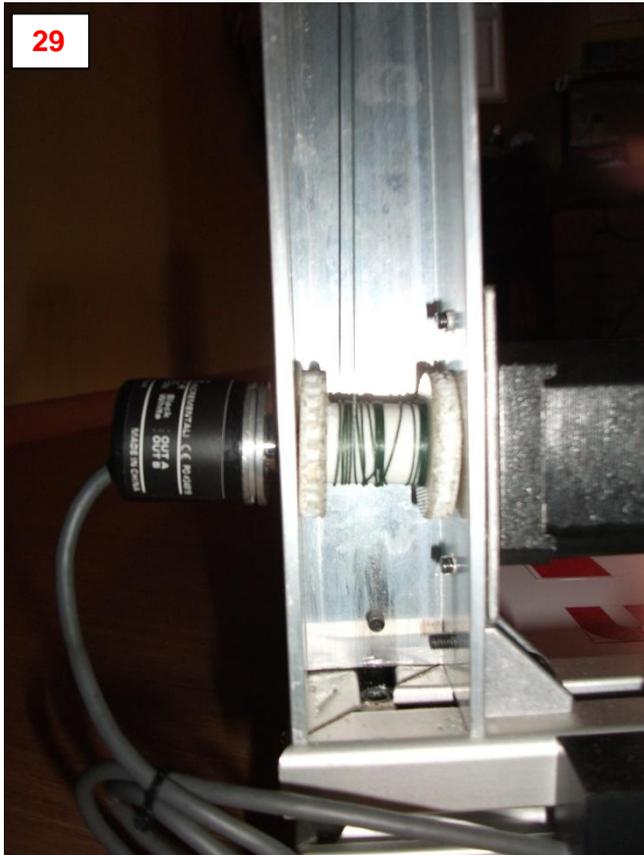












COMENTARIOS DE FOTOGRAFIAS

Figura 1	<i>El autor realizando pruebas funcionales</i>
Figura 2	<i>El autor realizando labores de ajuste</i>
Figura 3	<i>Vistas generales</i>
Figura 4	<i>Vistas generales</i>
Figura 5	<i>Vistas generales</i>
Figura 6	<i>Vista del sistema con el software funcionando</i>
Figura 7	<i>Detalle de los ejes de coordenadas</i>
Figura 8	<i>Vista de planta de la zona de trabajo</i>
Figura 9	<i>Detalle de un foco</i>
Figura 10	<i>Zona de trabajo y cintas métricas de referencia</i>
Figura 11	<i>Cámara principal (Objetivo)</i>
Figura 12	<i>Cámara principal (Fijación)</i>
Figura 13	<i>Caja de empalmes para motores y encoder</i>
Figura 14	<i>Vista de cámara secundaria</i>
Figura 15	<i>Efector</i>
Figura 16	<i>Efector sobre zona de trabajo</i>
Figura 17	<i>Detalle del efector</i>
Figura 18	<i>Caja de la electrónica de control</i>
Figura 19	<i>Detalle de fijación de las columnas</i>
Figura 20	<i>Cable de alimentación del efector</i>
Figura 21	<i>Plantilla de calibración</i>
Figura 22	<i>Vista del sistema</i>
Figura 23	<i>Piezas a reconocer</i>
Figura 24	<i>Vista de la parte inferior del robot</i>
Figura 25	<i>Columna</i>
Figura 26	<i>Detalle de la guía pasacable</i>
Figura 27	<i>Detalle de la fijación de un foco</i>
Figura 28	<i>Foco con difusor</i>
Figura 29	<i>Encoder carrete y motor</i>
Figura 30	<i>Vista del sistema</i>
Figura 31	<i>Proceso de centrado de la zona de trabajo</i>
Figura 32	<i>Foco y fijación entre estructura central y estructura auxiliar de la cámara</i>

9. Bibliografía

BARRAGÁN, Diego Orlando. *Manual de interfaz grafica de usuario*. 2013.

http://www.matpic.com/esp/matlab/interfaz_grafica.html

(Consulta: Diciembre de 2013)

BLANCHET, Gerard & CHARBIT, Maurice. *Digital Signal and Image Processing using MATLAB®*. United States: ISTE Ltd, 2006.

BRUCKMANN, Tobias & POTT, Andreas. *Cable-Driven Parallel Robots*. Springer-Verlag Berlin: Heidelberg, 2013

C. GONZALEZ, Rafael. *Digital Image Processing using MATLAB®*. United States: Prentice Hall, 2004.

GARCÍA, Iván Danilo. *Visión Artificial y Procesamiento Digital de Imágenes usando Matlab*. 2008.

<http://vision-artificial-matlab.blogspot.com.es/>

(Consulta: Agosto de 2013)

KHOSRAVI, M.A. & TAGHIRAD, H.D. & OFTADEH, R. Industrial Control Center of Excellence (ICCE), K.N. Toosi University of Technology of Tehran. 18-22 Oct. 2010. *Forward kinematic analysis of a planar cable driven redundant parallel manipulator using force sensors*.

MCANDREW, Alasdair. *An Introduction to Digital Image Processing with Matlab*. Victoria University of Technology. 2004.

MEJÍA VILET, José Ramón. *Apuntes de Procesamiento Digital de Imágenes*. San Luis Potosí. 2005.

POTT, Andreas. *An algorithm for real-time forward kinematics of cable-driven parallel robots*. International Symposium in Robot Kinematics, Springer, Piran Portoroz, 2010.

SOLOMON, Chris & BRECKON, Toby. *Fundamentals of digital image processing*. West Sussex, UK: John Wiley & Sons Ltd, 2011.

SO-RYEOK, Oh & AGRAWAL, S.K. Department of Mechanical Engineering, Delaware University, Newark, USA. 14-19 Sept. 2003.

Cable-suspended planar parallel robots with redundant cables: controllers with positive cable tensions.

Image Processing Toolbox User's Guide®. COPYRIGHT 1993 - 2004 by The MathWorks, Inc.

- Direcciones de internet:

- Visión artificial:

Paginas de consultas sobre programación de MATLAB

<http://www.lawebdelprogramador.com/foros/Matlab/index1.html>

<http://www.mathworks.es/es/help/images/index.html#btdrtag>

(Consulta: Agosto de 2013 – Diciembre 2013)

Paginas de consulta sobre PDI con MATLAB

<http://elgva1.usc.es/~mjose/docencia/3ciclo/tema2.htm>

<http://alvarounal.blogspot.com.es/2011/12/vision-artificial-usando-matlab-parte-1.html>

<http://www.matrixlab-examples.com/angle-between-vectors.html>

(Consulta: Septiembre de 2013 – Junio de 2014)

Metodología de calibración de cámaras de visión artificial

http://www.vision.caltech.edu/bouquetj/calib_doc/

(Consulta: Julio de 2014)

- Robótica:

Paginas de consulta para realizar el estado del arte sobre robots reales de cinemática paralela controlados por cables.

<http://robot.gmc.ulaval.ca/en/research/theme201.html>

<http://www.skycam.tv/>

http://www.ipa.fraunhofer.de/IPAnema_ein_hochdynamischer_Seilroboter.839.0.html

http://www.cablebot.eu/en/cablebot_consortium/fraunhofer_ipa.html

www.agenciasinc.es/

(Consulta: Marzo de 2014 – Julio de 2014)

- Componentes del sistema:

Paginas de consulta para realizar la compra de los componentes.

<https://www.sparkfun.com/>

<http://www.dx.com/>

<http://es.rs-online.com/web/>

<http://es.farnell.com/>

<http://www.logitech.com/es-es/home>

<http://www.wantmotor.com/>

<http://www.st.com/web/en/home.html>

(Consulta: Agosto de 2013 - Marzo de 2014)