



UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA EQUINOCCIAL

**FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA
CARRERA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA**

**SISTEMA DE CONTROL INTELIGENTE PARA ROBOT
MANIPULADOR**

**TRABAJO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO
DE INGENIERO EN MECATRÓNICA**

MILTON XAVIER MOLINA CADENA

DIRECTOR: ING. FAUSTO FREIRE CARRERA

QUITO-ECUADOR

2015

© Universidad Tecnológica Equinoccial. 2015

Reservados todos los derechos de reproducción

DECLARACIÓN

Yo **MILTON XAVIER MOLINA CADENA**, declaro que el trabajo aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

La Universidad Tecnológica Equinoccial puede hacer uso de los derechos correspondientes a este trabajo, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por la normativa institucional vigente.

Milton Xavier Molina Cadena

C.I. 1723603187

CERTIFICACIÓN

Certifico que el presente trabajo que lleva por título “**Sistema de control inteligente para robot manipulador**”, que, para aspirar al título de **Ingeniero Mecatrónico** fue desarrollado por **Milton Xavier Molina Cadena**, bajo mi dirección y supervisión, en la Facultad de Ciencias de la Ingeniería; y cumple con las condiciones requeridas por el reglamento de Trabajos de Titulación artículos 18 y 25.

Ing. Fausto Freire Carrera

DIRECTOR DEL TRABAJO

C.I. 1802424737

ÍNDICE DE CONTENIDOS

PÁGINA

RESUMEN.....	viii
ABSTRACT.....	ix
1. INTRODUCCIÓN.....	1
2. MARCO TEÓRICO.....	3
2.1. ROBÓTICA.....	3
2.2. ROBÓTICA INDUSTRIAL.....	4
2.3. CONFIGURACIÓN CINEMÁTICA PARA MANIPULADORES	6
2.3.1. CONFIGURACIÓN ARTICULADA.....	6
2.3.2. CONFIGURACIÓN ESFÉRICA	7
2.3.3. CONFIGURACIÓN SCARA.....	8
2.3.4. CONFIGURACIÓN CILÍNDRICA	8
2.3.5. CONFIGURACIÓN CARTESIANA	9
2.4. MODELOS CINEMÁTICOS PARA MANIPULADORES.....	10
2.4.1. CINEMÁTICA DIRECTA.....	11
2.4.1.1. Matriz de transformación homogénea	11
2.4.2. CINEMÁTICA INVERSA.....	12
2.5. INTELIGENCIA ARTIFICIAL EN LOS ROBOTS.....	14
2.6. VISIÓN ARTIFICIAL	15
2.6.1. CARACTERÍSTICAS DE LA VISIÓN ARTIFICIAL.....	15
2.6.2. APLICACIÓN DE LA VISIÓN ARTIFICIAL	17
2.6.3. ADQUISICIÓN DE IMAGEN.....	19
2.6.4. RUIDO EN IMÁGENES	20
2.7. PROCESAMIENTO DIGITAL DE IMÁGENES	20
2.7.1. FILTRO DE SUAVIZADO EN IMÁGENES DIGITALES.....	20
2.7.2. IMAGEN EN ESCALA DE GRISES	21

2.7.3. MODELO DE COLOR RGB.....	23
2.7.4. MODELO DE COLOR HSV	23
2.7.5. SEGMENTACIÓN	25
2.7.6. UMBRALIZACIÓN.....	26
2.7.7. EXTRACCIÓN DE REGIONES POR COLOR	26
2.7.8. OPERACIONES MORFOLÓGICAS	26
2.7.8.1. Dilatación	27
2.7.8.2. Erosión.....	28
2.7.9. MOMENTOS GENERALES.....	28
3.1. METODOLOGÍA MECATRÓNICA.....	31
3.1.2. ESPECIFICACIONES DEL SISTEMA	32
3.1.3. REQUERIMIENTOS TÉCNICOS PARA EL CONTROL DEL MANIPULADOR	32
3.2. ANÁLISIS DE DISEÑO MECÁNICO.....	34
3.2.1. DESCRIPCIÓN BRAZO ROBÓTICO	34
3.2.2. ROBOT MELFA RV-2AJ	37
3.2.3. ESTUDIO CINEMÁTICO	40
3.3. ANÁLISIS DE DISEÑO ELECTRÓNICO	44
3.3.1. DESCRIPCIÓN CONTROLADORA CR1-571	46
3.3.2. COMUNICACIÓN PC Y CONTROLADORA.....	48
3.3.3. SELECCIÓN DE WEBCAM Y UBICACIÓN	51
3.3.3.1. Iluminación	51
3.3.3.2. Ubicación de la cámara.....	52
3.3.3.3. Cámara externa al robot.....	53
3.3.3.4. Cámara en el extremo del robot	54
3.3.3.5. Selección de la ubicación de la cámara.....	54
3.3.3.6. Selección cámara web	56
3.4. DESARROLLO DE SOFTWARE Y SISTEMA DE CONTROL	57
3.4.1. SISTEMA DE CONTROL MEDIANTE VISIÓN ARTIFICIAL	57
3.4.2. PROCESAMIENTO DE IMÁGENES	59
3.4.2.1. Transformación de la imagen al modelo HSV	59

3.4.2.2. Umbralización de imagen HSV.....	59
3.4.2.3. Binarización de la imagen	61
3.4.2.4. Erosión y dilatación de la imagen	61
3.4.2.5. Segmentación	62
3.4.2.6. Reconocimiento de formas.....	64
3.4.3. SISTEMA DE CONTROL MEDIANTE VISIÓN ARTIFICIAL.....	67
4.1. PRUEBA ETAPA VISIÓN ARTIFICIAL	68
4.2. PRUEBA CINEMÁTICA DEL ROBOT MELFA RV2AJ.....	72
5.1. CONCLUSIONES.....	75
5.2. RECOMENDACIONES.....	76
BIBLIOGRAFÍA.....	77

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 3.1 Comparación robots manipuladores	¡Error! Marcador no definido.
Tabla 3.2 Especificaciones técnicas brazo robótico RV2AJ	38
Tabla 3.3 Especificaciones controladora CR1-571	46
Tabla 3.4 Parámetros comunicación serial	49
Tabla 3.5 Comandos de comunicación Melfa RV2AJ	50
Tabla 3.6 Rango de valores extracción de color rojo	60
Tabla 3.7 Momentos invariantes y acercamiento de los contenedores	66
Tabla 4.1 Resultado de pruebas de reconocimiento	72

ÍNDICE DE ECUACIONES

Ecuación [2.1] Suavisado Gaussiano	21
Ecuación [2.2] Luminancia de imágenes.....	22
Ecuación [2.3] Dilatación de imágenes	27
Ecuación [2.4] Erosión de imágenes.....	28
Ecuación [2.5] Momento geométrico central	29
Ecuación [2.6] Momento de orden cero	29
Ecuación [2.7] Centro de gravedad de la imagen en el eje x	29
Ecuación [2.8] Centro de gravedad de la imagen en el eje y	29
Ecuación [3.1] Ángulo ubicación espacial objeto	41
Ecuación [3.2] Longitud del objeto respecto al manipulador	41
Ecuación [3.3] Ángulo θ cinemática manipulador.....	43
Ecuación [3.4] Ángulo θ_1 cinemática manipulador.....	43
Ecuación [3.5] Ángulo θ_7 cinemática manipulador.....	43
Ecuación [3.6] Longitud L_c cinemática manipulador.....	43
Ecuación [3.7] Longitud L_e cinemática manipulador	43
Ecuación [3.8] Longitud L_d cinemática manipulador	43
Ecuación [3.9] Ángulo θ_2 cinemática manipulador.....	43
Ecuación [3.10] Ángulo θ_3 cinemática manipulador.....	43
Ecuación [3.11] Ángulo θ_4 cinemática manipulador.....	43
Ecuación [3.12] Ángulo θ_5 cinemática manipulador.....	43
Ecuación [3.13] Ángulo θ_6 cinemática manipulador.....	43
Ecuación [3.14] Ángulo movimiento segundo eslabón	44
Ecuación [3.15] Ángulo movimiento tercer eslabón.....	44
Ecuación [3.16] Ángulo movimiento cuarto eslabón.....	44
Ecuación [3.17] Momentos de orden p y q.....	66
Ecuación [3.18] Momentos invariantes de Hu.....	66

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1. Manipulador Industrial.....	5
Figura 2.2. Manipulador Articulado	7
Figura 2.3. Manipulador esférico.....	7
Figura 2.4. Manipulador Scara.....	8
Figura 2.5. Manipulador Cilíndrico	9
Figura 2.6. Manipulador cartesiano.....	9
Figura 2.7. Configuración Manipuladores	10
Figura 2.8. Modelo Cinemática	11
Figura 2.9. Relaciones geométricas de la cinemática	13
Figura 2.10. Modelo de visión artificial	17
Figura 2.11. Estructura imagen digital.....	20
Figura 2.12. Suavizado imagen	21
Figura 2.13. Conversión escala de grises	22
Figura 2.14. Modelo de color RGB.....	23
Figura 2.15. Modelo de color HSV	24
Figura 2.17. Dilatación morfológica.....	27
Figura 2.18. Erosión morfológica	28
Figura 3.1. Metodología de diseño mecatrónico	31
Figura 3.2. Diagrama función principal de un manipulador	36
Figura 3.3. Robot Melfa RV2AJ	37
Figura 3.4. Rango angular de movimiento	39
Figura 3.5. Ubicación espacial efector final.....	41
Figura 3.6. Configuración geométrica de movimiento	42
Figura 3.7. Posición angular final.....	44
Figura 3.8. Área de trabajo con la cinemática calculada	45
Figura 3.9. Controladora CR1-571	47
Figura 3.10. Iluminación frontal.....	52
Figura 3.11. Configuración espacial de la cámara	53
Figura 3.12. Posición cámara en el manipulador	55

Figura 3.13. Diagrama de bloques control visual para manipulador.....	58
Figura 3.14. Planificación secuencia de control	58
Figura 3.15. Diferencia modelos de color.....	59
Figura 3.16. Umbralización de color rojo.....	61
Figura 3.17. Resultado erosión y dilatación	62
Figura 3.18. Segmentación individual del cada objeto	64
Figura 3.19. Ingreso etapa de reconocimiento, (a) objeto a manipular, (b) contenedores.....	65
Figura 3.20. Respuesta etapa de reconocimiento	67
Figura 3.21. Interfaz sistema de control inteligente Melfa RV2AJ	69
Figura 4.1. Ruido a diferente incidencia luminosa.....	69
Figura 4.2. Geometrías unidas en la segmentación	70
Figura 4.3. Respuesta asociación de figuras y posición en la imagen	71
Figura 4.5. Desviación de posición en el contenedor	74

RESUMEN

Este trabajo consistió en implementar en el robot manipulador Melfa RV2AJ inteligencia artificial enfocada al reconocimiento y asociación de formas en el campo de visión, con el fin de posicionar el efector final del robot sobre el punto centro del contenedor destino para el objeto manipulado. Fue necesario acoplar la cámara web al extremo final del manipulador para la implementación de un sistema de control estático mediante visión artificial, y así cumplir con una distancia focal apropiada para visualizar una porción del espacio de trabajo propio del manipulador. En la implementación y desarrollo de software se utilizó como recurso computacional la librería de visión artificial opencv y el entorno de desarrollo Qt Creator, con la intención de direccionar el proyecto hacia una aplicación de acceso libre a nivel de código con un lenguaje de programación estándar como lo es c++. Se determinó cuan eficiente es el sistema en general para realizar las operaciones de reconocimiento y asociación de formas, con objetos de textura orientada a un solo color, a través de la caracterización de contornos y puntos específicos que describen la geometría de una figura. Mediante pruebas de colocación se determinó la precisión del sistema de posicionamiento angular del manipulador, comparando si el contorno del objeto colocado incide totalmente sobre la geometría del contenedor seleccionado.

ABSTRACT

This work is to implement the robot manipulator RV2AJ Melfa focused to recognition and association of ways in the field of view, in order to position the end effector of the robot about the target center point of the container to the object being handled. It was necessary to attach the webcam at the far end of the manipulator to implement a system of static control by artificial vision, and comply with an appropriate focal length to display a portion of the workspace of the manipulator itself. In the implementation and development of software was used as a computational resource library opencv computer vision and Qt Creator development environment, with the intention of directing the project towards a free application level access code with a standard programming language such as what is C ++. We determined how efficient the overall system to perform reconnaissance and association of shapes, textured objects oriented to a single color, by characterizing outlines specific points that describe the geometry of a figure. By placement testing system accuracy angular positioning of the manipulator is determined by comparing the outline of the object if placed affects the geometry of the selected container.

1. INTRODUCCIÓN

En la actualidad el uso de la inteligencia artificial ha ido en incremento, permitiendo el desarrollo de nuevos y complejos algoritmos de programación en las distintas áreas que componen esta rama de la tecnología, además de varias aplicaciones formales en la industria, en donde se hace uso extenso de manipuladores robóticos que ayudan al desarrollo de nuevos productos en ambientes peligrosos, o trabajos difíciles de realizar para el ser humano por su complejidad. Es por esta razón que surge la necesidad de integrar la visión artificial, y diseñar un sistema para el control de manipuladores de mayor nivel que requiera trabajar sin mucha supervisión y permita alta precisión en cualquier tarea realizada.

Últimamente se han desarrollado sistemas robotizados con varios grados de libertad que permiten hacer manipulaciones en tiempos bajos y con gran precisión, mediante la implementación de sistemas de control complejos que les permitan realizar acciones de movimiento y de selección de alto nivel. La fabricación de mecanismos autónomos ha desatado una competencia constante en el desarrollo de nuevas formas de procesamiento y adaptación al entorno para resolución de problemas, sin la necesidad de la intervención de agentes externos de control.

En lo que se refiere a control visual en los últimos años destaca los avances en el campo de la medicina, en el que la precisión y exactitud es muy importante, el desarrollo de los vehículos no tripulados o en las cadenas de montaje industriales, todo ello consolidando un sistema artificial eficiente que va en crecimiento sobre los robots con menor intervención humana en los procesos de producción. La característica principal en los sistemas de visión constituye la capacidad de adquirir gran cantidad de información perteneciente al entorno de trabajo en una sola imagen de entrada, sin la necesidad de integrar dispositivos adicionales para realizar una construcción panorámica de los objetos y obstáculos que se encuentran alrededor del dispositivo inteligente.

Uno de los principales problemas es la necesidad de disponer de un sistema de calibración para la cámara de visualización, tal que si el entorno de

trabajo sufre algún cambio el sistema se comporte de manera adaptiva y siga trabajando con las reglas inicialmente establecidas sin que exista o se presenten nuevos errores de posicionamiento o interpretación del campo de trabajo.

Este proyecto está orientado a la ampliación de aplicaciones que presenta la inteligencia artificial, ya que hace uso del tratamiento de imágenes digitales para el control de un manipulador industrial. La posición del efector final del manipulador está determinada por los parámetros adquiridos a través del dispositivo de adquisición de imágenes, tal que el sistema adquiere un tipo de control visual abierto en el que no existe retroalimentación y corrección de parámetros de ejecución. Este tipo de control inteligente puede ser utilizado sobre líneas de producción en la que se requiera implementar un sistema de control de calidad o de clasificación.

La implementación de sistemas de control visual, por ejemplo en una industria, permitiría agilizar procesos, aumentar la productividad y reducir costes, dependiendo de la función que cumpla el sistema implementado.

OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

- Desarrollo e implementación de un algoritmo de control visual para el manipulador Melfa RV2AJ que permita identificar y posicionar objetos en el contenedor.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Implementar un algoritmo de reconocimiento y asociación de formas mediante la librería opencv.
- Evaluar la cinemática del manipulador Melfa RV2AJ para su posicionamiento sobre el contenedor deseado.
- Evaluar la posición de los objetos reconocidos con respecto al manipulador.

2. MARCO TEÓRICO

A través de los años la humanidad ha experimentado un cambio radical con la aplicación de los conocimientos acumulados, surgiendo así nuevos tipos de tecnologías útiles para diversos campos de la ciencia moderna.

2.1. ROBÓTICA

En la actualidad se define a la robótica como una ciencia encargada del diseño e implementación de prototipos mecánicos inteligentes que sean capaces de emular el comportamiento de un ser vivo además de integrar la eficiencia y capacidad de operación de los procesadores de información actuales. Para lograr tal diseño es necesario integrar varias ramas de la ciencia como la mecánica, la electrónica, control, programación, además de otras ramas importantes, que en conjunto convergen en un punto para el desarrollo de máquinas inteligentes y resolución de tareas difíciles de realizar para el ser humano (Barrientos, 1997).

Desde siempre, las personas han querido desarrollar seres animados con diferentes fines. Este deseo de dar vida, conjugado con el progreso mecánico, científico, tecnológico y electrónico a lo largo de la historia, dio lugar a la creación de los autómatas, máquinas que imitan la figura y los movimientos de un ser animado, antecedente directo de los robots.

El avance progresivo de la robótica permite el desarrollo de mecanismos con mayor autonomía, y menor necesidad de intervención o supervisión externa, a diferencia de las primeras generaciones que únicamente realizaban trabajos repetitivos siempre bajo vigilancia en caso de presentarse algún inconveniente con el funcionamiento de la máquina. La configuración de los primeros robots respondía a las denominadas configuraciones esférica y antropomórfica de uso especialmente válido para la manipulación.

Con la aparición de sensores y actuadores cada vez más sofisticados el campo de aplicación para el robot se ha diversificado apareciendo en varios ámbitos de la sociedad, ya sea en ambientes industriales o de desarrollo científico, cumpliendo con requerimientos de gran precisión en bajos tiempos de ejecución.

2.2. ROBÓTICA INDUSTRIAL

La necesidad constante de mejorar la calidad en los productos y conseguir una mayor productividad en las líneas de fabricación, ha impulsado a la industria a la renovación continua de su sistema de automatización constituida principalmente por los mecanismos presentes en las etapas de producción. Esta característica de mejora en los sistemas de fabricación permite que aparezcan nuevos mecanismos con dispositivos periféricos más sofisticados, añadiendo cada vez más autonomía en las máquinas de las industrias. A pesar de los avances tecnológicos que han transformado el diseño y funcionamiento de los robots, en la industria aún se utiliza en las tareas de automatización repetitivas, máquinas que se limitan a la ejecución de instrucciones específicas diseñadas únicamente para un tipo de tarea puntual. La inflexibilidad y generalmente el alto coste de estas máquinas, conocidas como sistemas de automatización rígidos, han contribuido al creciente uso de robots en la industria ya que este tipo de mecanismos presentan mejores funcionalidades en un entorno de trabajo flexible, además de ser fácilmente adaptables en cualquier etapa de la producción. Generalmente los robots industriales presentan como característica un nivel de autonomía que les permite ejecutar acciones de decisión en un instante pequeño, basándose en los requerimientos de calidad vigente para la producción de los productos.

En la actualidad la industria es el sector donde más se requiere de la robótica, ya que los constantes cambios en los procesos de producción requieren mecanismos autónomos cada vez más sofisticados. Es por esta razón que el desarrollo de la robótica parte inicialmente de las necesidades industriales, que junto al avance de la tecnología permitieron la formación de mecanismos inteligentes capaces de realizar varias tareas, además de movimientos complejos a través de espacio de trayectorias. Además de los procesos industriales que requieren de la presencia de robots, también existen varios campos en los cuales la robótica constituye una herramienta

de investigación y de desarrollo, como en la medicina, la exploración espacial, la domótica y otras áreas.

Un robot industrial es un manipulador de uso general controlado por computador que integra algunos elementos rígidos conectados en serie mediante articulaciones prismáticas o de revolución. El final de la cadena esta fijo a una base soporte, mientras el otro extremo está libre y equipado con una herramienta para manipular objetos o realizar tareas de montaje. El movimiento de las articulaciones está referenciado a la conexión con el extremo anterior, tal que el resultado es un conjunto de movimientos individuales con el objetivo de trasladar el efector final sobre una trayectoria específica. Los grados de libertad presentes en la configuración del manipulador describen el área de trabajo al que tendrá acceso el robot además del comportamiento cinemático que este presenta al realizar los movimientos programados en el medio de control. Su composición mecánica está conformada por la estructura física de un brazo y una herramienta anclada al extremo final emulando en lo posible los grados de libertad presentes en las extremidades humanas para conseguir movimientos complejos a una mayor velocidad conservando la precisión y el control en cada evento de traslación, tal que la configuración básica para un manipulador robótico de uso industrial se representa en la figura 2.1.

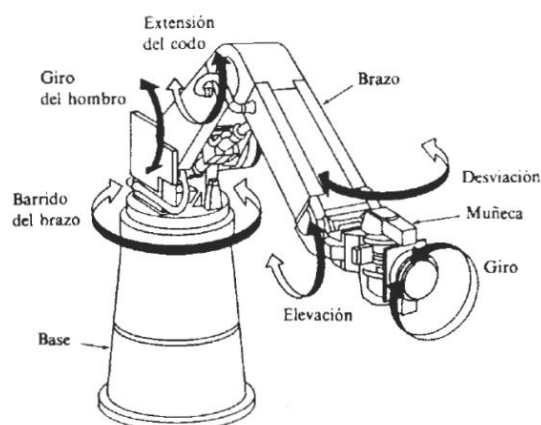


Figura 2.1. Manipulador Industrial

Fuente: (Fu, González, & Lee, 1988)

2.3. CONFIGURACIÓN CINEMÁTICA PARA MANIPULADORES

La variedad en las aplicaciones para los manipuladores industriales permite configuraciones diferentes y determinadas en su estructura acorde a la tarea que se desea desarrollar, ya que si bien se puede emplear un robot de uso general que presente seis grados de libertad para ejecutar una acción, no necesariamente se requiere implementar un robot de estas características, es por esta razón que existe una gama de configuraciones que posicionan a los manipuladores bajo categorías de trabajo permitiéndoles soldar, manejar materiales y ensamblar, además de otras actividades requeridas principalmente por la industria de producción. (Craig, 2006).

Los manipuladores en la actualidad son generalmente clasificados cinemáticamente haciendo referencia a sus tres primeras articulaciones de posicionamiento, así los cinco tipos de geometrías de uso regular son:

- Articulado (RRR)
- Esférico (RRP)
- Scara (RRP)
- Cilíndrico (RPP)
- Cartesiano (PPP)

2.3.1. CONFIGURACIÓN ARTICULADA

Este manipulador consta de tres articulaciones de rotación, esto permite que la posición del extremo final este especificado mediante coordenadas angulares de fácil resolución. La estructura tiene un mejor acceso a espacios cerrados, además de un volumen de trabajo mayor, considerando al campo de movimiento una esfera con un radio descrito por la longitud total del manipulador. Tiene mayor uso en aplicaciones de gran complejidad principalmente en la industria automotriz donde se requiere líneas de ensamblaje automatizadas, también es utilizado como el principal modelo de estudio para aplicaciones de investigación y desarrollo. La gran desventaja es su costo, en general es más difícil su construcción por el tipo de

articulaciones que constituyen su estructura, su modelo se representa en la figura 2.2 (Barrientos, 1997).

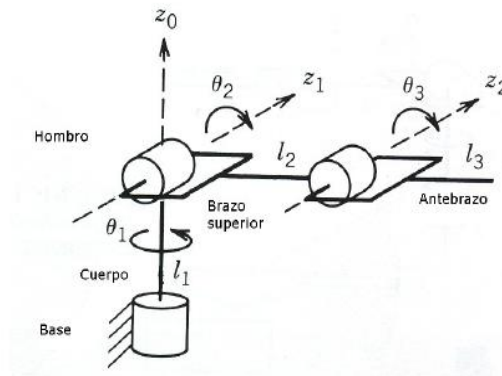


Figura 2.2. Manipulador Articulado

Fuente: (Craig, 2006)

2.3.2. CONFIGURACIÓN ESFÉRICA

Esta configuración es similar a la considerada como articulada con diferencia en la última articulación que es de tipo prismática. Las variables articulares expresan la posición del extremo del tercer enlace en coordenadas polares. Debido a la configuración utilizada para el movimiento de sus articulaciones el espacio de trabajo está restringido a trayectorias apartadas de la base, sin acceso a espacios cerrados. El modelo básico para su estructura se muestra en la figura 2.3 (Barrientos, 1997).

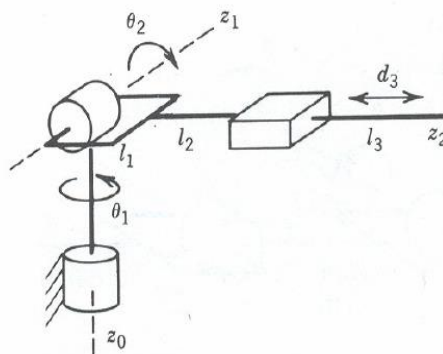


Figura 2.3. Manipulador esférico

Fuente: (Craig, 2006)

2.3.3. CONFIGURACIÓN SCARA

En esta configuración la última articulación de igual manera es de tipo prismática, la diferencia radica en que el hombro y codo rotan alrededor de ejes verticales. Una de las características principales de este manipulador es su rigidez en la dirección vertical, lo que le hace principalmente compatible con operaciones de ensamblaje ya que los momentos de inercia en cada articulación son menores para la traslación de objetos. Este brazo puede realizar movimientos horizontales de mayor alcance debido a sus dos articulaciones rotacionales. Su modelo básico se representa en la figura 2.4 (Fu, González, & Lee, 1988).

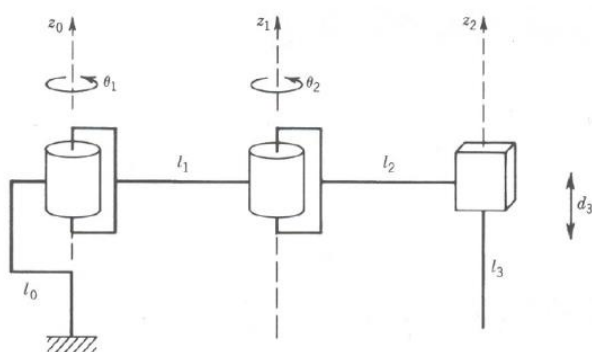


Figura 2.4. Manipulador Scara

Fuente: (Craig, 2006)

2.3.4. CONFIGURACIÓN CILÍNDRICA

La primera articulación es de revolución alrededor de la base, siendo prismáticas las articulaciones posteriores, está diseñado para ejecutar los movimientos conocidos como interpolación lineal e interpolación por articulación, la característica principal de esta configuración es el volumen de trabajo que es de forma cilíndrica, suponiendo un radio de giro de 360 grados y un rango de desplazamiento L , lo que puede resultar de interés en una célula flexible, con el robot situado en el centro de la célula sirviendo a diversas máquinas dispuestas radialmente a su alrededor. El modelo para su representación se muestra en la figura 2.5 (Fu, González, & Lee, 1988).

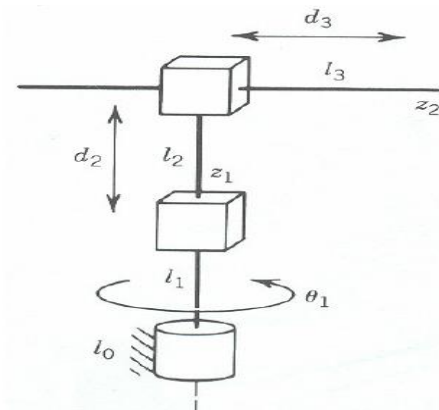


Figura 2.5. Manipulador Cilíndrico

Fuente: (Craig, 2006)

2.3.5. CONFIGURACIÓN CARTESIANA

Las articulaciones son del tipo prismáticas, su cinemática se describe por cambios en las posiciones de los ejes (x , y , z). Esta configuración es bastante usual en estructuras industriales por su fácil implementación y gran diversidad de aplicaciones para líneas de producción. El volumen de trabajo es menor ya que solo se tiene acceso directo al plano (x , y), donde se puede ejecutar cualquier acción de mecanizado sobre cualquier tipo de material dependiendo únicamente de la herramienta colocada en el extremo final del robot. Esta configuración se representa en la figura 2.6 (Craig, 2006).

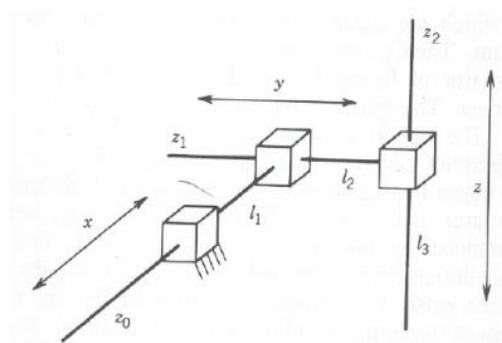


Figura 2.6. Manipulador cartesiano

Fuente: (Craig, 2006)

En la figura 2.7 se representa todas las configuraciones que puede presentarse en un manipulador industrial, dependiendo de las necesidades

de producción que se presenten en las líneas de montaje o elaboración. En la actualidad la configuración angular es la más utilizada ya que su estructura puede presentar más de 6 grados de libertad para realizar operaciones complejas de movimiento, principalmente útil para la manipulación directa de objetos sobre bandas de transporte, o para líneas de ensamblaje automatiz.

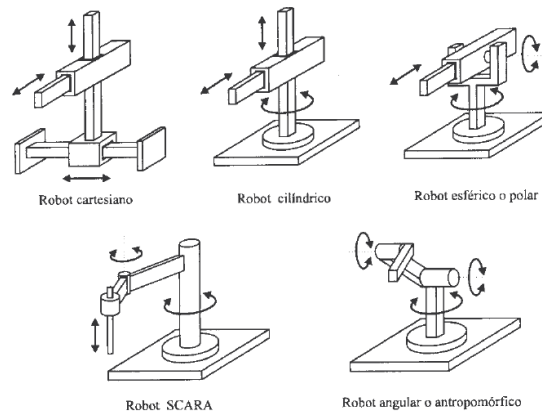


Figura 2.7. Configuración Manipuladores

Fuente: (Barrientos, 1997)

2.4. MODELOS CINEMÁTICOS PARA MANIPULADORES

La cinemática para el manipulador industrial está enfocada al estudio analítico de la geometría que compone cada articulación al instante de desplazarse a través del espacio de trabajo, con respecto a un sistema de referencia fijo sin considerar las fuerzas o momentos que originan el cambio de estado en los actuadores de cada unión de la cadena. El desplazamiento espacial del robot como una función del tiempo describe el tramo de posiciones que adquiere sobre un grupo de coordenadas permisibles dentro de su campo de movimiento, para controlar la trayectoria es necesario recurrir a métodos matemáticos que describan la cinemática para la cadena de eslabones completa y así adquirir la localización espacial del extremo final del robot. Para realizar el análisis de posiciones que toman las articulaciones del robot, se puede utilizar la cinemática directa o inversa

dependiendo de las variables que se desean encontrar como se muestra en la figura 2.8.

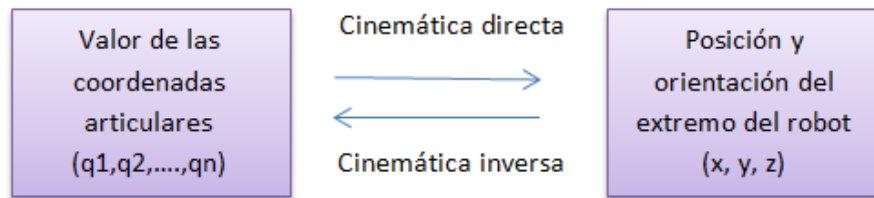


Figura 2.8. Modelo Cinemática

2.4.1. CINEMÁTICA DIRECTA

El análisis de la cinemática directa para un manipulador consiste en encontrar las posiciones angulares para cada una de sus articulaciones a partir de la localización y la orientación del efector final del robot, esto permite encontrar varios parámetros angulares a partir de una sola posición conocida sobre la cadena abierta de eslabones. El problema en esta metodología se reduce a encontrar una matriz de transformación que relaciona el sistema de coordenadas ligado al cuerpo en movimiento respecto a un sistema de coordenadas que se toma como referencia. Para lograr esta representación se usan las matrices de transformación homogénea, la cual incluye las operaciones de traslación y orientación. (Madrigal & Idiarte, 2002).

2.4.1.1. Matriz de transformación homogénea

Es una matriz que transforma un vector expresado en coordenadas homogéneas en otro sistema de posiciones en el espacio tridimensional. Esta matriz está compuesta por matrices de rotación y traslación tal que abarca todo el volumen de movimiento del manipulador. Esta representación matricial de un elemento mecánico rígido para describir la geometría espacial de un brazo fue utilizada por primera vez por Denavit y Hartenberg en 1995.

La matriz de transformación homogénea tiene la siguiente estructura:

$$T = \begin{bmatrix} m \text{ rotacion} & m \text{ traslacion} \\ perspectiva & escalado \end{bmatrix}$$

$$T = \begin{bmatrix} n & s & a & p \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Los vectores n , s , a son ortogonales unitarios y p es un vector que describe la posición x , y , z del origen del sistema actual respecto del sistema de referencia.

La matriz de rotación describe la orientación espacial que adquiere el manipulador referente a un sistema de coordenadas, este sistema también puede presentar traslación en los ejes espaciales representados en el vector de traslación.

2.4.2. CINEMÁTICA INVERSA

El objetivo de la cinemática inversa consiste en encontrar los valores que deben adoptar las coordenadas articulares del robot para que su extremo se posicione y oriente según una determinada localización espacial. Al tener un solo valor referencial de partida la solución para las posiciones angulares de las articulaciones converge en un conjunto de valores que puede adoptar la cadena de eslabones, es decir se puede presentar múltiples soluciones para un solo punto de coordenadas espaciales, el problema principal radica en que las soluciones no siempre pueden existir en el volumen de trabajo por el cual puede desplazarse el robot ocasionando una obstrucción cinemática al instante de realizar movimientos de traslación (Fu, González, & Lee, 1988).

Para la resolución de la cinemática inversa existen métodos numéricos iterativos, cuya velocidad de convergencia e incluso su convergencia en si no está siempre garantizada, es por esta razón que para su resolución es viable utilizar métodos cerrados ligados directamente con la geometría y disposición de manipulador. Las ventajas de utilizar un método de resolución cerrado se presenta a continuación:

- Una de las aplicaciones puntuales en la que se puede utilizar este tipo de resolución es en escenarios de tiempo real donde se requiere

encontrar posiciones en intervalos de tiempo muy cortos para que no exista descoordinación en los eventos de movimiento. Al pensar en una solución de tipo iterativo no es totalmente fiable el encontrar los valores angulares en el momento adecuado.

- Al existir múltiples soluciones para posicionar la cadena de eslabones según la localización del extremo final del robot, el uso de una solución cerrada permitiría restringir mediante determinadas reglas el comportamiento cinemático del manipulador.

A pesar de las dificultades que se pueden presentar en este tipo de cinemática, la mayor parte de los robots poseen configuraciones relativamente simples que facilitan la resolución de su problema cinemático inverso. Si se consideran solo los tres primeros grados de libertad de muchos robots, los elementos quedarían contenidos en un solo plano ya que presentarían una estructura planar, facilitando la resolución del problema.

Los métodos geométricos permiten obtener normalmente los valores de las primeras variables articulares que son las que consiguen posicionar al robot, sin atender la orientación de su extremo final. Para ello se utilizan relaciones trigonométricas sobre articulaciones del robot, además de recurrir a la resolución de triángulos formados por los elementos que constituyen al robot. Tal como se muestra en la figura 2.9 las relaciones geométricas describen la cadena cinemática para el manipulador.

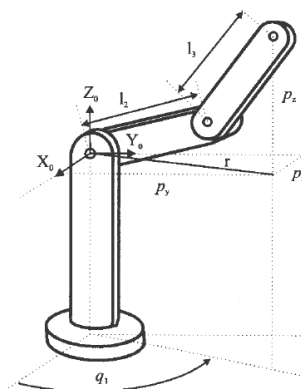


Figura 2.9. Relaciones geométricas de la cinemática

Fuente: (Fu, González, & Lee, 1988)

2.5. INTELIGENCIA ARTIFICIAL EN LOS ROBOTS

La inteligencia artificial está asociada a la simulación de los complejos procesos cognitivos que caracterizan el comportamiento del ser humano en sistemas informáticos, para integrar las altas velocidades de procesamiento con la lógica secuencial que componen el razonamiento inteligente. A pesar de que la mayoría de patrones en el razonamiento humano han sido emulados como la capacidad de resolver problemas o tomar decisiones, los sistemas inteligentes ideados para los robots no han superado la barrera de autonomía completamente ya que no tienen la habilidad de percepción presente en todos los seres vivos. Esta característica sensorial es la que enlaza el entorno con el pensamiento, impulsándolo a descubrir la naturaleza de las sensaciones captadas. Un aspecto parcial de la percepción, es el reconocimiento de formas y de patrones, que no solo está limitado a la visión, ya que integra todos los sentidos como medios de comprensión e interpretación de lo que acontece en el exterior, y son estas habilidades de asociación presentes en el cerebro los principales procesos que se desea duplicar en una máquina (Serrano, 2012).

El progreso en la creación de algoritmos para la emulación de inteligencia artificial ha experimentado varias etapas de transformación, desde simples procesos lógicos bien definidos hasta conceptos abstractos propios del razonamiento. En la actualidad las máquinas son capaces de tomar decisiones y de ejecutar una variedad de tareas en poco tiempo, en gran parte por el avance tecnológico en los procesadores de información, pero aun los emuladores de inteligencia artificial difieren del razonamiento y la percepción del entorno.

Una parte representativa y de gran desarrollo dentro de la inteligencia artificial es la visión artificial, dado que permite a los mecanismos acceder a la realidad y adquirir datos en forma de imágenes para interactuar con objetos externos de manera autónoma.

2.6. VISIÓN ARTIFICIAL

La visión artificial está asociada a la emulación y perfeccionamiento del sentido visual del ser humano, para adquirir e interpretar imágenes que describen el entorno en una secuencia plana de los acontecimientos exteriores. Las estructuras y propiedades del mundo real que se desean deducir a partir de la visión artificial incluyen propiedades geométricas y tipos de materiales que componen a los objetos. Esto permite que los mecanismos reconozcan e interactúen con los objetos que componen el entorno (Gómez-Allende, 1994).

La entrada a un sistema de visión artificial es una imagen obtenida por un elemento de adquisición mientras que su salida es una descripción de la escena mediante el análisis de todos los objetos que integran la imagen, para que el robot pueda interactuar en tiempo real con el entorno y se adapte a los cambios que se presenten. Es por esta razón que la salida del sistema de visión depende exclusivamente de la calidad de la imagen de entrada y la cantidad de información que esta puede proporcionar, ya que si se presentan distorsiones al instante de capturar las imágenes o movimientos bruscos la información procesada no será interpretada con la misma eficiencia.

2.6.1. CARACTERÍSTICAS DE LA VISIÓN ARTIFICIAL

EL amplio campo de aplicaciones que presenta la visión artificial, se debe a que permite extraer y analizar información espectral, espacial y temporal de los distintos objetos.

El sistema físico de visión artificial está constituido principalmente por el sistema de adquisición de las imágenes y el sistema de procesamiento digital. El resultado de la interacción entre estas dos etapas principales converge en la extracción de información de interés de la imagen, para ser utilizada en una representación visual, en la planificación para el movimiento de un robot, o ser una fuente de datos para un autómata programable. En definitiva, múltiples periféricos pueden ser receptores de esta información y

vincularse con el sistema de procesamiento de las imágenes. Los subsistemas que cumplen funciones necesarias en el tratamiento de imágenes son:

- **Etapa de iluminación:** Esta referida a la cantidad de luz que presenta el entorno al momento de realizar la adquisición de imágenes, normalmente se utilizan puntos de iluminación adicionales para estabilizar la cantidad de luz que incide sobre el objeto visualizado.
- **Etapa de captura:** Participan los transductores que convierten la radiación luminosa reflejada en señales eléctricas. El rango de captura varía desde el espectro visible, radiación gamma, hasta la radiofrecuencia o microondas. El dispositivo empleado generalmente para la adquisición de imágenes es una cámara que cumpla con los requerimientos de resolución y resistencia.
- **Etapa de adquisición:** La señal eléctrica procedente de las cámaras forman bajo una frecuencia de captura diferentes secuencias de imágenes que describen el entorno, la tarjeta encargada de recopilar esta información en forma de señales se llama digitalizador de video, y está localizado en la tarjeta madre del computador.
- **Etapa de procesamiento:** Está integrado por un computador o un clúster de ordenadores dependiendo de las necesidades y los requerimientos de los algoritmos de programación que componen a la visión artificial. Parten de una representación digital de las imágenes y procesan esta información hasta extraer las características de interés que contiene la imagen.
- **Periféricos externos:** Conjunto de elementos receptores de información procedentes de la etapa de procesamiento, encargados de interpretar datos y ejecutar una acción en respuesta a los patrones encontrados en las imágenes tratadas. En general los mecanismos externos son usados como final del sistema, tal que se cumple el ciclo de visión artificial hasta que ingrese una nueva imagen que contenga información.

El ciclo continuo de un sistema de visión artificial permite que los robots o mecanismos autónomos tomen decisiones o ejecuten acciones programadas con anterioridad, sacrificando para conseguirlo una cantidad dada de recursos físicos que brinden velocidad de tiempo de procesamiento y almacenamiento de información. En la figura 2.10 se representa el diagrama general que gobierna el funcionamiento de la visión artificial, donde se diferencian las características físicas y de software requeridas para realizar el procesamiento de imágenes sin la necesidad que intervenga el usuario durante la ejecución del programa.

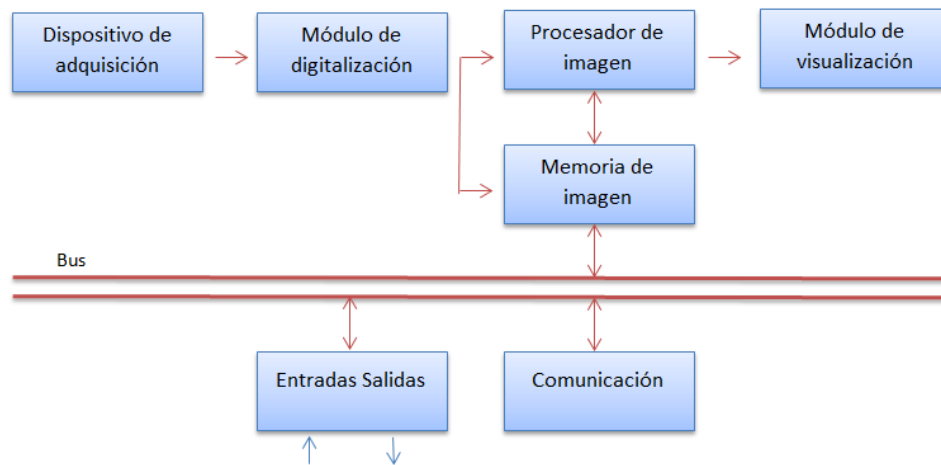


Figura 2.10. Modelo de visión artificial

2.6.2. APLICACIÓN DE LA VISIÓN ARTIFICIAL

Con el desarrollo de microprocesadores sofisticados que permiten ejecutar mayor cantidad de instrucciones por segundo, las aplicaciones potenciales de la visión artificial presentan un mayor crecimiento ampliando la capacidad resolutoria de problemas en mecanismos autónomos y sistemas de producción. Una aplicación puede exigir varias funciones de procesamiento de imágenes a partir de algoritmos para la segmentación y recopilación de información contenida en la imagen sin sacrificar mayor cantidad de recursos físicos.

El uso de la visión artificial en el sector industrial abarca una gran cantidad de aplicaciones, beneficiando tanto áreas de producción como de clasificación partiendo de la adquisición de imágenes en un campo de trabajo. De forma general los principales sectores de aplicación de la visión artificial son:

- **Control de procesos:** Está enfocado a la segmentación de información necesaria para la toma de decisiones dentro del sistema de producción. La extracción de características de interés se lo realiza con algoritmos que facilitan el procesamiento de imágenes, por lo general se comienza con una operación de medición bidimensional del objeto visualizado para establecer posiciones, formas o características referidas a tonalidades de colores, para establecer datos indicativos durante las etapas de clasificación o reconocimiento.
- **Control de calidad:** Todo proceso industrial es evaluado por la calidad de su producto final, esto hace de la etapa de control de calidad una fase crucial del proceso. Los mecanismos utilizados para establecer la calidad de un producto varían dependiendo de los parámetros que tengan relevancia en el mismo, por lo general el sistema de visión artificial surge como una buena alternativa capaz de detectar aquellos errores que un operario pudiera pasar por alto, ya que el procesamiento de imágenes se lo realiza bajo parámetros requeridos y en una cantidad de tiempo pequeña.
- **Aplicaciones no industriales:** Comprende todos aquellos sistemas automatizados que no son parte de una etapa de producción industrial, específicamente está enfocado al desarrollo de nuevos mecanismos robóticos capaces de emular un proceso de aprendizaje basado en visión artificial, y también aplicaciones de software que permiten al usuario realizar actividades básicas sobre imágenes modificando su morfología o estructura interna de la información que está presente.

El objetivo general de una máquina que integra la visión artificial es describir una escena, analizando varias imágenes de la misma, independientemente de la perspectiva de captura ya sea de forma tridimensional o bidimensional. Cuando se ha extraído una parte de una imagen, generalmente es necesario medir varias propiedades geométricas que pueden ser la base para reconocer si el subconjunto representa o no un objeto dado, así como para determinar la posición y orientación del mismo.

2.6.3. ADQUISICIÓN DE IMAGEN

Una imagen digital se representa como una función bidimensional de coordenadas espaciales (x, y) , y la amplitud en cualquier par coordenado representa a la intensidad de color para ese determinado punto. Las imágenes digitales entonces se encuentran constituidas de elementos finitos con una localización y un valor definido de manera discreta, tal que cada elemento recibe el nombre de pixel. La cantidad total de pixeles constituyen la resolución visual de una imagen (Bradski & Kaehler, 2008).

Las imágenes digitales a color se generan a partir de la unión de imágenes monocromáticas individuales, también conocidos como bandas. Una imagen a color en un sistema RGB consiste de tres imágenes monocromáticas del mismo tamaño, donde cada una de ellas representa una componente del sistema de color (rojo, verde y azul). En este tipo de imágenes, el pixel puede ser visto como un vector cuya dimensión es igual al número de bandas que conforman la imagen.

Las cámaras digitales convencionales realizan una discretización de las intensidades de luz reflejadas sobre una escena, ya que generan una representación bidimensional de un mundo tridimensional analógico. La manera usual de representar este proceso es llamado proyección central, donde un rayo va desde un punto en el mundo tridimensional hacia un punto en el espacio llamado centro de proyección y continua hasta intersectarse con el plano de la imagen, en él se hace el promedio de intensidades de

acuerdo a un arreglo bidimensional, generándose una imagen digital. En la figura 2.11 se representa la estructura que adquiere una imagen digital.

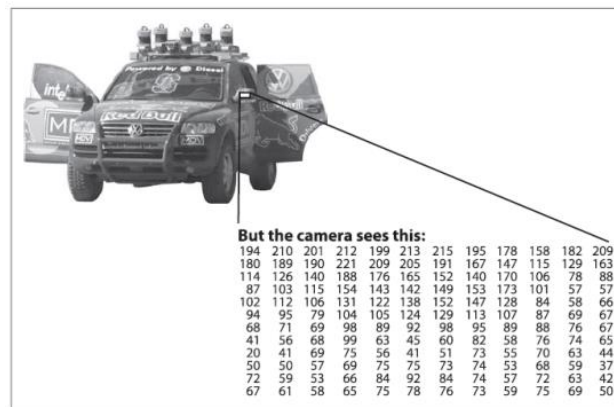


Figura 2.11. Estructura imagen digital

Fuente: (Bradski & Kaehler, 2008)

2.6.4. RUIDO EN IMÁGENES

Las imágenes capturadas en un entorno sin control de luz casi siempre son degradadas por algunos errores aleatorios que se pueden presentar, de manera que afectan a la calidad de la imagen y a la información que contienen. Esta degradación es conocida como ruido, y puede ocurrir durante la captura de la imagen, transmisión, o procesamiento. Independientemente de la etapa en la que se genere ruido en la imagen normalmente se considera a su aparición como una característica probabilística que atraviesa la imagen en su proceso de representación.

El ruido ideal denominado ruido blanco está presente en todas las frecuencias con la misma intensidad. Un caso especial de ruido blanco es el ruido Gaussiano, en donde la variable aleatoria tiene una distribución Gaussiana.

2.7. PROCESAMIENTO DIGITAL DE IMÁGENES

2.7.1. FILTRO DE SUAVIZADO GAUSSIANO EN IMÁGENES DIGITALES

Las operaciones de suavizado se utilizan para disminuir los efectos negativos que se pueden presentar en una imagen digital como

consecuencia de un sistema de muestreo pobre o del canal de transmisión. En el filtro gaussiano, el efecto mezcla ligeramente los colores de los píxeles que están vecinos el uno al otro en un mapa de bits lo que provoca que la imagen pierda algunos detalles minúsculos, pero se vea más suave debido a que los bordes presentes en la imagen se ven afectados. La ecuación para calcularla es:

$$G(x, y) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} e^{-\frac{x^2+y^2}{2\sigma^2}} \quad [2.1]$$

Donde x e y son las coordenadas de las imágenes y σ es la desviación estándar. La desviación estándar es el único parámetro del filtro Gaussiano y es proporcional al tamaño de la vecindad en donde se va aplicar el filtro. Los píxeles más distantes del centro del operador tienen una menor influencia, como se muestra en la figura 2.12.



Figura 2.12. Suavizado imagen

Fuente: (Alaens, 2010)

2.7.2. IMAGEN EN ESCALA DE GRISES

Una imagen en color a escala de grises representa la misma cantidad de información del entorno que una a color, con la diferencia que cada valor discreto de los píxeles varía en un rango de 0 a 255, representando cada color con una intensidad de oscuridad o claridad, el equivalente a la luminancia de la imagen. Una imagen digital tiene un número limitado de niveles de grises, es por eso que las transformaciones de escala de grises son fáciles de realizar tanto en hardware como en software.

Para el cálculo de la escala de grises o luminancia de una imagen debe realizarse una media ponderada de los distintos componentes de color de cada pixel (rojo, verde, azul). La ecuación de la luminancia es la expresión matemática de ese fenómeno, y los factores de ponderación de cada componente de color nos indican la sensibilidad del ojo humano a las frecuencias del espectro cercanas al rojo, verde y azul.

$$Y = R * 0.3 + G * 0.5 + B * 0.11 \quad [2.2]$$

Para realizar la conversión a escala de grises de una imagen es necesario aplicar la ecuación 2.2 a cada pixel, entonces se obtiene una nueva matriz de un byte por pixel con información de la luminancia.

Las transformaciones en escala de grises son usadas generalmente para interpretar información de manera más fácil, variando únicamente el contraste de la imagen como método para mejorar la calidad del contenido. La técnica de ecualización por histograma es una transformación de la imagen cuyo objetivo principal es crear una imagen con igual distribución de niveles de brillo.

La ecualización por histograma mejora el contraste para valores de brillo cercanos al nivel máximo del histograma y disminuye el contraste para los valores mínimos del histograma. En la figura 2.13 se representa una imagen en escala de grises según la luminancia de la imagen original.



Figura 2.13. Conversión escala de grises

2.7.3. MODELO DE COLOR RGB

Este espacio de color tiene tres componentes: rojo, verde y azul que corresponden a los tres colores primarios aditivos, que mezclados bajo cantidades definidas describen diferentes tonalidades de color y son representados como se muestra en la figura 2.14

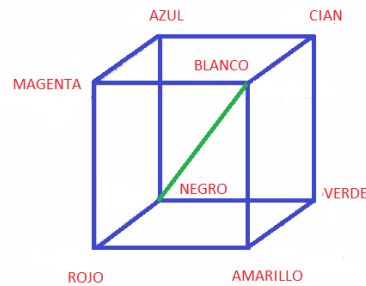


Figura 2.14. Modelo de color RGB

Generalmente este espacio de color es utilizado en el procesamiento de imágenes con restricción para separar la luminosidad del color, es decir, se necesita de los tres componentes de cada pixel para obtener un valor cuantitativo de la luminosidad, haciendo difícil el tratamiento digital de imágenes en condiciones de luz variable.

Para la representación de una imagen digital en este espacio de colores el valor que toma cada color primario varía de 0 a 255, esto permite que el vector para cada pixel adquiera diferentes tonalidades para la representación general de la imagen en una matriz de pixeles.

La principal ventaja de este espacio de color es que es muy utilizado en gráficas por computadora. La mayoría de los monitores y tarjetas de video trabajan con este modelo por lo que resulta sumamente práctico su empleo para aprovechar rutinas de software existentes y optimización por hardware.

2.7.4. MODELO DE COLOR HSV

El modelo de color HSV es una transformación no lineal del modelo RGB en

coordenadas cilíndricas de manera que cada color está definido en función de las tres propiedades del color:

- Tinte o matiz: Ángulo que representa el matiz, normalmente definido entre 0° y 360° .
- Saturación: Nivel saturación del color, dado entre 0 y 1, 0 representa sin saturación alguna (blanco), hasta 1 que sería el matiz en toda su intensidad. Es común también darlo en percentiles 0%-100%.
- Brillo: Nivel del brillo entre 0 y 1. 0 es negro; 1, blanco. Al igual que la saturación puede darse en porcentos entre 0% y 100%. De esta forma el 50% indica el nivel medio o normal del brillo del color.

Una saturación de cero indica que no hay matiz y el color está dentro de la escala de grises. En la figura 2.15 se representa el esquema general del modelo HSV

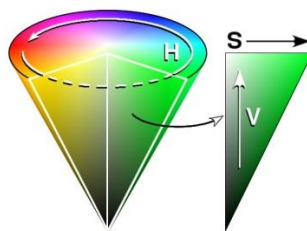


Figura 2.15. Modelo de color HSV

Fuente: (Wapcaplet, 2005)

La tapa del cono corresponde al valor de luminosidad más intenso ($V = 1$). La punta del cono es el color negro carente de luminosidad. El matiz (H) es el ángulo alrededor del eje de luminosidad (V),

El espacio de color HSV presenta las mismas ventajas que el espacio de color YUV para aplicaciones de visión debido a la fácil separación entre luminosidad y cromaticidad, sin embargo, al no estar soportado directamente por hardware el manejo de este espacio de color puede resultar en un procesamiento muy costoso en tiempo.

2.7.5. SEGMENTACIÓN

La segmentación consiste en subdividir una imagen en sus regiones u objetos de interés, bajo un cierto nivel de precisión. Las técnicas utilizadas para la extracción de la información dependen del problema que se intenta resolver, así una vez separado el objeto deseado, el proceso de segmentación debe detenerse. En general, la segmentación automática es una de las tareas más difíciles en el procesamiento de imágenes, ya que esta etapa del proceso determina el eventual éxito o fracaso del análisis de la imagen.

Los algoritmos de segmentación de imágenes tienen tres formas comunes: métodos basados en bordes, técnicas basadas en regiones y técnicas de umbral.

- Los métodos basados en bordes se centran en la detección de contornos. Delimitan el borde de un objeto y segmentan los píxeles dentro del contorno como pertenecientes a ese objeto. Su debilidad consiste en conectar contornos separados o incompletos, lo que los hace susceptibles a fallas.
- Las técnicas basadas en regiones, usualmente operan de la siguiente forma: la imagen es dividida en regiones agrupando píxeles vecinos con niveles de intensidad similares. Las regiones adyacentes son unidas bajo cierto criterio que involucra la homogeneidad y agudeza de las fronteras de la región. Un criterio muy estricto provoca fragmentación, un criterio poco estricto ocasiona uniones indeseadas.
- Las técnicas de umbral segmentan la imagen píxel por píxel, es decir, no toman en consideración el valor de los píxeles vecinos para el proceso. Si el valor de un píxel está dentro del rango de valores especificado para un objeto el píxel es segmentado. Son efectivas cuando los objetos y el fondo de la imagen tienen rangos de valores diferentes y existe un contraste marcado entre ellos. Como la información de los píxeles vecinos es ignorada, las fronteras de regiones borrosas pueden ocasionar problemas.

La elección de una técnica de segmentación está determinada por las características particulares del problema a resolver. La salida de esta etapa son los valores de los píxeles que forman la frontera de una región o bien la región misma.

2.7.6. UMBRALIZACIÓN

Los objetos o regiones tienen como característica la reflexión o absorción de luz en sus superficies, esto permite que la constante de brillo o umbral pueda determinarse para segmentar objetos y el fondo.

La Umbralización tiene un coste computacional bajo y rápido, puede ser fácilmente realizada en aplicaciones de tiempo real usando hardware especializado.

2.7.7. EXTRACCIÓN DE REGIONES POR COLOR

El uso del color en el procesamiento de imágenes está motivado por factores, que a menudo simplifican la identificación y extracción de objetos de una escena.

Una de las técnicas más simples para lograr la segmentación por color es trabajar con las tres componentes de una imagen RGB; para la segmentación de un color en particular por ejemplo el color rojo en la componente roja de la imagen el valor del color rojo puro es 255 mientras este mismo color en las otras capas tiene un valor mucho menor, dependiendo de las características de captura de imagen.

2.7.8. OPERACIONES MORFOLÓGICAS

Las operaciones morfológicas son métodos para procesar imágenes binarias conservando las principales características en la forma de los objetos. El valor de cada pixel en la imagen de salida está basado sobre el correspondiente pixel de entrada y sus vecinos. Dentro de las operaciones morfológicas esta la dilatación y erosión. La dilatación adiciona píxeles a los límites del objeto, y la erosión remueve píxeles sobre los límites del objeto.

2.7.8.1. Dilatación

La dilatación es la transformación morfológica que combina dos vectores utilizando la suma.

Sea A y B conjuntos en un espacio E^n con elementos $a = (a_1, \dots, a_n)$ y $b = (b_1, \dots, b_n)$, respectivamente, entonces la dilatación de A por B es el conjunto de todos los posibles vectores que son suma de pares de elementos, uno de A y otro de B.

De manera formal, la dilatación de A por B se define mediante:

$$A \oplus B = \{x | (B)x \cap A \neq \emptyset\} \quad [2. 3]$$

Por tanto, el proceso de dilatación consiste en obtener la reflexión de B sobre su origen, después, cambiar esta reflexión por x. La dilatación de A por B es entonces, el conjunto de todos los desplazamientos x, tales que B y A se solapen en al menos un elemento distinto de cero.

Los componentes del conjunto B (elemento estructurador), pueden ser ceros o unos. La cantidad de ceros o unos determina, en conjunto con el tamaño del elemento estructurador, el efecto que produce su utilización en las operaciones morfológicas.

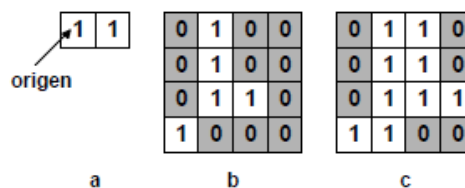


Figura 2.16. Dilatación morfológica

Fuente: (Malpartida, 2003)

Al usar el elemento estructurador sobre una imagen de entrada, y después aplicar el proceso de dilatación, se obtiene la imagen de salida ilustrada en la figura 2.17c.

2.7.8.2. Erosión

Es la transformación morfológica que combina dos conjuntos usando el concepto de inclusión. Si A y B son conjuntos en el espacio euclídeo n-dimensional, entonces la erosión de A por B es el conjunto de todos los elementos x para los que x+B pertenecen al conjunto A. La erosión de A por B se define por:

$$A \ominus B = \{x / (B)x \subseteq A\} \quad [2.4]$$

La erosión de A por B es el conjunto de todos los puntos x tal que B, trasladado por x, está contenido en A. Sin embargo, esta ecuación, normalmente, es más adecuada en implementaciones prácticas de la morfología. En la figura 2.18 se muestra el proceso de erosión morfológica a partir de un elemento estructurador y una imagen de entrada.

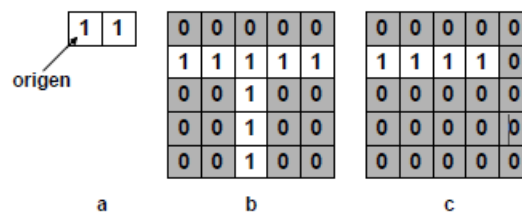


Figura 2.17. Erosión morfológica

Fuente: (Malpartida, 2003)

2.7.9. MOMENTOS GENERALES

En el procesamiento de imágenes, la teoría de los momentos es un cierto promedio ponderado determinado de las intensidades de los píxeles de la imagen. Además proporciona una interesante y útil alternativa para la representación de formas de objetos después de la segmentación. Las propiedades simples de la imagen que se encuentran a través de momentos de imagen incluyen área (o intensidad total), su centro de gravedad, y la información sobre su orientación.

Si existe un objeto en una región que viene dado por los puntos en los que $f(x, y) > 0$, el momento de orden p, q se define como:

$$m_{pq} = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} x^p y^q f(x, y) dx dy \quad [2. 5]$$

Un momento de gran interés es el de orden cero (el orden de un momento viene dado por la suma de los índices p y q), que coincide con el área del objeto, tal como lo determina la ecuación:

$$m_{00} = \sum_{x=0}^{N-1} \sum_{y=0}^{N-1} l(x, y) \quad [2. 6]$$

El área física se puede calcular sin más que multiplicar m_{00} por el área física de un pixel, lo cual obliga a un calibrado previo de la cámara. Desde el punto de vista del reconocimiento de objetos no es necesario pasar a las dimensiones físicas del objeto, ya que es posible obtener momentos invariantes a traslaciones, giros y tamaños relativos de los objetos.

Los momentos de orden uno m_{01} y m_{10} junto con m_{00} determinan el llamado centro de gravedad del objeto, determinado en las ecuaciones.

$$x = \frac{m_{10}}{m_{00}} = \frac{\sum \sum x l(x, y)}{l(x, y)} \quad [2. 7]$$

$$y = \frac{m_{01}}{m_{00}} = \frac{\sum \sum y l(x, y)}{l(x, y)} \quad [2. 8]$$

3. METODOLOGÍA

3.1. METODOLOGÍA MECATRÓNICA

En el proceso de integración de sistemas para el diseño y construcción de equipos se utiliza una estructura metodológica que permite en la actualidad realizar un procedimiento adecuado para el desarrollo de nuevas tecnologías mecatrónicas, con resultados dirigidos a un funcionamiento eficiente.

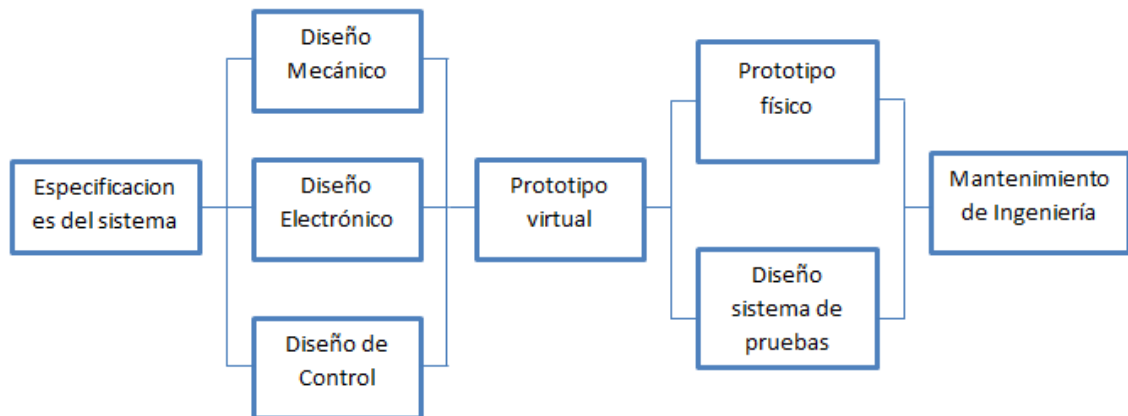


Figura 3.1. Metodología de diseño mecatrónico

El enfoque mecatrónico presentado en la figura 3.1 denota una estructura esquematizada que consolida el diseño final en etapas anteriores de análisis y procesos de selección, acorde a las especificaciones iniciales establecidas que forman un punto base para la generación de alternativas que conjuntamente brinden una solución final al problema planteado.

La especificación de los requerimientos del sistema como punto inicial permite que en las etapas siguientes de diseño mecánico, electrónico y de control se establezcan soluciones óptimas, que brinden un prototipo ficticio que será evaluado y corregido en caso de que presente posibles errores en alguna etapa de su diseño. Esta dinámica conjunta entre subprocesos permite que se realice un análisis profundo de la eficiencia que va a presentar el prototipo final del proyecto para que se ajuste a todas las alternativas posibles y brinde la más óptima de las soluciones.

Para el presente trabajo se utilizó el enfoque mecatrónico anteriormente señalado para conseguir una estructura lógica de diseño que encamine al

proyecto hacia un resultado final apoyado principalmente de la investigación y análisis.

3.1.2. ESPECIFICACIONES DEL SISTEMA

En este proyecto la convergencia de los subsistemas enunciados en el enfoque mecatrónico permite el control del brazo robótico para la manipulación de objetos reconocidos mediante visión artificial.

Para lograr un control preciso del brazo robótico melfa RV2AJ, es necesario adquirir variables externas de posicionamiento que permitan colocar las articulaciones en los ángulos correctos, tal que exista un factor de error mínimo en cuanto el movimiento del brazo. Para cumplir todos los requerimientos planteados inicialmente para este proyecto es necesario atender a lo siguiente:

- El programa de reconocimiento artificial debe adquirir y clasificar la imagen del objeto acorde su geometría, además de traducir la posición inicial y la final donde debe ser colocado el objeto en coordenadas físicas reales.
- La traducción de pixeles a una cantidad de medida real debe regirse una resolución que permita tener una posición exacta del objeto minimizando el error al trasladarlo de una posición a otra.
- El sistema de control para el posicionamiento del manipulador debe realizar la conversión de las coordenadas adquiridas por visión artificial en posiciones angulares para cada articulación como requerimiento para efectuar la cinemática de 5 grados de libertad presentes en el brazo robótico melfa RV2AJ.

3.1.3. REQUERIMIENTOS TÉCNICOS PARA EL CONTROL DEL MANIPULADOR

A partir de los requerimientos base que se debe tomar en cuenta para la elaboración del proyecto se puede elaborar una estructura mecatrónica que

permita el desarrollo final mediante etapas en las cuales se cumplan con las especificaciones globales del sistema, por lo cual es necesario analizar como etapa inicial los requerimientos técnicos que deben estar inherentes en el proyecto para un correcto desempeño:

-Funcionalidad.- El proyecto final tendrá posibles aplicaciones dentro del sector industrial en las líneas de producción que necesiten un método de clasificación más autónomo en cuanto pueda resolver el lugar de origen y la posición final que debe tener el objeto reconocido.

-Control.- Recae necesariamente en la precisión con la que cuente el sistema para efectuar el posicionamiento del robot manipulador, además del reconocimiento específico de la forma del objeto, tomando en cuenta factores externos como la cantidad de luz presente en el medio.

-Interfaz amigable.- Necesario para la comunicación entre el programa de control y el usuario, con una interfaz de fácil manejo y despliegue detallado de información referente al reconocimiento artificial.

-Mantenimiento.- Prioritario para el manipulador y todo su sistema motriz que debe ser efectuado según especificaciones del fabricante.

Restricciones.- El proyecto implementado obedece a una aplicación que intenta ampliar el control implementado en un manipulador confiriéndole un grado de inteligencia para la toma de decisiones en periodos de procesamiento cortos. Así las condiciones establecidas que afectan el funcionamiento general del sistema son:

- Para la cinemática el cuarto eslabón del manipulador debe permanecer por debajo de la unión entre el primer y segundo eslabón. Además de conservar la condición de perpendicularidad hacia el plano de referencia (x, y).
- Los objetos visualizados para el reconocimiento y asociación obedecen a un solo color de textura, en este caso el rojo.

- El objeto manipulado se posiciona en un valor inicial para realizar su traslado sobre el contenedor correspondiente.

3.2. DISEÑO MECÁNICO

Para el análisis mecánico del proyecto se describe el funcionamiento de los actuadores presentes en las articulaciones del brazo robot melfa RV2AJ, además del cálculo matemático necesario para posicionar el eslabón final del robot en las coordenadas deseadas. En el análisis matemático para el movimiento del robot se considera los grados de libertad presentes en el sistema, para conseguir mayor precisión en el instante de colocar los objetos en su posición final, además de las propias restricciones angulares presentes en el robot que limitan el movimiento dentro de un rango específico.

3.2.1. DESCRIPCIÓN GENERAL BRAZO ROBÓTICO

Un manipulador generalmente está compuesto por un conjunto de elementos electromecánicos que le permiten realizar tareas de forma automática facilitando actividades de producción o trabajos en ambientes poco amigables para las personas. Esta dependencia hacia los manipuladores para entornos industriales ha encaminado el desarrollo de varios diseños aportando a su crecimiento en funcionamiento y estructura física más robusta con entornos de programación más amigables y permisibles.

Debido a que la mayoría de manipuladores presentan en su diseño una similitud con el brazo humano, se puede tener acceso a un amplio rango de trabajo para realizar el movimiento conjunto de todas las articulaciones presentes en el robot, esto permite que se puedan manipular objetos trasladándolos de una posición a otra o cumplir actividades en las que se requiera precisión, considerando eventualmente el peso de la carga ya que puede ocasionar vibración en la traslación sobre el manipulador desestabilizando la acción.

Los manipuladores industriales pueden efectuar un número diverso de trabajos automáticamente mediante programas preestablecidos en la memoria del controlador, o también por un enlace de comunicación que le permite a la controladora recibir comandos desde un ordenador para realizar acciones concretas. Su estructura está compuesta de elementos rígidos conectados por uniones en una cadena cinemática abierta. Estas uniones son normalmente de rotación o prismáticas permitiendo el desplazamiento lineal.

Cada uno de los movimientos independientes que puede realizar cada articulación con respecto al anterior define a un grado de libertad determinando el número de eslabones presentes en el mecanismo, los mismos que fijan la posición y orientación del gripper o elemento final del robot.

Existen varias maneras para movilizar cada eslabón de un robot manipulador ya sea de forma eléctrica, hidráulica o mediante actuadores neumáticos, cada uno de ellos conformado por una retroalimentación al sistema que permite conocer la posición en la que se encuentran en cada instante, eliminando la necesidad de posicionar los actuadores al inicio del programa antes de ejecutar una acción. La mayoría de manipuladores en la actualidad tienen seis o menos grados de libertad, tres para posicionamiento y tres para orientación, con estos parámetros se puede definir su cinemática dentro de un campo de trabajo propio del robot.

Un manipulador industrial está compuesto por varios componentes que ayudan a su funcionamiento general, permitiendo realizar variadas tareas de automatización, así integra:

- Estructura mecánica.- Está compuesto por diversas articulaciones que describen la forma del manipulador y los grados de libertad. Si la estructura integra varios eslabones se genera mejor maniobrabilidad reduciendo el control general.

- Actuadores.- Generalmente se utilizan dispositivos neumáticos, hidráulicos o motores eléctricos servocontrolados, su uso depende del par y las fuerzas necesarias para movilizar una carga dinámica en el extremo del efector final del robot.
- Sistema de control.- En esta etapa se realiza la supervisión de las articulaciones ya que cada acoplamiento cuenta con un sistema de retroalimentación que permite al controlador conocer la velocidad de desplazamiento y posición actual. También se encarga del control de la trayectoria para el efecto de trasladar al efector final a una posición según referencias anteriores de la posición de cada articulación. El sistema de control en manipuladores industriales integra métodos básicos de control para estabilizar el funcionamiento de cada articulación atendiendo a las variaciones de carga, velocidad de movimiento y aceleraciones que experimentan los actuadores.

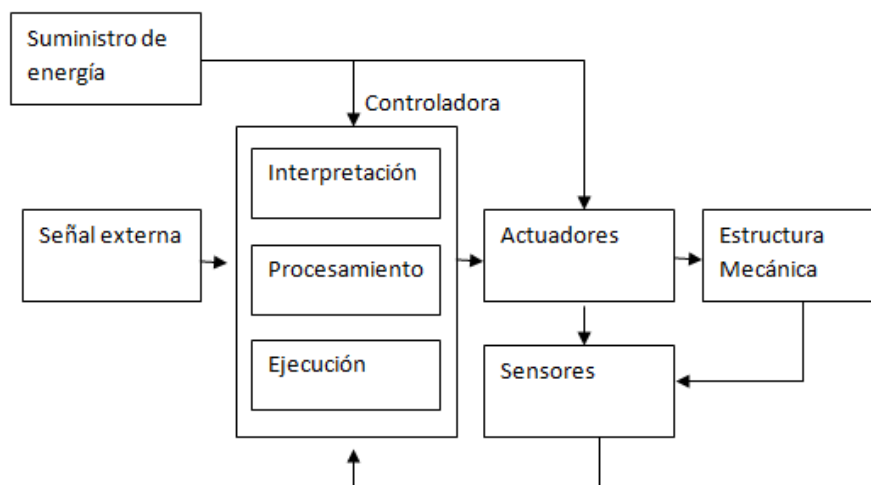


Figura 3.2. Diagrama función principal de un manipulador

El esquema de funcionamiento general para los manipuladores como lo describe la figura 3.2 muestra todos los subsistemas que conforman al robot, para el funcionamiento y el control de cada actuador presente en la estructura a través de encoders que muestran la posición de las uniones permitiendo a la controladora interpretar los grados que se necesita para colocarse en una ubicación.

Los manipuladores industriales cumplen con las características requeridas para este proyecto y de igual manera según su modelo la mayoría presenta un gran alcance o área de trabajo. Por lo tanto se seleccionó el manipulador Mitsubishi melfa RV-2AJ de la facultad, que tiene en su diseño 5 grados de libertad con los cuales se puede realizar un modelo cinemático para movilizar y posicionar cada actuador según el ángulo que se requiera.

3.2.2. ROBOT MELFA RV-2AJ

Como se puede ver en la figura 3.3 se trata de un robot angular de brazo articulado diseñado para la manipulación de objetos o el transporte de los mismos dependiendo principalmente de la herramienta colocada en el efector final del robot. Tiene un rango de trabajo amplio en el cual se puede efectuar movimientos de rotación angular a una velocidad variable, considerable para aplicaciones industriales en las que no se requiera una capacidad de acción alta ajustándose a tiempos de producción.



Figura 3.3. Robot Melfa RV2AJ

Fuente: (Mitsubishi Electric, 2001)

La carga en el extremo final del robot puede variar hasta un valor máximo de 2 kg de peso ya que si se excede de este valor podría efectuar pequeños desbalances en los actuadores, disminuyendo la precisión al momento de realizar movimientos y posicionamiento de los objetos.

La estructura está compuesta por servomotores de corriente alterna que realimentan al sistema mediante codificadores de posición absoluta, lo que

permite a la controladora conocer la velocidad de desplazamiento y la posición de cada articulación presentando una variación de ± 0.02 mm en la precisión final de todo el sistema. La retroalimentación del sistema también permite mantener una posición fija al encender el manipulador después de haber sido apagado.

El brazo robótico melfa RV2AJ presenta características mecánicas generales como:

Tabla 3.1 Especificaciones técnicas brazo robótico RV2AJ

Grados de libertad	5	
Motores	Servomotores AC	
Detección de posición	Codificadores absolutos	
Máxima Carga (Kg)	2	
Longitud del brazo (mm)	250	
Alcance radial máximo (mm)	410	
Limite (grados)	J1	+/- 150
	J2	180 (-60 a +120)
	J3	230 (-110 a +120)
	J4	-
	J5	+/- 90
	J6	+/- 200
Velocidad máxima (grados/s)	J1	180
	J2	90
	J3	135
	J4	-
	J5	180
	J6	210
Velocidad máxima (mm/s)	2100	
Repetitividad (mm)	+/- 0.02	
Peso (Kg)	17	
Instalación	Suelo, techo o base FESTO	
Controlador del robot	CR1-571	

Fuente: (Mitsubishi Electric, 2001)

El brazo robótico tiene en el interior de su estructura canales que permiten el acople de efectores neumáticos en su extremo final, dependiendo del modelo del actuador colocado se necesita una cierta cantidad de presión para sujetar los objetos firmemente, y así no presenten ningún tipo de deslizamiento vertical y puedan caer del manipulador.

En la tabla 3.2 se evidencia el rango angular de movimiento que puede realizar cada articulación sin que exista conflicto con su configuración física, pues pueden presentarse trayectorias que ocasionen colisiones entre articulaciones y causen algún tipo de daño en los actuadores o en la estructura del manipulador.

Las características del manipulador melfa RV2AJ permite que tenga un rango de trabajo amplio lo cual es necesario en este proyecto para posicionar el efector final a una altura adecuada para captar mediante una cámara la forma del objeto y la posición donde este será colocado. Estos datos son necesarios para realizar el posterior análisis de la cinemática del robot y posicionar cada articulación en un valor angular restringido por sus características físicas.

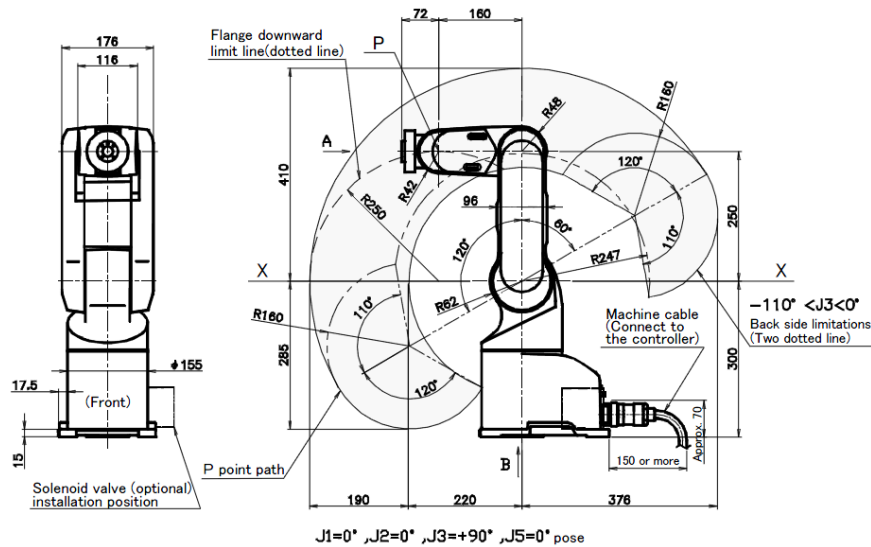


Figura 3.4. Rango angular de movimiento

Fuente: (Mitsubishi Electric, 2001)

Como se puede observar en la figura 3.4 cada actuador tiene un rango de rotación en el cual puede posicionarse, según las instrucciones de movimiento recibidas desde el controlador. En este modelo cada articulación tiene una dimensión diferente lo que permite que el campo de trabajo varíe de forma asimétrica para realizar acciones de manipulación.

Es necesario destacar que en la figura 3.4 no se muestra el efector final, pues se puede adaptar cualquier tipo de actuador que realice alguna acción, pero es indispensable su consideración para el cálculo de la cinemática del robot porque se requiere de toda la geometría de la estructura física para tener una mayor precisión en el instante de realizar un movimiento.

Para la aplicación del proyecto no se considera la velocidad de traslación del objeto como una variable requerida, ya que no está restringido a un tiempo de control en el que sea necesaria una acción rápida, únicamente se evidencia la eficiencia de traslación y la precisión para colocar el objeto en su posición final.

3.2.3. ESTUDIO CINEMÁTICO

La trayectoria que sigue un manipulador está gobernado por el cálculo matemático de la cinemática para considerar los valores angulares que debe tomar cada actuador. Esto permite que el efector final se traslade por medio de coordenadas espaciales reales y así se pueda posicionar en un punto específico, para realizar tareas de manipulación o diferentes actividades industriales.

Para efectuar la acción de movimiento en el robot Melfa RV-2AJ, y controlar la posición y la orientación del efector final se utiliza el concepto de cinemática inversa ya que esta forma de resolución permite encontrar el valor angular para cada articulación partiendo inicialmente con el conocimiento de las coordenadas donde debe ubicarse el manipulado.

En la cinemática inversa no existe una solución única de posicionamiento para cada articulación, ya que se pueden generar múltiples configuraciones

cinemáticas para una misma posición final. En algunos casos estas soluciones pueden presentar conflictos con el manipulador al estar fuera de rango de la estructura física del robot.

Existen varias alternativas para encontrar una solución dentro de la cinemática inversa, es por ello que para calcular los valores angulares de cada articulación en el robot Melfa RV-2AJ se utiliza la forma de resolución geométrica en la que el movimiento del manipulador se restringe a adquirir y depositar objetos por debajo de su origen, lo que permite que el cálculo sea menos extenso y solo integre un campo pequeño de trabajo en el que el robot puede desplazarse.

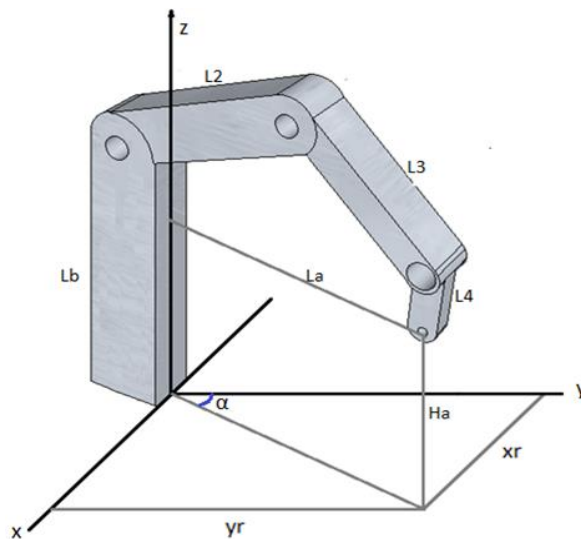


Figura 3.5. Ubicación espacial efector final

$$\alpha = \tan^{-1} \left(\frac{x_r}{y_r} \right) \quad [3.1]$$

$$L_a = \sqrt{x_r^2 + y_r^2} \quad [3.2]$$

Como se muestra en la figura 3.5 la orientación angular α para el manipulador depende de los valores en los ejes coordenados (x, y), pues estos definen la posición en la que debe colocarse el manipulador para dejar el objeto.

En la obtención de los valores (xr, yr) se utiliza visión artificial para reconocer la forma del contenedor del objeto y así adquirir su posición dentro de la

imagen. Esto convierte a la cámara colocada en el extremo del robot en un sensor de posicionamiento, de las imágenes capturadas se realiza la traducción de píxeles a medidas reales obteniendo así las coordenadas para posicionar el efector del robot. Si existiese pequeños errores en el instante de realizar la conversión afectaría a la precisión con la que se desea colocar el objeto dentro de su contenedor reduciendo la eficiencia del sistema.

La altura H_a como lo muestra la figura 3.5 es un valor inicial del sistema que está determinado por el grosor del contenedor y la distancia entre este y el efector final del manipulador para colocar el objeto.

Para realizar el cálculo geométrico que describa la cinemática del manipulador es necesario considerar que el movimiento se restringe a la posición que muestra la figura 3.6, es decir sus articulaciones se encuentran en un rango angular positivo y no se considera necesario realizar traslaciones que excedan este tipo de configuración, porque la tarea que emplea el robot es la de manipular de objetos en el plano (x, y) .

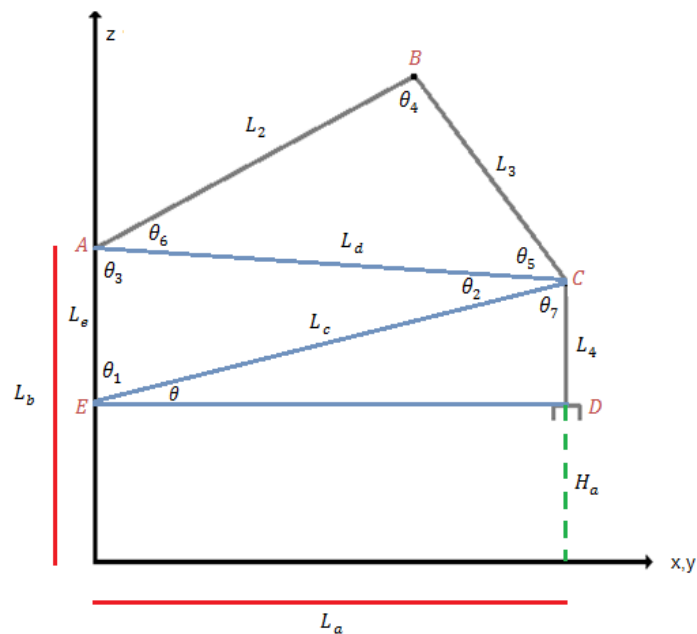


Figura 3.6. Configuración geométrica de movimiento

La solución geométrica encontrada es válida siempre que el ángulo θ_3 sea menor de 90 grados, en caso de ser diferente la ecuación empleada para la resolución del triángulo (A, C, E) sería errónea, dando como resultado valores angulares para la cinemática diferentes a los esperados.

Es necesario considerar que el extremo final del manipulador siempre cumplirá la condición de perpendicularidad hacia el plano (x, y), porque al instante de colocar el objeto se requiere que este sea paralelo con la superficie del contenedor. Esto resume el cálculo en procedimientos geométricos sencillos que describen los valores para cada ángulo mostrado en la figura 3.6 siempre y cuando no se exceda con la configuración mostrada.

$$\theta = \tan^{-1}\left(\frac{L_4}{L_a}\right) \quad [3.3]$$

$$\theta_1 = 90 - \theta \quad [3.4]$$

$$\theta_7 = \tan^{-1}\left(\frac{L_a}{L_4}\right) \quad [3.5]$$

$$L_c = \sqrt{L_4^2 + L_a^2} \quad [3.6]$$

$$L_e = L_b - H_a \quad [3.7]$$

$$L_d = \sqrt{L_c^2 + L_e^2 - 2 * L_c * L_e * \cos(\theta_1)} \quad [3.8]$$

$$\theta_2 = \cos^{-1}\left(\frac{L_c^2 + L_d^2 - L_e^2}{2 * L_c * L_e}\right) \quad [3.9]$$

$$\theta_3 = 180 - \theta_1 - \theta_2 \quad [3.10]$$

$$\theta_4 = \cos^{-1}\left(\frac{L_2^2 + L_3^2 - L_d^2}{2 * L_2 * L_3}\right) \quad [3.11]$$

$$\theta_5 = \cos^{-1}\left(\frac{L_d^2 + L_3^2 - L_2^2}{2 * L_d * L_3}\right) \quad [3.12]$$

$$\theta_6 = 180 - \theta_4 - \theta_5 \quad [3.13]$$

Mediante la caracterización de los triángulos que conforman la geometría del manipulador se obtiene como resultado el valor angular de cada articulación

con lo cual ya se puede acceder a una posición cinemática que cumpla los requerimientos del proyecto en cuanto precisión para la colocación de los objetos. Como se muestra en la figura 3.7 finalmente se obtiene las posiciones angulares para cada articulación deducida por el complemento existente entre el eje de movimiento y los ángulos θ anteriormente calculados.

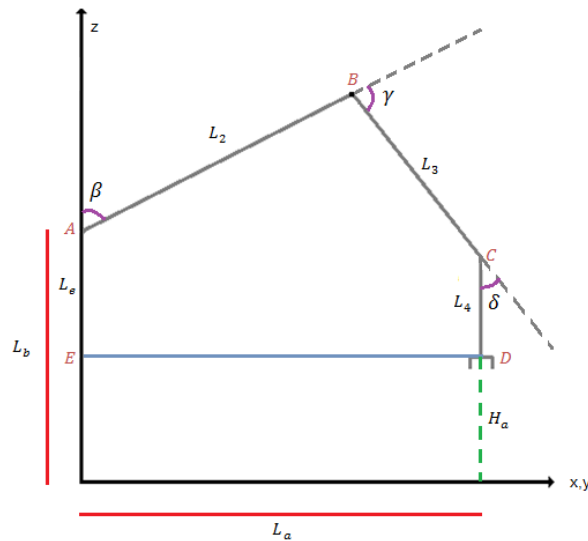


Figura 3.7. Posición angular final

$$\beta = 180 - (\theta_6 + \theta_3) \quad [3.14]$$

$$\gamma = 180 - \theta_4 \quad [3.15]$$

$$\delta = 180 - (\theta_5 + \theta_2 + \theta_7) \quad [3.16]$$

Partiendo de las ecuaciones geométricas utilizadas como solución a la cinemática del manipulador se establece los límites para el posicionamiento del efector final del manipulador, atendiendo a las consideraciones de cálculo iniciales como la perpendicularidad del cuarto eslabón con el plano visual. Los límites cinemáticos calculados para la aplicación difieren de los máximos valores angulares que pueden tomar los actuadores del manipulador. De esta manera en la figura 3.8 se muestra los límites para el posicionamiento del robot.

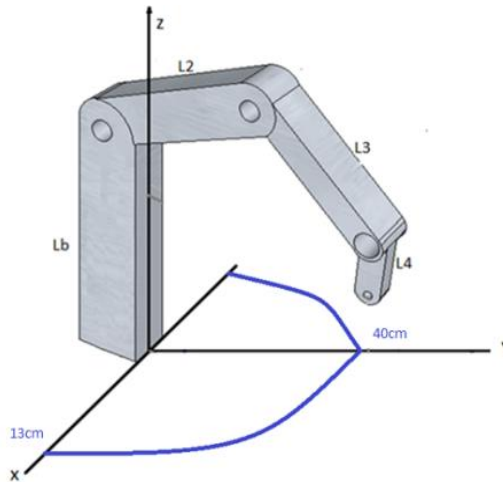


Figura 3.8. Área de trabajo con la cinemática calculada

3.3. DISEÑO ELECTRÓNICO

Los diferentes dispositivos electrónicos que integran el proyecto son parte importante dentro del sistema general para la manipulación de objetos porque permiten realizar tareas autónomas específicas. Una vez que se ha realizado la programación requerida para el funcionamiento de los periféricos electrónicos del manipulador se obtiene un mayor control sobre el movimiento del manipulador, y los actuadores presentes en su estructura general.

Para la parte electrónica del proyecto se describe el funcionamiento y características del controlador para el manipulador melfa RV2AJ, pues este dispositivo permite el accionamiento de los actuadores colocados en las articulaciones del robot además de interpretar comandos de movimiento que posicionan al efector final en coordenadas espaciales específicas, para cumplir una tarea requerida.

Al estar la interfaz del proyecto desarrollada en un lenguaje de programación diferente al nativo del manipulador es necesario especificar el protocolo de comunicación utilizado para enlazar el computador con el controlador, y enviar todos los datos necesarios para el control de los actuadores y así conseguir los movimientos articulares deseados.

Una parte importante a considerar en el proyecto representa el dispositivo utilizado para la captura de imágenes, en este caso se incorporó en el manipulador una cámara web que cumple con los requerimientos técnicos en cuanto resolución para la visualización de los objetos de interés, además de una compatibilidad flexible para cualquier tipo de sistema operativo.

3.3.1. DESCRIPCIÓN CONTROLADORA CR1-571

El controlador es la parte principal del manipulador porque integra todas las tarjetas electrónicas que permiten controlar todo el sistema a base de un lenguaje de programación general proporcionado por el fabricante. El CR1-571 está constituido por una CPU - RISC de 64 bits, lo cual le permite ejecutar hasta 32 programas en modo multitarea.

Tabla 3.2 Especificaciones controladora CR1-571

Número de ejes controlables		6
Tipo de procesador		CPU principal: 64 bit RISC
Capacidad de memoria	#Posiciones	2500
	#Programas	88 de 5000 líneas máximo cada uno
Lenguaje de programación		MELFA_BASIC IV
Entradas/salidas		16/16 pero se puede ampliar a 240/240
Parada de emergencia		1
Conexión RS-232		1 para conexión a PC
Conexión RS-422		1 para Teaching Box
Interfaces de extensión		3
Pinza		4/0 (con opciones: 4/4)
Tensión de alimentación		Monofásica 90-132 V AC
		Monofásica 180-253 V AC
Temperatura ambiente		0 hasta 40 °C
Humedad ambiente		45-85% sin condensación
Montaje		En el suelo
Dimensiones		(212 x 166 x 290) mm
Peso		8 kg

Fuente: (Mitsubishi Electric, 2001)

En la tabla 3.3 se resume todas las características principales que describen el funcionamiento del controlador CR1-571.

Este controlador cuenta con una capacidad de memoria limitada a un máximo de 88 programas de 5000 líneas de código cada uno, esto permite la elaboración de un conjunto de instrucciones complejas en el lenguaje de programación nativo. Para guardar los diferentes programas elaborados en la memoria, el controlador cuenta con puertos de comunicación como el RS-232, que le permite enviar o recibir datos de manera sincrónica posibilitando el desarrollo de aplicaciones en tiempo real.



Figura 3.9. Controladora CR1-571

Como se muestra en la figura 3.9 la parte frontal de controlador está constituido por una interfaz amigable, con un display en el cual se muestra cualquier tipo de error que se presente en el manipulador, además de otros botones de accionamiento para poner en marcha el robot dependiendo generalmente del modo de operación que se encuentre activado según la posición de la llave de seguridad:

- Modo auto (op).- Bajo este modo el controlador es el único dispositivo que puede comandar los actuadores del manipulador.
- Modo teach.- Cuando se activa este modo de operación las acciones del robot quedan restringidos a las señales del teaching box, el cual es un dispositivo periférico que cumple la función principal de activar

el robot de manera remota o a distancia para evitar situaciones de riesgo.

- Modo auto (ext).- Este modo permite que la pc quede como el único dispositivo de control para el funcionamiento del manipulador deshabilitando las opciones anteriores

3.3.2. COMUNICACIÓN PC Y CONTROLADORA

Para realizar la comunicación entre el software de control desarrollado y la controladora del robot melfa RV2AJ, se utiliza el protocolo de enlace RS-232 para enviar y recibir datos de manera sincrónica y así realizar aplicaciones en tiempo real bajo diferentes lenguajes y entornos de programación. Es por ello que se desarrolló el programa en lenguaje c++, compatible con la librería de visión artificial además de tener fácil acceso a todas las estructuras de bajo nivel que integran el ordenador como el puerto de comunicación serial.

En la actualidad los ordenadores personales ya no disponen en su mayoría del puerto serial RS-232 debido a que este tipo de comunicación es obsoleta para aplicaciones informáticas además de presentar una tasa de velocidad para la transmisión de datos mucho menor a protocolos actuales. Esto hace necesario realizar la conversión entre el puerto USB del ordenador y el puerto de comunicación serial integrada en la parte frontal del controlador, para que una vez establecido el enlace entre estos dispositivos se pueda enviar y recibir comandos del programa desarrollado y se ejecuten las acciones de control deseadas.

Existe una gran variedad de dispositivos en el mercado de bajo costo que realizan la conversión entre estos dos puertos de comunicación, es por esta razón que para la implementación del proyecto se utilizó como medio de enlace un adaptador USB-Serial que admite una tasa de transferencia para datos de 500 kbps. Al ser la distancia de comunicación corta se elimina la necesidad de análisis sobre posibles pérdidas en los paquetes de datos enviados a la controladora.

Para acceder al puerto serial desde el ordenador se utiliza una librería integrada en el entorno de programación QT, desarrollada bajo código libre y compatible para cualquier sistema operativo, permitiendo la configuración del puerto según lo requerido por la controladora para establecer el enlace de comunicación, tal como se muestra en la tabla 3.4.

Tabla 3.3 Parámetros comunicación serial

Puerto de enlace COM	Según lo asigne el ordenador
Velocidad de transmisión	9600
Bits de datos	8
Paridad	EvenParity
Bits de parada	TwoStop
Control de flujo	NoFlowControl

Para el propósito de establecer la comunicación entre el ordenador y el controlador una vez realizado la configuración inicial, es necesario enviar comandos específicos mediante la función (write) de la librería serial de QT. Esto permite que el software reconozca si existe conexión con la controladora al recibir una respuesta a modo de eco a los comandos enviados.

Existen varios comandos que se pueden utilizar de forma externa a partir de un lenguaje de programación diferente al utilizado en el entorno Melfa Basic, ya que son palabras reservadas para que la controladora las interprete. En esencia la comunicación depende únicamente de los comandos enviados para realizar acciones de movimiento o configurar el manipulador.

En la tabla 3.5 se resume los comandos utilizados para controlar al manipulador.

Tabla 3.4 Comandos de comunicación Melfa RV2AJ

INSTRUCCIÓN	CARACTERÍSTICA	RESPUESTA (Estado ok)
CNTLON	Inicializa el para movimientos suaves entre puntos de desplazamiento	QoK
CNTLOFF	Finaliza la sentencia de control	QoK
SRVON	Activa todos los actuadores	QoK
SRVOFF	Desactiva los actuadores de cada articulación	QoK
RSTALRM	Reinicia las alarmas de la controladora	QoK
EXECHOPEN	Permite abrir el gripper o efector final.	QoK
EXECMVS	Instrucción de movimiento enviada con las posiciones angulares.	QoK

Para enviar estas instrucciones por el puerto serial es necesario seguir una sintaxis para que la controladora interprete la orden enviada y ejecute una acción en respuesta. En el software desarrollado para este proyecto se utiliza varias funciones para enviar las instrucciones principales que se requieren al controlar el manipulador. El formato utilizado en el código de programación es el siguiente:

```
{  
    Serial->Write ("1; 1; SRVON" + "\r");
```

}

Además de la instrucción que reconoce la controladora se añade dos parámetros necesarios para establecer la comunicación.

- Parámetro '1; 1'.- Se antepone para enviar instrucciones de movimiento.
- Parámetro '1; 9'.- Se antepone para enviar un comando de consulta del programa
- Parámetro '\r'.- Es utilizado para finalizar la línea de instrucciones enviados por el puerto serial.

El protocolo de comunicación presentado es utilizado una vez que se ha realizado el cálculo de los ángulos necesarios para posicionar al griper del robot porque el control del manipulador se lo realiza directamente desde el computador sin un programa ejecutado en la controladora.

3.3.3. SELECCIÓN DE WEBCAM Y UBICACIÓN

La elección de un dispositivo de captura que integre un sistema autónomo depende únicamente de la función que realice dentro del sistema, además de las condiciones externas que tengan influencia al instante de realizar la adquisición de imágenes. Es por esta razón que se requiere analizar factores importantes como la iluminación y la ubicación, que denotan las características que son necesarias para el correcto funcionamiento de la cámara.

3.3.3.1. Iluminación

Las imágenes capturadas pueden presentar variaciones dependiendo de la cantidad de luz presente en el entorno ya sea esta artificial o natural. Esto puede ocasionar que se pierda información porque el dispositivo fotosensible está expuesto a una mayor o menor iluminación perdiendo datos relevantes de la imagen.

En sistemas de control autónomo es necesario condicionar el entorno de trabajo a ciertos decibeles de iluminación generalmente 100 lúmens, para

que la cámara pueda trabajar en condiciones normales y cumpla la función requerida. Esto permite un campo de visualización más claro para interpretar los datos adquiridos de una manera más eficiente.

Para realizar el tratamiento de imágenes requerido en este proyecto, las condiciones de luz presentes se restringen a la iluminación ambiental que puede tener pequeñas variaciones, es por esta razón que se utiliza una fuente de luz artificial en el lugar de pruebas para mantener la claridad al instante de visualizar y reconocer los objetos que serán manipulados. La configuración de iluminación utilizada es de manera frontal y directa como se muestra en la figura 3.10, debido a que el campo de visualización de la cámara y la luz tienen la misma dirección hacia la posición de interés.

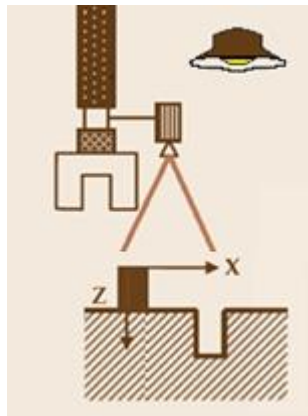


Figura 3.10. Iluminación frontal

La disposición de la fuente de iluminación permite según su intensidad disminuir los efectos exteriores sobre el objeto reduciendo las sombras en los contornos. Esto ocasiona que en la imagen capturada se diferencie de manera clara la forma de los objetos y el espectro de color que tiene su superficie, los cuales son datos importantes en el espacio de control que rigen las acciones de movimiento del manipulador en este proyecto.

3.3.3.2. Ubicación de la cámara

La colocación espacial de la cámara representa el punto de referencia para la visualización de la escena de control, por esta razón es necesario fijarla

en una posición que no afecte la adquisición de las imágenes, con un campo de visión amplio y claro.

Existen varias ubicaciones posibles en las que se puede colocar la cámara en el espacio de trabajo, esto depende de la forma que se requiere capturar las imágenes, es decir de manera estática o dinámica. La diferencia principal entre las dos configuraciones para la adquisición de imágenes radica en el modelo de control utilizado y calibración de la cámara necesaria para interpretar distancias entre el punto de referencia de visualización y el objeto capturado.

Como se muestra en la figura 3.11 las cámaras pueden referirse a distintos puntos espaciales en dirección al objeto de interés. La variante para cada caso recae en los ejes coordenados de posición para el efector final y para el objeto que se va a manipular, causando consideraciones referenciales diferentes para el cálculo de la cinemática del robot y definición de trayectorias en el espacio.

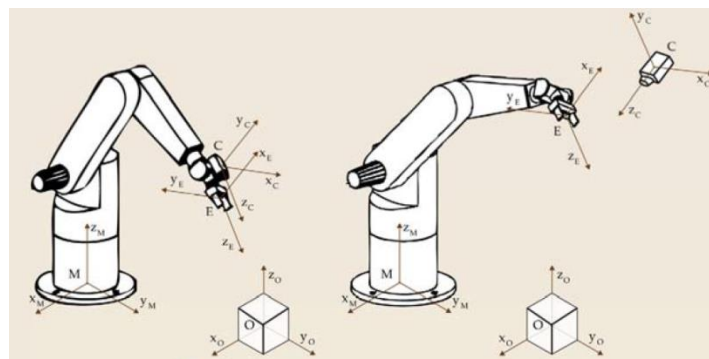


Figura 3.11. Configuración espacial de la cámara

Fuente: (Gómez, 2010)

3.3.3.3. Cámara externa al robot

La configuración externa de la cámara con respecto al campo de trabajo permite una visualización estática de la escena, en caso de que no esté posicionada sobre una estructura móvil. Esto permite adquirir constantemente la posición del extremo final del robot al igual que el

movimiento en cada una de sus articulaciones dependiendo de los grados de libertad que integren su estructura.

Al no estar la cámara acoplada a un extremo del robot las imágenes capturadas hacen referencia continua de la posición que adquiere el manipulador, lo cual posibilita un estudio cinemático de la evolución que tienen en el movimiento cada una de las articulaciones del robot.

El ángulo de visualización en esta posición muestra a los objetos en diferentes perspectivas delimitando la opción de cálculo directo de las distancias entre objetos, es por esta razón que se requiere de un método de calibración para las imágenes capturadas y así traducir las medidas obtenidas en píxeles a valores reales del mundo.

3.3.3.4. Cámara en el extremo del robot

En esta configuración la cámara se encuentra ubicada en el extremo final del manipulador, tal que elimina la posibilidad de adquirir constantemente la posición del robot a través de las imágenes capturadas.

Al estar ubicada la cámara solidaria con la configuración mecánica del robot se accede directamente a un campo de visualización dirigido únicamente hacia el objeto de interés, lo que posibilita mayor precisión para adquirir la posición real del objeto con referencia al extremo final del manipulador.

Mientras el manipulador no se encuentre en movimiento las imágenes capturadas desde la posición de la cámara corresponderán al plano 2D donde está colocado el objeto, esto facilita la forma de cálculo para encontrar la posición del objeto mediante conversiones geométricas sencillas.

3.3.3.5. Selección de la ubicación de la cámara

Para la aplicación aquí desarrollada se optó por acoplar la cámara en el extremo del robot MELFA RV2AJ tal como se muestra en la figura 3.12, el punto de visualización hacia el objeto permite capturar imágenes en el plano

(x, y) referenciado únicamente al sistema de coordenadas donde está colocado el objeto. Esta característica en la visualización elimina la necesidad de utilizar métodos de calibración para la cámara, debido que las imágenes no contienen al objeto en diferentes perspectivas que afecten a la estimación de las distancias entre el efector final del manipulador y el objeto.

Debido que en este proyecto se requiere estimar la posición del contenedor que presente la misma forma que el objeto manipulado, es necesario estimar las medidas con referencia al efector final con la mayor precisión posible sin que se presenten errores en la colocación del objeto sobre la posición que le corresponde porque denotaría una desviación, evidenciada principalmente en la traducción correspondiente entre las medidas de la imagen capturada y los valores reales del mundo.



Figura 3.12. Posición cámara en el manipulador

Es necesario considerar que para el desarrollo del control visual para el robot no se requiere adquirir imágenes en tiempo real de la posición del objeto, la acción de manipulación se realiza mientras el objeto y el contenedor están dispuestos en el espacio de trabajo de manera fija sin que sufran una alteración en su estado que cause algún tipo de movimiento. Por esta razón la captura de las imágenes necesarias para el reconocimiento y caracterización del contenedor del objeto se la realiza de manera anticipada en una posición fija del manipulador, tal que no afecte a la adquisición de imágenes porque si se presentan variaciones mientras la luz ingresa en el

sensor fotosensible ocasionaría distorsiones visuales afectando al cálculo de posiciones y al funcionamiento del sistema en general.

La colocación de la cámara permite acceder a un campo visual del contenedor y del objeto, es por esta razón que el cálculo para encontrar sus posiciones con referencia al manipulador se ve simplificado, al igual que la cinemática del robot.

3.3.3.6. Selección cámara web

Finalmente una vez analizadas las variables presentes en el sistema para el funcionamiento general del proyecto como la iluminación requerida y la existente en el entorno, al igual que la distancia que separa el punto de visualización y el campo de trabajo, no existe la necesidad de adquirir una cámara que disponga de características industriales en cuanto resolución y formas de calibración. Es por esta razón que para este proyecto se seleccionó una web cam con características técnicas estándares porque la función que cumple la cámara acoplada en extremo final del robot corresponden a la de caracterización y reconocimiento de objetos, lo cual puede realizarse a la distancia estimada de visualización.

Las especificaciones técnicas que describen el funcionamiento de la cámara acoplada en el robot para el sistema de control se detallan a continuación:

- **Marca:** Genius
- **Interfaz:** Plug & Play
- **Tecnología del sensor** HD720P
- **Resolución** 1.3M pixeles
- **Adquisición de cuadros por segundo:** 30 cuadros por segundo
- **Tipo de protección:** Función IPM (Image Protection Mechanism)

El dato técnico para este caso de mayor relevancia es la resolución de la cámara ya para el procesamiento de imágenes es necesario conocer la dimensión de la imagen capturada.

3.4. DESARROLLO DE SOFTWARE Y SISTEMA DE CONTROL

3.4.1. SISTEMA DE CONTROL MEDIANTE VISIÓN ARTIFICIAL

El desarrollo de dispositivos con mayor capacidad de procesamiento de información ha permitido la implementación de sistemas de control más sofisticados, enfocados a la obtención de una mejor estabilidad en la respuesta del sistema en un lapso de tiempo relativamente corto.

Con la demanda actual de calidad sobre las líneas de fabricación surgió un nuevo sistema de control en el cual las señales de entrada se sujetan a la información relevante contenida en una imagen, para conseguir como respuesta una acción de reconocimiento o clasificación. Para realizar este bucle de control es necesario contar con un subsistema de procesamiento de imágenes para la separación de la información requerida, además de un dispositivo de captura que cumpla con los requerimientos técnicos de trabajo en el sistema.

Los sistemas de control de visión artificial presentan una mayor aceptación en la industria por su gran desempeño y eficiencia en el instante de realizar operaciones de movimiento sobre manipuladores, la ventaja directa se enfoca en la integración de algoritmos de visión artificial, con el control de posiciones efectuado sobre el manipulador. Es por esta razón que el presente proyecto está enfocado directamente a este tipo de control porque integra subsistemas de procesamiento de imágenes para lograr el movimiento de las articulaciones del robot melfa RV2AJ. El tipo de control utilizado corresponde a un sistema de lazo abierto en el cual los bloques integrados dan como resultado la posición del manipulador sobre el centro de los contenedores visualizados, existiendo para este caso un único bucle de lazo cerrado entre los actuadores que mueven al robot y la controladora que constantemente censa los valores angulares de los servomotores, tal como se muestra en la figura 3.13

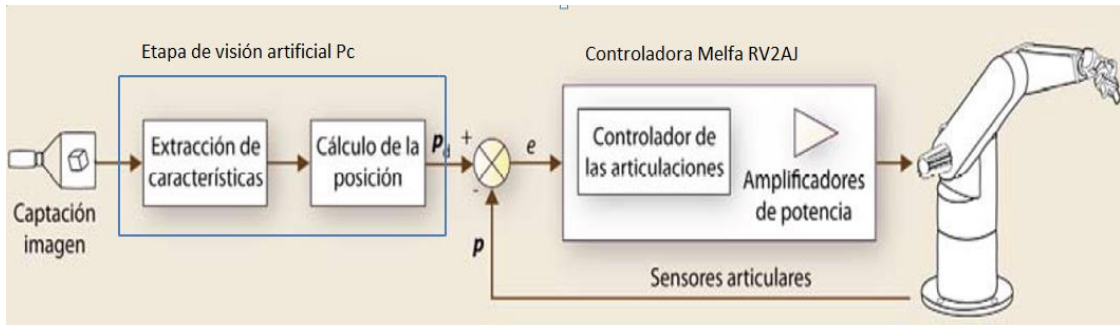


Figura 3.13. Diagrama de bloques control visual para manipulador

Fuente: (Gómez, 2010)

Al definir la secuencia de control de manera abierta se está estableciendo una sola vía de transporte de la información, desde la captura de imágenes hasta el posicionamiento del manipulador. El error esperado en este tipo de sistema de control puede generarse al instante de traducir las medidas capturadas en medidas reales, al no existir una resolución de conversión adecuada el posicionamiento del manipulador puede adquirir posiciones desviadas respecto al centro de los contenedores. Para reducir este error inducido durante la interpretación de información es necesario establecer adecuadamente las medidas del cuadrante de visualización con respecto al manipulador y así definir de forma clara los límites de acción para el movimiento del robot, obteniendo como resultado lo mostrado en la figura 3.14.

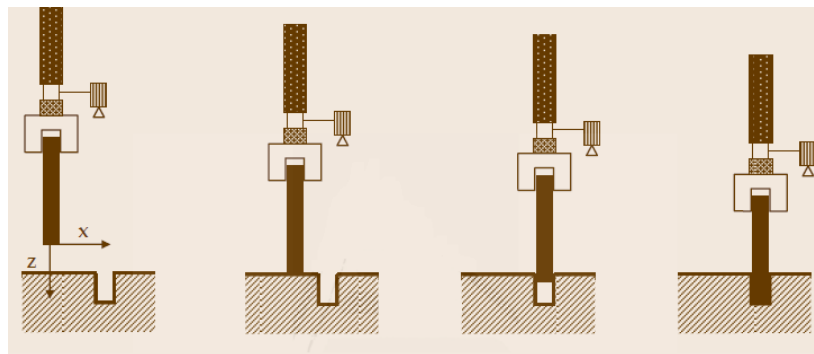


Figura 3.14. Planificación secuencia de control

Fuente: (Gómez, 2010)

3.4.2. PROCESAMIENTO DE IMÁGENES

3.4.2.1. Transformación de la imagen al modelo HSV

Para segmentar las formas que describen la geometría de los contenedores, es necesario cambiar el modelo de color al que pertenece la imagen, debido que después de pasar por la etapa de captura, la imagen es representada digitalmente en el modelo RGB estándar utilizado por la mayoría de cámaras web con características normales. La principal desventaja en este modelo es la dificultad para realizar operaciones de procesamiento de imágenes necesarias para la extracción de las características que describen los objetos, a diferencia del modelo HSV que separa la intensidad de la imagen de la información del color. Al representar las tonalidades de colores presentes en una imagen mediante los tres parámetros del modelo HSV, se puede diferenciar, o segmentar con claridad un espacio de color definido, tal que del entorno visible por la cámara únicamente se recupera como información los objetos recubiertos de un color específico.

Para la transformación entre espacios de colores se utilizó la función `cvCvtColor()` presente en la librería de visión artificial `opencv`, la cual devuelve una imagen representada en el modelo HSV para su posterior tratamiento digital. En la figura 3.15 se representa la diferencia entre los modelos de colores HSV Y RGB, para su posterior segmentación de color.

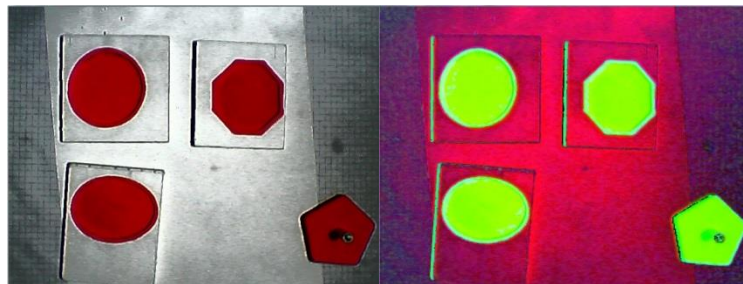


Figura 3.15. Diferencia modelos de color

3.4.2.2. Umbralización de imagen HSV

Esta etapa de procesamiento permite separar la información requerida del fondo captado en el campo de visualización, generando como resultado una

imagen segmentada que contiene la forma del objeto a manipular y de los contenedores donde será depositado. Para realizar la segmentación de color en una imagen es necesario recorrer la misma de manera unitaria, es decir pasar por cada pixel analizando y clasificando su valor actual, de tal manera que los pixeles que contengan un rango diferente de color son excluidos y reemplazados por un valor predeterminado en este caso el color negro representado por 0.

Para el reconocimiento de formas en este proyecto se optó por recubrir las figuras de color rojo tal que la segmentación de la imagen este dirigido a este único color, de esta manera todo color diferente al rojo en el campo de visualización será discriminado quedando en la imagen únicamente la información de la forma de los contenedores para realizar el posterior proceso de reconocimiento y asociación de geometrías.

Debido a que la imagen a segmentar está representada en el modelo HSV, se requiere de tres valores que determinen el rango de umbralización para el color rojo, los mismos que pueden variar a causa de la iluminación de la escena. En la aplicación desarrollada los valores escogidos para la segmentación bajo una cantidad de luz considerada constante, corresponden a los mostrados en la tabla 3.6.

Tabla 3.5 Rango de valores extracción de color rojo.

Rango	Matiz	Saturación	Brillo
Inferior	170	40	200
Superior	180	255	255

Al aplicar el rango de valores de la tabla 3.6 como umbrales de búsqueda sobre la imagen capturada, se obtiene como resultado la figura 3.16.

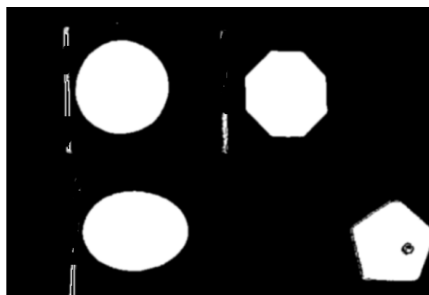


Figura 3.16. Umbralización de color rojo.

3.4.2.3. Binarización de la imagen

El proceso de binarización de la imagen reduce el conjunto de posibles valores de cada pixel a únicamente dos colores blanco y negro. De esta forma las operaciones posteriores son más rápidas y en general se consumen menos recursos del sistema, en la imagen de un solo canal queda representado el fondo y la forma de los contenedores donde será depositado el objeto de interés. Si el valor de umbralización para binarizar la imagen no está dentro del rango de interés, en relación a una imagen en escala de grises el resultado en la forma de los objetos puede variar presentándose pequeños conjuntos adicionales de pixeles considerados como ruido, ocasionando a su vez una disminución en la probabilidad de reconocimiento y caracterización de formas en los objetos visualizados. Para binarizar una imagen se utiliza la sintaxis:

```
cvThreshold(img,img,10,255,CV_THRESH_BINARY);
```

3.4.2.4. Erosión y dilatación de la imagen

Esta etapa de procesamiento morfológico permite realizar operaciones de rellenado o eliminación de un conjunto de pixeles sobre la imagen segmentada para definir con mayor calidad el contorno de las figuras y las formas que determinan su geometría. La sintaxis de aplicación es la siguiente:

```
cvErode(img, img, NULL, 4);  
cvDilate(img, img, NULL, 4);
```

La técnica de erosión y dilatación aplicada consecutivamente permite eliminar grupos de píxeles externos a la forma de interés, reduciendo el ruido que pueda permanecer en la imagen después de ser segmentada, además de rellenar los posibles vacíos generados en el interior de los objetos, tal como se muestra en la figura 3.17 donde se aprecia la diferencia entre imágenes después de aplicar la técnica de definición.



Figura 3.17. Resultado erosión y dilatación

3.4.2.5. Segmentación

La segmentación es un proceso que consiste en dividir una imagen digital en regiones homogéneas con respecto a una o más características con el fin de facilitar un posterior análisis o reconocimiento automático. A pesar de que existen diferentes enfoques para realizar la segmentación en la práctica se demuestra que la segmentación no tiene reglas estrictas a seguir, y dependiendo del problema en cuestión, puede ser necesario idear técnicas a medida.

La segmentación termina cuando los objetos extraídos de la imagen se corresponden unívocamente con las distintas regiones disjuntas a localizar en la misma. En este caso se habla de segmentación completa de la escena o imagen y en el caso contrario, de segmentación parcial. En una escena compleja, el resultado de la segmentación podría ser un conjunto de regiones homogéneas superpuestas y en este caso, la imagen parcialmente segmentada deberá ser sometida después a un tratamiento posterior con el fin de conseguir una segmentación completa.

En general, el proceso de segmentación suele resultar complejo si la cantidad de objetos visibles es grande, o se presenta mucho ruido en la escena. Para manipuladores que incorporan visión artificial es necesario intervenir el escenario de visualización para conseguir condiciones ideales de trabajo referente al tratamiento de imágenes.

Los diferentes objetos que aparecen en una imagen pueden ser localizados atendiendo a aspectos como: sus contornos o su textura dependiendo de la técnica utilizada:

- Técnicas basadas en umbralización,
- Técnicas basadas en detección de los contornos de los objetos
- Técnicas basadas en propiedades locales de las regiones.

En este caso para segmentar las geometrías de cada contenedor se utiliza la técnica de detección de contornos, al aproximar el contorno real mediante la función `cvApproxPoly()` se obtiene un conjunto de líneas unidas que intentan coincidir con el contorno del objeto. Esta secuencia de puntos cerrados permite mediante relaciones de medida conocer el ancho y alto del objeto para poderlo encerrar en un rectángulo y así cumplir con la segmentación individual para cada contenedor presente en la imagen. Para mejor comprensión una imagen que ingresa al subsistema de segmentación atraviesa la siguiente sintaxis de programación:

```
CvSeq* imgseq;
cvFindContours(img,imgmem,&imgseq,sizeof(CvContour),CV_RETR_LIST,CV_CHAIN_APPROX_SIMPLE);
cvDrawContours(img, imgseq, cvScalarAll(255), cvScalar(0,0,0),CV_AA);
cvCanny(img,img, 0,255,3);
CvSeq* aprox;
aprox=cvApproxPoly(imgseq,sizeof(CvContour),imgmem,CV_POLY_APPROX_DP,1,1);
for(;aprox!=0;aprox=aprox->h_next)
{
    CvRect rect;
    CvPoint pt1,pt2;
    rect=cvBoundingRect(aprox, NULL);
    pt1.x = rect.x;
    pt2.x = (rect.x+rect.width);
```

```

    pt1.y = rect.y;
    pt2.y = (rect.y+rect.height);
    cvRectangle(msdes, pt1,pt2,cvScalar(255,255,255),-1,8,0);
}

```

A partir de esta etapa se obtienen varias imágenes separadas que contienen como información la forma de cada objeto presente en el campo de visualización, para luego pasar por procesos de detección de características y clasificación.

En la figura 3.18 se representa el resultado obtenido a partir de una imagen de entrada una vez realizada la segmentación individual de formas.

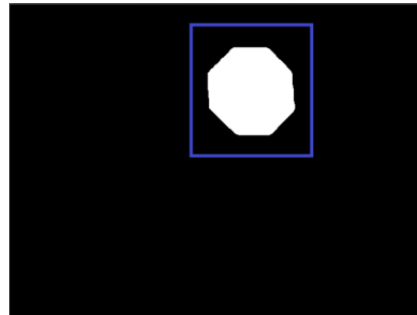


Figura 3.18. Segmentación individual del cada objeto

3.4.2.6. Reconocimiento de formas

En la actualidad existen una gran cantidad de métodos utilizados para el reconocimiento de formas, que se diferencian entre sí por la eficiencia con la que realizan el reconocimiento o la cantidad de tiempo que le toma al programa realizar esta acción, pero todos los métodos convergen en la idea de identificar y clasificar objetos mediante vías digitales. Es por esta razón que se puede utilizar cualquier forma de reconocimiento que cumpla con los objetivos requeridos sin la necesidad de sacrificar gran cantidad de recursos informáticos en aplicaciones de tiempo real.

En general se busca el conjunto mínimo de características que permiten determinar de manera unívoca a qué clase pertenecen todos los objetos del universo de trabajo. Una elección mala de las características discriminantes puede hacer que el sistema sea innecesariamente caro y lento, o que sea

imposible construir un clasificador para resolver un problema utilizando tales características.

Esta etapa de procesamiento es la más importante del sistema para la extracción de características, es donde se reconoce las formas anteriormente segmentadas para su clasificación y asociación. Para una mejor comprensión sobre las formas externas, en esta etapa ingresan dos imágenes preprocesadas las cuales contienen por separado como información, la forma del objeto que será manipulado por el robot y las formas en conjunto de los contenedores destino, tal como se muestra en la imagen 3.19.

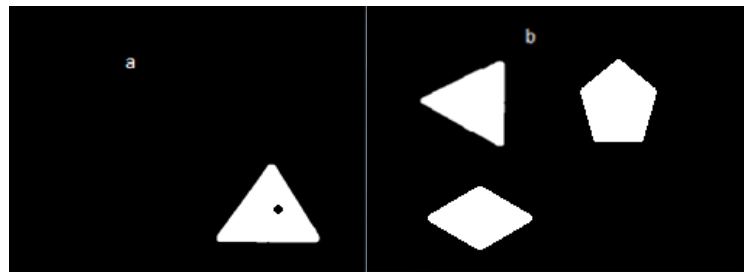


Figura 3.19. Ingreso etapa de reconocimiento, (a) objeto a manipular, (b) contenedores

Una vez ingresadas las imágenes con la información necesaria se realiza un proceso repetitivo individual, en donde se extraen los momentos invariantes de Hu de cada objeto visualizado por la cámara, para adquirir parámetros propios de las geometrías que describen la forma de los objetos presentes. Los momentos invariantes pueden ser considerados como un promedio ponderado de los píxeles de una imagen, a partir de los momentos geométricos que presentan características de varianza ante la rotación y escalamiento, denotado en la ecuación [2.3].

Donde μ_{pq} es el momento geométrico de orden $(p + q)$, $f(x, y)$ es el valor del píxel en la posición (x, y) de la imagen y (\bar{x}, \bar{y}) es el centroide de la misma. A partir de estos momentos se obtiene un momento de orden $(p + q)$ que es invariante al escalamiento.

$$n_{pq} = \frac{\mu_{pq}}{\mu_{00}^{1 + \frac{p+q}{2}}} \quad [3.17]$$

Mediante esta solución se pueden obtener siete momentos invariantes que no presentan cambios ante la escala, rotación y posición dentro del campo de visión, representado mediante las expresiones:

$$\begin{aligned} \phi_1 &= n_{20} + n_{02}, \\ \phi_2 &= (n_{20} - n_{02})^2 + 4n_{11}^2, \\ \phi_3 &= (n_{30} - 3n_{12})^2 + (3n_{21} - n_{03})^2, \\ \phi_4 &= (n_{30} + n_{12})^2 + (n_{21} + n_{03})^2, \\ \phi_5 &= (n_{30} - 3n_{12})(n_{30} + n_{12})((n_{30} + n_{12})^2 \\ &\quad - 3(n_{21} + n_{03})^2) + (3n_{21} - n_{03})(n_{21} + n_{03}) \\ &\quad \times (3(n_{30} + n_{12})^2 - (n_{21} + n_{03})^2), \\ \phi_6 &= (n_{20} - n_{02})((n_{30} + n_{12})^2 - (n_{21} + n_{03})^2) \\ &\quad + 4n_{11}(n_{30} + n_{12})(n_{21} + n_{03}), \\ \phi_7 &= (3n_{21} - n_{03})(n_{30} + n_{12})((n_{30} + n_{12})^2 \\ &\quad - 3(n_{21} + n_{03})^2) - (n_{30} - 3n_{12})(n_{21} + n_{03}) \\ &\quad \times (3(n_{30} + n_{12})^2 - (n_{21} + n_{03})^2) \end{aligned} \quad [3.18]$$

Al obtener como resultado una matriz en la que consta los momentos para todas las imágenes segmentadas se realiza una diferencia ponderada para elegir qué valor es el más cercano al objeto a manipular, de esta manera se obtiene un solo valor porcentual próximo que relaciona dos geometrías cumpliendo con la asociación de objetos. Para calcular los momentos invariantes de Hu sobre cualquier tipo de imagen se debe utilizar la siguiente sintaxis de programación:

```
cvMoments(img,&imgmom,0);
cvGetHuMoments(&imgmom, &imghu);
```

Al ingreso de la figura 3.18 se obtiene como resultado los valores denotados en la tabla 3.7 que evidencia la cercanía de la forma entre los contenedores y el objeto (a), que en este caso es el triángulo.

Tabla 3.6 Momentos invariantes y acercamiento porcentual de los contenedores

	Pentágono	Rombo	Triángulo
\emptyset_1	6.33 e-04	6.66 e-04	0.74 e-03
\emptyset_2	3.88 e-10	1.66 e-09	1 e-09
\emptyset_3	5.55 e-16	5.55 e-14	2.5 e-10
\emptyset_4	8.33 e-17	8.33 e-17	1.38 e-13
\emptyset_5	5 e-32	2.5 e-31	5.55 e-25
\emptyset_6	8.33 e -22	1.38 e-20	2.7 e-18
\emptyset_7	5.55 e-32	8.33 e-32	3.38 e-25
% acercamiento	0%	28.57%	85.71%

El resultado de realizar estas operaciones de clasificación se muestra en la figura 3.20 donde el sistema arroja como respuesta el contenedor con mayor similitud al objeto que se desea manipular, tal que se procede a encontrar su ubicación espacial con respecto al manipulador para ubicar al objeto en su punto central y cumplir con los requerimientos inicialmente planteados.

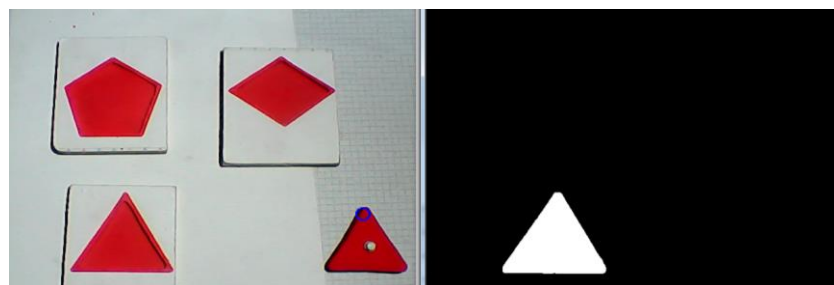


Figura 3.20. Respuesta etapa de reconocimiento

3.4.3 SOFTWARE DE CONTROL

La interfaz desarrollada para el control del manipulador Melfa RV2AJ integra los diferentes subsistemas que componen el proyecto. Es por esta razón que se requirió de una plataforma de desarrollo versátil y de amplio soporte para la implementación de aplicaciones con interfaz gráfica para usuarios, como lo es Qt. La principal ventaja de Qt es la característica de multiplataforma además de estar desarrollada como software libre y de código abierto,

permitiendo a la comunidad cibernética contribuir de manera abierta con algoritmos de programación para su constante desarrollo.

Uno de los principales requerimientos en la implementación de la interfaz de control fue disponer de una biblioteca para establecer la comunicación serial entre el computador y la controladora del manipulador. En versiones recientes del entorno de programación Qt se integra la librería QSerialPort, la cual permitió configurar acorde los parámetros requeridos la comunicación por el puerto serial.

Para el diseño de la estructura de programación enfocada a la visión artificial fue necesario analizar la compatibilidad de la plataforma Qt con las herramientas computacionales que ofrece la web para el procesamiento de imágenes digitales. De esta manera se encontró que la biblioteca Opencv es compatible con la plataforma de desarrollo, permitiendo la implementación de sistemas de visión artificial basados en un lenguaje de programación estructural como lo es c++. Las diversas funciones integradas en la librería de visión artificial Opencv permiten procesar y manipular la información contenida en las imágenes capturadas, de manera eficiente y con un tiempo de ejecución bajo.

El principal inconveniente encontrado entre la plataforma de desarrollo Qt y la librería de visión artificial consistió en las estructuras para la representación de las imágenes generando incompatibilidades en las posteriores etapas de procesamiento.

La interfaz visual desarrollada integra tres grupos de botones en los cuales se detalla el inicio de comunicación, la configuración del manipulador, y la etapa de visión artificial. Los botones mencionados representan las variables de inicio para que el sistema general funcione según los requerimientos inicialmente establecidos. Entre los parámetros que arroja el sistema como respuesta para el control del manipulador se encuentra la posición del contenedor asociado, la imagen del contenedor escogido y el número de objetos visualizados en el campo que abarca la cámara web.

En la figura 3.21 se muestra la interfaz gráfica desarrollada para el sistema de control inteligente para el manipulador Melfa RV2AJ. Cumpliendo con los requerimientos iniciales de fácil manejo y estabilidad para la ejecución de las tareas implementadas.

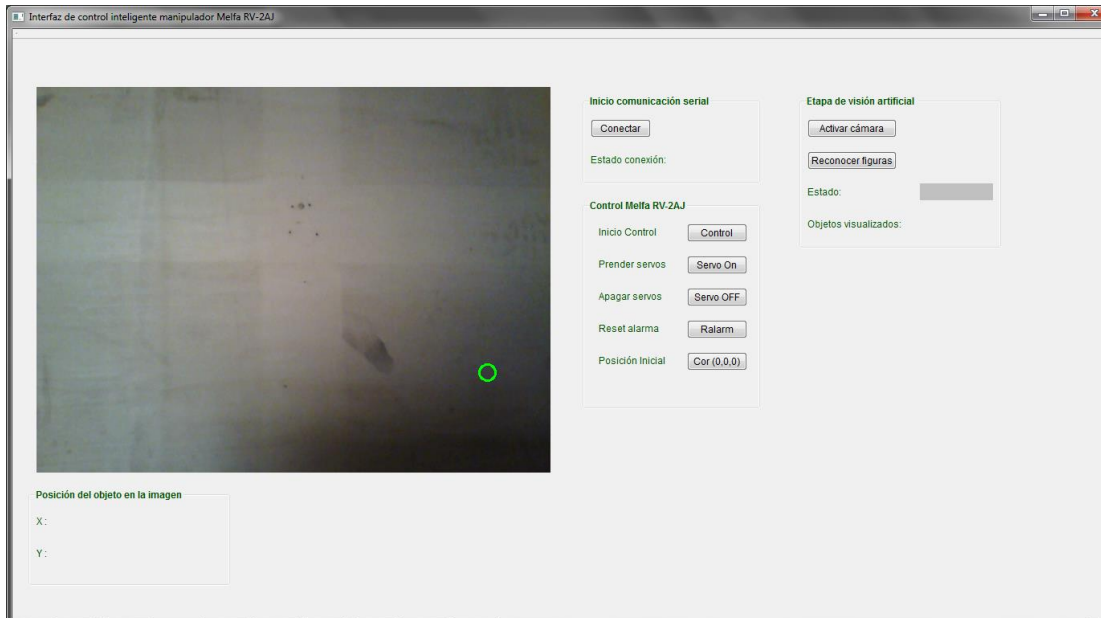


Figura 3.21. Interfaz sistema de control inteligente Melfa RV2AJ

4. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Para analizar la respuesta de cada subsistema que integra el funcionamiento del proyecto, se requiere comparar los resultados esperados en cuanto a precisión tanto para la etapa de reconocimiento de imágenes, como para la de cinemática del robot Melfa RV2AJ. Estas dos etapas son las más recurrentes al error debido a varios factores externos o de interpretación que puede generar un error limitante afectando directamente a la precisión que se desea alcanzar del sistema.

Dentro del análisis de resultados se excluye la estructura mecánica del manipulador, porque se asume que el robot se encuentra en condiciones ideales de funcionamiento indicadas por el fabricante.

4.1. PRUEBA ETAPA VISIÓN ARTIFICIAL

En esta etapa el error esperado es el reconocimiento y asociación inexacta entre el objeto que se desea manipular y su contenedor denotando una falta de precisión en el sistema. Las principales causas que conllevan a un reconocimiento erróneo apuntan principalmente al ruido presente en las imágenes, ya sea al instante de captura causado por factores de iluminación o por algoritmos de procesamiento mal ejecutados que pueden afectar el contorno de la figura apartándola de su verdadera geometría.

Para la implementación del sistema es necesario considerar la cantidad de iluminación que está presente en el campo de visualización como un factor importante para el reconocimiento de imágenes, las funciones de segmentación implementadas responden de manera diferente según la cantidad de luz presente. En la figura 4.1 se evidencia la respuesta del subsistema de captura bajo cantidades de luz diferentes, presentándose una incidencia de ruido variable para cada prueba. Si se cuenta con una fuente de iluminación externa que apunte directamente a los objetos visualizados se disminuye la cantidad de ruido, permitiendo una mejor calidad en las imágenes para su posterior tratamiento e ingreso a la etapa de clasificación y reconocimiento.

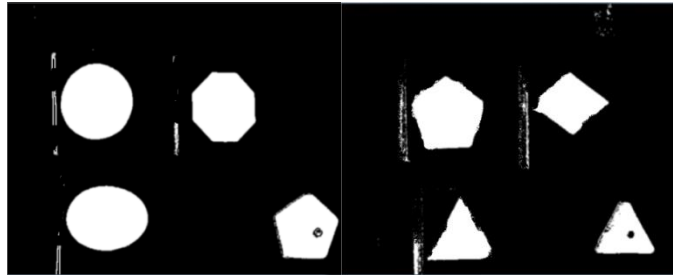


Figura 4.1. Ruido a diferente incidencia luminosa

En la detección del color rojo se evidenció en las pruebas realizadas que la respuesta de las funciones empleadas varían según la intensidad de brillo presente en el fondo de la escena, tal que para fondos totalmente oscuros la geometría capturada de los objetos presentaba mayor distorsión a diferencia de fondos con colores más claros. Para evitar esta diferencia de calidad en la imagen se realiza la sustracción del fondo de escena sobre las imágenes capturadas tal que únicamente se conserva la información deseada de la forma de los objetos y se disminuye la incidencia de ruido proveniente del entorno y de las características propias del dispositivo de captura.

Si se forman pequeños conjuntos de píxeles a manera de ruido al ser capturada la imagen es necesario aplicar técnicas de eliminación morfológica, donde el agente determinante es detectado para cada conjunto presente en la imagen y así se realiza un proceso de disminución para desaparecer completamente todo lo considerado como ruido. En este caso al aplicar la técnica de erosión sobre todas las imágenes de entrada se consiguió eliminar todo el ruido presente, tal que las figuras en las imágenes corresponden únicamente a los objetos visualizados. Mediante los resultados obtenidos en la eliminación de ruido se obtuvo la misma imagen para cada caso de iluminación analizados con anterioridad, constatando que el sistema de control visual implementado para el manipulador trabaja bajo un rango de tolerancia correspondiente a la cantidad de iluminación presente en el campo de visualización.

Entre las condiciones que gobiernan al sistema aquí implementado al estar la imagen segmentada en un formato binarizado se diferencia claramente el

fondo y los objetos facilitando el proceso de separación. El principal inconveniente en esta etapa de segmentación se puede presentar si dos contenedores se posicionan continuamente ocasionando que sus geometrías se unifiquen. Esto puede provocar la segmentación de objetos errónea tal como se muestra en la figura 4.2 donde los contenedores están muy juntos y no son tratados individualmente. Este evento provoca que la imagen segmentada que ingresa al subsistema de reconocimiento no adquiera los valores de descripción deseados, y se cometa errores de asociación.

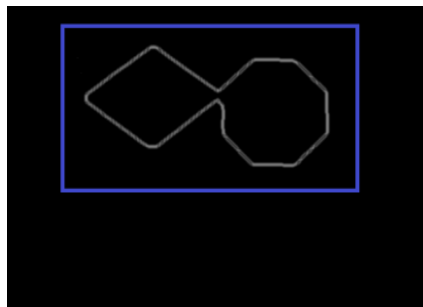


Figura 4.2. Geometrías unidas en la segmentación

Para evitar este tipo de errores es necesario colocar los contenedores de forma separada tal que no presenten ningún tipo de unificación. Esta especificación requerida restringe la cantidad de objetos que se pueden colocar en el campo de visión.

En caso que el filtro de ruido no haya sido el deseado para la etapa de segmentación pueden aun existir conjuntos de pixeles ajenos a las geometrías de interés, por esta razón se implementó un filtrado adicional guiado por el área de cada objeto, así se descartan las pequeñas superficies ajenas a los objetos de interés que se presenten durante el tratamiento de las imágenes.

Al estar sujeta la imagen de entrada a parámetros estáticos como el uso de un solo espacio de color se simplificó la aplicación de técnicas para la clasificación de objetos, tal que a partir de la implementación de momentos invariantes para cada una de las geometrías se recopilan datos suficientes

para la selección única de un contenedor donde se requiere posicionar el objeto, sin la necesidad de utilizar otro tipo de clasificadores más robustos para cualquier tipo de entorno y circunstancias dinámicas.

Si se ingresa como argumento al sistema una imagen que contenga al objeto de interés y su contenedor, el sistema arroja como respuesta un vector de porcentajes en el cual se representa que figura es la más cercana al objeto que se desea manipular. Este valor de semejanza cumple con los parámetros básicos de búsqueda y clasificación mediante el uso de momentos invariantes, como el principio para la automatización industrial de manipuladores mediante visión artificial segmentada por rasgos característicos. Como se muestra en la figura 4.3 al ingresar una imagen al sistema de reconocimiento la respuesta es inmediata denotando el contenedor más cercano a la geometría requerida además de su posición con respecto a la imagen.

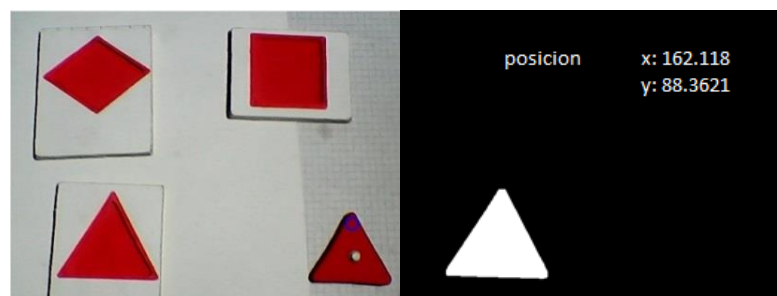


Figura 4.3. Respuesta asociación de figuras y posición en la imagen

Si se presenta cualquier tipo de error en las etapas previas a la realización del reconocimiento el resultado en la salida del sistema será un contenedor con forma diferente al objeto de entrada, lo cual representa una imprecisión en el subsistema de asociación de geometrías. Para corregir este tipo de errores es necesario prevenir las circunstancias extremas de funcionamiento, referente a cantidad de luz y de ruido presentes en el campo de visualización.

Tras la implementación de técnicas para el reconocimiento de imágenes, se puede establecer parámetros indicativos recurrentes a la cantidad de reconocimientos exitosos a partir de un total para así asociar la presión del

sistema a un porcentaje con un cierto rango de error. En la tabla 4.1 se resume el número de intentos de reconocimientos y cuántos de ellos han concluido de manera esperada.

Tabla 4.1 Resultado de pruebas de reconocimiento

Figura de prueba	Cantidad de intentos	Porcentaje de aciertos
Circulo	15	93%
Ovalo	15	100
Triangulo	15	100
Cuadrado	15	100
Rectángulo	15	100
Rombo	15	100
Pentágono	15	100
Octágono	15	93%
Total sistema		98.33%

El resultado obtenido obedece a un sistema confiable para el reconocimiento de formas descritas por un solo color. En los casos que presentaron una diferencia con respecto al puntaje esperado responden a geometrías muy parecidas con otros contenedores, que ante cualquier tipo de error presentado en etapas anteriores puede concluir en un reconocimiento errado.

Para el caso de un octágono su geometría es muy similar o tiende a parecerse a la forma de un círculo, por tanto es preciso realizar un preprocesamiento en la imagen de entrada que procure conservar la mayor cantidad de detalles posibles de los objetos, y así se puedan diferenciar claramente mediante las técnicas de reconocimiento empleadas.

4.2. PRUEBA CINEMÁTICA DEL ROBOT MELFA RV2AJ

En general los cálculos empleados que gobiernan la cinemática inversa del manipulador melfa RV2AJ responden de manera esperada, tal que el efector

final se posiciona en el punto medio sobre cada uno de los contenedores. El objeto en este caso es colocado dentro de la región que se desea cumpliendo con el requerimiento de precisión en el sistema, así la geometría empleada para describir la posición angular de cada articulación cumple con todos los puntos referentes al campo de visión, sin quedar exenta ninguna coordenada (x, y) en el plano visual.

La cinemática utilizada para el cálculo de las posiciones angulares restringe el campo de desplazamiento del manipulador sobre el plano visual ajustándolo a una región de ubicaciones posibles sin exceder los valores límites en cada servomotor. En el campo de trabajo activo, existe una solución geométrica basada en los cálculos realizados, que en comparación con el espacio de trabajo propio del manipulador aun difiere del valor máximo posible, es por esta razón que en la ubicación escogida para la cámara el cuadrante visual siempre permanecerá en la región de trabajo del manipulador.

Al tratarse de un escenario estático regido por medidas claramente identificadas el error que se puede generar al instante de posicionar el efector final, se debe principalmente al área del contenedor y su posición dentro de la imagen capturada, al existir píxeles que deforman la geometría real del objeto los cálculos eventuales para la localización de su centro se desvían del esperado, ocasionando un ligero error de posicionamiento del manipulador con respecto al contenedor según lo muestra la figura 4.5. También se puede considerar como un factor determinante de imprecisión a la configuración física de los objetos si la ubicación del sujetador no está totalmente centrada en todos los casos.

La respuesta obtenida varía para cada objeto manipulado, se obtuvieron distintas posiciones de colocación, unas con un grado mayor de precisión con respecto a otras pruebas. Esta evidencia de desviación en cuanto la centralización correcta del efector final, describe en la cinemática de movimiento un rango de variación para la colocación de objetos sobre sus respectivos contenedores. El rango de desviación se puede calcular a partir

del área que excede el perímetro objetivo acercándose a una variación del 3% de posicionamiento centrado, de esta manera el manipulador se comporta como un mecanismo autónomo capaz de reconocer y asociar formas sin la intervención directa de una persona externa que supervise las acciones

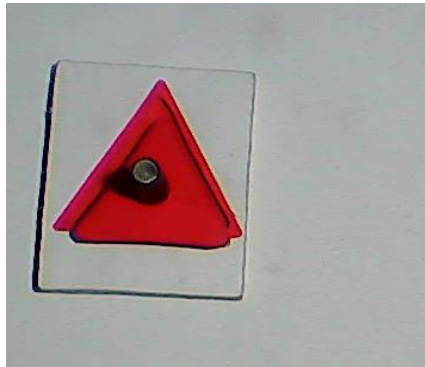


Figura 4.4. Desviación de posición en el contenedor

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. CONCLUSIONES

Mediante los resultados obtenidos en el desarrollo práctico del proyecto se puede concluir que:

- La implementación de sistemas inteligentes de control sobre manipuladores articulados permite realizar tareas complejas repetitivas a base de un conocimiento experimental sin la necesidad de la intervención de un agente externo de control.
- Los sistemas de visión artificial dependen estrechamente de las condiciones establecidas en el entorno limitando su aplicación en ambientes cambiantes.
- Es posible implementar un sistema de control visual estático sobre cualquier tipo de manipulador para adquirir una guía de posicionamiento espacial que le permita al robot establecer referencias de movimientos y reconocimiento del entorno de trabajo.
- La efectividad de reconocimiento de formas depende de la calidad de imagen obtenida en la etapa de preprocesamiento y acondicionamiento como también en la etapa de extracción de características, conservando la menor cantidad posible de ruido ya sea este inducido por el entorno o por los algoritmos de procesamiento.
- Las pruebas realizadas sobre el manipulador Melfa RV2AJ cumplen con los requerimientos establecidos inicialmente, contribuyendo a la implementación de un mecanismo con un nivel mayor de interpretación del entorno, mediante la adición de sistemas de visión artificial y de la cinemática para el control de movimiento de cada articulación del manipulador.

5.2. RECOMENDACIONES

Para posteriores trabajos referentes a este tipo de tema, se considera tener en cuenta las siguientes actividades:

- Adecuar el escenario de trabajo con suficiente incidencia luminosa para la adquisición de imágenes con mejor calidad para su procesamiento.
- Verificar la comunicación existente entre el computador y el manipulador melfa RV2AJ antes de proceder a enviar comandos de movimiento, para no incidir en instancias de error en la controladora.
- Limitar los valores angulares calculados a los máximos referenciados en el manual de fabricación del manipulador porque pueden ocasionar daños en los servomotores que integra el robot en su estructura
- Utilizar un tipo de pinza diferente de movimiento lineal para efectuar la manipulación directamente sobre el contorno de los objetos y no sobre sujetadores.
- Utilizar clasificadores más robustos para el reconocimiento de imágenes que soporten texturas de forma y color indistintos y combinados.
- Adquirir una cámara con una capacidad de definición mayor a los 3 megapíxeles para una mejor visualización del entorno de interés.
- Implementar un sistema de control dinámico que responda ante cambios eventuales del entorno.
- Basar el procesamiento de imágenes en diferentes librerías computacionales para un mejor rendimiento en el funcionamiento general del sistema.

Bibliografía

Barrientos, A. (1997). Fundamentos de robótica. McGraw-Hill.

Bradski, G., & Kaehler, A. (2008). Learning Opencv. O'Reilly Media.

Craig, J. J. (2006). Robotica. Mexico: Pearson Educación.

Fu, K. S., González, R. C., & Lee, C. S. (1988). Robótica: control, detección, visión e inteligencia. McGraw-Hill.

Gómez, G. J. (2010). Control visual-fuerza autocalibrado para seguimineto de trayectorias de tareas cooperativas roboticas. Universidad de Alicante.

Gómez-Allende, D. M. (1994). Reconocimientos de formas y visión artificial. Addison-Wesley Iberoamericana.

Madrigal, R. I., & Idiarte, E. V. (2002). Robots industriales manipuladores. Barcelona: Edicions UPC.

Alaens. (2010). Ejemplo filtro promedio. wikipedia.

Serrano, A. G. (2012). Inteligencia Artificial. Rc libros.

Wapcaplet. (2005). Cono de colores del espacio HSV. wikipedia.

Malpartida, E. A. (2003). Sistema de visión artificial para el reconocimiento y manipulación de objetos. Universidad Católica del Perú.

H. Rhody. "Lecture 10: Hough Circle Transform". Rochester Institute of Technology, 2005.

R. Laganière. "Opencv 2: Computer visión application programming cookbook".Packt Publishing, 2011.

R. Igual, C. Medrano. "Tutorial OpenCV". Universidad Politécnica de Teruel, 2008.

Ollero, Aníbal. Robótica, Manipuladores y robots móviles. Alfaomega y Marcombo. España. 2001

Manuales de Festo.

- 648814_Manual_Robot.pdf
- 132308_Instructions_Robot.pdf

ANEXOS

ANEXO 1

FLUJOGRAMA GENERAL SISTEMA DE CONTROL INTELIGENTE

