



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

**Desarrollo de un sistema de
detección y manipulación de objetos
para un robot de servicio**

TESIS

Que para obtener el título de
Ingeniero Mecatrónico

P R E S E N T A

Edgar de Jesús Vázquez Silva

DIRECTOR DE TESIS

M.I. Marco Antonio Negrete Villanueva

Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2018





Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

Agradezco a ...

...a mi familia, por su total cariño, formación y apoyo,

...a mi madre por creer siempre en mí,

...a mi padre por su esfuerzo y sacrificio,

...al Dr. Jesús Savage Carmona, por permitirme
ser parte de su equipo de trabajo,

...al Mtro. Marco Antonio Negrete Villanueva,
por su paciencia y apoyo en todo momento,

...a todos y cada uno de los integrantes del laboratorio
de Biorobótica por sus múltiples enseñanzas,

...a Jaqui por ser mi apoyo y escucha en momentos inciertos,

...a Feliza por ser una excelente consejera y amiga,

...a Bere por el tiempo y esperanzas depositados en mí,

Se agradece al CONACYT, a través del proyecto 245491, "Laboratorio de Movilidad e Infraestructura Verde para la Eficiencia Energética en Ciudades", por el apoyo recibido en la realización de este documento.

Índice general

| | |
|--|-----------|
| 1. Introducción | 1 |
| 1.1. Planteamiento del problema | 2 |
| 1.2. Hipótesis | 3 |
| 1.3. Objetivos | 3 |
| 1.4. Descripción del documento | 4 |
| 2. Marco teórico | 5 |
| 2.1. Robots de servicio | 5 |
| 2.2. Fundamentos básicos de Robots Manipuladores | 7 |
| 2.2.1. Configuraciones típicas y parámetros característicos | 8 |
| 2.2.2. Descripciones espaciales y transformaciones | 9 |
| 2.2.3. Cinemática directa | 10 |
| 2.3. Imágenes RGB-D | 11 |
| 2.3.1. Modelo matemático de un plano | 12 |
| 2.4. Forma punto-normal y forma general de la ecuación de un plano | 13 |
| 2.4.1. Modelo del plano definido por tres puntos | 14 |
| 2.5. Algoritmo RANSAC | 15 |
| 2.6. Algoritmo PCA | 17 |
| 2.6.1. Desviación estándar | 17 |
| 2.6.2. Varianza | 17 |
| 2.6.3. Covarianza | 18 |
| 2.6.4. Matriz de covarianzas | 19 |
| 2.6.5. Vectores y valores propios | 19 |
| 3. Detección de objetos | 21 |
| 3.1. Segmentación de planos con RANSAC | 21 |
| 3.2. Extracción de objetos | 23 |
| 3.3. Aproximación de orientación de objetos con PCA | 24 |
| 3.3.1. Adquisición de datos y cálculo de la media | 24 |
| 3.3.2. Cálculo de la matriz de covarianza | 25 |
| 3.3.3. Cálculo de rotación del objeto | 26 |
| 4. Características del manipulador de 7DOF | 29 |
| 4.1. Descripción del hardware | 29 |
| 4.1.1. Motores dynamixel Serie MX | 29 |
| 4.1.2. Características de los servomotores dynamixel MX-106 | 31 |
| 4.1.3. Características de conexión | 35 |
| 4.2. Descripción de los elementos del sistema de manipulación | 35 |
| 4.3. Cinemática directa | 37 |
| 4.3.1. Teoría transformaciones y medidas del manipulador | 37 |
| 4.3.2. Implementación (Descripción con ROS) | 39 |

| | | |
|-----------|--|-----------|
| 4.3.3. | Comparación entre la convención D-H y la descripción solo con rotaciones y traslaciones. | 40 |
| 4.4. | Determinación del área de trabajo | 44 |
| 4.5. | Cinemática inversa | 48 |
| 4.5.1. | Desacople cinemático | 49 |
| 4.6. | Cinemática inversa paquetería MoveIt | 54 |
| 4.7. | Planteamiento de la función de costo para el cálculo de la cinemática inversa. . . | 56 |
| 5. | Implementación usando la plataforma ROS | 58 |
| 5.1. | Ros | 58 |
| 5.1.1. | Nodos | 58 |
| 5.1.2. | Paquetes | 58 |
| 5.1.3. | Tópicos | 59 |
| 5.1.4. | Servicios | 59 |
| 5.2. | Máquinas de estados | 59 |
| 5.2.1. | Descripción de pruebas de toma de objetos. | 61 |
| 5.2.2. | Pruebas de toma de objetos estado actual. | 62 |
| 5.2.3. | Pruebas de toma de objetos con información de orientación y dimensiones del objeto. | 63 |
| 5.3. | El robot de servicio Justina | 64 |
| 6. | Resultados | 67 |
| 6.1. | Extracción de planos. | 68 |
| 6.1.1. | Comparación exactitud y rapidez | 72 |
| 6.2. | Extracción de objetos y sus características | 74 |
| 6.2.1. | Estimación de alturas | 74 |
| 6.3. | Cálculo de la orientación del objeto. | 77 |
| 6.3.1. | Pruebas para objetos a 0 grados | 77 |
| 6.3.2. | Pruebas para objetos a 45 grados | 80 |
| 6.3.3. | Pruebas para objetos a 90 grados | 82 |
| 6.4. | Tiempo de ejecución para diferentes algoritmos de cinemática inversa. | 84 |
| 6.4.1. | Tiempo de ejecución para los dos algoritmos de cinemática inversa. | 84 |
| 6.4.2. | Evaluación del valor de la función de costo. | 85 |
| 6.5. | Pruebas de manipulación con el robot real | 88 |
| 7. | Conclusiones y trabajo futuro | 91 |
| 7.1. | Conclusiones | 91 |
| 7.2. | Trabajo futuro | 93 |

Resumen

El reconocimiento de objetos y la adecuada manipulación de los mismos es una problemática común en el área de la robótica de servicios. El presente documento aborda el diseño de un sistema de manipulación de objetos formado por un manipulador de 7DOF, el desarrollo de un algoritmo de visión computacional para obtener la posición y orientación de los objetos, la puesta a prueba de diferentes algoritmos para el cálculo de la cinemática inversa del brazo robótico y finalmente la planeación de acciones entre la detección de un objeto y su correcta manipulación.

El desarrollo del sistema de manipulación se plantea con diferentes subtareas, se comienza con la descripción de la detección de objetos utilizando el algoritmo RANSAC para encontrar superficies planas, se plantea un algoritmo para la extracción de objetos, posteriormente se plantea un análisis de componentes principales para estimar la orientación de los objetos sobre el plano.

Se continua con la descripción del manipulador de 7DOF, se analiza la cinemática directa haciendo énfasis en la caracterización experimental del espacio de trabajo del manipulador y se reportan algoritmos utilizados para el cálculo de la cinemática inversa.

Posteriormente se reporta la integración del sistema utilizando la plataforma ROS (Robot Operative System), finalmente concluye con la descripción de la tarea de manipulación de objetos y se reportan resultados y conclusiones.

Los algoritmos desarrollados en el presente documento pueden ser utilizados en la segmentación de objetos de manera general, y podrán ser implementados para realizar un seguimiento de peatones o usuarios de bicicletas en un sistema de monitoreo para bicicletas ecológicas como parte del proyecto "Laboratorio de Movilidad e Infraestructura Verde para la Eficiencia Energética en Ciudades".

Capítulo 1

Introducción

En los últimos años, el área de la robótica y sus múltiples aplicaciones se han expandido a pasos agigantados, tal es el caso de la robótica de servicios. Años atrás la idea de tener un robot capaz de ayudar en las tareas del hogar sólo era concebida gracias a la ciencia ficción; hoy en día es una total realidad. Un robot inteligente es una máquina capaz de extraer información de su entorno y usar su conocimiento del mundo para moverse con seguridad de manera significativa y deliberada.[1] Actualmente existe un auge en utilizar a los robots como auxiliares en las actividades domésticas, un área llamada: “robótica de servicio”. Sin embargo, el área de la robótica de servicios y robots de asistencia comprende un gran rango de problemáticas.

Es conveniente poner en contexto algunas definiciones útiles según la Federación Internacional de Robótica. Un **robot de servicio** es un robot que realiza tareas útiles para humanos o equipos, excluida la aplicación de automatización industrial [2]. Un **robot de servicio personal** o un **robot de servicio para uso personal** es un robot de servicio utilizado para una tarea no comercial, por lo general por personas con alguna limitación física. Algunos ejemplos son el robot de servicio doméstico, la silla de ruedas automatizada y el robot de asistencia de movilidad personal[2].

La motivación de este trabajo se encuentra en las condiciones de la población con alguna discapacidad en México. De acuerdo con el INEGI y SEDESOL, en México, hasta el 2014, el 6.4% de la población reportó alguna discapacidad. La mayoría son personas adultas mayores y los principales tipos de discapacidad son la motriz, la visual y los problemas para aprender, recordar o concentrarse[3]. De acuerdo con el INEGI, con respecto al uso de ayudas técnicas para personas con discapacidad, sólo se menciona el uso de lentes para los problemas de visión. Para los problemas de movilidad las personas con discapacidad reportan usar bastón, silla de ruedas, muletas, andaderas, la ayuda de alguien y otros [4].



Figura 1.1: Robot de asistencia doméstica, desarrollado por la compañía Toyota (c). Asistente de tareas domésticas para personas con limitaciones físicas[5].

En este contexto, se propone el desarrollo de herramientas tecnológicas que ayuden a mejorar la calidad de vida de la población que sufre alguna discapacidad en México. De acuerdo con la definición de robot de servicio propuesta por la FIR (Federación Internacional de Robótica), un robot de servicio diseñado, construido y programado para asistir en tareas domésticas podría ayudar a tal propósito. El hecho de tener un asistente doméstico podría significar delegar múltiples tareas a los robots. Estas tareas están orientadas a asistir a personas con problemas de motricidad, problemas de desplazamiento, problemas de memoria, entre otros. Un asistente doméstico ayudaría a la ejecución de estas actividades.

Los robots enfrentan problemáticas a las que cualquier humano está sometido día a día: ambientes dinámicos, características de entornos no estandarizados, incertidumbre ante escenarios desconocidos. Dada la naturaleza de esta disciplina científica han surgido diversas líneas de investigación que abarcan estas problemáticas. La mecánica, la electrónica, la informática, la inteligencia artificial y la ingeniería de control, son algunas de las disciplinas involucradas. La robótica se ayuda de estas disciplinas para resolver problemas particulares, por ejemplo, un robot de servicios debe ser capaz de reconocer y manipular objetos en diferentes ubicaciones y desde diferentes alturas, tener locomoción en diferentes tipos de superficies, interactuar con un humano, distinguir diferentes personas, etc. Por último, pero no menos importante, el funcionamiento seguro de estos sistemas en ambientes dinámicos es un requisito fundamental para su futura aceptación y aplicabilidad.

1.1. Planteamiento del problema

La creación de estos sistemas autónomos requiere la integración de un gran conjunto de capacidades y tecnologías. Los ejemplos de capacidades incluyen la interacción humano-robot (habla, identificación de personas, seguimiento de personas, entre otros), navegación, planeación de acciones, control de comportamientos, detección y reconocimiento de objetos, manipulación de objetos o seguimiento de objetos. Con respecto a las tecnologías es requerida la aplicación de sensores RGB-D, cámaras estereoscópicas, sensores láser, entre otros.

Con respecto a la inteligencia, los sistemas deben contener métodos de planificación de acciones y comportamientos adaptables. Los procedimientos apropiados deben, por ejemplo, permitir al operador enseñar al robot nuevos comportamientos y entornos vía comandos de voz o gestos. Los futuros hogares probablemente contendrán dispositivos electrónicos más inteligentes capaces de comunicarse entre si incluyendo el uso de internet como base común de conocimientos, de modo que los robots desempeñarán un papel más importante.

Entre todas estas líneas de investigación es imprescindible contar con un robot que sea capaz de interactuar con los objetos en el mundo real, por ello es necesario contar un sistema que pueda reconocer los objetos y su posición adecuadamente. En el mundo real los robots se enfrentan con condiciones dinámicas en el ambiente, por ejemplo al pedir a un robot que tome un objeto y pueda llevarlo hasta nosotros, el primer problema al que nos enfrentamos es conocer la posición del objeto (la cual será diferente en cada ocasión), posteriormente, si deseamos localizar dos objetos del mismo tipo, estos no serán reconocidos de igual manera por el robot debido a las condiciones de luz, a los cambios de forma, y a los cambios de apariencia.

En lo que respecta al proceso de la toma de objetos actual, en el robot de servicio Justina, únicamente se utiliza la información de posición del objeto sin considerar la información de orientación. Este proceso es susceptible a fallas cuando se trata de objetos de grandes

dimensiones, entiendase objetos con dimensiones mayores a la longitud total del efector final del manipulador en su mayor apertura.

Dadas las condiciones antes descritas, es preciso contar con algoritmos que ayuden a mejorar la manipulación de objetos. Para ello es necesario dividir la tarea en operaciones: la primera de ellas consiste en estimar la posición del objeto, tener un indicador que nos ayude a determinar cuál es la mejor forma de tomar un objeto y contar con un algoritmo lo suficientemente robusto que lleve el efector final al objeto deseado. Otra de las operaciones necesarias es llevar el actuador final del brazo robótico a una posición (x, y, z) deseada. Por último es necesario contar con un planeador de acciones para coordinar cada uno de los eventos dentro de la tarea.

Podemos observar que las problemáticas son variadas, sin embargo podemos reducir el problema principal en tres tareas secundarias: Detectar un objeto, obtener una aproximación de cuál será la mejor manera de tomarlo y corroborar que el sistema de manipulación es robusto y óptimo en su ejecución.

1.2. Hipótesis

- Un sistema de visión computacional con implementación de un algoritmo de análisis de componentes principales podrá indicarnos cuál es la mejor orientación para tomar un objeto y por tanto mejorará la manipulación de objetos.

1.3. Objetivos

Objetivo general

Implementar un conjunto de algoritmos de visión computacional que mejore el sistema de detección y manipulación de objetos formado por un sensor kinect y un brazo robótico de 7DOF en un robot de servicios.

Objetivos específicos

- Implementar un algoritmo de visión computacional para identificar un plano.
- Implementar un algoritmo de visión computacional para determinar la posición de un objeto.
- Implementar un algoritmo de análisis de componentes principales para calcular la orientación de un objeto.
- Caracterizar el espacio de trabajo del manipulador de 7DOF ubicado en el robot de servicio Justina.
- Poner a prueba dos diferentes algoritmos para el cálculo de la cinemática inversa de un brazo robótico de 7DOF, un algoritmo geométrico y un algoritmo numérico.
- Realizar pruebas de desempeño para verificar si existe una mejora significativa entre las tareas.

1.4. Descripción del documento

En el capítulo 2 de este documentos se definen los conceptos utilizados para la solución propuesta. En el capítulo 3 se aborda la manera en que se desarrollaron los algoritmos de visión computacional para realizar la extracción de un plano, identificar la posición de un objeto, implementar un algoritmo de Análisis de Componentes Principales (PCA por sus siglas en inglés) para obtener cual será la mejor orientación para tomar un objeto a partir de su forma. En el capítulo 4 se describe el sistema de manipulación utilizado. Se comienza por conocer las características de los actuadores utilizados, se obtienen las ecuaciones correspondientes a la cinemática de los brazos para llevarlo hasta una posición (x, y, z, roll, pitch, yaw) deseada. Posteriormente se realiza un análisis En el capítulo 5 se realiza la integración de las tareas antes mencionadas, la plataforma sobre la cual se desarrolló el sistema y se describe el desarrollo del modelo probabilístico utilizado para mejorar la manipulación de objetos en un robot de servicios. En el capítulo 6 se reportan los resultados y conclusiones obtenidas de este trabajo.

Capítulo 2

Marco teórico

En este capítulo se definirán los conceptos utilizados para la solución propuesta como transformaciones homogéneas de las cuales se harán uso para describir los sistemas de referencia del manipulador, así como el algoritmo PCA del cual se hará uso para obtener una aproximación a la orientación de los objetos. Se describe además el algoritmo RANSAC el cual es utilizado en este documento para la segmentación de planos.

2.1. Robots de servicio

Dado que este trabajo se centrará en los robots de servicio doméstico es importante mencionar que un robot de servicio doméstico es un robot capaz de realizar tareas de la vida diaria en un ambiente similar al de un hogar real. Actualmente el desarrollo de este tipo de robots encuentra promoción en la competencia Robocup @Home al menos a nivel de investigación académica [6]. Robocup @Home promueve el desarrollo de robots de servicio al brindar una plataforma estándar de prueba similar a un ambiente doméstico. Esta categoría promueve la incorporación de habilidades robóticas avanzadas para la interacción con los humanos y con el entorno de operación. Esta competencia se enfoca a desarrollar habilidades en los robots de servicio. Ejemplos de estas habilidades son la localización, navegación segura en ambientes no controlados, la comunicación natural humano-robot por voz, detección de gestos, habilidades visuales para el reconocimiento y la manipulación de objetos [7].

Los robots de servicio doméstico enfrentan diversos retos: desarrollar tareas en ambientes dinámicos, características de entornos no estandarizados, incertidumbre ante escenarios desconocidos, entre otros. Dadas las condiciones en que estos robots operan los programadores y desarrolladores han enfocado sus esfuerzos en dotar a los robots de ciertas capacidades. Por ejemplo el robot Cosero, consta de un sistema de percepción del entorno, un sistema de manipulación, un sistema de interacción humano-robot y un sistema de planeación de tareas [8].

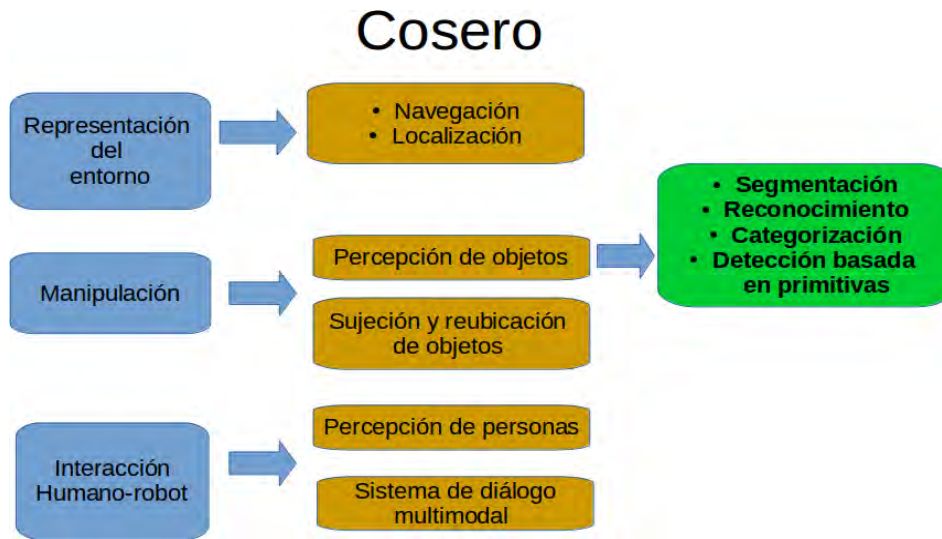


Figura 2.1: Estructura de software del robot Cosero.

En particular, la detección y manipulación de objetos, es una tarea fundamental a resolver en los robots de servicio. La idea general de la robótica de servicio doméstico ha existido desde hace mucho tiempo, pero es un tema de investigación relativamente joven. El objetivo de crear robots de servicios útiles y autónomos que puedan interactuar con seres humanos y objetos en el mundo real en un entorno natural plantea un gran número de problemas sin resolver en muchas disciplinas científicas. En general, diferentes robots de servicio doméstico poseen un sistema de detección y manipulación de objetos (Figuras 2.1, 2.2, 2.3).



Figura 2.2: Estructura de software del robot Markovito.

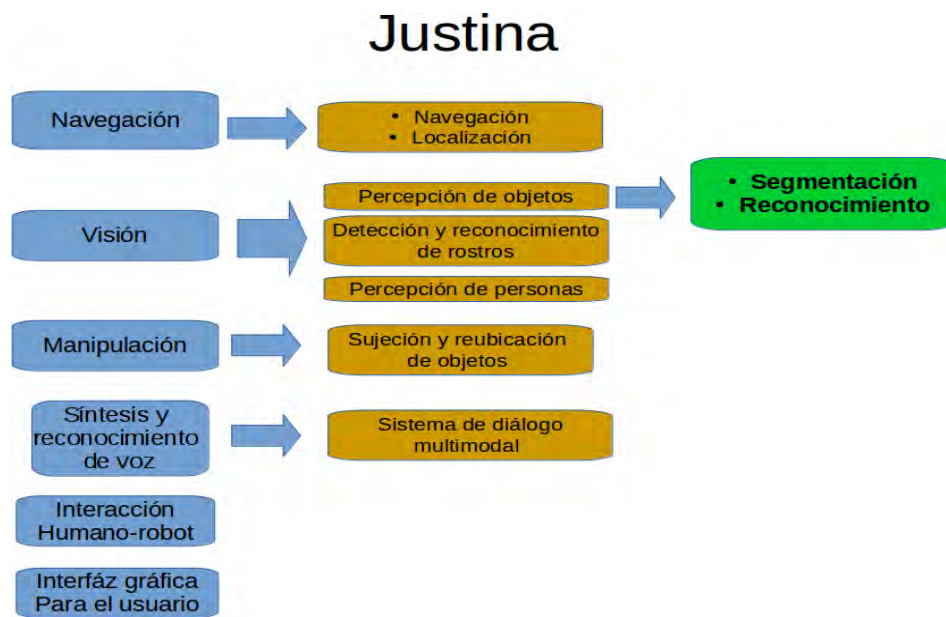


Figura 2.3: Estructura de software del robot Justina.

Recientemente, el progreso en estos campos de investigación, así como la normalización en el desarrollo de hardware y software, ha llevado a un aumento en la disponibilidad de recursos, métodos y componentes para el desarrollo de Robots de servicio doméstico . Por ello estamos cada vez más cerca de convivir con robots de servicios de manera exitosa en diversos lugares, por ejemplo hospitales [9], oficinas, construcciones, o tiendas departamentales [10].

Estos desarrollos han sido posibles gracias a herramientas de código abierto como lo es Ubuntu, ya que ha servido como base para el desarrollo de software especializado para robots, por ejemplo ROS [11]. Este conjunto de librerías especializadas para robots pueden llegar a ser muy particulares y estar enfocados a una sola área de investigación de las antes mencionadas, por ejemplo: Carmen [12], un conjunto de librerías y algoritmos de control para navegación de robots, desarrollados por la universidad Carnegie Mellon[13].

En la parte de simulación se cuenta con ejemplos como el USARSim [14], rviz [15] o Gazebo [16]. Por lo que respecta a los algoritmos de visión computacional existen bibliotecas de código abierto como OpenCV [17] el cual tiene un gran campo de aplicaciones[18]. Por lo que corresponde a los kits estándar de hardware, podemos mencionar la construcción de robots de plataforma estándar por ejemplo VolksBot [19] y las plataformas bases por ejemplo ActivRobots [20], Pepper [21], Toyota HSR [5] ha hecho posible desarrollar software de manera más rápida y eficiente.

2.2. Fundamentos básicos de Robots Manipuladores

La manipulación adecuada de objetos es una característica imprescindible en los robots de servicio dadas las condiciones de su entorno y las tareas cotidianas que le podemos asignar a dicho robot. Una posible solución al problema de la manipulación de objetos es la incorporación de manipuladores seriales a una base móvil; sin embargo se debe tener en cuenta que los objetos a ser manipulados se encuentran en condiciones aleatorias de posición y orientación, estas características implican que el manipulador serial debería ser capaz de alcanzar una



Figura 2.4: Robot de asistencia humana desarrollado por la compañía Toyota.[5]

posición (x, y, z) con cualquier orientación (roll, pitch, yaw).

Los robots manipuladores industriales presentan una configuración serial, que hace semejanza con un brazo humano. La arquitectura típica de un manipulador consiste en una serie de barras rígidas unidas entre sí mediante el uso de articulaciones rotacionales o prismáticas. De manera general cada articulación logra su movimiento gracias a un actuador y a la adición de algunos elementos complementarios como sensores de posición y de velocidad[22].

Los robots manipuladores clásicos están caracterizados, desde el punto de vista mecánico, por una serie de propiedades tales como los grados de libertad, el espacio de trabajo, la rigidez estructural, peso propio y la capacidad de llegar a un punto deseado con exactitud en múltiples repeticiones. Además, en los robots manipuladores suelen tomarse en cuenta características adicionales: la carga útil máxima y la velocidad de trabajo.



Figura 2.5: Robot serial elaborado por la compañía ABB.

2.2.1. Configuraciones típicas y parámetros característicos

Según la geometría de su estructura mecánica, un manipulador puede ser:

- Cartesiano, cuyo posicionamiento en el espacio se lleva a cabo mediante articulaciones lineales.
- Cilíndrico, con una articulación rotacional sobre una base y articulaciones lineales para el movimiento en altura y en radio.

- Polar, que cuenta con dos articulaciones rotacionales y una lineal.
- Esférico (o de brazo articulado), con tres articulaciones rotacionales.
- Mixto, que posee varios tipos de articulaciones, combinaciones de las anteriores. Es destacable la configuración SCARA (Selective Compliance Assembly Robot Arm).
- Paralelo, posee brazos con articulaciones prismáticas o rotacionales concurrentes. Figura 2.6

Los principales parámetros que caracterizan a los robots industriales son:

- Número de grados de libertad. Puede entenderse como número total de variables necesarias para obtener la ubicación de un cuerpo en el espacio. Aunque la mayoría de las aplicaciones requieren manipuladores de 6 DOF, otras más complejas requieren un número mayor, tal es el caso de las labores de apertura y cierre de puertas.
- Espacio de trabajo. Es el conjunto de puntos del espacio accesibles al efector final, que depende de la configuración geométrica del manipulador. Un punto del espacio se dice totalmente accesible si el efector final puede situarse en él en todas las orientaciones que permita la constitución del manipulador.
- Velocidad. Es la máxima velocidad que alcanzan el efector final y las articulaciones.



Figura 2.6: Robot paralelo.

2.2.2. Descripciones espaciales y transformaciones

La cinemática es la ciencia que estudia el movimiento sin considerar las fuerzas que lo ocasionan. Dentro de esta ciencia se estudian la posición, la velocidad y la aceleración. En consecuencia, el estudio de la cinemática de manipuladores se refiere a todas las propiedades geométricas y las basadas en los cambios de estas a lo largo del tiempo. Dados los objetivos de este trabajo solo se abordarán la cinemática directa e inversa, sin llegar a analizar la dinámica del manipulador.

El problema de la cinemática directa se refiere encontrar una matriz de transformación que relaciona el sistema de coordenadas ligado al cuerpo en movimiento respecto a un sistema de coordenadas que permanece estático y se toma como referencia. Para lograr esta representación se usa la matriz de transformación homogénea con una dimensión 4×4 , la cual incluye las operaciones de rotación y traslación.

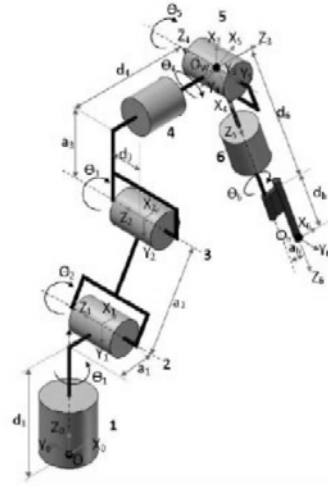


Figura 2.7: Esquema de sistemas de referencia en robot antropomórfico de seis grados de libertad.

La matriz de transformación homogénea es una matriz de 4x4 que transforma un vector expresado en coordenadas homogéneas desde un sistema de coordenadas hasta otro sistema de coordenadas. La matriz de transformación homogénea tiene la siguiente estructura:

$$T_0^1 = \begin{bmatrix} n_x & s_x & a_x & p_x \\ n_y & s_y & a_y & p_y \\ n_z & s_z & a_z & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

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

2.2.3. Cinemática directa

El problema de la cinemática directa consiste en determinar la posición del efector final en el espacio dado el valor de cada una de las articulaciones. El valor de los ángulos de las articulaciones se determinan con ayuda de sistemas de referencia ubicados en cada una de las articulaciones del robot.

Un robot manipulador está compuesto de un conjunto de enlaces conectados por varias juntas. Las articulaciones pueden ser muy simples, tales como una articulación de revolución o una articulación prismática. Una articulación de revolución es como una bisagra y permite una rotación relativa alrededor de un solo eje coordinado; una junta prismática permite un movimiento lineal a lo largo de un solo eje. En ambos casos podemos observar que la articulación tiene un solo grado de libertad de movimiento: el ángulo de rotación en el caso de una articulación de revolución, y la cantidad de desplazamiento lineal en el caso de una articulación prismática.

Con el supuesto de que cada articulación tiene un solo grado de libertad, la acción de cada una de las articulaciones se puede describir por un solo número real: el ángulo de rotación en el caso de una articulación de revolución o el desplazamiento en el caso de una junta prismática. El objetivo del análisis de la cinemática directa es determinar el efecto acumulativo de todo el conjunto de variables de la articulación y observarlo en el efector final [23].

El análisis cinemático de un manipulador de n -enlaces puede ser extremadamente complejo y las convenciones que se presentan a continuación simplifican el análisis considerablemente.

Un robot manipulador con n grados de libertad tendrá por consecuencia n articulaciones. Se numeran las articulaciones de 1 a n , y se numeran los enlaces de 0 a n , comenzando desde la base en un sistema de referencia fijo. Para esta convención, la articulación i conecta el enlace $i - 1$ al enlace i .

Cuando se acciona la articulación i el enlace i se mueve, por lo tanto, el enlace 0 (el primer eslabón) es fijo, y no se mueve cuando las juntas consecuentes son accionadas. Por supuesto, el robot manipulador podría ser móvil (por ejemplo, podría ser montado en una plataforma móvil o en un vehículo autónomo), pero para esta primer parte abordaremos el problema suponiendo una plataforma fija.

Este tema se abordará con más detalle 4.3 en el capítulo de este documento.

2.3. Imágenes RGB-D

En la robótica de servicios resulta imprescindible contar con robots que sean capaces de percibir su entorno, los elementos que los rodean y determinar características de los mismos. Los humanos, dadas estas necesidades, hemos desarrollado el sentido de la vista que nos permite determinar características del entorno y de los elementos que lo componen: objetos, personas, acciones, entre otros. Dentro de las características de relevancia se encuentran el color, la forma, la textura, las dimensiones y su ubicación en el espacio.

Para optimizar los movimientos de un robot, no sólo se debe identificar cada objeto que se encuentra en el entorno, sino también la posición que estos guardan respecto al robot. Normalmente, la segmentación de objetos de una imagen se logra mediante la segmentación de color, esta segmentación se logra a partir del análisis cromático de los componentes RGB de la imagen obtenida del objeto; sin embargo, este método es poco eficiente debido a que es sumamente susceptible a los cambios en la iluminación [24].

Por lo tanto, necesitamos considerar una fuente de datos adicional, en este caso la profundidad, para discriminar objetos que no están en el rango de interés. En este documento se reportan los datos obtenidos al resolver este problema con la incorporación de un sensor RGB-D. Una imagen RGB-D es una imagen que además de proporcionar información del color de la escena agrega información sobre la distancia en profundidad a la cual se encuentran los puntos de la escena.

La rápida evolución de esta reciente tecnología ha resultado en el aumento de la calidad de las imágenes, la mejora en la sincronización del color con la profundidad y la disminución del tiempo de muestreo entre cada imagen. En particular, la profundidad de la imagen se obtiene en una matriz resultado de la proyección de rayos infrarrojos sobre los objetos. El sensor cuenta con una cámara infrarroja que obtiene la lectura de los haces infrarrojos reflejados sobre los objetos.

El sensor Kinect incorpora un sensor de profundidad, un cámara de color y un arreglo de cuatro micrófonos que, en conjunto, proporcionan una captura de movimiento de cuerpo completo en 3D. La figura 2.8 muestra la disposición del proyector de infrarrojos (IR), la cámara de color y la cámara IR. El sensor de profundidad consta de un proyector IR combinado

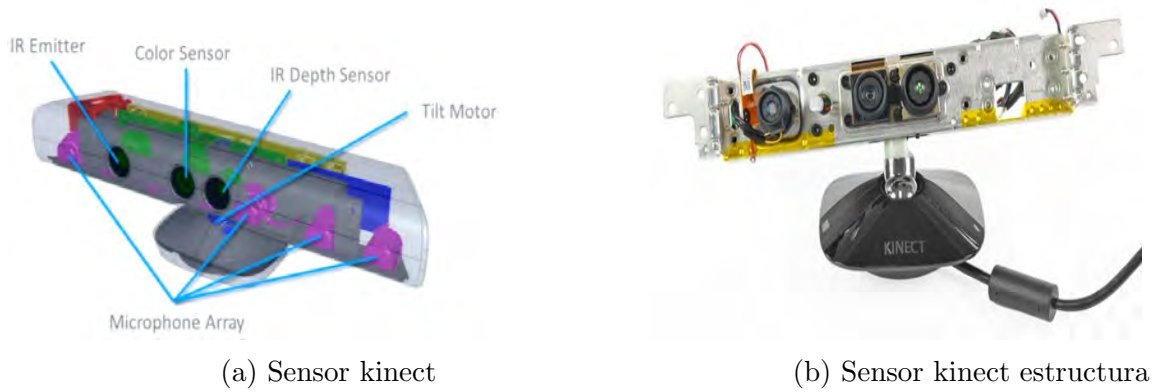


Figura 2.8: Sensor kinect elaborado por Microsoft.

con una cámara IR, la cual es un sensor semiconductor de metal-óxido monocromático. El sensor de profundidad es desarrollado por la compañía israelí PrimeSense [25].

Aunque la tecnología exacta es cerrada, se basa en el principio de la estructura de la luz y su difracción. El proyector IR es un láser IR que pasa a través de una rejilla de difracción y se esparce como una nube de puntos. Dada la geometría de construcción entre el proyector IR y la cámara IR se puede reconstruir un modelo 3D si se observa un punto en el proyector y posteriormente se ubica su correspondiente reflexión en la cámara, esto se puede lograr utilizando triangulación.

Debido a que el patrón de puntos es relativamente al azar, la coincidencia entre la imagen IR y el patrón del proyector puede realizarse de forma directa comparando pequeñas vecindades utilizando, por ejemplo, referencias cruzadas [25].

El valor de la profundidad se codifica en escala de grises, cuanto más oscuro sea un píxel, más cerca está el punto de la cámara en el espacio, los píxeles negros indican que no se posee información respecto a la distancia en ese píxel. Esto puede suceder si los píxeles están demasiado lejos o demasiado cerca de la cámara IR.

2.3.1. Modelo matemático de un plano

En matemáticas, un plano es una superficie plana, bidimensional que se extiende infinitamente. Un plano es el análogo bidimensional de un punto (dimensiones cero), una línea (una dimensión), el **plano** (dimensión dos) y un espacio tridimensional (volumenes).

En un espacio euclidiano de cualquier número de dimensiones, un plano está determinado únicamente por cualquiera de los siguientes enunciados:

1. Tres puntos no colineales.
2. Una línea y un punto no perteneciente a esa línea.
3. Dos líneas distintas, pero que se cruzan.
4. Dos líneas paralelas no sobre puestas.

Las siguientes afirmaciones se mantienen en el espacio euclidiano tridimensional, pero no en las dimensiones superiores:

- Dos planos distintos son paralelos o se intersecan en una línea.
- Una línea es paralela a un plano, lo cruza en un solo punto, o está contenida en el plano.
- Dos líneas distintas perpendiculares al mismo plano deben ser paralelas entre sí.

2.4. Forma punto-normal y forma general de la ecuación de un plano

De manera análoga a la forma en que se describen las líneas en un espacio bidimensional utilizando una forma de punto-pendiente para sus ecuaciones, los planos en un espacio tridimensional tienen una descripción que utiliza un punto en el plano y un vector ortogonal a él (vector normal) para indicar su *inclinación*.

Específicamente, sea r_0 el vector de posición de algún punto $P_0 = (x_0, y_0, z_0)$, y sea $n = (a, b, c)$ un vector no nulo. El plano determinado por el punto P_0 y el vector n consiste en aquellos puntos P , con el vector de posición r , de tal manera que el vector trazado de P_0 a P sea perpendicular a n . Recordando que dos vectores son perpendiculares si y sólo si su producto punto es cero, se deduce que el plano deseado puede ser descrito como el conjunto de todos los puntos r tales que:

$$n \cdot (r - r_0) = 0 \tag{2.1}$$

desarrollando los términos esto se convierte en:

$$A(x - x_0) + B(y - y_0) + C(z - z_0) = 0 \tag{2.2}$$

que es la forma punto-normal de la ecuación de un plano. Esta es sólo una ecuación lineal

$$ax + by + cz + d = 0 \tag{2.3}$$

donde:

$$d = -(ax_0 + by_0 + cz_0) \tag{2.4}$$

es un plano que tiene como vector el vector normal $n = (a, b, c)$. Esta ecuación para un plano recibe el nombre de forma general de la ecuación del plano.

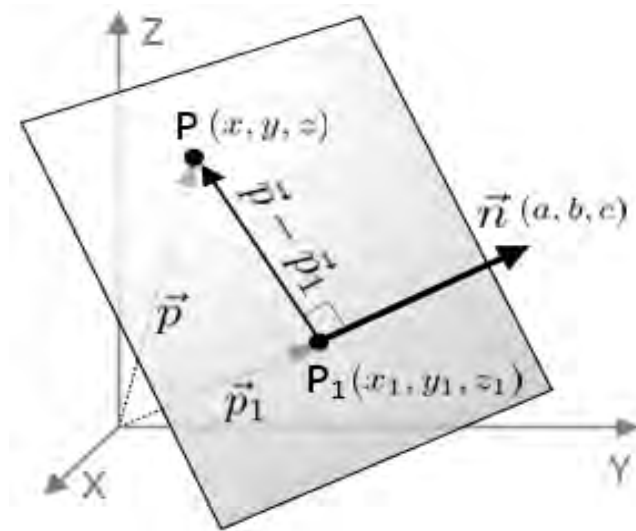


Figura 2.9: Ecuación de un plano definido por un punto y su normal.

2.4.1. Modelo del plano definido por tres puntos

Sea $p_1 = (x_1, y_1, z_1)$, $p_2 = (x_2, y_2, z_2)$, y $p_3 = (x_3, y_3, z_3)$ puntos en el espacio R^3 no-colineales.

Este plano también puede ser descrito por el “punto y un vector normal” de acuerdo a la descripción anterior. Un vector normal adecuado se da por el producto cruz.

$$n = (p_2 - p_1) \times (p_3 - p_1) \quad (2.5)$$

El punto r_0 puede considerarse como cualquiera de los puntos dados p_1 , p_2 o p_3 (o cualquier otro punto en el plano).

Distancia desde un punto a un plano.

Para un plano $\Pi : ax + by + cz + d = 0$ y un punto $P_1 = (x_1, y_1, z_1)$ no necesariamente en el plano, la distancia más corta de P_1 al plano es:

$$D = \frac{|ax_1 + by_1 + cz_1 + d|}{\sqrt{a^2 + b^2 + c^2}} \quad (2.6)$$

De lo cual podemos observar que el punto p_1 se encuentra en el plano si y sólo si $D = 0$.

Si $\sqrt{a^2 + b^2 + c^2} = 1$ significa que a , b , y c están normalizados, entonces la ecuación se convierte en:

$$D = |ax_1 + by_1 + cz_1 + d| \quad (2.7)$$

2.5. Algoritmo RANSAC

El algoritmo RANSAC (RANDOM Sample And Consensus) fue introducido por primera vez por Fischler y Bolles en 1981, como un método para estimar los parámetros de un determinado modelo a partir de un conjunto de datos contaminados por grandes cantidades de valores atípicos (outliers). Un dato es considerado un valor atípico si no encaja en el modelo propuesto, dentro de un umbral de error que define el valor máximo de desviación atribuible al efecto del ruido, en el caso contrario se denominan valores típicos (inliers) al conjunto de datos que ajustan en el modelo con la característica antes mencionada.

RANSAC selecciona uniformemente al azar un subconjunto de muestras de datos y lo utiliza para crear un modelo de estimación de parámetros. Luego se determina si las muestras están dentro de una tolerancia de error del modelo antes propuesto. Si estas muestras se consideran como parte del modelo generado se agrupan en un conjunto llamado *consenso*. De manera análoga se llaman *valores atípicos* al conjunto de datos que superan el umbral de error con respecto al modelo. Si el recuento de los datos agrupados en el consenso es suficientemente alto con respecto de los valores atípicos, se considera que el modelo se ajusta al conjunto de datos, siendo el modelo propuesto un modelo que se aproxima al conjunto total de datos.

El algoritmo consta de tres parámetros para estimar: (A) la distancia t para considerar si un punto es compatible o no con el modelo, (B) el número de iteraciones para buscar subconjuntos de decisión, y (C) el umbral T que es el número mínimo de puntos compatibles para considerar una buena estimación del modelo.

Umbral de distancia t para determinar compatibilidad dato/modelo. Se quiere elegir un umbral t tal que la probabilidad de que un punto pertenece es un valor típico es α . Este cálculo requiere conocer la distribución de probabilidad de la distancia de un valor típico del modelo.

Número de iteraciones. El número de iteraciones N se calcula en función de la probabilidad p de que un por lo menos un subconjunto que se elige aleatoriamente esta libre de valores atípicos.

Número mínimo T de puntos en el subconjunto de decisión. El número T se busca que sea similar al número de inliers que se supone que hay en el conjunto de datos.

- Dos planos distintos son paralelos o se intersecan en una línea.
- Una línea es paralela a un plano, lo cruza en un solo punto, o está contenida en el plano.
- Dos líneas distintas perpendiculares al mismo plano deben ser paralelas entre sí.

A continuación se muestra el pseudocódigo básico para el algoritmo RANSAC.

Algoritmo 1: RANSAC para obtener modelo del plano

input : Nube de puntos organizada

output: Modelo del plano

Condiciones iniciales;

$n \leftarrow$ numero mínimo de puntos para considerar un modelo aceptable;

$t \leftarrow$ distancia máxima aceptable para considera un punto dentro del modelo;

$errorModelo \leftarrow$ error acumulado de cada uno de los puntos al modelo propuesto;

Inicialización de variables;

$iteraciones = 0;$

$mejorModelo = vacio;$

$errorModelo =$ Algo realmente grande;

while $iteraciones < k$ **do**

 Generación del modelo a partir de datos aleatoriamente seleccionados;

$modeloPropuesto = f(datos);$

$modeloPropuesto = rand(datos);$

$modeloPropuesto \leftarrow f(p_1, p_2, p_3);$

$inliers = 0;$

$n = 800;$

for cada punto **in** datos **and not** en inliers **do**

 calcular error - Con la distancia de un punto al plano;

$error = \frac{|ax_1 + by_1 + cz_1 + d|}{\sqrt{a^2 + b^2 + c^2}};$

if punto ajusta en modeloPropuesto **with an** error **< than** t **then**

$inliers \leftarrow$ punto;

$errorModelo = errorModelo + error;$

if número de elementos **in** inliers **is** $> n$ **then**

 //Esto significa que tenemos un buen modelo ;

 //Verificamos si el modelo calculado supera al mejor modelo calculado con anterioridad.;

if $errorModelo < menorError$ **then**

$mejorAjuste = mejorModelo;$

$menorError = errorModelo;$

 incrementamos iteraciones;

Llegamos al numero de iteraciones k y devolvemos el mejor modelo obtenido;

return mejorAjuste;

2.6. Algoritmo PCA

El Análisis de Componentes Principales (PCA) ha sido llamado uno de los resultados más valiosos de la álgebra lineal [26]. PCA Se usa abundantemente en muchas disciplinas, desde la neurociencia hasta la computación gráfica debido a que es un método simple. El PCA proporciona una metodología para reducir un conjunto de datos complejos a una dimensión inferior.

El algoritmo PCA tiene sus bases en la estadística y parte de la idea de que se tiene un gran conjunto de datos, y se desea analizar ese conjunto en términos de las relaciones entre los puntos individuales que lo conforman. Se pretende analizar algunas de las medidas que podemos calcular en un conjunto de datos y lo que estas medidas dicen acerca de los datos en sí.

2.6.1. Desviación estándar

La desviación estándar es una medida de la dispersión de un conjunto de datos respecto de la media. Se calcula como la raíz cuadrada de la varianza, determinando la variación entre cada punto perteneciente al conjunto de datos respecto a la media. Si los puntos de datos están más lejos de la media, hay una desviación más alta dentro del conjunto de datos.

Dado que la desviación estándar puede ser interpretada como una medida de incertidumbre cuando se calcula el valor de esta en un grupo repetido de medidas nos da la precisión de éstas. Cuando se va a determinar si un grupo de medidas está de acuerdo con el modelo teórico, la desviación estándar de esas medidas es de vital importancia: si la media de las medidas está demasiado alejada de la predicción (con la distancia medida en desviaciones estándar), entonces consideramos que las medidas contradicen la teoría. Esto es coherente, ya que las mediciones caen fuera del rango de valores en el cual sería razonable esperar que ocurrieran si el modelo teórico fuera correcto. La desviación estándar es uno de varios parámetros de dispersión central; muestra la agrupación de los datos alrededor de un valor central (la media o promedio).

Por tanto para calcular la desviación estándar primero debemos calcular la media del conjunto de datos. De acuerdo con:

$$\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^n X_i}{n} \quad (2.8)$$

donde n es el número total de datos contenido en la muestra.

Cálculo de la desviación estándar.

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}{(n - 1)}} \quad (2.9)$$

2.6.2. Varianza

La noción de varianza se suele emplear en el ámbito de la estadística. Es utilizada para identificar a la media de las desviaciones cuadráticas de una variable de carácter aleatorio,

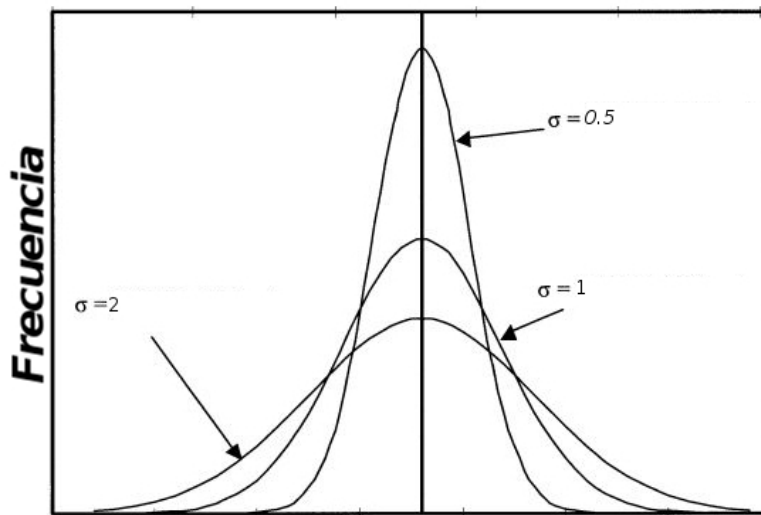


Figura 2.10: Distribución normal con media cero y diferentes desviaciones estándar.

considerando el valor medio de ésta.

La varianza de las variables aleatorias, por lo tanto, consiste en una medida vinculada a su dispersión. Se trata del valor esperado del cuadrado de la desviación de esa variable considerada frente su media y se mide en una unidad diferente. Por ejemplo: en los casos en que la variable mide una distancia en kilómetros, su varianza se expresa en kilómetros al cuadrado.

Cabe destacar que las medidas de dispersión (también identificadas con el nombre de medidas de variabilidad) se encargan de expresar la variabilidad de una distribución por medio de un número, en los casos en que las diferentes puntuaciones de la variable están muy alejadas de la media. A mayor valor de la medida de dispersión, mayor variabilidad. En cambio, a menor valor, más homogeneidad.

Por lo que respecta a su representación matemática se puede expresar como el cuadrado del valor de la desviación estándar, como se muestra a continuación.

$$s = \sigma^2 \quad (2.10)$$

$$s = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}{(n)} \quad (2.11)$$

2.6.3. Covarianza

Las dos últimas medidas que hemos observado son puramente uni-dimensionales. Conjuntos de datos como este podrían ser: alturas de todas las personas en la sala, las calificaciones para el último examen, etc. Sin embargo, muchos conjuntos de datos tienen más de una dimensión y el objetivo del Análisis de Componentes Principales son estos conjuntos de datos. En tal caso es importante observar si existe alguna relación entre las diferentes dimensiones. Por ejemplo, se podría tener como conjunto de datos tanto la altura de todos los estudiantes en una clase,

y la calificación que recibieron en un examen.

Se podría entonces realizar un análisis estadístico para observar si la altura de un estudiante tiene algún efecto en su calificación. La desviación estándar y la varianza sólo funcionan en una dimensión, de modo que podríamos solamente calcular la desviación estándar para cada dimensión de un conjunto de datos de forma independiente de las otras dimensiones.

Por lo tanto, si se tiene un conjunto de datos en 3 dimensiones (x, y, z) , entonces se podría medir la covarianza entre: las dimensiones (x, y) , las dimensiones (x, z) y las dimensiones (y, z) . Como se puede observar la medición de la covarianza entre (x, x) , (y, y) o (z, z) se puede reducir a calcular la varianza de cada dimensión respectivamente. La fórmula para la covarianza es muy similar a la fórmula para la varianza.

$$var(X) = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})(X_i - \bar{X})}{(n)} \quad (2.12)$$

$$cov(X, Y) = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{(n)} \quad (2.13)$$

2.6.4. Matriz de covarianzas

Cuando se dispone de un conjunto de datos multidimensionales la información obtenida de los cálculos de las covarianzas se dispone en forma de matriz para facilitar su manejo, tal matriz es llamada *Matriz de covarianzas*. La matriz de covarianzas es de dimensiones $n \times n$ donde n es el número de dimensiones totales en el conjunto de datos.

A continuación se muestra la matriz de covarianzas para un conjunto de datos de 3 dimensiones, llamadas x, y , y z .

$$C = \begin{bmatrix} cov(x, x) & cov(x, y) & cov(x, z) \\ cov(y, x) & cov(y, y) & cov(y, z) \\ cov(z, x) & cov(z, y) & cov(z, z) \end{bmatrix} \quad (2.14)$$

2.6.5. Vectores y valores propios

Se conocen como valores propios de una matriz al conjunto de valores que resuelven la ecuación:

$$|A - \lambda I| = 0 \quad (2.15)$$

$$det(A - \lambda I) = 0 \quad (2.16)$$

También puede observarse que λ es un vector de valores escalares que a su vez son solución del polinomio de grado n , donde n es la dimensión de la matriz A :

$$|A - \lambda I| = (\lambda_1 - \lambda)(\lambda_2 - \lambda)(\lambda_3 - \lambda) \dots (\lambda_n - \lambda) \quad (2.17)$$

Por lo tanto, existe un vector propio asociado a cada uno de los valores propios de la matriz A:

$$(A - \lambda I)\vec{v} = 0 \tag{2.18}$$

Para encontrar el valor de los vectores característicos de la matriz A se determinan los valores característicos de la matriz A y se resuelve la ecuación:

$$\begin{aligned} (A - \lambda_1 I)\vec{v}_1 &= 0 \\ (A - \lambda_2 I)\vec{v}_2 &= 0 \\ &\cdot \\ &\cdot \\ &\cdot \\ (A - \lambda_n I)\vec{v}_n &= 0 \end{aligned} \tag{2.19}$$

Es importante observar que el conjunto de todos los vectores propios asociados a un valor propio dado \vec{E}_λ , junto con el vector 0, forman un espacio vectorial.

Por lo tanto, \vec{E}_λ representa un subespacio de R^n porque es el espacio solución de un sistema homogéneo de ecuaciones lineales y está conformado por matrices columna \vec{v} de $n \times 1$ que pertenecen a R^n .

Los vectores característicos $\vec{v}_1, \vec{v}_2, \vec{v}_3 \dots \vec{v}_n$, asociados a los valores característicos distintos $\lambda_1, \lambda_2, \dots \lambda_n$ de la matriz A, **son linealmente independientes, y este conjunto es una base en R^n** . Si la matriz A es simétrica y real, entonces la base es ortogonal.

Es importante resaltar estas dos características puesto que la aplicación que se desarrollará en este trabajo se basa en el principio de la independencia lineal de los vectores propios y que estos construyen una base ortogonal del conjunto de datos observados.

Capítulo 3

Detección de objetos

En este capítulo se aborda el desarrollo de los algoritmos para la detección y extracción de características de objetos propuestos en los objetivos de este trabajo. La metodología de desarrollo de este capítulo se divide en las tareas descritas a continuación:

- Segmentación de planos
- Extracción de planos
- Segmentación de objetos
- Cálculo del centroide de un objeto
- Estimación a la orientación de un objeto

Es importante mencionar que los desarrollos reportados en este trabajo fueron realizados en la plataforma para el desarrollo de software para robots ROS (Robot Operative System por sus siglas en inglés)[11], alojado en el sistema operativo Ubuntu 16.04. (Ver sección 5)

3.1. Segmentación de planos con RANSAC

Para el desarrollo del algoritmo RANSAC se utilizó el sensor Kinect dado que este sensor, además de una imagen de color, proporciona información sobre la profundidad de los objetos. Con un manejo adecuado de ambos datos se pueden conseguir avances notables en el campo de la visión computacional. Para el desarrollo del algoritmo se hizo uso de la información de profundidad de los objetos.

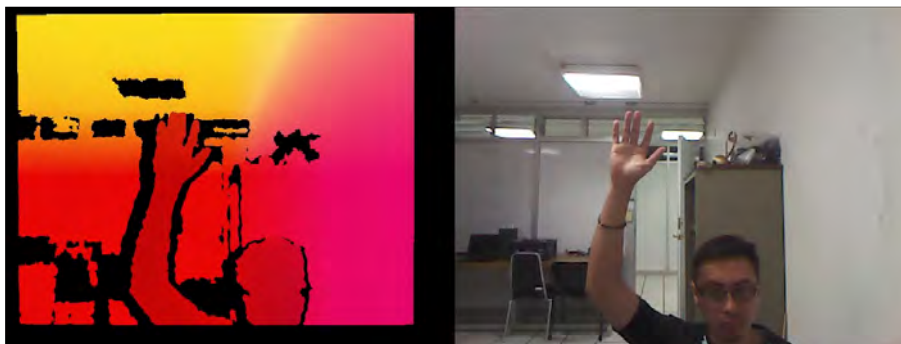


Figura 3.1: Imagen típica de la información otorgada por el sensor Kinect.

Se desarrolló un programa en lenguaje C++ para segmentar los planos. La información de profundidad entregada por el Kinect, se da en una matriz donde cada elemento i, j contiene la información de profundidad obtenida por el sensor, como se explica a continuación.

Cada elemento de la matriz contiene información de un punto $p = (x, y, z)$ donde el haz infrarrojo fue reflejado, esto nos permite conocer la distancia a la cual se encuentra un objeto, o su superficie. La información que nos entrega el sensor en forma de matriz es de dimensiones 640X480 por tanto consta de 307,200 elementos en total. Dentro de este conjunto de datos se buscan las superficies planas.

Se programó el algoritmo RANSAC para extraer planos en C++, el código se puede consultar en la página [27].

Para la correcta implementación del algoritmo fue necesario tomar algunas consideraciones, por ejemplo: descartar del procesamiento todos aquellos píxeles que no proporcionen información relevante de profundidad para reducir el tiempo de procesamiento del algoritmo.

Para la construcción de planos se tomaron tres puntos aleatorios y se construyeron dos vectores a partir de los puntos y se realizó el producto cruz entre estos.

$$\begin{aligned} p_1 &= rnd(datos) \\ p_2 &= rnd(datos) \\ p_3 &= rnd(datos) \\ \vec{v}_1 &= p_1 - p_2 \\ \vec{v}_2 &= p_1 - p_3 \\ \vec{N} &= \vec{v}_1 \times \vec{v}_2 \end{aligned} \tag{3.1}$$

Conocemos la ecuación general del plano:

$$\Pi : Ax + By + Cz + D = 0 \tag{3.2}$$

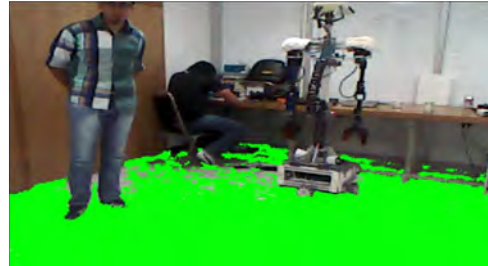
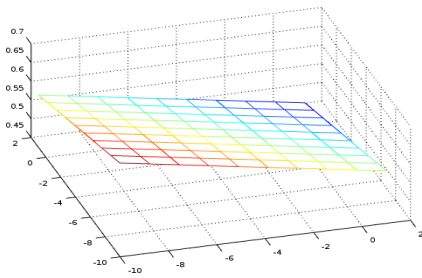
donde: A, B, C son las componentes del vector normal respectivamente y D la podemos calcular como:

$$D = -(Ap_{1_x} + Bp_{1_y} + Cp_{1_z}) \tag{3.3}$$

Por lo tanto con tres puntos seleccionados aleatoriamente tenemos un modelo de plano generado aleatoriamente, lo cual es el primer requerimiento para el algoritmo.

Posteriormente se comparó el resto de la información con ese modelo propuesto aleatoriamente y verificamos que tan buen modelo es. Para ello calculamos la distancia euclidiana de cada punto al plano propuesto, si la distancia es menor que cierto umbral lo consideramos como parte del modelo e incrementamos el número de valores típicos que empatan con el modelo (“inliers”).

Del mismo modo se buscaba que el número de valores típicos que empataran con el modelo fuera al menos el 60 % del total de datos. De otro modo la implementación a nivel de algoritmo devolvía un modelo vacío. En apartado correspondiente a los resultados se trata este tema con mayor profundidad.



(a) Grafico de un plano en tercera dimensión. (b) Segmentación de un plano utilizando el algoritmo RANSAC con un número de iteraciones igual a 70 y un umbral de 2 cm (Plano en color verde).

Figura 3.2: Planos y su representación en 3D.

Por ahora el algoritmo no restringe su búsqueda a planos horizontales o verticales, queda como trabajo futuro el desarrollo de una búsqueda selectiva de planos con características similares a una mesa, destacando características de horizontalidad y altura.

3.2. Extracción de objetos

Una vez que se encontró la nube de puntos perteneciente al plano, se prosiguió a ubicar espacialmente los objetos que se encontraban sobre el plano. Se realizó la extracción de objetos con las siguientes restricciones:

Algoritmo 2: Algoritmo para extracción de objetos de una nube de puntos organizada.

input : Nube de puntos organizada

input : Modelo del plano

Sea: **Condiciones iniciales;**

$p \leftarrow$ Conjunto total de puntos obtenidos del sensor;

$p_\pi \leftarrow$ Conjunto de puntos pertenecientes al modelo del plano;

$p_0 \leftarrow$ Conjunto de puntos pertenecientes a un objeto;

$p_{extra} \leftarrow$ Conjunto de puntos con restricciones adicionales ;

$p \leftarrow \{p_1, p_2, p_3 \dots p_n\}$;

$p_\pi \leftarrow \{p_{\pi_1}, p_{\pi_2}, p_{\pi_3} \dots p_{\pi_n}\}$;

$p_0 \leftarrow \{\emptyset\}$;

$p_{extra} \leftarrow \{(x, y, z) : x < 0.5[m], z < p.z \forall p \in p_\pi\}$;

$p_0 = p - p_\pi - p_{extra}$;

return p_0 ;

De otro modo esto sería igual a:



(a) Extracción de los puntos que pertenecen al objeto. (b) Información de profundidad del objeto.

Figura 3.3: Extracción de información del objeto.

- Supresión de los puntos pertenecientes al plano.
- Supresión de los puntos por debajo del plano.
- Supresión de los puntos más allá de 50[cm] respecto al punto más cercano en x .

Posterior a este proceso tenemos como resultado un conjunto de puntos reflejados sobre un objeto sólido con las distancias proyectadas sobre los tres ejes coordenados respecto del robot.

3.3. Aproximación de orientación de objetos con PCA

El análisis de componentes principales se usa abundantemente en muchas formas de análisis de datos. En este caso se utilizará como una metodología para reducir un conjunto de datos a una dimensión inferior. Más concretamente la forma en que podemos obtener una base ortogonal del conjunto de datos, que represente la distribución de los puntos proyectados sobre el objeto. Esta base, representará la dirección de la distribución de los puntos del objeto, y por tanto encontraremos la dirección del objeto mismo respecto al robot.

3.3.1. Adquisición de datos y cálculo de la media

La adquisición de datos se realizó mediante la extracción de los puntos pertenecientes al objeto. Cada uno de los datos perteneciente al conjunto de puntos posee tres características:

- La distancia al objeto proyectada sobre el eje x
- La distancia al objeto proyectada sobre el eje y
- La distancia al objeto proyectada sobre el eje z

Por lo tanto, de una nube de puntos como la mostrada en la figura [?] podemos extraer medidas de dispersión, y medidas de tendencia central. Se partió con el cálculo de la media de los datos. $\bar{X}, \bar{Y}, \bar{Z}$. El punto $P(\bar{X}, \bar{Y}, \bar{Z})$ representa el centroide del objeto. Conociendo este punto podemos conocer la ubicación espacial del objeto respecto del robot y determinar si es manipulable (si se encuentra dentro del área de trabajo) y conocer las coordenadas a donde debemos llevar el efector final del manipulador.

Aunque el cálculo del centroide del objeto es operacionalmente simple este resultado puede no representar correctamente el centroide real del objeto. La extracción de la información del objeto está sujeta a la perspectiva de la cámara con respecto del objeto en cuestión. De esta manera si la posición de la cámara con respecto del objeto se aproxima a una vista lateral se reducirá la cantidad de haces de luz proyectada sobre la superficie del objeto. En la figura [?] se logra apreciar que el punto representante del centroide no coincide con el centroide real de los objetos.

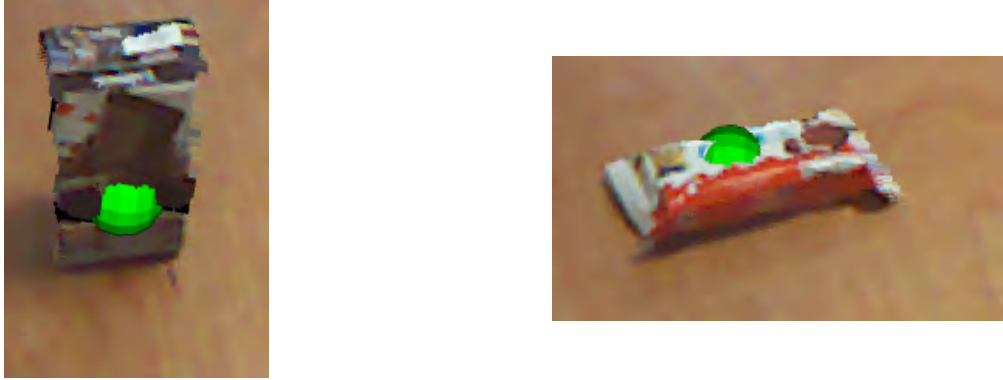


Figura 3.4: Segmentación de un objeto y su correspondiente centroide (punto verde).

3.3.2. Cálculo de la matriz de covarianza

Dada una variable estadística n -dimensional $(X_1, X_2, X_3, \dots, X_n)$, llamaremos matriz de covarianzas a la matriz cuadrada, $n \times n$, que disponga en su diagonal principal de las varianzas de cada una de las distribuciones marginales unidimensionales, y en los elementos no-diagonales (i, j) de las correspondientes covarianzas entre cada dos variables S_{ij} .

Para ello se hizo uso de las expresiones matemáticas correspondientes:

$$var(X) = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})(X_i - \bar{X})}{n} \quad (3.4)$$

$$cov(X, Y) = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{n} \quad (3.5)$$

A continuación se anexa en código correspondiente al cálculo de las varianzas y covarianzas.

```

1 //Calculate covariance matrix
2 for(int j = 0; j < object.rows; j++)
3   for (int i = 0; i < object.cols; i++)
4     {
5       px = object.at<cv::Point3f>(j, i);
6       if ( px != cv::Point3f(0.0, 0.0, 0.0) && px != cv::Point3f(0, 255, 0))
7         {
8           var_x += pow( (px.x - centroid[0]), 2 );
9           var_y += pow( (px.y - centroid[1]), 2 );
10          var_z += pow( (px.z - centroid[2]), 2 );
11          cov_xy += ( px.x - centroid[0] )*( px.y - centroid[1] );
12          cov_xz += ( px.x - centroid[0] )*( px.z - centroid[2] );
13          cov_yz += ( px.y - centroid[1] )*( px.z - centroid[2] );
14          n++;

```

```

15     }
16   }
17
18   var_x /= n;
19   var_y /= n;
20   var_z /= n;
21
22   cov_xy /= n;
23   cov_xz /= n;
24   cov_yz /= n;
25
26   cov_matrix << var_x, cov_xy, cov_xz,
27                cov_xy, var_y, cov_yz,
28                cov_xz, cov_yz, var_z;
29

```

Algoritmo 3.1: Cálculo de varianzas y covarianzas

Posteriormente se propuso a encontrar los valores de los vectores propios asociados a la matriz de covarianzas. En la literatura existen múltiples métodos numéricos para la solución de esta problemática, como la puesta a prueba de dichos algoritmos no es el propósito de este trabajo se optó por utilizar la librería **eigen**. Por tanto, una vez construida la matriz de covarianzas M , se utiliza la instrucción:

```

1 Eigen::SelfAdjointEigenSolver<Eigen::MatrixXf> eig(cov_matrix);

```

Algoritmo 3.2: Cálculo de varianzas y covarianzas

La instrucción *Eigen::SelfAdjointEigenSolver<Eigen::MatrixXf>* nos devuelve un objeto *eig* cuyos atributos son *eigenvalues()* y *eigenvectors()*. Con ayuda de esta librería podemos obtener fácilmente los vectores propios de la matriz M . Es importante mencionar que el atributo *eigenvectors()* del objeto *eig* se encuentra normalizado; por lo tanto es conveniente darle un escalamiento relacionado con la dispersión de los datos. De este modo se optó por multiplicar cada uno de los vectores propios por su correspondiente valor de desviación estándar.



Figura 3.5: Segmentación de un objeto y sus correspondientes ejes principales (rojo).

3.3.3. Cálculo de rotación del objeto

Una vez que se obtuvieron los eigenvectores de la matriz de covarianzas estos indican las direcciones en los cuales tiene una mayor distribución la nube de puntos del objeto en cuestión. Por la naturaleza de los eigen-vectores y al tratarse de un espacio tridimensional, estos ejes forman un sistema ortogonal; por lo tanto son perpendiculares entre sí.

Por tal motivo basta con conocer los cosenos directores de cada uno de los eigenvectores con el eje coordinado del robot, compararlos en magnitud y determinar los ángulos roll, pitch y

yaw del objeto con respecto del robot.

Componentes y cosenos directores de un vector.

Se llama componentes de un vector \vec{A} respecto del sistema de coordenadas con origen O y ejes x , y a las proyecciones de \vec{A} sobre los ejes, sea dicho de otro modo, los números:

$$\begin{aligned} a_1 &= x_2 - x_1 \\ a_2 &= y_2 - y_1 \end{aligned} \quad (3.6)$$

Transaladando esta idea a un espacio tridimensional los componentes de un vector están determinados por la forma:

$$\begin{aligned} a_1 &= x_2 - x_1 \\ a_2 &= y_2 - y_1 \\ a_3 &= z_2 - z_1 \end{aligned} \quad (3.7)$$

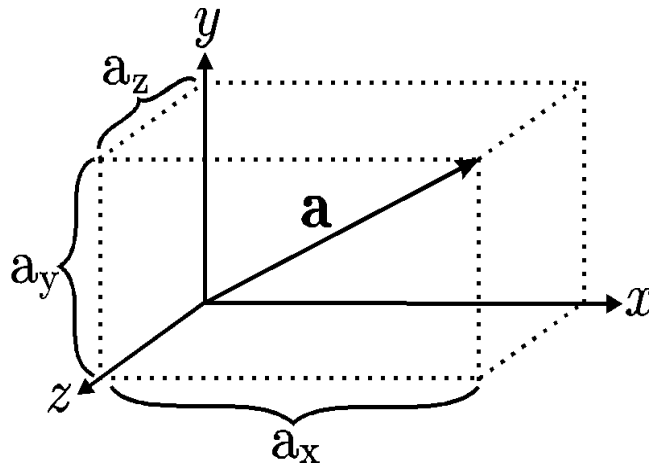


Figura 3.6: Componentes de un vector en el espacio.

En general, se tiene $\vec{A} = (a_1, a_2, a_3,)$ para indicar que a_1, a_2, a_3 son las componentes del vector \vec{A} . Esas componentes son números que pueden ser positivos o negativos.

Por lo tanto:

$$|\vec{A}| = \sqrt{a_1^2 + a_2^2 + a_3^2} \quad (3.8)$$

Expresión que siempre es positiva y da el módulo del vector en función de sus componentes.

Se llaman *cosenos directores* de un vector, respecto de un sistema de coordenadas ortogonales con origen O y ejes x , y , z , a los cosenos de los ángulos que el mismo forma con el

sentido positivo de los ejes coordenados.

Los ángulos deben ser tomados entre 0 y π , de manera que los cosenos directores pueden ser positivos o negativos. Si los ángulos del vector $\vec{A}(a_1, a_2, a_3)$ con los respectivos ejes coordenados los representamos por α , β y γ , los cosenos directores se deducen de las fórmulas:

$$\begin{aligned} a_1 &= |\vec{A}| * \cos\alpha \\ a_2 &= |\vec{A}| * \cos\beta \\ a_3 &= |\vec{A}| * \cos\gamma \end{aligned} \tag{3.9}$$

De las relaciones anteriores se deduce también:

$$\begin{aligned} \cos\alpha &= \frac{a_1}{\sqrt{a_1^2 + a_2^2 + a_3^2}} \\ \cos\beta &= \frac{a_2}{\sqrt{a_1^2 + a_2^2 + a_3^2}} \\ \cos\gamma &= \frac{a_3}{\sqrt{a_1^2 + a_2^2 + a_3^2}} \end{aligned} \tag{3.10}$$

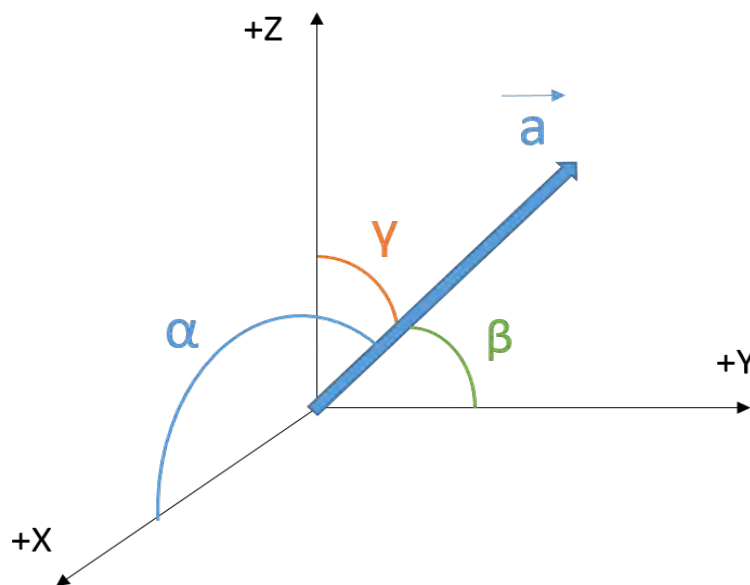


Figura 3.7: Cosenos directores en el espacio.

La importancia de abordar este tópico se debe a que en desarrollo del presente trabajo se hace uso de los cosenos directores para determinar la dirección en que puntan los vectores resultado del análisis de componentes principales, por tanto se hace uso de esta característica geométrica de los vectores para conocer el ángulo de orientación de los objetos.

Capítulo 4

Características del manipulador de 7DOF

En esta sección se hablará de las características mecánicas del brazo robótico ensamblado en el robot de servicio Justina. Se describirán los elementos que componen el brazo robótico haciendo énfasis en la ubicación de los actuadores y cómo influye esto en el modelo matemático del mismo. Posteriormente se abordarán los temas respectivos a la cinemática de un brazo robótico de 7DOF.

4.1. Descripción del hardware

Los servomotores Dynamixel son un sistema de actuador inteligente desarrollados con el propósito de funcionar como uniones un robot o estructura mecánica. Los servomotores Dynamixel están diseñados para ser modulares y soportar la conexión en cadena en cualquier robot o diseño mecánico. Este tipo de servomotores es popular por los beneficios que ofrece: movimientos potentes y flexibles [28].

El conjunto de servomotores Dynamixel son un grupo de actuadores de alto rendimiento con reductor, controlador y un protocolo de comunicación completamente integrados. El estado del actuador se puede leer y monitorear a través de un flujo de paquetes de datos [29].

4.1.1. Motores dynamixel Serie MX

Los motores Dynamixel de la serie MX cuentan con la implementación de un algoritmo de control PID para mantener la posición del eje. Las ganancias del algoritmo de control PID se pueden ajustar individualmente para cada servo, lo que le permite controlar la velocidad y par del motor. Todos los servos de la serie MX usan un voltaje nominal de 12v.

En lo que respecta a la parte mecánica, todos los servos Dynamixel son compatibles con una amplia variedad de bridas, acoplamientos y sujetadores lo cual facilita la construcción de cualquier configuración deseada. Este conjunto de elementos mecánicos permite una conexión directa de cualquier modelo de servomotores Dynamixel, lo que proporciona una gran variedad de configuraciones para cualquier necesidad. Dada la gran variedad de configuraciones, este tipo de elementos de unión y fijación resultó de gran ayuda mecánica al momento de construir el manipulador donde se implementaron los algoritmos descritos en el presente trabajo.

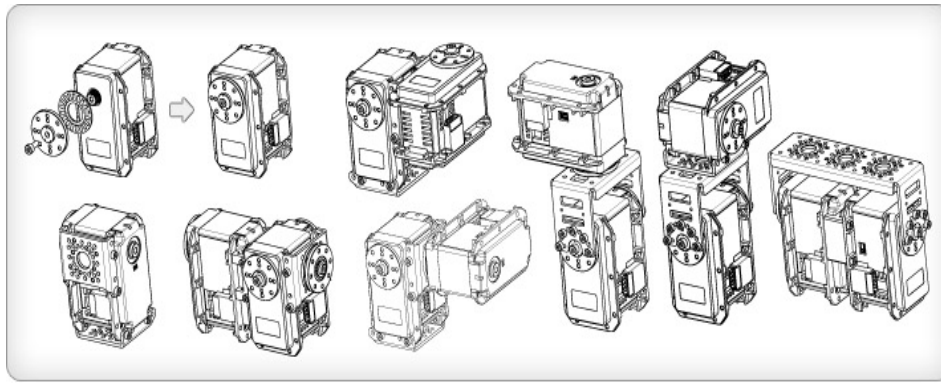


Figura 4.1: Variedad de ensamblajes para servomotores.

Resumiendo las características de los servomotores de la serie MX, podemos enlistar las siguientes:

- Detección de posición sin contacto debido a la implementación del sensor de efecto hall.
- Comunicación de alta velocidad de hasta 4.5 Mbps.
- Control PID para autocorrección en posicionamiento. [4096 steps]
- Control de par basado en corriente (2.69mA/step)

Si se desea controlar este servo Dynamixel desde un equipo de computo es necesario contar con un dispositivo que facilite la comunicación entre este y el microprocesador de cada uno de los servomotores. El dispositivo que cumple con esta funcionalidad es el USB2Dynamixel, utilizado en la implementación de este trabajo.

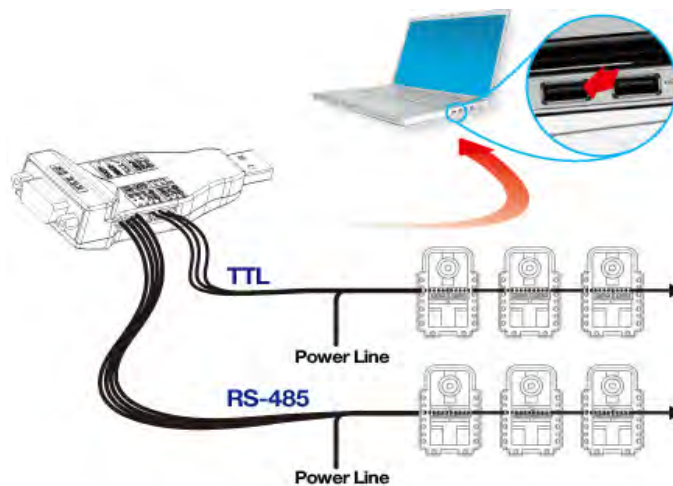


Figura 4.2: Dispositivo de comunicación USB a protocolo serial.

Los motores que componen esta gama comparten características, las cuales se mencionan a continuación:

| MOTORES GAMA MX | | | |
|----------------------------------|---------------------------------------|-----|-------|
| Voltaje de operación | 14.8v | 12v | 11.1v |
| Protocolo | TTL Serial Asincrono | | |
| Velocidad del puerto | 8000bps - 3Mbps | | |
| Retroalimentación de posición | SI | | |
| Retroalimentación de temperatura | SI | | |
| Control PID | SI | | |
| Material | Carcasa plástica y reducción metálica | | |
| Motor | Maxon RE-MAX | | |

Tabla 4.1: Características sobresalientes de los servomotores dynamixel de gamma MX.

4.1.2. Características de los servomotores dynamixel MX-106

| 12 volts | | | |
|-----------------------|-------------------------------|----------------------|----------------------|
| Voltaje de operación | MX-106 | MX-64 | MX-28 |
| Par de bloqueo | 8.4[N.m] (5.2[A]) | 6.0[N.m] (4.1[A]) | 2.5[N.m] (1.4[A]) |
| Velocidad sin carga | 45rpm | 63rpm | 55rpm |
| Peso | 153g | 126g | 72g |
| Resolución | 0.088 grado/valor de registro | | |
| Relación de reducción | 1/200 | | |
| Corriente máxima | 5.2A@12V | 4.1A@12V | 1.4A@12V |

Tabla 4.2: Características dynamixel modelo MX-106 [28].



Figura 4.3: Servomotor dynamixel modelo MX-106.

La importancia de conocer las características del servomotor MX-106 radican en poder determinar si las capacidades del actuador son suficientes para la aplicación debida. En la configuración del manipulador se tienen dos motores del modelo antes mencionado en un acoplamiento paralelo compartiendo el mismo eje de acción con lo cual se tiene la suma del par de torsión en ese eje. La suma total del par proporcionado por el arreglo de servomotores Dynamixel MX-106 es de 16.8[N.m].

Se realizó la medición de la masa total de manipulador, siendo esta de $1.8[kg]$ y por tanto

$$\begin{aligned} p &= mg \\ &= 1.8[kg] \cdot 9.81[m/s^2] \\ &= 17.658[N] \end{aligned} \tag{4.1}$$

se sabe que un par de fuerzas está caracterizado por el momento que estas generan:

$$M = F_1 d = F_2 d \tag{4.2}$$

Se toma el caso límite donde suponemos el peso ejercido como una carga concentrada en el extremo del manipulador $d = 0.70[m]$, además suponemos el caso de una viga en catilibre con donde el par máximo requerido es ejercido en el extremo que sirve de soporte, con lo cual se tiene la configuración mostrada en la figura 4.4. Aplicando (ec. 4.2) tenemos un par ejercido por el peso del manipulador de $M = 12.3606[N.m]$.

$$\begin{aligned} Par_{carga} &< Par_{suministrado} \\ 12.3606 &< 16.8[N.m] \end{aligned} \tag{4.3}$$

Se observó que aún en el caso límite el par suministrado por el arreglo de servomotores en modo paralelo es suficiente para mover el manipulador.

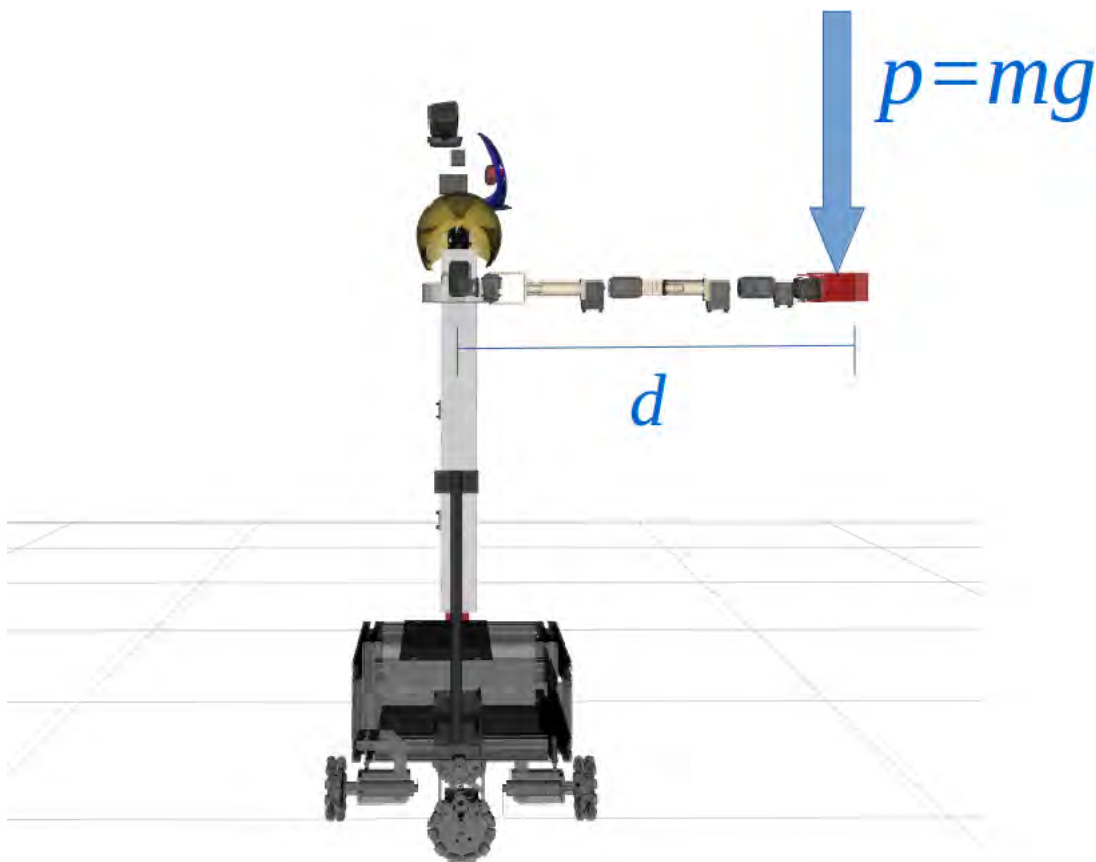


Figura 4.4: Representación de la descomposición de par para el manipulador de 7DOF en un robot de servicio.

Por otro lado es importante conocer la estructura de transmisión de la información de un servomotor con el dispositivo controlador. Para ello los servomotores dynamixel cuentan con un protocolo de comunicación serial asincrono, el cual transmite una serie de datos en una trama, como se ilustra en la figura 4.5.



Figura 4.5: Estructura de una trama de información como método de comunicación serial.

El significado de cada byte que compone al paquete datos es el siguiente:

- **0xFF 0xFF** : Es la instrucción que marca el inicio del paquete.
- **ID** : Es el ID de cada servomotor particular en la cadena.
- **LENGTH** : Es el tamaño del paquete. El tamaño es calculado como el numero de parámetros más dos (N+2).
- **INSTRUCTION** : Indica el tipo de instrucción que ejecutará el servomotor dynamixel.
 - PING
 - READ_DATA
 - WRITE_DATA
 - REG_WRITE
 - ACTION
 - RESET
 - SYN_WRITE
- **PARAMETER 0...N** : Este parámetro se usa cuando la instrucción requiere datos auxiliares.
- **CHECK SUM** : Se usa para verificar si el paquete de datos se dañó durante la comunicación.

A continuación se muestra una tabla con las características más relevantes de los registros que posee cada uno de los servomotores dynamixel.

| AREA | Dirección | Nombre | Descripción | Acceso |
|------|-----------|---------------------|---|--------|
| | 3 | ID | Identificador del motor | L/E |
| | 4 | Baud Rate | Velocidad transmisión datos dynamixel | L/E |
| | 10 | Drive mode | Configuraciones en modo dual | L/E |
| | 14 | Max Torque(L) | Byte bajo del registro Máx torque | L/E |
| | 15 | Max Torque(H) | Byte alto del registro Máx torque | L/E |
| | 24 | Torque Enable | On Off Torque | L/E |
| | 26 | D gain | Ganancia de control derivativa | L/E |
| | 27 | I gain | Ganancia de control integral | L/E |
| | 28 | P gain | Ganancia de control proporcional | L/E |
| | 30 | Goal position(L) | Byte bajo del registro para una posición deseada | L/E |
| | 31 | Goal position(H) | Byte alto del registro para una posición deseada | L/E |
| | 32 | Moving Speed(L) | Byte bajo del registro para una velocidad deseada | L/E |
| | 33 | Moving Speed(H) | Byte alto del registro para una velocidad deseada | L/E |
| | 34 | Torque Limit(L) | Byte bajo del registro para un par deseado | L/E |
| | 35 | Torque Limit(H) | Byte alto del registro para un par deseado | L/E |
| | 36 | Present position(L) | Byte bajo del registro de la posición presente | L |
| | 37 | Present position(H) | Byte alto del registro de la posición presente | L |
| | 40 | Present load(L) | Byte bajo del registro de la carga presente | L |
| | 41 | Present load(H) | Byte alto del registro de la carga presente | L |

Tabla 4.3: Tabla de registros para servomotores Dynamixel de la gama MX.

4.1.3. Características de conexión

Se ha mencionado con anterioridad que el brazo robótico con el cual se realizaron las pruebas correspondientes para este trabajo consta de 10 servomotores dynamixel de la gama MX y de diferentes modelos. Para facilitar la comunicación entre los diferentes modelos de servomotores se utilizó un método de conexión *daisy chain* en cual permite una conexión en cadena entre servomotores, asignándole un ID a cada servomotor y realizando la comunicación a través de un solo puerto.

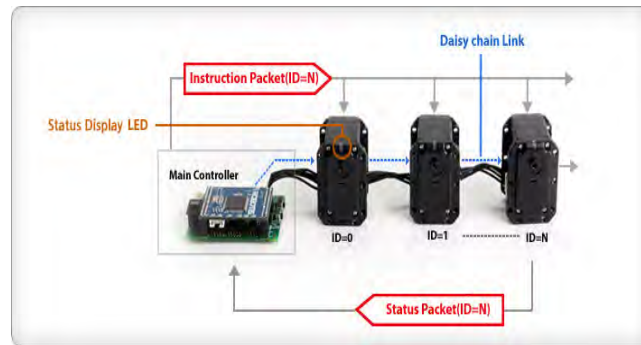


Figura 4.6: Servomotores dynamixel en conexión daisy chain.

El sistema *daisy chain* es un esquema de conexiones que forman una sucesión de enlaces, tal que el dispositivo A se encuentra conectado al dispositivo B y este, a su vez, se encuentra conectado a un dispositivo C y así sucesivamente. Es importante señalar que en este tipo de conexión los dispositivos no forman redes, en tal caso el dispositivo C no podría estar conectado al dispositivo A. Otro aspecto importante de resaltar es que en este tipo de conexiones al no poder formar redes la comunicación se realiza dispositivo a dispositivo, por tanto los dispositivos últimos en la cadena pueden presentar retraso o fallas eléctricas con respecto de los dispositivos primeros en orden de la cadena.

4.2. Descripción de los elementos del sistema de manipulación

El hardware del manipulador está compuesto por un total de 10 servomotores Dynamixel fabricados por la compañía Robotis [29]. Esta compañía cuenta con diversas gamas de modelos de servomotores según las necesidades de la aplicación. A continuación se describirá el sistema en orden descendente.

En la parte superior del brazo robótico se encuentran dos servomotores Dynamixel MX-106 conectados como maestro-esclavo, configurados en este modo trabajan de manera conjunta aumentando el par unitario de cada uno de los servomotores. Dadas las características antes descritas en la tabla 4.2 podemos observar que la configuración de servomotores entrega un par de torsión máximo a rotor bloqueado de $192.1[kg.cm]$ @ 12V. El sentido de giro positivo del arreglo de servomotores es el mostrado en la figura 4.7.

La configuración maestro-esclavo es un método de control simultáneo para dos servomotores Dynamixel, esta configuración es sumamente útil cuando se trata de construir una junta cuyo

eje de acción es coincidente. Los motores respectivos maestro y esclavo deben estar conectados mediante un cable de sincronización. como se muestra en la figura[4.7]. El servomotor esclavo es directamente controlado por la señal PWM del maestro transmitida a través del cable de sincronización. Es importante mencionar que la información de la posición, velocidad y corriente deseada es ignorada; puesto que esta información depende unicamente del maestro.

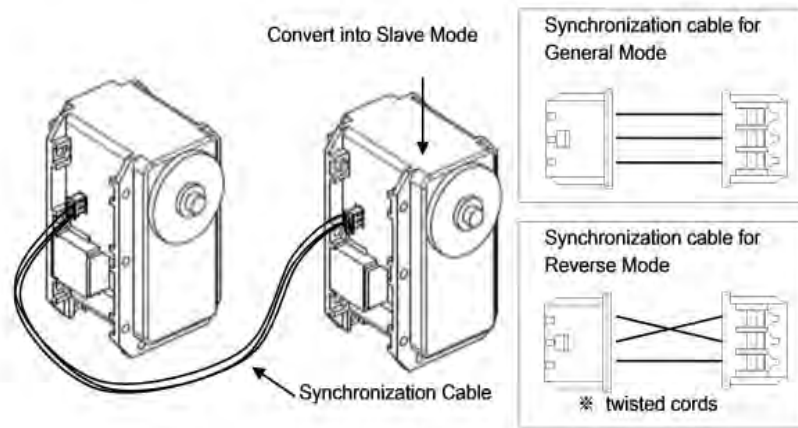


Figura 4.7: Configuración maestro-esclavo en servomotores dynamixel.

En la configuración maestro-esclavo, el esclavo puede configurarse para adoptar un sentido de giro inverso en caso que el acoplamiento mecánico así lo requiera. Dentro de este modo el servomotor esclavo tendrá la misma velocidad que el motor maestro, solo diferenciado por el sentido inverso de giro.

Posteriormente se encuentra un servomotor modelo MX-106, ubicado en una disposición horizontal. Unido a este servomotor se encuentra un eslabón obtenido mediante técnicas de manufactura aditiva. Dado que la construcción del brazo robótico esta pensada desde el punto de vista antropomórfico, este conjunto de servomotores, el maestro-esclavo y el servomotor MX-106 describen los grados de libertad que emulan el movimiento de un hombro humano.

El eslabón número 1 obtenido mediante técnicas de manufactura aditiva funge como elemento de unión entre servomotores. Al final de este elemento de unión se encuentra un servomotor MX-64 cuyo eje de acción es perpendicular respecto a la base el brazo. Estos tres servomotores describen los movimientos del hombro en comparación con un brazo humano. Directamente acoplado a este servomotor se encuentra otro servomotor modelo MX-106 el cual realiza el símil con un codo humano (figura 4.8).

Continuando en orden descendente, se encuentra un segundo eslabón utilizado como elemento de unión. En el extremo de este elemento se encuentra un servomotor MX-106, posteriormente un MX-64 y por último un servomotor modelo MX-28. Estos tres elementos construyen un sistema similar al de la muñeca de un brazo humano.

Por último, se encuentra el efector final compuesto de dos actuadores MX-28 ubicados en disposición horizontal. En el eje de acción de cada uno de estos se encuentra una pieza obtenida mediante impresión 3D que funge como sujetador para manipular objetos.

Como podemos observar el brazo robótico consta de un total de 10 servomotores conectados en *daisy chain*.



Figura 4.8: Diseño asistido por computadora del brazo robótico del robot Justina. Se realizó en modelado de partes utilizando el software SolidWorks(c). Muestra del ensamble final.

4.3. Cinemática directa

El problema de cinemática directa consiste en conocer la posición (x, y, z) del efector final dada una determinada configuración de ángulos para el conjunto de actuadores que forman el sistema mecánico. Para ello se describe la posición del efector final en términos de las transformaciones existentes entre este y la base fija del manipulador.

4.3.1. Teoría transformaciones y medidas del manipulador

Se partió del sistema mecánico previamente construido del brazo robótico del robot de servicio Justina. Para ello se realizaron mediciones de distancias entre los respectivos ejes de acción de cada uno de los actuadores a fin describir los desplazamientos de los sistemas de referencia en el brazo robótico.

Es importante mencionar que para la descripción de las transformaciones en la plataforma ROS, podemos construir la matriz de rotación de tal manera que incluyamos las rotaciones y desplazamientos en los tres ejes coordenados. Esta característica nos proporciona una ventaja sobre las técnicas de descripción de cinemática directa convencionales, tal es el caso del Método Denavit-Hartenberg donde el sistema de transformaciones debe ser descrito utilizando, únicamente, dos rotaciones y dos traslaciones según sus convenciones.

Es importante mencionar esta característica puesto que en algunos casos la convención Denavit-Hartenberg encuentra limitaciones para describir algunas transformaciones arbitrarias. En la representación Denavit-Hartenberg solo hay cuatro parámetros. Pues, mientras que el sistema de referencia i esté rígidamente unido al enlace i , tenemos la libertad para elegir el

origen y los ejes de coordenadas del sistema de referencia $i+1$.

Claramente, no es posible representar una transformación homogénea arbitraria usando solo cuatro parámetros. Por lo tanto, comenzamos por determinar qué transformaciones homogéneas se pueden expresar en la forma D_H.

Supongamos que tenemos dos marcos, indicados por los cuadros 0 y 1, respectivamente. Entonces existe una única matriz de transformación homogénea A que toma las coordenadas del sistema de referencia 1 y las expresa en términos del sistema de referencia 0. Ahora, es necesario aclarar que los sistemas de referencia deben tener dos características adicionales:

- (DH1): El eje x_1 es perpendicular al eje z_0
- (DH2): El eje x_1 intersecta el eje z_0 [23]

$$T_n^{n-1} = T_{Z_{n-1}}(d_n) * R_z(\theta_n) * T_{x_n}(a_n) * R_{x_n}(\alpha) \quad (4.4)$$

$$T_n^{n-1} = \begin{bmatrix} \cos \theta_n & -\sin \theta_n \cos \alpha_n & \sin \theta_n \sin \alpha_n & a_n \cos \theta_n \\ \sin \theta_n & \cos \theta_n \cos \alpha_n & -\cos \theta_n \sin \alpha_n & a_n \sin \theta_n \\ 0 & \sin \alpha_n & \cos \alpha_n & d_n \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.5)$$

Como podemos observar, en la convención de transformaciones Denavit-Hartenberg unicamente requerimos determinar el valor de cuatro variables, dos rotaciones (α, θ) y dos traslaciones (a, d) .

El sistema de descripción de transformaciones desarrollado por ROS, presenta la ventaja de describir las transformaciones de una manera más detallada al permitirnos describir las rotaciones y traslaciones en los tres ejes. Sin embargo este tipo de soluciones no suele ser las más óptimas, puesto que al incrementarse la cantidad de datos a manejar suele incrementarse el costo computacional que las operaciones demandan. Actualmente con el aumento del poder de procesamiento de las computadoras esta ya no suele ser una limitante.

Para ello se parte de la matriz de rotación compuesta roll, pitch, yaw.

$$R_1^0 = R_{z,\phi} * R_{y,\theta} * R_{x,\psi} \quad (4.6)$$

$$R_1^0 = \begin{bmatrix} \cos \phi & -\sin \phi & 0 \\ \sin \phi & \cos \phi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} \cos \theta & 0 & \sin \theta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \theta & 0 & \cos \theta \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \psi & -\sin \psi \\ 0 & \sin \psi & \cos \psi \end{bmatrix} \quad (4.7)$$

$$= \begin{bmatrix} \cos \phi \cos \theta & -\sin \phi \cos \psi - \cos \phi \sin \theta \sin \psi & \sin \phi \sin \psi + \cos \phi \sin \theta \cos \psi \\ \sin \phi \cos \theta & \cos \phi \cos \psi + \sin \phi \sin \theta \sin \psi & -\cos \phi \sin \psi + \sin \phi \sin \theta \cos \psi \\ -\sin \theta & \cos \theta \sin \psi & \cos \theta \cos \psi \end{bmatrix} \quad (4.8)$$

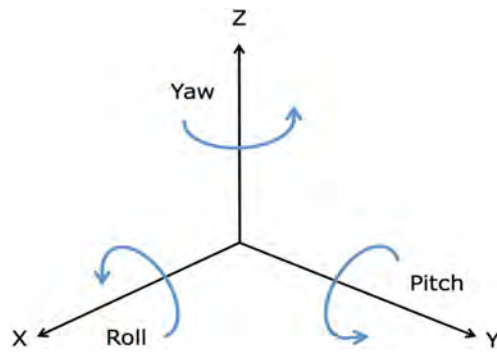


Figura 4.9: Rotaciones roll, pitch, yaw.

4.3.2. Implementación (Descripción con ROS)

Se utilizó un visualizador en 3D para observar el modelo del brazo y verificar el correcto movimiento mecánico del brazo. En tal caso se hizo uso de los paquetes proporcionados por *ROS* para la elaboración de modelos de robots. La descripción del modelo del robot se realizó en un archivo en formato XML. Esta sintaxis permite describir las transformaciones existentes entre cada uno de los sistemas coordenados significativos en el robot, así como permite cargar algún modelo *CAD* (*Computer Assisted Design*) de las piezas que componen al robot.

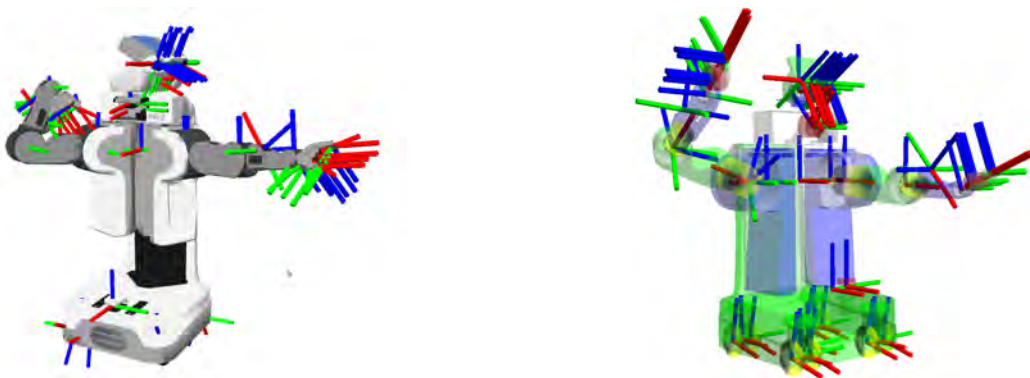


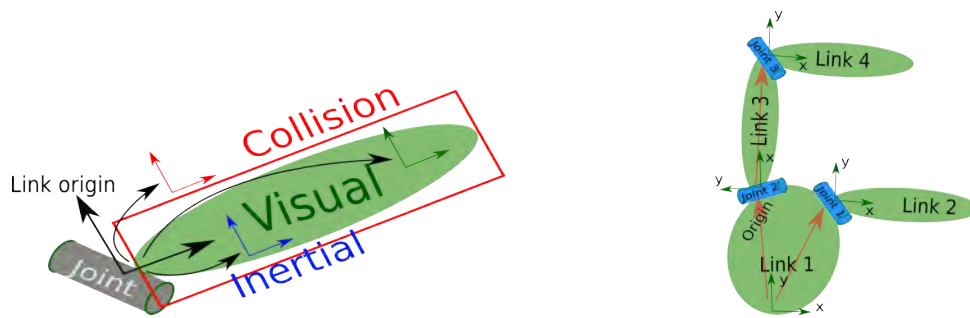
Figura 4.10: Ejemplo de un modelo de robot y sus respectivas transformaciones.

ROS proporciona un paquete para el manejo de información de las transformaciones de un robot que lleva el nombre de *tf*. En un nivel práctico, un árbol de transformación define los desplazamientos en términos de traslación y rotación entre diferentes marcos de coordenadas. La biblioteca *tf* usa una estructura en árbol para garantizar que solo haya un recorrido único que vincule dos sistemas coordenados entre sí y asume que todas las transformaciones del árbol se dirigen desde los nodos primarios a secundarios.

Para describir una transformación se requiere definir primero un conector, que funcione como cada uno de los elementos físicos, posteriormente la transformación se encargará de relacionar cada uno de estos conectores. Conceptualmente, cada nodo en el árbol de transformación corresponde a un sistema de coordenadas el cual representa cada uno de los conectores. Por otra parte, cada enlace de conexión corresponde a la transformación que debe aplicarse para pasar del nodo actual a su hijo.

Para crear el árbol de transformaciones del manipulador de 7DOF, se comenzó por crear un sistema de referencia en la base del brazo, el cual servirá como sistema de referencia fijo, se

llamó *base_ra_arm*. Posteriormente se fueron agregando eslabones según la configuración real del brazo.



(a) Constitución básica de *link* en el sistema ROS. (b) Ejemplo de sistema de transformaciones (sistemas de referencia y links).

Para crear esta configuración entre los diferentes sistemas de referencia, primero debemos decidir qué nodo será el padre y cuál será el hijo. Esta distinción es importante porque asume que todas las transformaciones se mueven de padres a hijos. Elegimos el sistema de referencia *base_ra_arm* como principal, ya que a medida que se agregan otras piezas: motores, eslabones y conectores, tendrá más sentido que se relacionen con un sistema fijo. Esto significa que la transformación asociada con el efector final y el sistema *base_ra_arm* puede ser obtenida mediante el árbol de transformaciones configurado. La conversión de la posición del sistema de referencia ubicado en el efector final al sistema de referencia fijo ubicado en la base del brazo puede ser obtenida mediante una llamada a la biblioteca *tf*.

4.3.3. Comparación entre la convención D-H y la descripción solo con rotaciones y traslaciones.

Se implementaron dos metodologías de descripciones para el cálculo de la cinemática directa del brazo robótico. La primera de ellas consistió en realizar la descripción completa de las transformaciones utilizando la información de rotación y traslación de cada uno de los respectivos sistemas de referencia.

En este proceso y con la información previamente obtenida de las dimensiones del brazo robótico se construyó la siguiente tabla donde se muestra la información de los desplazamientos y rotaciones de los respectivos sistemas de referencia.

| | TRANSLACIÓN | | | ROTACIÓN | | |
|---|-------------|------|-------|----------|----------|---------|
| | x | y | z | roll | pitch | yaw |
| 1 | 0.065 | 0.00 | 0.000 | $\pi/2$ | 0.000 | 0.000 |
| 2 | 0.215 | 0.00 | 0.000 | 0.000 | $\pi/2$ | 0.000 |
| 3 | 0.000 | 0.00 | 0.060 | $-\pi/2$ | $-\pi/2$ | 0.000 |
| 4 | 0.190 | 0.00 | 0.000 | $\pi/2$ | 0.000 | $\pi/2$ |
| 5 | 0.000 | 0.00 | 0.036 | $-\pi/2$ | $-\pi/2$ | 0.000 |
| 6 | 0.095 | 0.00 | 0.000 | $\pi/2$ | 0.000 | $\pi/2$ |

Tabla 4.4: Tabla de parámetros de transformaciones entre sistemas de referencia para el brazo robótico de 7DOF.

Con la información obtenida de las dimensiones del brazo robótico real se pudo realizar un modelo virtual del brazo utilizando un archivo en formato XML donde se describen las transformaciones entre los diferentes sistemas de referencia y los elementos de conexión obtenidos de modelos CAD. El resultado se puede observar en la figura 4.12.

El formato de descripción virtual de un modelo de robot en formato XML se compone de *links* y *joints*. Un *link* describe las características de un elemento de unión, estas pueden ser mecánicas, de material, de posición, etc. Un *joint* por otra parte describe la relación existente entre los orígenes de dos links, dicho de otro modo describe la transformación existente entre los sistemas de referencias (*orígenes*) de dos links.

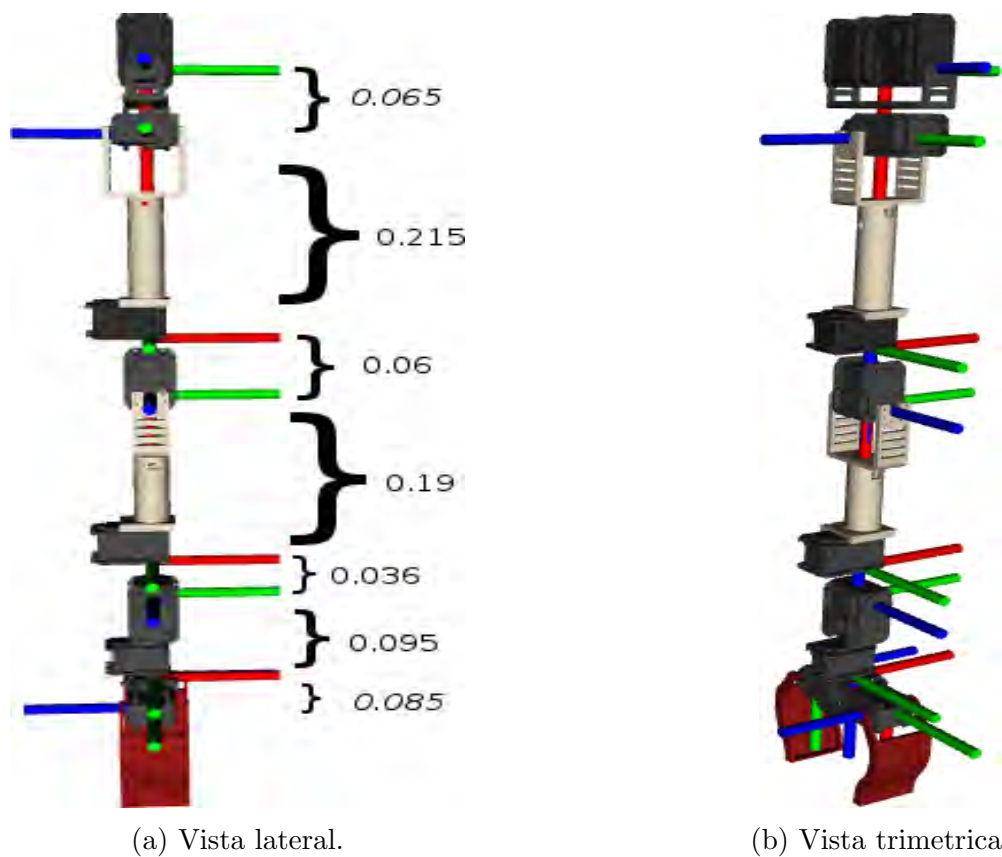


Figura 4.12: Modelo virtual del brazo robótico.


```

1 <link name="base_ra_arm">
2   <visual>
3     <origin xyz="-0.01 0.0 0.0" rpy="1.5707 0.0 1.5707" />
4     <geometry>
5       <mesh filename="package://knowledge/hardware/stl/brazo/mx106.2.stl" />
6     </geometry>
7     <material name="black.gray"><color rgba="0.2 0.2 0.2 1" /></material>
8   </visual>
9 </link>
10
11 <link name="ra_link0">
12   <visual>
13     <origin xyz="0.0 0.0 0.005" rpy="0.0 -1.5707 0.0" />
14     <geometry>
15       <mesh filename="package://knowledge/hardware/stl/brazo/mx106.s.stl" />
16     </geometry>
17     <material name="gray_black"><color rgba="0.3 0.3 0.3 1" /></material>
18   </visual>
19 </link>
20
21 <link name="ra_link1">
22   <visual>
23     <origin xyz="0.0 0.0 0.0" rpy="1.5707 -1.5707 0.0" />
24     <geometry>
25       <mesh filename="package://knowledge/hardware/stl/brazo/bone.1.stl" />
26     </geometry>
27     <material name="ra_material"><color rgba="0.9 0.85 0.75 1" /></material>
28   </visual>
29
30 </link>
31 .
32 .
33 .
34 <joint name="ra_1_joint" type="revolute">
35   <origin xyz="0.0 0.0 0.0" rpy="0.0 0.0 0.0" />
36   <parent link="base_ra_arm" />
37   <child link="ra_link0" />
38   <limit effort="0.0" lower="0.0" upper="0" velocity="0.0" />
39   <axis xyz="0 0 1" />
40 </joint>
41
42 <joint name="ra_2_joint" type="revolute">
43   <origin xyz="0.064 0.0 0.0" rpy="1.5707 0.0 0.0" />
44   <parent link="ra_link0" />
45   <child link="ra_link1" />
46   <limit effort="0.0" lower="0.0" upper="0" velocity="0.0" />
47   <axis xyz="0 0 1" />
48 </joint>
49 .
50 .
51 .

```

Algoritmo 4.1: Ejemplo de un archivo URDF para la descripción del sistema de manipulación.

Por otro lado se realizó la descripción del sistema de manipulación utilizando la convención Denavit-Hartenberg. Para ello se comenzó por plantear los ejes z que deben ser coincidentes, en posición y en sentido de giro, con los ejes de acción de cada uno de los actuadores. Sin embargo, en este punto se observó una limitante en el método D-H, al intentar describir la transformación entre el $link_2$ y el $link_3$ se observó que el método no puede describir con suficiente precisión la rotación en el eje " x " y al mismo tiempo un desplazamiento en el *eje* y . La manera de solucionar esta limitante consiste en realizar una transformación de rotación en el eje x primero, con esto los dos frames compartirán el mismo origen del sistema de referencia, posteriormente se plantea la traslación, ahora en el *eje* z .

Por tanto, los parámetros que describen las transformaciones del brazo según la convención D-H, se muestra en la siguiente tabla:

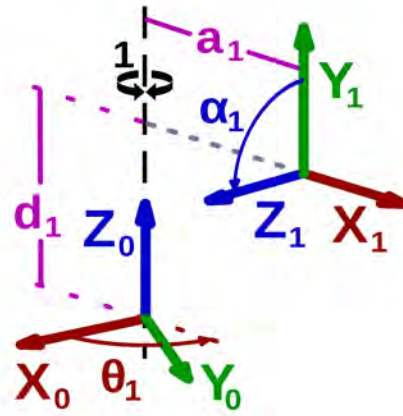
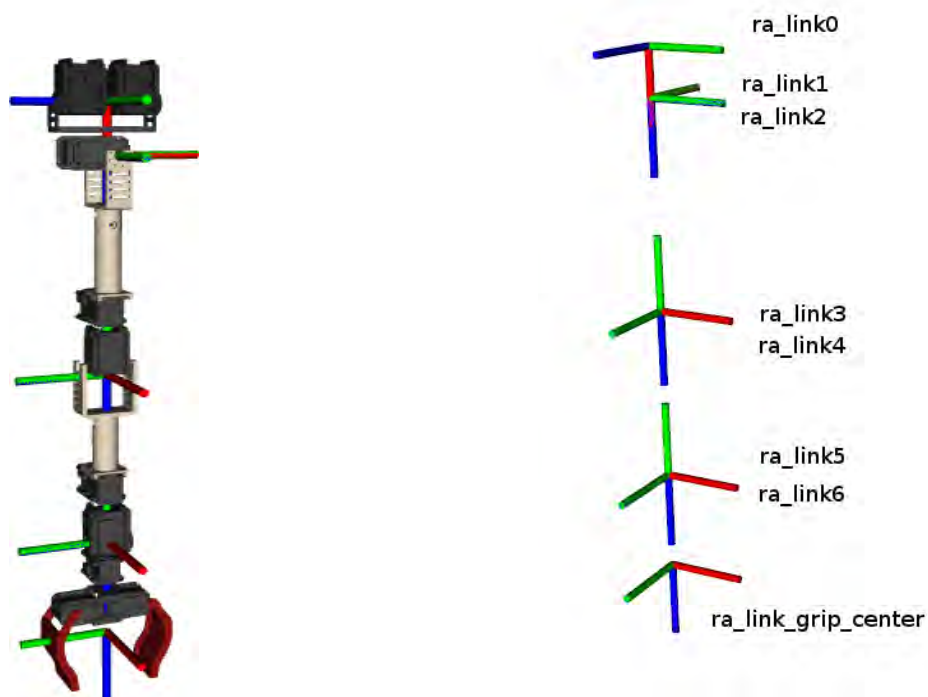


Figura 4.13: Ejemplo de obtención de parámetros DH.

| PARAMETROS DENAVIT-HARTENBERG | | | | |
|-------------------------------|-------|-------|----------|----------|
| | D | A | α | θ |
| 0-1 | 0.000 | 0.065 | $\pi/2$ | 0.000 |
| 1-2 | 0.000 | 0.000 | $\pi/2$ | $\pi/2$ |
| 2-3 | 0.275 | 0.000 | $-\pi/2$ | $-\pi/2$ |
| 3-4 | 0.000 | 0.000 | $\pi/2$ | 0.000 |
| 4-5 | 0.226 | 0.000 | $-\pi/2$ | 0.000 |
| 5-6 | 0.000 | 0.000 | $\pi/2$ | 0.000 |
| 6-7 | 0.165 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |

Tabla 4.5: Tabla de parámetros D-H para brazo robótico antropomórfico de 7DOF.



(a) Vista trimétrica.

(b) Vista de transformaciones.

Figura 4.14: Modelo virtual del brazo robótico utilizando la convención DH.

Como se puede observar en la Figura 4.14, la descripción de las transformaciones entre el *link1* y el *link2* comparten el origen. Únicamente difieren en la rotación del respectivo sistema de referencia. Sucede lo mismo para describir la transformación entre las parejas de *links*: [3 – 4] y [5 – 6].

De la comparación de estas dos representaciones podemos obtener pros y contras de cada una de ellas. Por un lado una representación completa de las transformaciones nos da la posibilidad de realizar una descripción más apegada al movimiento real del robot. Esta característica permite alinear cada uno de los sistemas de referencia a el eje de movimiento de cada uno de los actuadores. En este sentido, es conveniente utilizar esta descripción puesto que simplifica la manera de publicar cada una de las transformaciones entre los sistemas de referencia, basta con estar leyendo la posición de cada uno de los actuadores y publicar dicho valor para obtener la representación gráfica de la configuración del brazo en el modelo virtual.

Por otro lado, estar escuchando en tiempo real siete transformaciones completas requiere un mayor costo computacional comparado con realizar la multiplicación de las mismas siete matrices de transformación solo cuando sea de interés conocer la posición del efector final. En tal caso resulta conveniente tener las dos descripciones: la descripción completa para el despliegue de información de manera visual en el ambiente virtual y la descripción D-H para conocer la posición del efector final cuando sea necesario.

4.4. Determinación del área de trabajo

El espacio de trabajo es otro parámetro importante el cual servirá para caracterizar las dimensiones del brazo robótico con el cual estamos trabajando. El análisis del espacio de trabajo de robots manipuladores es de gran interés, puesto que la geometría del espacio de trabajo puede considerarse no sólo un aspecto fundamental para el diseño del robot sino que también es esencial para la ubicación del robot en el entorno de trabajo y también para la planificación de trayectorias.

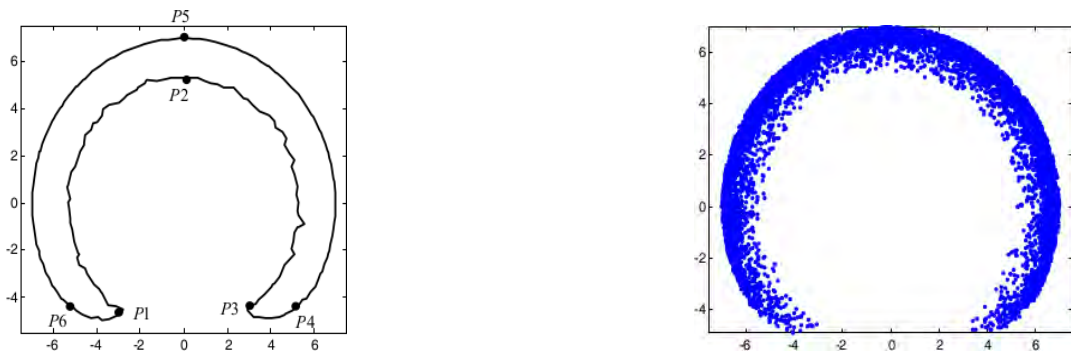
En robótica, el término espacio de trabajo puede ser entendido como: *El grupo de puntos que pueden ser alcanzados por su efector-final* [30].

Dicho de otro modo, el espacio de trabajo de un robot es el espacio en el cual el mecanismo puede trabajar según sus propias restricciones mecánicas.

Principales características de un espacio de trabajo.

Cuando se pretende estudiar un espacio de trabajo, lo más importante es su forma y volumen (dimensiones y estructura). Ambos aspectos tienen una importancia significativa debido al impacto que éstos ejercen en el diseño del robot y también en su manipulabilidad. En el presente trabajo se dará una mayor importancia al estudio de las dimensiones del espacio de trabajo desde el punto de vista de la manipulabilidad.

En el caso del presente trabajo fue preciso conocer las características de forma, dimensiones y estructura del robot a analizar, puesto que de estas características dependerá su espacio de trabajo.



(a) Nube de puntos del espacio de trabajo en 2D. (b) Curva de la frontera del espacio de trabajo del brazo robótico.

Figura 4.15: Espacio de trabajo de un robot 3R, donde los puntos de color azul representan el espacio de trabajo de este robot. Como se ha dicho previamente, los puntos en color azul representan cada una de las posiciones que puede alcanzar el efector-final del robot 3R.

En el apartado 4.6 se aborda el cálculo de la cinemática inversa por dos metodologías diferentes, se observó que para el caso del algoritmo numérico con la paquetería MoveIt! el algoritmo tiene un tiempo de ejecución muy alto cuando la posición deseada está fuera del espacio de trabajo del manipulador. Por ello, es importante caracterizar dicho espacio de trabajo. Es difícil validar si un punto se encuentra dentro del espacio semi-esférico (Figura 4.17); se planteó una región prismática para facilitar esta validación.

- La forma es importante para la definición del entorno donde el robot trabajará.
- Las dimensiones son importantes para la determinación del alcance del efector-final.
- La estructura del espacio de trabajo es importante para asegurar las características cinemáticas del robot las cuales están relacionadas con la interacción entre el robot y el entorno.

Además, la forma, dimensiones y estructura del espacio de trabajo dependen de las propiedades del robot en cuestión. Las dimensiones de los eslabones del robot y las limitaciones mecánicas de las articulaciones tienen una gran influencia en las dimensiones del espacio de trabajo. La forma depende de la estructura geométrica del robot y también de las propiedades de los grados de libertad. Por otro lado la estructura del espacio de trabajo viene definida por la estructura del robot y las dimensiones de sus eslabones.

Para la obtención del espacio de trabajo del brazo robótico en cuestión fue preciso partir de las características antes mencionadas. En este aspecto conocemos las tres características necesarias para la obtención del espacio de trabajo del robot, en cuanto a la forma podemos mencionar que el robot en cuestión es antropomórfico de 7 grados de libertad, cuyas dimensiones las hemos obtenido con anterioridad. En cuanto a la estructura podemos mencionar que conocemos el modelo de la cinemática directa del brazo e incluso que podemos visualizar en tiempo real la configuración del brazo antropomórfico, y por ende conocer la posición del efector final. Solo hace falta conocer las restricciones mecánicas del brazo robótico que se muestran en la tabla 4.6 .

| RESTRICCIONES MECÁNICAS DEL BRAZO ROBÓTICO [RAD] | | |
|--|--|-------------------|
| θ_1 | | [1.47, -1.47] |
| θ_2 | | [1.25, -0.21] |
| θ_3 | | [1.5707, -1.5707] |
| θ_4 | | [2.15, -1.15] |
| θ_5 | | [1.5707, -1.5707] |
| θ_6 | | [1.5, -1.35] |
| θ_7 | | [1.5707, -15707] |

Tabla 4.6: Tabla de restricciones mecánicas para brazo robótico antropomórfico de 7DOF.

Dentro de las metodologías planteadas para la obtención del espacio de trabajo de un robot existen diversas vertientes, una de ellas menciona la posibilidad de obtener dicho espacio generando números aleatorios con una distribución normal acotando los valores aleatorios dentro de las restricciones mecánicas. Posteriormente, con los valores aleatorios de ángulos y el modelo de la cinemática directa del brazo robótico, se obtiene la posición del efector final y se gráfica cada uno de estos valores en el tiempo.

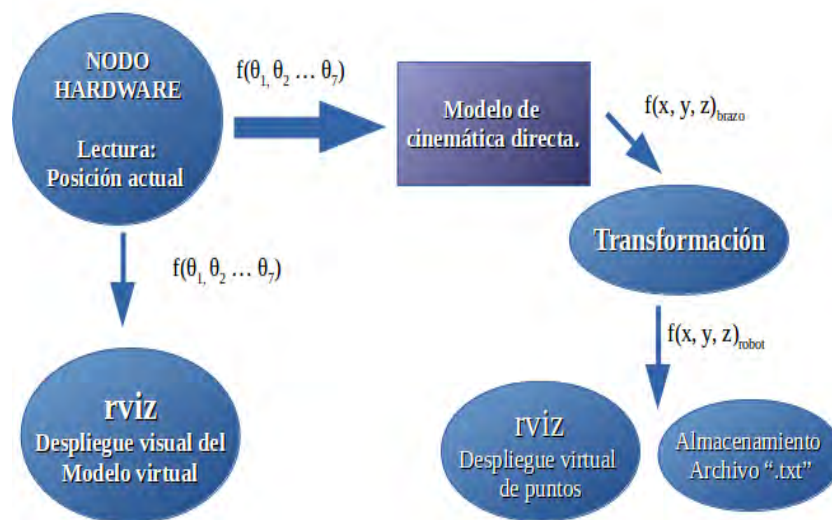
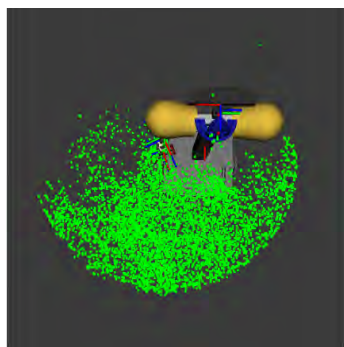
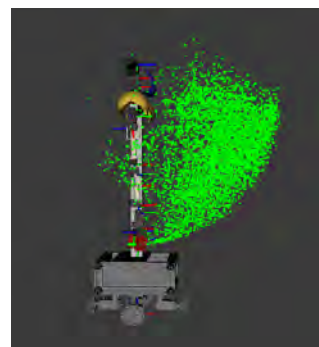


Figura 4.16: Esquema de construcción del espacio de trabajo para un robot de 7DOF.

Sin embargo, para el desarrollo de este documento se trabajó tanto con el modelo real del brazo robótico en cuestión, así como con el modelo virtual del mismo. Dadas estas condiciones se planteó el desarrollo de la siguiente manera: con el modelo real del brazo se obtuvieron en tiempo real las lecturas de posición de cada uno de los actuadores, posteriormente se actualizó el modelo virtual del mismo. Con esta información previa, los valores de posición de cada uno de los actuadores y el modelo de la cinemática directa del brazo, se calculaba en tiempo real la posición del efector final.



(a) Vista superior.



(b) Vista lateral.

Figura 4.17: Nube de puntos del espacio de trabajo del robot de servicio Justina. Nube de puntos desplegada en el visualizador gráfico Rviz, incluido en la paquetería de ROS.

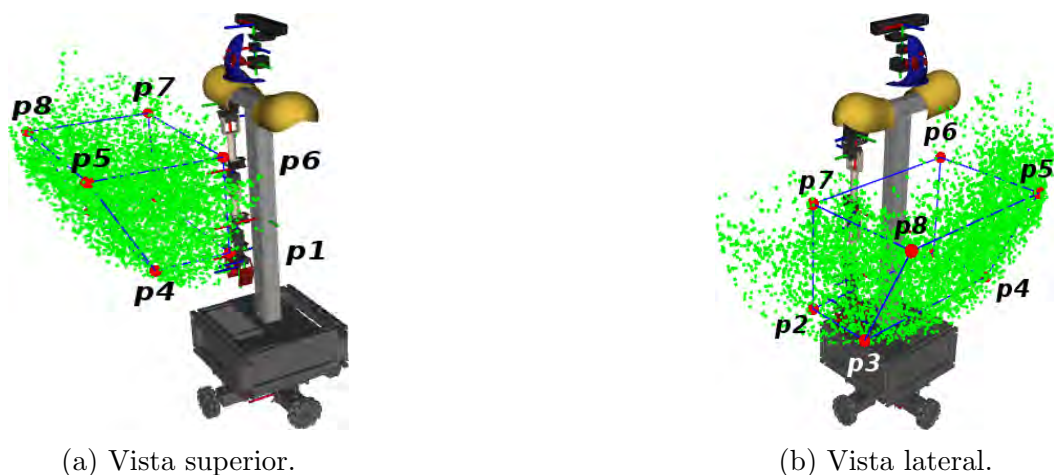
La técnica consiste en mover el manipulador en tiempo real, calcular la cinemática directa y obtener la posición del efector final para cada instante.

La ventaja que esta técnica supone, sobre otras, es la capacidad de obtener el espacio de trabajo tomando en cuenta las restricciones reales del robot, así como observar las trayectorias y los puntos críticos del efector final. En este sentido es importante mencionar que para algunos casos el efector final podría alcanzar un punto dentro del área de trabajo; sin embargo esta podría suponer un esfuerzo indeseado en alguno de los actuadores. Con esta técnica se pudo evitar ese tipo de configuraciones, y construir el espacio de trabajo bajo estos supuestos.

Se obtuvo la nube de puntos que en forma se puede aproximar a la sección de una esfera, como se observa en la figura 4.17. En el desarrollo de este trabajo se planteó la problemática de conocer si el brazo robótico es capaz de alcanzar un punto específico en el espacio, en tal caso los desarrollos en este punto deberían abordar la temática de la siguiente manera: encontrar la ecuación de un volumen que se aproxime a la forma que posee la nube de puntos con el objetivo de saber con certeza si el punto pertenece al volumen de trabajo del manipulador.

El problema de conocer aquellos puntos alcanzables para el brazo robótico se abordó de la siguiente manera; se propuso una región en el espacio con forma prismática. La región en el espacio mencionada con anterioridad cumple la condición que sus vértices pertenecen a la nube de puntos del espacio de trabajo del robot, con esto se asegura que todos los puntos dentro de la región propuesta son alcanzables para el robot.

Sin perder de vista el objetivo final de este trabajo que es la correcta manipulación de objetos con cierta rotación en “z”, este objetivo añade una limitante más: “La región en el espacio propuesta debe contener puntos donde el efector final pueda llegar con una orientación en z de por lo menos $\pi/2$ respecto sistema de referencia del robot”. Para ello restamos a el valor máximo en el eje “x” del espacio de trabajo la cantidad $0.165[m]$ según los parámetros DH. De esta manera se consiguió obtener un espacio de trabajo acotado cuyas características se observan en la figura 4.18 y en la tabla 4.7.



(a) Vista superior.

(b) Vista lateral.

Figura 4.18: Espacio de trabajo acotado de un robot antropomórfico de 7DOF. Puntos en el espacio que aproximan a un prisma el espacio de trabajo.

En la siguiente tabla podemos observar los parámetros que caracterizan el espacio de trabajo acotado para el brazo robótico de 7DOF.

| PARAMÉTRICOS DEL ESPACIO DE TRABAJO DEL BRAZO ROBÓTICO | | |
|--|--|--------------------------------|
| VERTICES $p(x, y, z)$ Respecto del robot | | |
| P_1 | | [0.165837, 0.064973, 0.719878] |
| P_2 | | [0.165837, -0.57737, 0.719878] |
| P_3 | | [0.426291, -0.57737, 0.719878] |
| P_4 | | [0.426291, 0.064973, 0.719878] |
| P_5 | | [0.606291, 0.064973, 1.09449] |
| P_6 | | [0.165837, 0.064973, 1.09449] |
| P_7 | | [0.165837, -0.57737, 1.09449] |
| P_8 | | [0.165837, -0.57737, 1.09449] |
| VOLUMEN | | |
| $V[m^3]$ | | 0.0838517 |

Tabla 4.7: Tabla de características del espacio de trabajo para brazo robótico antropomórfico de 7DOF. Puntos en el espacio que aproximan a un prisma el espacio de trabajo.

4.5. Cinemática inversa

El problema de la cinemática inversa consiste en, dada una posición deseada $p(x, y, z, roll, pitch, yaw)$, encontrar el valor de cada una de las juntas cinemáticas que lleven al brazo a la posición desea. Este problema suele ser uno de los más interesantes y complejos, dentro del estudio de la robótica. Es preciso mencionar que para llevar el efector final a cualquier posición y orientación deseada se requiere por lo menos un brazo robótico de 6DOF. En el desarrollo de este trabajo se plantea la resolución de la cinemática para un manipulador de 7DOF, lo cual suele aumentar el grado de complejidad en la resolución del problema. Dadas una posición y orientación deseadas expresadas en la matriz:

$$H = \begin{bmatrix} R & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.9)$$

El problema de la cinemática inversa consiste en encontrar una o todas las soluciones a la ecuación:

$$T_n^0(q_1, q_2 \dots q_n) = H \quad (4.10)$$

donde $q_1 \dots q_n$ son los valores de las respectivas juntas mecánicas. Representado de otra manera:

$$f(q_1, q_2 \dots q_n) = g(x, y, z, roll, pitch, yaw) \quad (4.11)$$

Para abordar la resolución de dicho problema se suele hacer uso del concepto de *desacople cinemático*. Utilizando este concepto se puede simplificar el problema del cálculo completo de la cinemática inversa. Por medio del desacople cinemático se pueden considerar de manera independiente el cálculo de la orientación inversa y el cálculo de la posición inversa.

4.5.1. Desacople cinemático

Como se ha mencionado con anterioridad, el problema de la cinemática inversa puede resolverse por separado en la resolución de la orientación inversa y la posición inversa, para manipuladores de 6 DOF o más. Es importante mencionar que para utilizar esta metodología de resolución el manipulador debe poseer la configuración de *muñeca esférica*. Es necesario partir de esta premisa puesto que la configuración de muñeca esférica implica que los tres últimos ejes de acción de intersectan en un punto llamado O_c . Además estos tres últimos ejes de acción pueden determinar la orientación del efector final sin afectar la posición alcanzada por los ángulos anteriores.

$$R_7^0(q_1, \dots, q_7) = R \quad (4.12)$$

$$o_7^0(q_1, \dots, q_7) = o \quad (4.13)$$

La suposición de una *muñeca esférica* implica que los ejes z_4 , z_5 y z_6 se intersectan en o_c . Como se observa en la figura 4.20 el origen del sistema O_5 coincide con el centro de la muñeca esférica O_c . Es importante resaltar que el movimiento de los tres últimos ejes no afecta la posición del centro de la muñeca O_c .

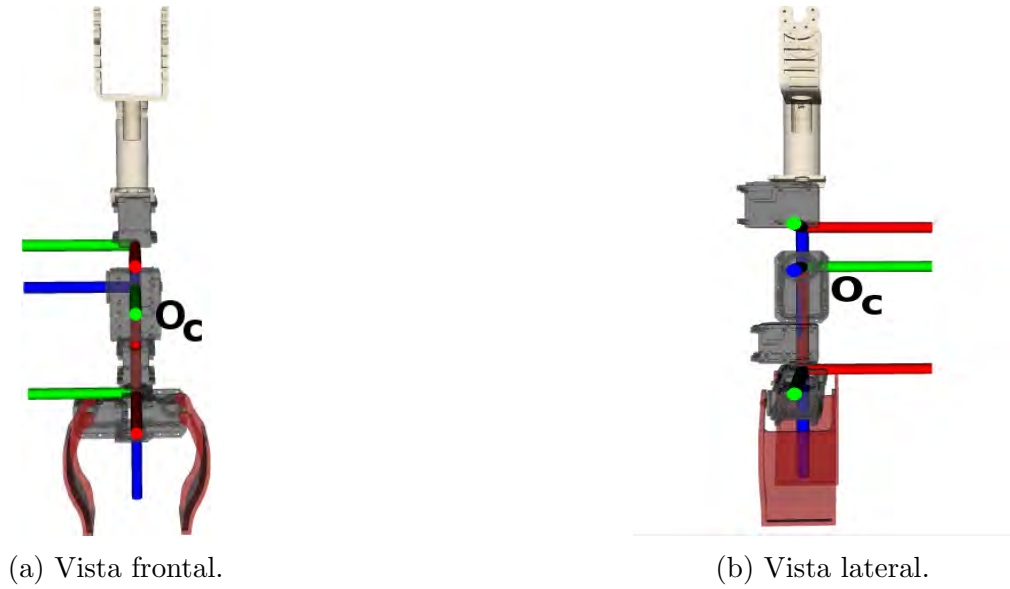


Figura 4.19: Centro de rotación de una muñeca esférica.

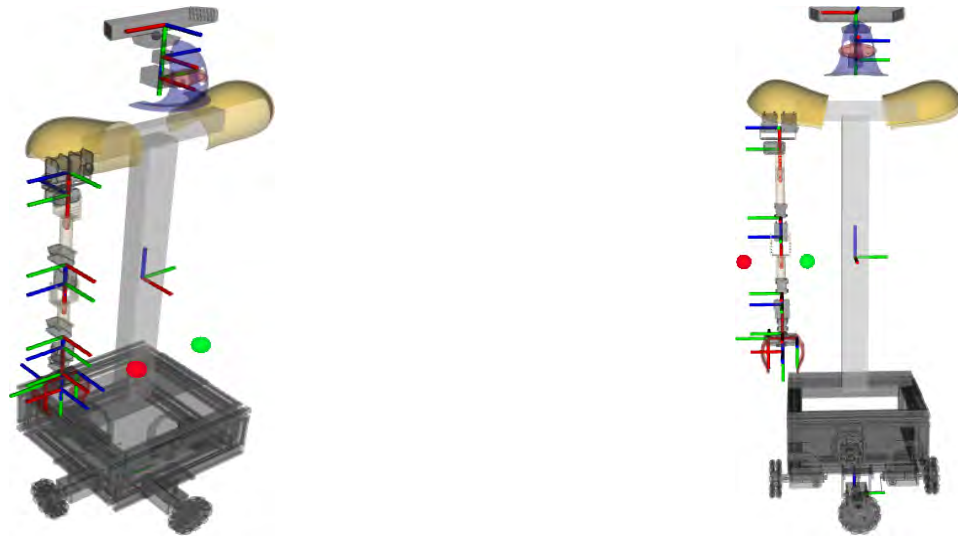
El centro del efector final deseado podemos llamarlo o y se puede obtener como la traslación d_6 a lo largo del eje x a partir del punto o_c^0 , donde d_6 es la distancia del centro del efector final al punto donde se intersectan los ejes de acción z_4 , z_5 y z_6 .

$$o = o_c^0 + d_6 R \hat{x} \quad (4.14)$$

$$o_c^0 = o - d_6 R \hat{x} \quad (4.15)$$

$$\begin{bmatrix} x_{oc} \\ y_{oc} \\ z_{oc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_{EE} - d_6 r_{13} \\ y_{EE} - d_6 r_{23} \\ z_{EE} - d_6 r_{33} \end{bmatrix} \quad (4.16)$$

De la ecuación 4.13 podemos observar que para realizar el cálculo del punto que representa el centro de la muñeca del manipulador solo debemos conocer el punto objetivo del efector final P_{EE} y la orientación deseada R . Utilizando la ecuación 4.13 calculamos el centro de la muñeca (*punto en rojo*). Posteriormente este punto servirá para calcular la cinemática inversa del manipulador quedando únicamente 4 valores de articulaciones por calcular.



(a) Posición desea del efector final. (verde)

(b) Posición del centro de la muñeca. (rojo)

Figura 4.20: Centro de la muñeca con rotación $\pi/2$.

Para motivos de este trabajo se utilizó un algoritmo ya implementado con anterioridad en el robot de servicio Justina, el cual utiliza la metodología de desacople cinemático para la resolución de esta tarea. El propósito de este trabajo es la comparación entre algoritmos de solución para esta tarea por tanto no se abordará fondo la resolución de este problema; sin embargo a continuación se enlistan las ecuaciones y consideraciones utilizadas en este algoritmo:

$$r = \sqrt{x^2 + y^2 + (z - D_1)^2} \quad (4.17)$$

$$\begin{aligned} \alpha &= \text{Atan2}((z - D_1), \sqrt{x^2 + y^2}) \\ \gamma &= \arccos \frac{-D_2^2 - D_3^2 + r^2}{-2D_2 D_3} \\ \beta &= \frac{\arcsin D_3 \sin \gamma}{r} \end{aligned} \quad (4.18)$$

Esta solución siempre considera solo la solución de codo arriba:

$$tunningRadiusElbow = D_2 \sin \beta \quad (4.19)$$

Se utiliza un vector que representa la posición del codo con respecto al sistema del mismo codo:

$$\begin{aligned} p_{elbow}[0] &= 0 \\ p_{elbow}[1] &= -tunningRadiusElbow * \cos(\text{elbowAngle}) \\ &= D_2 * \sin(\beta) * \cos(\text{elbowAngle}) \\ p_{elbow}[2] &= -tunningRadiusElbow * \sin(\text{elbowAngle}) \\ &= D_2 * \sin(\beta) * \sin(\text{elbowAngle}) \end{aligned} \quad (4.20)$$

Posteriormente se define una matriz de transformación del sistema sobre el cual gira el codo al sistema base del brazo:

$$oReRot = \begin{bmatrix} \cos(articular[0]) * \cos \alpha & -\sin(articular[0]) & \cos(articular[0]) * \sin -\alpha \\ \sin(articular[0]) * \cos \alpha & \cos(articular[0]) & \sin(articular[0]) * \sin -\alpha \\ -\sin \alpha & 0 & \cos -\alpha \end{bmatrix} \quad (4.21)$$

$$oReTrans = \begin{bmatrix} dhD[2] * \cos \beta * \cos \alpha * \cos articular[0] \\ dhD[2] * \cos \beta * \cos \alpha * \sin articular[0] \\ dhD[2] * \cos \beta * \sin \alpha + dhD[0] \end{bmatrix} \quad (4.22)$$

$$oRe = \begin{bmatrix} oReRot & oReTrans \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.23)$$

Se transforma la posición del codo respecto al sistema base:

$$p_{elbow} = oRe * p_{elbow} \quad (4.24)$$

$$\begin{aligned} articular[0] &= atan2\left(\frac{p_{elbow}[1] + dhA[0] * \sin articular[0]}{p_{elbow}[0] + dhA[0] * \cos articular[0]}\right) \\ articular[1] &= atan2\left(\frac{p_{elbow}[2] - dhD[0]}{\sqrt{p_{elbow}[0]^2 + p_{elbow}[1]^2}}\right) \\ articular[2] &= 0 \\ articular[3] &= 0 \end{aligned} \quad (4.25)$$

Con estos valores se obtiene la transformación del $link_0$ al $link_4$ para, posteriormente, calcular los dos ángulos restantes, $articular[2]$ y $articular[3]$:

$$T_0^4 = T_0^1 * T_1^2 * T_2^3 * T_3^4 \quad (4.26)$$

donde, cada una de las transformaciones se encuentra definida como:

$$\begin{aligned} T_i^{i+1} &\leftarrow \{ Rot = RPY(dhAlpha[i], 0, articular[i] + dhTheta[i]), \\ &Trans = (dhA[i] * \cos articular[i], dhA[i] * \sin articular[i], dhD[i]) \} \end{aligned} \quad (4.27)$$

posteriormente se obtiene la matriz de transformación inversa, para calcular la posición de la muñeca:

$$T_4^0 = (T_0^4)^{-1} \quad (4.28)$$

$$wristPos = T_4^0 * wristPos$$

por tanto se tiene:

$$\begin{aligned} articular[2] &= atan2\left(\frac{wristPos[1]}{wristPos[2]}\right) \\ articular[3] &= \pi/2 - atan2\left(\frac{wristPos[2]}{\sqrt{wristPos[0]^2 + wristPos[1]^2}}\right) \end{aligned} \quad (4.29)$$

Como salida del algoritmo se tiene:

$$\begin{aligned}
articular[0] &= atan2\left(\frac{p_{elbow}[1] + dhA[0] * \sin articular[0]}{p_{elbow}[0] + dhA[0] * \cos articular[0]}\right) \\
articular[1] &= atan2\left(\frac{p_{elbow}[2] - dhD[0]}{\sqrt{p_{elbow}[0]^2 + p_{elbow}[0]^2}}\right) \\
articular[2] &= atan2\left(\frac{wristPos[1]}{wristPos[2]}\right) \\
articular[3] &= \pi/2 - atan2\left(\frac{wristPos[2]}{\sqrt{wristPos[0]^2 + wristPos[1]^2}}\right)
\end{aligned} \tag{4.30}$$

posteriormente, se calculan los ángulos deseados de la muñeca.

Algoritmo 3: Condiciones para el cálculo de la cinemática inversa por el método geométrico.

```

if 1 - fabs( $R_7^4[0,0]$ ) < 0.0001 then
  |  $articular[4] = 0$  ;
  |  $articular[5] = 0$  ;
  |  $articular[6] = Atan2(R_7^4[1,1], R_7^4[0,1])$  ;
else
  |  $articular[4] = Atan2(R_7^4[1,0], R_7^4[0,0])$ ;
  |  $articular[5] = Atan2(\sqrt{1 - (R_7^4[2][0])^2}, R_7^4[2,0])$ ;
  |  $articular[6] = Atan2(R_7^4[2,2], -R_7^4[2,1])$ ;
  | if  $articular[4] > \pi/2$  then
  | |  $articular[4]- = \pi$  ;
  | |  $articular[5]* = -1$  ;
  | else if  $articular[4] < -\pi/2$  then
  | |  $articular[4]+ = \pi$  ;
  | |  $articular[5]* = -1$  ;

  |  $\psi_1 = atan2(\frac{R_4^7[2][2]}{-R_4^7[2][1]})$ ;
  |  $\psi_2 = atan2(\frac{-R_4^7[2][2]}{R_4^7[2][1]})$ ;
  | if fabs( $\psi_1$ ) < fabs( $\psi_2$ ) then
  | |  $articular[6] = \psi_1$  ;
  | else
  | |  $articular[6] = \psi_2$  ;

return  $articular[]$  ;

```

Uno de los objetivos de este trabajo consiste en realizar una comparación entre este algoritmo y un resolvidor de cinemáticas estándar el cual utiliza un método iterativo para tal propósito. Tal paquete es nombrado *moveIt!* y es compatible con la paquetería ROS.

4.6. Cinemática inversa paquetería MoveIt

La paquetería de software *moveIt!* consiste en una serie de librerías enfocadas a las tareas de manipulación de objetos en la robótica. Paquetes como *arm_navigation* fueron diseñados con el objetivo específico de ayudar en tareas de planeación de movimientos, generación de trayectorias y monitoreo del ambiente particularmente para los manipuladores del robot PR2 [31]. La idea original de la paquetería *moveIt!* es generar planes de manipulación y trayectorias basándose información de un modelo del entorno. Dichos modelos del entorno se crean, comúnmente, utilizando la fusión de datos del sensor láser y de sensores estéreo colocados en los robots.

El ambiente es representado como una mezcla de datos proporcionados en dos formatos:

1. Una red voxelizada que representa la mayor parte de los obstáculos en el medio ambiente.
2. Primitivas geométricas y modelos de mallas para representar objetos que han sido reconocidos y registrado en el medio ambiente mediante rutinas de detección de objetos.

De esta manera la información del modelo del entorno sirve de entrada principal a los planificadores que constituyen la paquetería *moveIt!*.

MoveIt! incorpora herramientas para planeación de movimientos, cinemática, percepción 3D, control y navegación. Además provee una plataforma de uso fácil para desarrollo de aplicaciones robóticas avanzadas, permitiendo la evaluación de nuevos diseños de robots y la construcción de productos robóticos para su uso industrial, comercial y de investigación, entre otros. *MoveIt!* Es el software de código abierto más usado para manipulación de robots [31].

En la actualidad *moveIt* provee una interfaz genérica para la planeación de movimiento de manipuladores que puede ser integrada muy fácilmente en ROS. Esta interfaz permite la integración de diferentes tipos de planeadores de movimientos, por ejemplo:

1. Planeadores aleatorizados. Open Motion Planning Library (OMPL).
2. Planeadores basados en búsquedas. (SBPL)
3. Librerías de optimización de trayectorias. (CHOMP)
4. Librerías de optimización estocástica para la planeación de movimientos. (STOMP)

La paquetería *moveIt* permite personalizar el solucionador de cinemáticas para realizar cálculos más rápidos de la cinemática inversa, utilizando para ello métodos numéricos. Una característica importante de la paquetería *moveIt* es que para solucionar la cinemática inversa extrae de la información necesaria desde un archivo URDF (archivo estándar para descripción de robots en el formato aceptado por ROS).

De esta manera se utilizó el archivo URDF que contiene la información con la descripción de las transformaciones entre los elementos del robot Justina. Para ello se creó un archivo extra que contiene únicamente la información de traslaciones entre los elementos que constituyen los brazos del robot Justina. Como se muestra en la figura 5.7.



(a) URDF descripción del robot Justina.

(b) URDF descripción de las transformaciones de los brazos del robot Justina.

Figura 4.21: Vista trimétrica del despliegue del robot Justina y sus respectivos manipuladores en el visualizador gráfico Rviz.



(a) URDF descripción del robot Justina.

(b) URDF descripción de las transformaciones de los brazos del robot Justina.

Figura 4.22: Imagen de la comparación entre descripciones de los brazos del robot Justina.

Con la información del archivo URDF se creó un nuevo archivo que contiene la información de las relaciones entre los elementos que constituyen al robot Justina, tal documento es conocido como SURDF, por ser una descripción semántica del robot.

Una vez que se generaron tales archivos se procedió a crear un modelo cinemático de los brazos del robot Justina. Tal modelo cinemático de los brazos nos da acceso a funciones para obtener la cinemática inversa, utilizando el solucionador de cinemática KLD integrado en la paquetería *moveIt!*.

Esta sección en particular tiene como objetivo comparar ambos métodos de solución de la cinemática inversa del robot de servicio Justina. Por tanto, en el presente trabajo se analiza y

compara el tiempo de ejecución de ambos algoritmos. Y como característica extra se plantea una función de utilidad para evaluar la *conveniencia* de utilizar un algoritmo u otro.

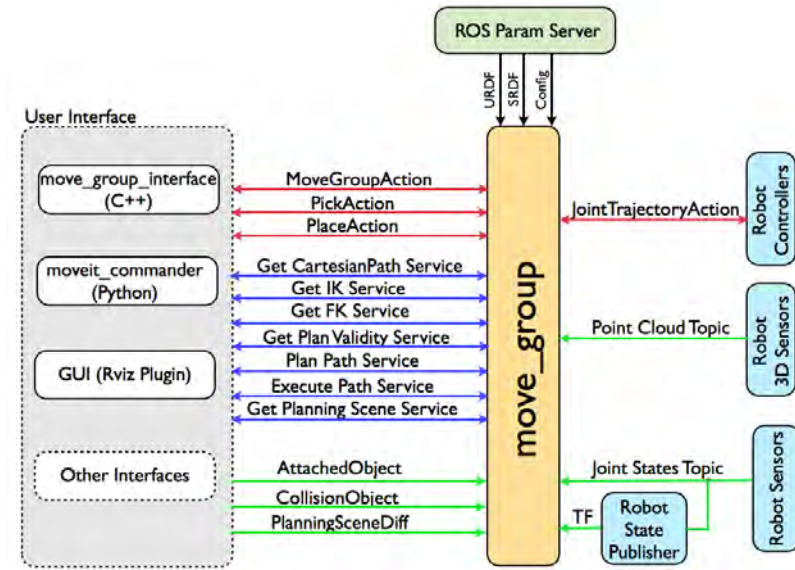


Figura 4.23: Imagen de la estructura de la paquetería *moveIt!*. [32]

4.7. Planteamiento de la función de costo para el cálculo de la cinemática inversa.

Al resolver el problema de la cinemática inversa se pueden obtener múltiples soluciones para una misma información de entrada $x, y, z, roll, pitch, yaw$. Por ello, es importante determinar en qué casos es conveniente tomar la información obtenida mediante un método geométrico o mediante un método iterativo. Por tal razón en el presente trabajo de tesis se plantea una función de costo que nos permita comparar y cuantificar ambos algoritmos de solución de cinemáticas.

Para el planteamiento de la función de costo se tomaron en cuenta los siguientes aspectos:

- Los valores de ángulos más alejados de cero implican un mayor gasto energético de los motores.
- Los ángulos de los motores 0 y 5, deben ser negativos para obtener una configuración de codo abajo y conservar una estructura antropomórfica de los brazos.

$$\epsilon = f(\theta_0, \theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4, \theta_5, \theta_6)$$

$$\epsilon = \sum_{i=0}^n |\theta_i| * \alpha \tag{4.31}$$

4.7. PLANTEAMIENTO DE LA FUNCIÓN DE COSTO PARA EL CÁLCULO DE LA CINEMÁTICA INVERSA.

Donde α representa una ganancia que establecimos con un valor de 0.5. Para corregir el problema con la morfología de la toma de objetos se optó por restringir los valores de ángulos dentro del archivo que contiene la descripción del robot. De esta manera se realizaron las pruebas llamando dos servicios para el cálculo de la cinemática inversa y evaluando la función de costo con la respuesta obtenida.

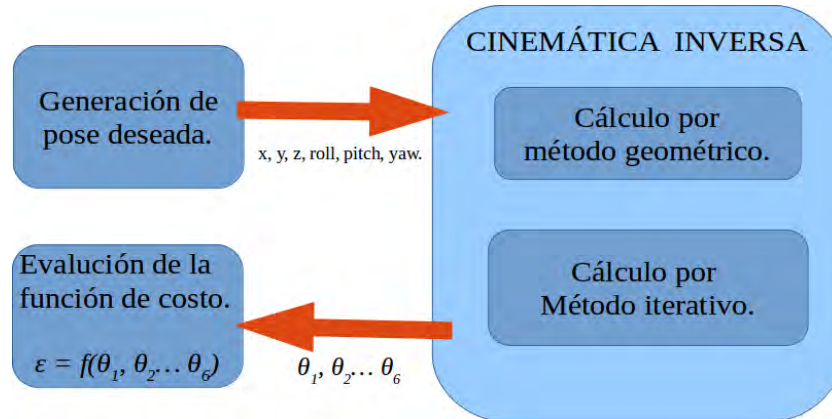


Figura 4.24: Imagen representativa de la comunicación entre módulos para evaluar la función de costo propuesta para el cálculo de la cinemática inversa.

Los resultados de realizar esta evaluación se reportan en el capítulo 6.

Capítulo 5

Implementación usando la plataforma ROS

En este capítulo se describe la plataforma ROS (Robot Operative System), su estructura, los elementos principales que lo componen y sus formas de interconexión. Se aborda, además, la metodología de integración de los algoritmos desarrollados en este trabajo.

5.1. Ros

ROS es un meta-sistema operativo de software libre para robótica que ofrece las utilidades que se esperarían en cualquier sistema operativo: abstracción de hardware, control de dispositivos de bajo nivel, implementación de funcionalidades comunes, intercambio de mensajes entre procesos y mantenimiento de paquetes. Su objetivo principal es dar soporte a la reutilización de código en la investigación y desarrollo de robótica [11].

Una de las principales ventajas que ofrece es la de comunicar distintos procesos dependientes o independientes entre sí de manera muy sencilla. El funcionamiento de un robot se piensa de manera modular, donde cada módulo realiza una tarea específica y ROS se encarga del transporte de la información entre ellos. Además, su creciente comunidad aporta mucho al desarrollo de nuevo software que otros usuarios pueden utilizar de acuerdo a sus necesidades.

5.1.1. Nodos

Nodo es el nombre que reciben ROS los pequeños módulos que conforman la red de trabajo; se encargan de realizar una tarea en particular. Por ejemplo, un nodo mueve los motores, otro nodo es responsable de la interfaz con el usuario, otro planea las trayectorias, mientras que un último nodo controla los sensores. La comunicación entre nodos se realiza por medio de mensajes usando tópicos o servicios.

5.1.2. Paquetes

El software en ROS se organiza por medio de paquetes. Un paquete puede entenderse como una carpeta con estructura definida y puede contener el código de un nodo, la definición de mensajes, archivos de configuración, software ajeno a ROS, etc. Se pretende que un paquete ofrezca una utilidad por sí mismo, pero no debe ser tan complejo como para ser difícil de

entender por otros usuarios. Cuando se comparten desarrollos en la comunidad de ROS, los paquetes son la unidad más pequeña de construir y publicar. Es decir, si se crea un nodo con una funcionalidad única y éste se quiere compartir con el mundo, lo que se debe compartir en realidad es el paquete que contiene al nodo.

5.1.3. Tópicos

Uno de los patrones para comunicar nodos entre sí es por medio de tópicos. Un nodo publica cierto tipo de información en un tópico específico y todos los nodos que requieran de esa información deberán suscribirse a ese tópico para obtenerla. En cuanto los datos sean publicados, los nodos suscritos la recibirán. Los tópicos son un patrón no-bloqueante que presenta una distribución 1:n.

5.1.4. Servicios

El otro patrón para comunicar nodos son los servicios, que utilizan un sistema petición-respuesta. Si algún proceso o cálculo se requiere hacer sólo en ciertas situaciones es conveniente programarlo como un servicio. Si un nodo requiere utilizar un servicio, manda un mensaje de petición con la información necesaria al nodo que ofrece dicho servicio, el procesamiento se lleva a cabo y se regresa al nodo solicitante un mensaje de respuesta con el resultado del servicio. Al igual que los tópicos, cada servicio tiene el tipo de mensaje específico con el que se comunicará; hay un tipo de mensaje para las peticiones y otro para las respuestas.

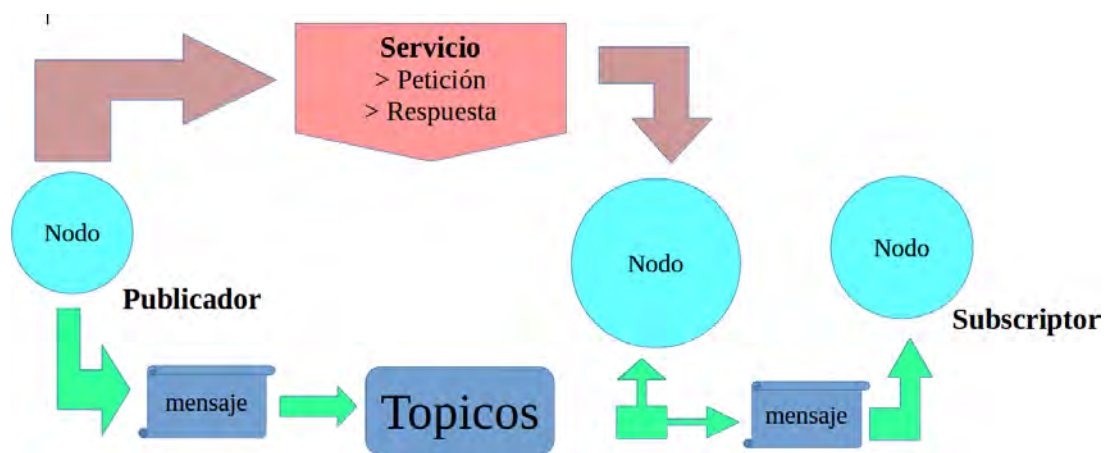


Figura 5.1: Esquemas de comunicación Tópicos y Servicios.

5.2. Máquinas de estados

Se denomina máquina de estados a un modelo de comportamiento de un sistema con entradas y salidas, en donde las salidas dependen no sólo de las señales de entradas actuales sino también de las anteriores.

Las máquinas de estados se definen como un conjunto de estados que sirve de intermediario en esta relación de entradas y salidas, haciendo que el historial de señales de entrada determine, para cada instante, un estado para la máquina, de forma tal que la salida depende únicamente

del estado y las entradas actuales.

En este sentido, como parte de este trabajo, se plantean las máquinas de estados como la metodología de solución ante ciertos problemas como lo son: *describir el proceso de la toma de objetos, describir el proceso de llevar el brazo hasta el punto óptimo de sujeción, describir el proceso de evaluación de la función de costo para el brazo manipulador del robot Justina, entre otras.*

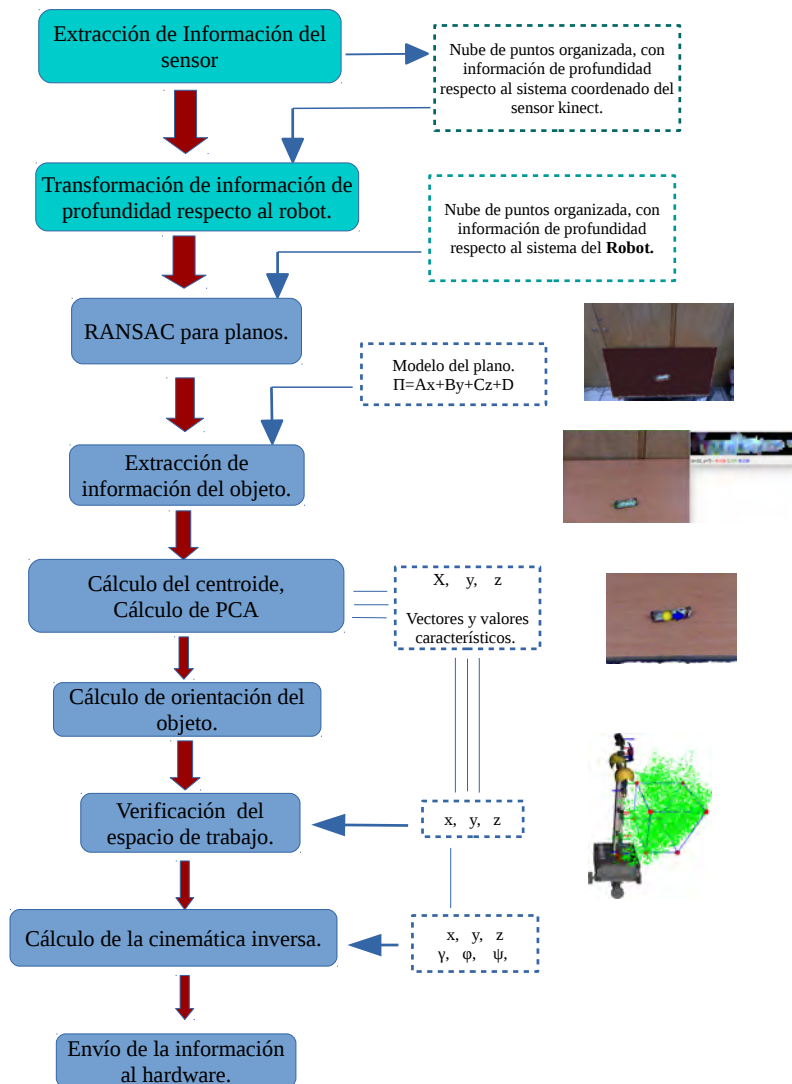


Figura 5.2: Diagrama de bloques del sistema de manipulación.

5.2.1. Descripción de pruebas de toma de objetos.

La toma de objetos es la parte crucial de este trabajo, la importancia de este evento radica en que se incluye la totalidad de tareas desarrolladas en este trabajo para realizar una prueba de mayor complejidad. A grandes rasgos, la prueba de la toma de objetos se compone de subtareas, algunas de las cuales se describen a continuación.

La primer subtarea es la segmentación del objeto y el cálculo del respectivo centroide del objeto en cuestión (Ver Sección [3]). Como entrada de la tarea se tiene una nube de puntos obtenida por la cámara RGB-D Kinect y lo esperado a la salida es una posición x, y, z en el espacio así como la orientación del objeto $roll, pitch, yaw$. Partiendo con la nube de puntos como entrada al sistema, es la segmentación de un plano (en caso de existir), posteriormente se eliminan los puntos pertenecientes al plano y por debajo de este, se eliminan los puntos más alejados 0,5[m] en el eje x respecto al robot. Se parte de las siguientes premisas: que el conjunto de puntos restante corresponde al conjunto de puntos que conforman al objeto, que solo se encuentra un objeto en la mesa en cada evento de toma de objetos. Con tal información, podemos proceder a calcular el centroide del objeto así como el respectivo ángulo del mismo.



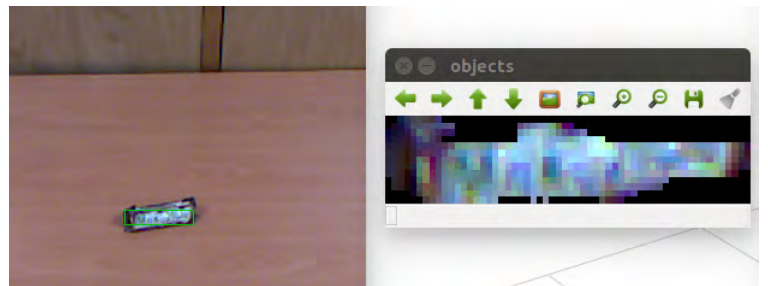
(a) Imagen de segmentación de los puntos pertenecientes al plano.



(b) Segmentación de plano con extracción de los objetos sobre este.



(c) Bounding box de la región de interes.



(d) Bounding box de los puntos pertenecientes al objeto.

Figura 5.3: Esquemas del proceso de segmentación del objeto.

Para realizar el cálculo del centroide del objeto en cuestión se utiliza la media en cada uno de los correspondientes ejes, el cálculo es prácticamente directo, no así el cálculo de los ángulos representativos de la orientación del objeto. Para ello se calculó en un principio, los componentes principales del conjunto formado por los puntos del objeto, con la información de los eigenvectores de la matriz de covarianzas podemos obtener la dirección en la cuál ocurre la mayor distribución de los puntos, y por tanto podemos obtener los cosenos directores de cada uno de los respectivos eigenvectores obteniendo así los ángulos de rotación $roll, pitch, yaw$.

Una vez conociendo esta información es posible avanzar a la etapa de manipulación para la cual es necesario conocer la información del objeto en el espacio x, y, z y con ayuda del

proceso anteriormente descrito podemos obtener los ángulos requeridos para el efector final del manipulador. En esta etapa como parte de los resultados del análisis comparativo entre las soluciones encontradas mediante la paquetería *MoveIt!* y el método geométrico, se optó por utilizar el método geométrico ya implementado en el robot de servicio Justina.

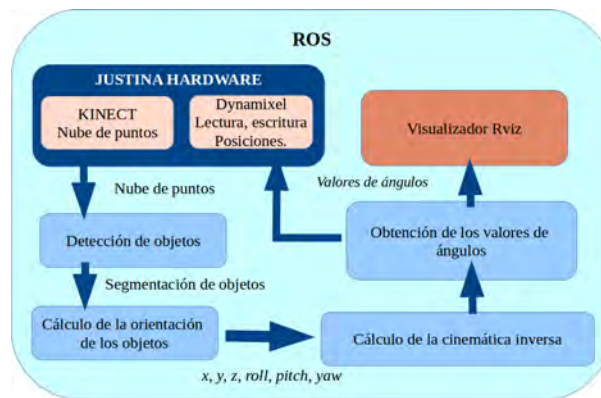


Figura 5.4: Diagrama de bloques del proceso toma de objetos.

Con el resultado del cálculo de la cinemática inversa, se obtienen los ángulos requeridos para cada uno de los actuadores para que el efector final llegue al punto en el espacio deseado. Para ello se utiliza un *tópico* implementado en ROS, que comunica los ángulos deseados del manipulador con un nodo encargado de operar el hardware, en este caso, los motores Dynamixel.

5.2.2. Pruebas de toma de objetos estado actual.

En lo que respecta al proceso de la toma de objetos actual, en el robot de servicio Justina, únicamente se utiliza la información de posición del objeto sin considerar la información de orientación. Este proceso es susceptible a fallas cuando se trata de objetos de grandes dimensiones, entiéndase objetos con dimensiones mayores a la longitud total del efector final del manipulador en su mayor apertura. Por otro lado, puede presentar fallas con objetos de alturas reducidas, estos son objetos con alturas menores a la mitad de la longitud d del manipulador pues ello indica una posible colisión con la superficie que soporta dicho objeto.



(a) Sin considerar información de orientación.



(b) Tomando en cuenta la información de orientación.

Figura 5.5: Fotografía de la tarea de manipulación para una bolsa de papel.

5.2.3. Pruebas de toma de objetos con información de orientación y dimensiones del objeto.

Como parte de los desarrollos obtenidos de este trabajo, se adiciona la información de la orientación de los objetos, con la cual se puso a prueba si la adición de esta información mejora significativamente la tarea de toma de objetos en el robot de servicio Justina.

Para ello, una vez realizada la segmentación del objeto en cuestión se procede a calcular el centroide del objeto, posteriormente se calcula la matriz de covarianzas de y se obtienen los vectores y valores característicos de la matriz, con lo cual se obtienen los ejes que representan una aproximación a la orientación del objeto.

Algoritmo 4: Cálculo de ángulos del efector final de un brazo manipulador con muñeca esférica

```

input : Vectores principales del objeto
output: Ángulos del efector final  $roll(\phi), pitch(\theta), yaw(\psi)$ 

Inicialización de variables;
 $\phi = 0;$ 
 $\theta = 0;$ 
 $\psi = 0;$ 

def ordenamiento vectores( $\vec{v}_1, \vec{v}_2, \vec{v}_3$ ):
|   return list( $\vec{v}_{mayor}, \vec{v}_{medio}, \vec{v}_{menor}$ );

def etiquetado( $\vec{v}$ ):
|   return  $\vec{v} \leftarrow x \|y\|z;$ 

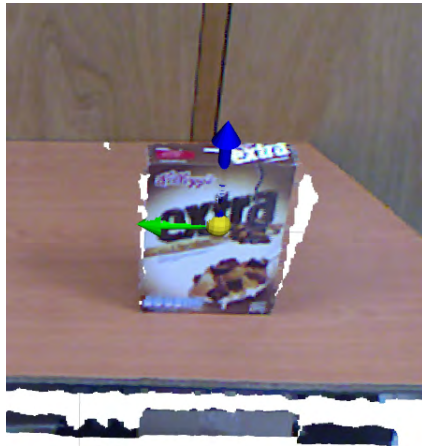
def main( $\vec{v}_1, \vec{v}_2, \vec{v}_3$ ):
|    $\vec{v} \leftarrow$  variable local;
|    $\vec{v}_{mayor}, \vec{v}_{medio}, \vec{v}_{menor} \leftarrow$  ordenamientoVectores( $\vec{v}_1, \vec{v}_2, \vec{v}_3$ );
|   etiquetado( $\vec{v}$ );
|   if  $\vec{v}_{mayor} == "z"$  then
|       |   roll  $\phi = 0;$ 
|       |   pitch  $\theta = -90;$ 
|       |   yaw  $\psi = \arctan \frac{\vec{v}_{menor} \cdot y}{\vec{v}_{menor} \cdot x};$ 
|   else
|       |   roll  $\phi = \arctan \frac{\vec{v}_{menor} \cdot y}{\vec{v}_{menor} \cdot x};$ 
|       |   pitch  $\theta = 0;$ 
|       |   yaw  $\psi = 0;$ 
|   end
|   return  $\phi, \theta, \psi;$ 

```

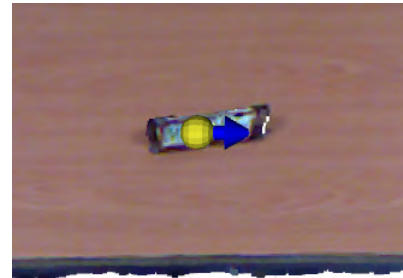
Con fines de obtener el conjunto de ángulos en los cuales debe posicionarse el efector final del manipulador fue preciso realizar dos ordenamientos. El primer ordenamiento se realizó considerando la magnitud de los vectores característicos de la matriz de covarianzas. Posteriormente para cada uno de esos vectores se etiquetó en cuál de los ejes coordenados del sistema de la base del robot sus proyecciones eran mayores. El algoritmo 4 menciona los pasos

que componen esta tarea.

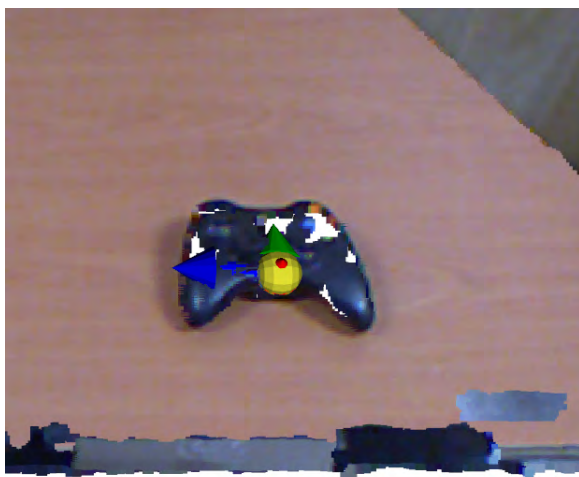
De esta manera la abstracción de la información que tenemos se basa en que sabemos cual es el mayor eje, su magnitud y la dirección a la cual apunta. Por lo tanto, realizamos el siguiente criterio para determinar los ángulos de rotación del efector final.



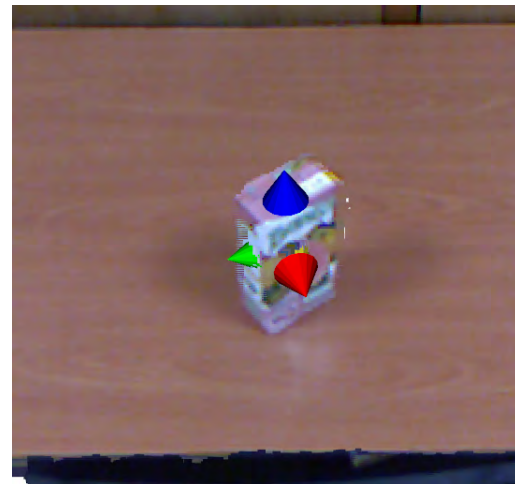
(a) Caja de cereal



(b) Barra de chocolate



(c) Control de videojuegos



(d) Caja de jugo

Figura 5.6: Imagen de cálculo de la orientación con PCA. En azul, el eje con mayor magnitud, que representa el eje en el cual existe una mayor distribución de puntos (eje con mayor varianza de datos).

5.3. El robot de servicio Justina

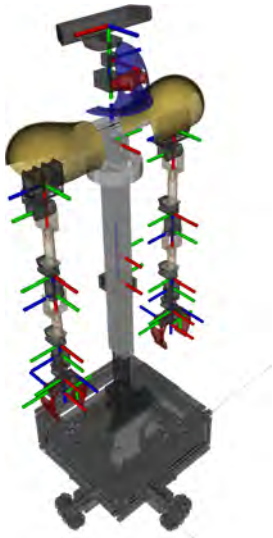
Justina es un robot de servicio desarrollado en el laboratorio de Biorrobótica de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México. Dentro del conjunto de tareas que debe desempeñar el robot Justina se encuentran la detección y el reconocimiento de rostros, la detección y el reconocimiento de objetos, la manipulación de objetos, la navegación en un ambiente cerrado similar al de un hogar u oficina, todo esto de manera autónoma.

Para realizar tales tareas el robot de servicio Justina cuenta con una base omnidireccional compuesta de 4 motores, la cual le permite realizar desplazamientos laterales, dos manipuladores en cadena abierta de 7 grados de libertad cada uno, los manipuladores se componen por motores

Dynamixel cuyas características se detallan en el apartado 4.1.

En la parte superior de la estructura que forma al robot se encuentra una arreglo de dos servomotores que realizan la función de una cabeza sobre la cual se encuentra montado el sensor RGB-D de la compañía Microsoft cuyas características se mencionan en el apartado 2.3 de este documento.

Todos estos componentes se encuentran montados sobre una estructura compuesta por perfil estructural de aluminio, lo que facilita su ensamble y rediseño.



(a) URDF descripción del robot Justina.



(b) Fotografía del robot Justina.

Figura 5.7: Imagen de Justina virtual y fotografía real.

En cuanto a la estructura de software, Justina se encuentra, actualmente, desarrollada en ROS; por tanto existen nodos encargados de la comunicación directa con el hardware. En el caso de este trabajo los nodos más relevantes a nivel de hardware son: el nodo encargado de la comunicación con los motores Dynamixel y el nodo encargado de operar al sensor Kinect. La comunicación con estos dos dispositivos de hardware se realiza mediante tópicos.

El nodo encargado de operar los motores está publicando en todo momento la posición actual de cada uno de los servomotores; por otro lado está a la escucha permanente que llegue un mensaje con la información de una posición objetivo.

El nodo del sensor kinect, se encarga de obtener los datos y publicar dos mensajes con informaciones similares. Uno de estos mensajes contiene la información del sensor kinect (imagen de color e información de profundidad) obtenida tal cual del hardware, el otro mensaje proviene de la transformación de la información de profundidad del sensor con respecto de la base del robot.

Las relaciones mecánicas del robot se encuentran definidas mediante la nomenclatura correspondiente a un archivo URDF con el cual ROS crea un árbol de transformaciones dinámico. Con tal información podemos obtener las transformaciones entre diferentes sistemas de referencia dentro del robot o con respecto a algún sistema de referencia en particular.

Como parte de este trabajo se programó un nodo en ROS en cual, con la información de las respectivas transformaciones y la información de profundidad obtenida del sensor kinect, se calcula la información del objeto y sus características de ubicación espacial, dimensiones y orientación. El nodo se realizó en el lenguaje de programación orientada a objetos C++, por su parte, se comunica a través de ROS por medio de la recepción de información mediante la llegada de tópicos; por otro lado responde en un servicio con la información de los objetos: ubicación espacial y orientaciones.

Capítulo 6

Resultados

En este capítulo se describen las pruebas realizadas con el fin de comprobar la hipótesis de este trabajo. Además se muestran los resultados obtenidos de dichas pruebas, la descripción de las pruebas y la discusión de resultados se abordarán en el siguiente orden:

1. Extracción de planos.
 - Exactitud, rapidez.
2. Extracción de objetos y sus características.
 - Exactitud en la estimación de la posición.
 - Comparación en característica de altura.
 - Estimación de la orientación de objetos.
 - Exactitud en el cálculo de la orientación. Comparación orientación estimada y real.
3. Espacio de trabajo del algoritmo numérico.
4. Comparación tarea de manipulación utilizando información de orientación de los objetos.

6.1. Extracción de planos.

En esta sección se analizarán los resultados obtenidos al probar el algoritmo RANSAC para encontrar planos modificando el número de iteraciones. Observaremos el comportamiento del error y el tiempo de ejecución a fin de encontrar el número óptimo de iteraciones para este algoritmo.

El proceso para el análisis de datos fue el siguiente: se propuso un modelo de plano conocido por el usuario. Dicho modelo se obtuvo a partir del conocimiento de la altura del plano, en este caso, una mesa. Posteriormente se cuantificó la cantidad de puntos que entraban en este modelo ideal y se tomó como base para la medición de errores. Continuando con el procedimiento se modificó el algoritmo para realizar un número determinado de iteraciones (600, 200, 100, 50, 30, 24 y 20) y se midió el error relativo y el tiempo de ejecución, en cada uno de estos procedimientos.

Se probó el algoritmo con diferentes números de iteraciones, en todos los casos se realizaron 50 pruebas. Los resultados se pueden observar en las siguientes gráficas.

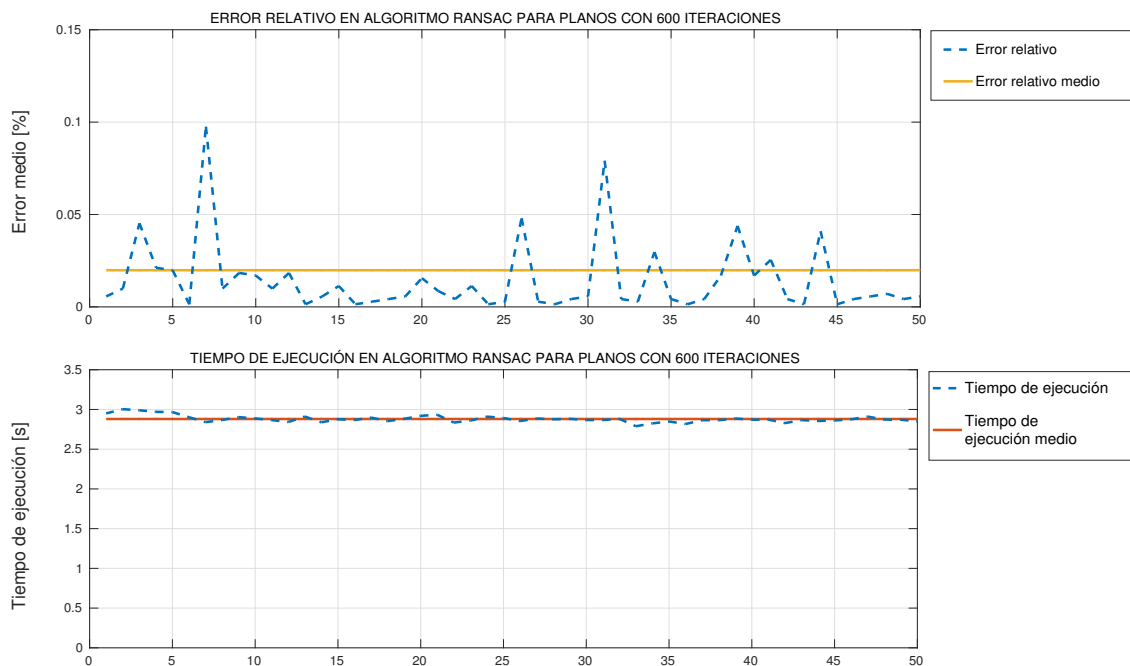


Figura 6.1: Gráfica correspondiente al error relativo para el algoritmo RANSAC para detección de planos con 600 iteraciones.

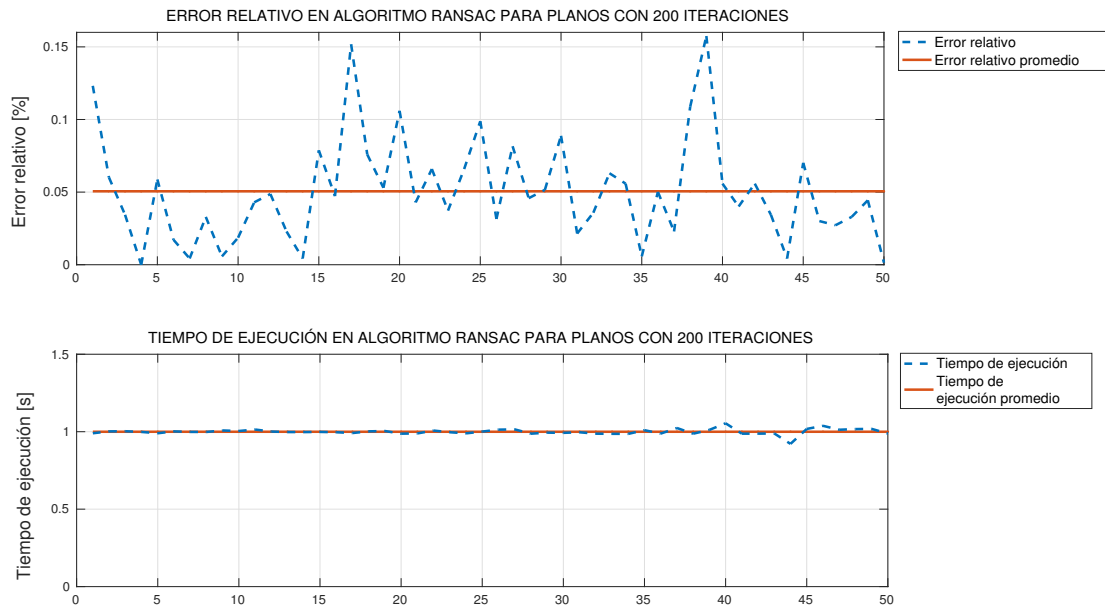


Figura 6.2: Gráficas correspondientes al error relativo y tiempo de ejecución para el algoritmo RANSAC con 200 iteraciones.

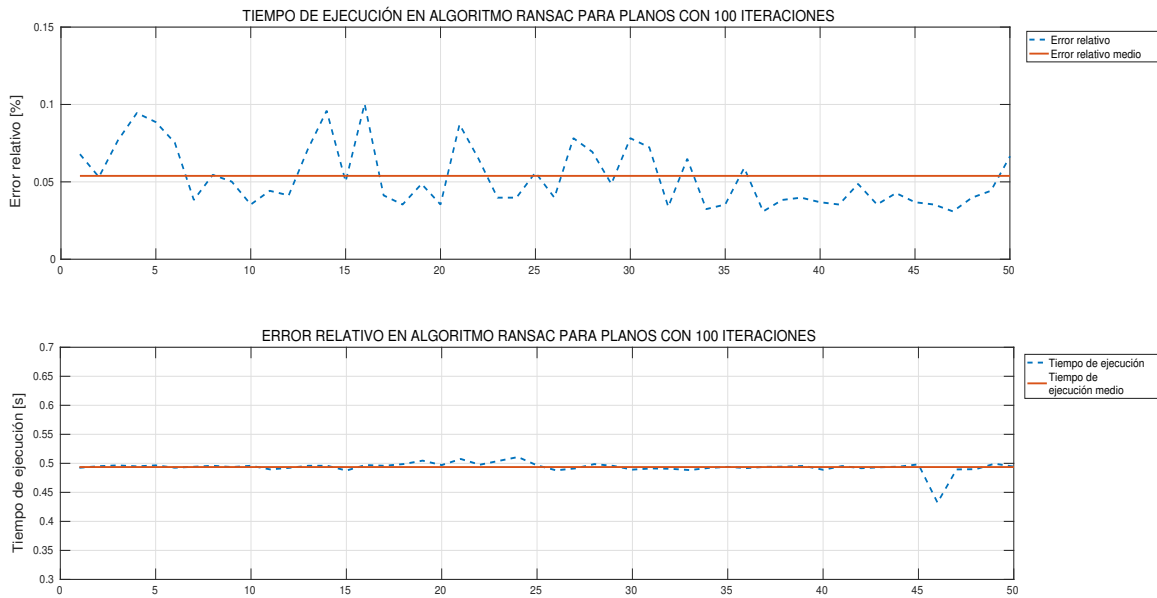


Figura 6.3: Gráficas correspondientes al error relativo y tiempo de ejecución para el algoritmo RANSAC con 100 iteraciones.

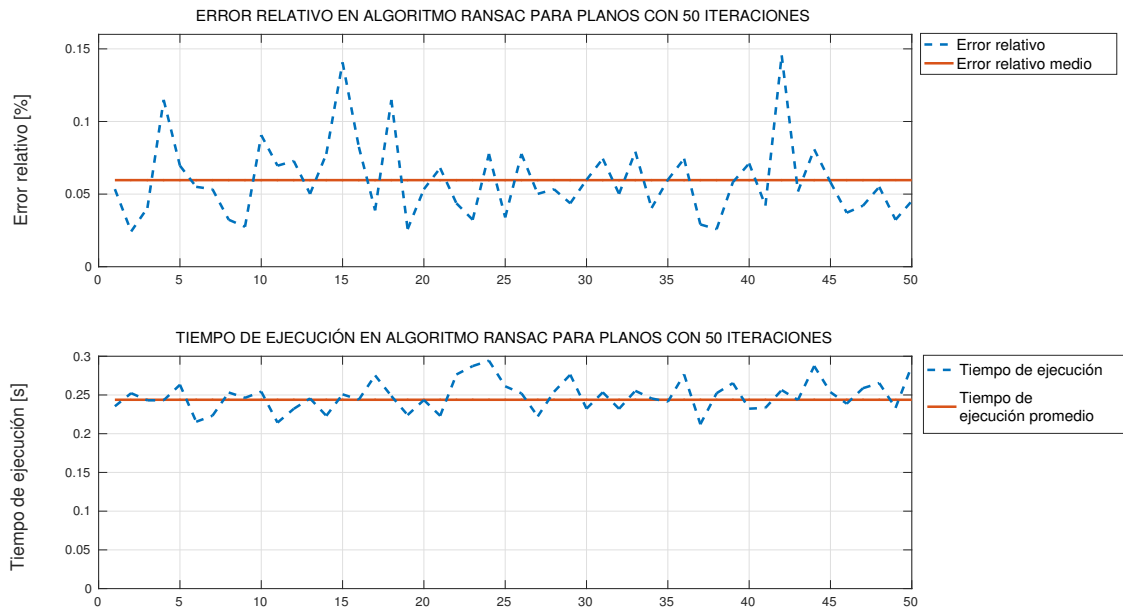


Figura 6.4: Gráficas correspondientes al error relativo y tiempo de ejecución para el algoritmo RANSAC con 50 iteraciones.

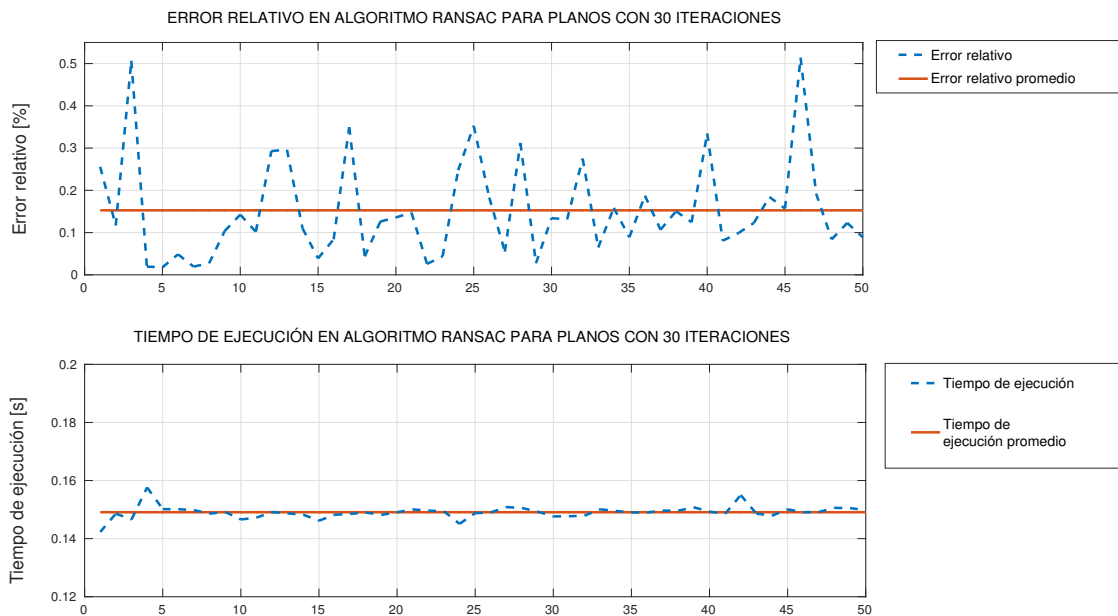


Figura 6.5: Gráficas correspondientes al error relativo y tiempo de ejecución para el algoritmo RANSAC con 30 iteraciones.

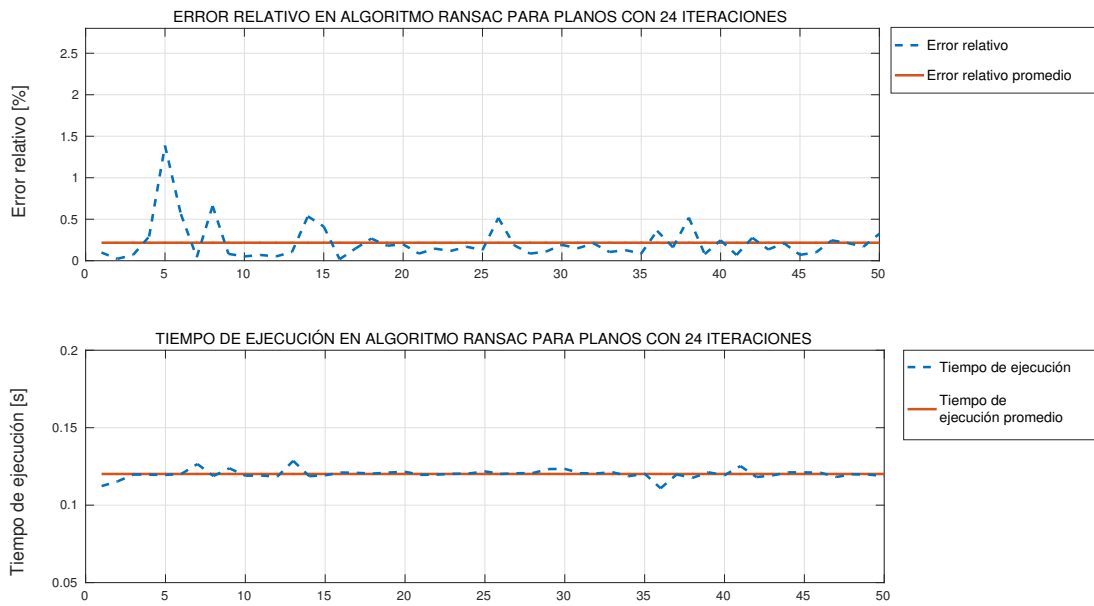


Figura 6.6: Gráficas correspondientes al error relativo y tiempo de ejecución para el algoritmo RANSAC con 24 iteraciones.

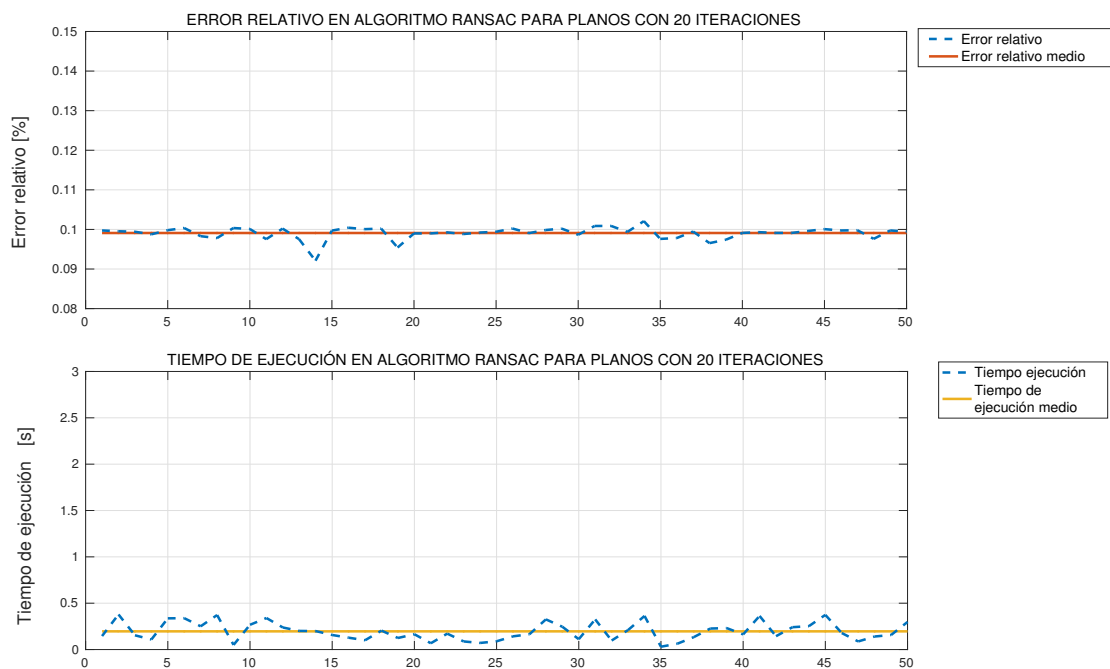


Figura 6.7: Gráficas correspondientes al error relativo y tiempo de ejecución para el algoritmo RANSAC con 20 iteraciones.

Una vez que se obtuvo la información parcial de cada uno de estos eventos se realizó una tabla extra que agrupa la información del tiempo de ejecución promedio y el error relativo

promedio contra el número de iteraciones del algoritmo. Se obtuvo la siguiente gráfica.

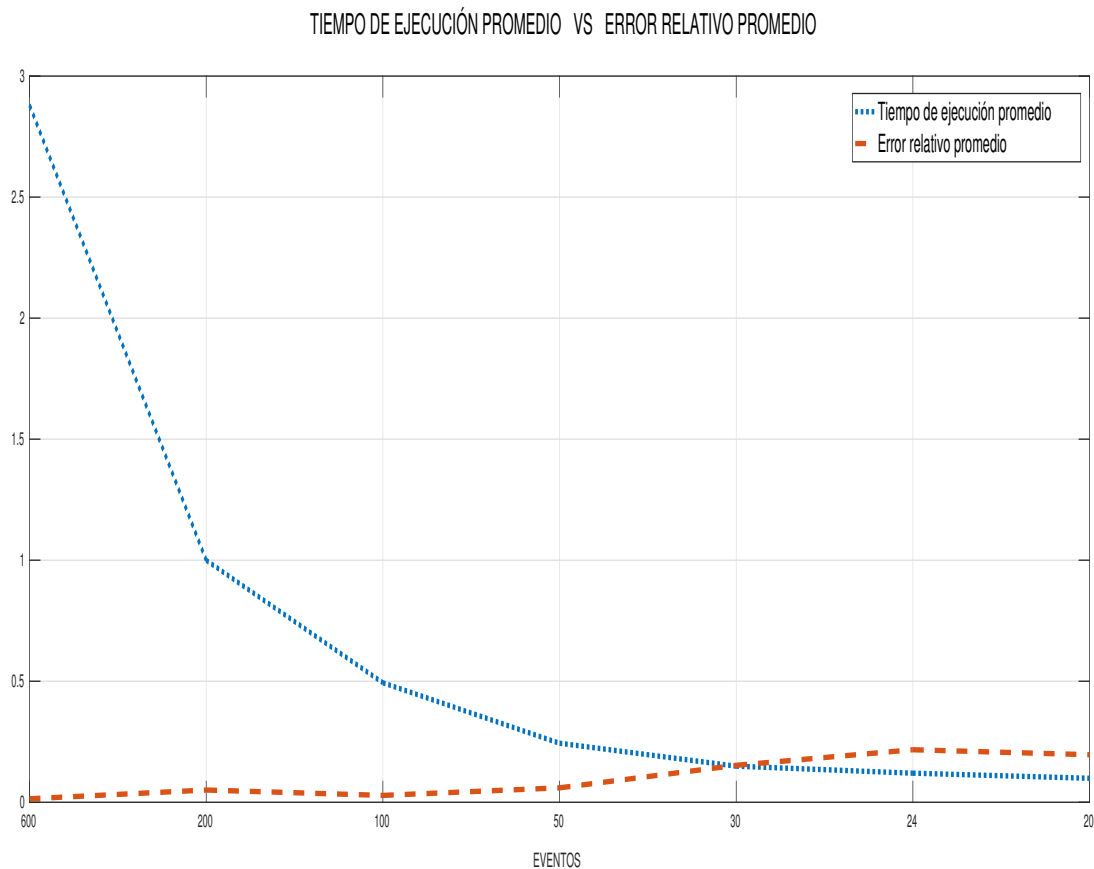


Figura 6.8: Gráfica del error relativo vs tiempo de ejecución para diferentes números de iteraciones.

Como podemos observar en la gráfica 6.8 el error relativo presenta un incremento conforme se disminuye el número de iteraciones en el algoritmo. El tiempo de ejecución por su parte muestra un decremento conforme número de iteraciones disminuye. Dado este comportamiento de ambos parámetros resulta difícil encontrar un punto de equilibrio entre estas dos unidades de medición. Para la aplicación particular de este trabajo se determinó un número óptimo de iteraciones entre 30 y 24.

6.1.1. Comparación exactitud y rapidez

Para este conjunto de pruebas se comparó el algoritmo desarrollado en el presente trabajo contra el implementado actualmente en el robot de servicio Justina, reportado en el trabajo de tesis [33].

Las pruebas se desarrollaron de la siguiente manera, con la estructura de comunicación que permite ROS se implementaron dos servicios para encontrar planos: el desarrollado en este trabajo de tesis y el algoritmo ya implementado. Se obtuvo la información de profundidad con el sensor RGB-D Kinect, esta información se compartió a través de un tópico al cual ambos

servicios se encontraban suscritos. De esta manera nos aseguramos de contar con la misma información en ambos algoritmos para poner a prueba la velocidad de ejecución y la precisión de algoritmo.

En cuanto a la medida de precisión del algoritmo continuamos suponiendo un plano horizontal del cual conocemos su altura; por tanto podemos conocer la ecuación del plano horizontal a esa altura. Se puso a prueba el algoritmo para ese modelo y se observó la cantidad de puntos que entran en ese modelo, tomando este resultado como el ideal. Posteriormente se pusieron en funcionamiento ambos algoritmos midiendo la cantidad de puntos en los modelos obtenidos y comparándolos con el número de puntos ideal. Este evento se iteró una cantidad de 80 veces.

Posteriormente se calculó el error relativo entre el modelo ideal y cada uno de los algoritmos como se muestra en la gráfica siguiente.

La tabla 6.1 resume los resultados obtenidos durante las pruebas.

| Resultados algoritmo RANSAC | | |
|-------------------------------------|-----------|-----------|
| Número de iteraciones: 1000 | | |
| Distancia mínima al modelo: 0.02[m] | | |
| | Anterior | Actual |
| Tiempo promedio de ejecución | 96.24[ms] | 701.5[ms] |
| Error relativo promedio | 39.95 | 8.78 |

Tabla 6.1: Comparación de resultados de RANSAC para planos.

Con la información de la tabla 6.1 se puede deducir que la nueva implementación del algoritmo RANSAC con 1000 iteraciones y una distancia mínima al modelo de 0.02[m] es más lenta pero con menor error relativo. La diferencia de 605[ms] puede llegar a ser significativa si se requiere ejecutar el algoritmo iterativamente, sin embargo, el común de las pruebas en robots de servicio doméstico no suelen requerir este tipo de acciones.

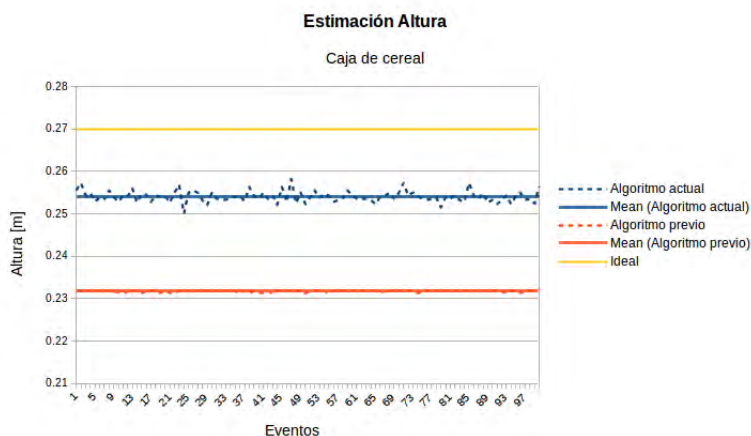
6.2. Extracción de objetos y sus características

En lo que respecta a la extracción de objetos y sus características se realizó una caracterización de la misma. Para ello se realizaron un total de 100 eventos para cada uno de los 5 objetos diferentes: un control para videojuegos de forma irregular, una caja de cereal, un envase de jugo, un envase de bebida láctea y una barra de chocolate. Como información de interés se compararon las medidas de altura de los objetos. Puesto que el algoritmo previo también hacía una estimación de la altura de los objetos se compararon los resultados de ambos algoritmos.

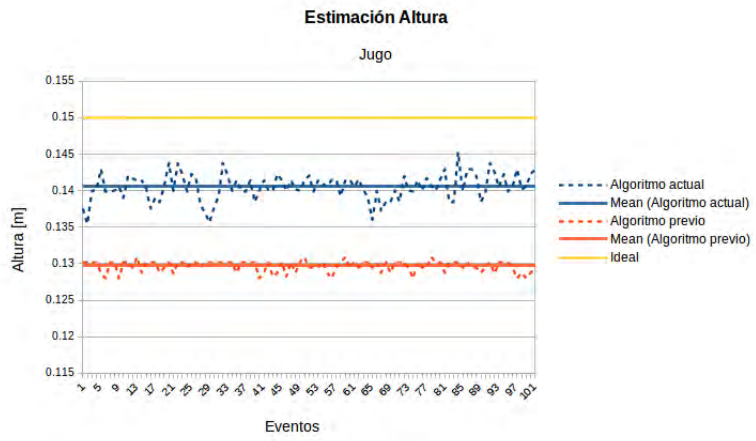


Figura 6.9: Fotografía de los objetos utilizados en las pruebas de cálculo de alturas y de manipulación de objetos.

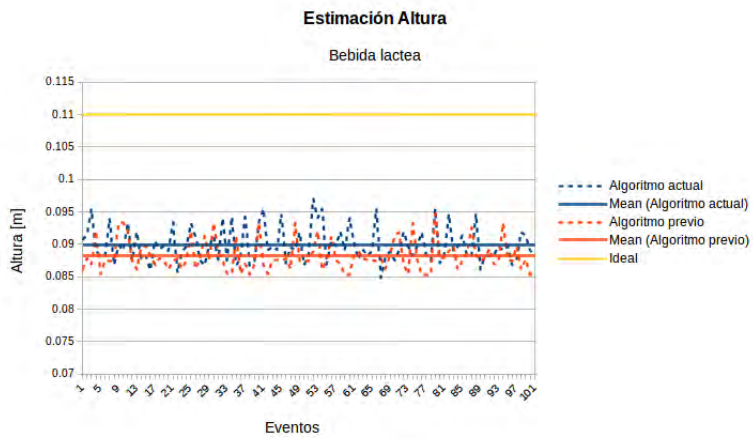
6.2.1. Estimación de alturas



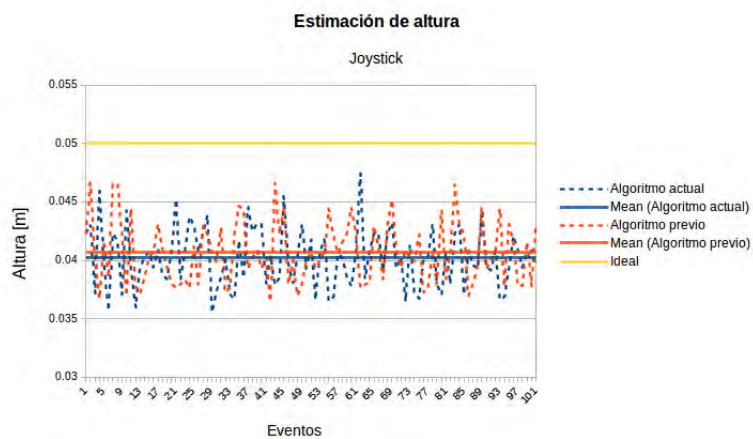
(a)



(b)



(c)



(d)

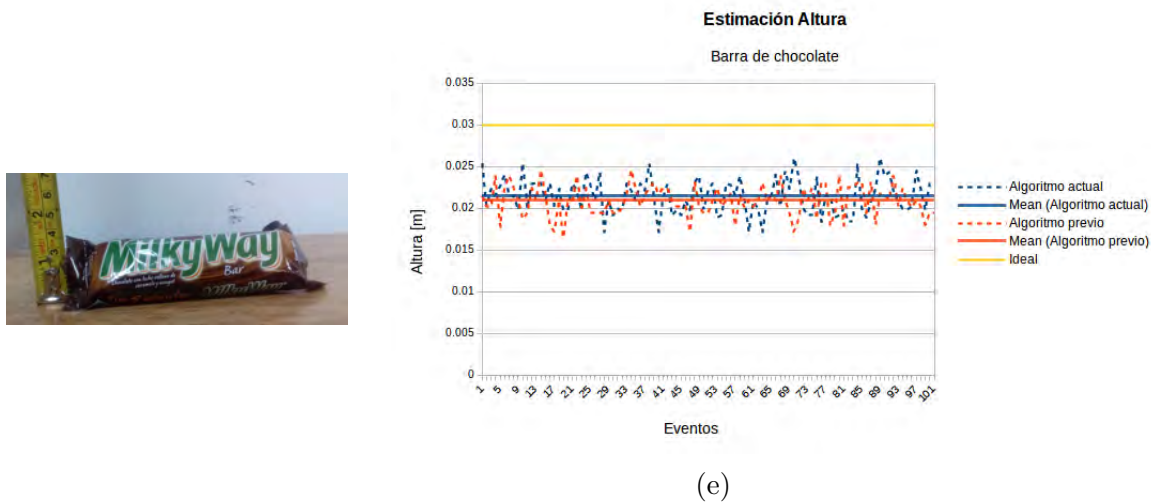


Figura 6.14: Gráficas de alturas para: (a) una caja de cereal, (b) una caja de jugo, (c) un envase de leche, (d) un control de videojuegos, (e) una barra de chocolate. La altura real del objeto (amarillo), la altura estimada con el algoritmo previo (rojo) y la estimación actual (azul).

Posteriormente, se realizó una prueba T para muestras pareadas (prueba t de mediciones repetidas) con el objetivo de saber si son significativamente diferentes. En el caso de este trabajo es necesario saber si las medias de las muestras tomadas realmente representan una mejor estimación de alturas.

A continuación se reportan los valores de medias, con el valor T obtenido para cada conjunto de pruebas y el valor de significancia para comparar altura estimada por algoritmo previo vs altura estimada por algoritmo actual.

| Objeto | Algoritmo previo | | Algoritmo actual | | T_{value} | P_{value} |
|------------------------|------------------|--------------|------------------|--------------|-------------|--------------------------|
| | Altura media [m] | Varianza | Altura media [m] | Varianza | | |
| Cereal | 0.2568 | $1.79e^{-6}$ | 0.2324 | $4.22e^{-6}$ | -26.77 | $p_{value} < 2.2e^{-16}$ |
| Jugo | 0.1407 | $3.28e^{-6}$ | 0.1305 | $1.67e^{-6}$ | -64.854 | $p_{value} < 2.1e^{-16}$ |
| Leche | 0.0901 | $7.33e^{-6}$ | 0.0889 | $5.54e^{-6}$ | 1.8081 | $p_{value} < 2.1e^{-16}$ |
| Control de videojuegos | 0.0485 | $6.28e^{-6}$ | 0.0411 | $7.01e^{-6}$ | 1.3817 | $p_{value} = 0.0175$ |
| Barra de chocolate | 0.0215 | $3.3e^{-6}$ | 0.0213 | $4.4e^{-6}$ | -11.42 | $p_{value} = 0.1335$ |

Tabla 6.2: Tabla de resultados de la prueba T a medidas repetidas para la altura de 5 objetos.

6.3. Cálculo de la orientación del objeto.

En esta sección del trabajo se reportan los resultados obtenidos al realizar las pruebas de estimación de orientación de los objetos sobre un plano. En esta prueba se realizaron 50 tomas de datos para cada uno de los objetos con diferentes orientaciones.

El proceso para poner a prueba la estimación de ángulos de los objetos con respecto del eje Y del robot se describe a continuación. Una vez obtenidos los vectores propios de la matriz de covarianzas, se obtiene un conjunto de vectores ortogonales que nos indican los ejes en los cuales sucede la mayor distribución de puntos de un objeto. Con este conjunto de vectores se realizaron dos procesos:

- Un ordenamiento por magnitud.
- Una ordenamiento por magnitudes en las respectivas componentes x, y, z

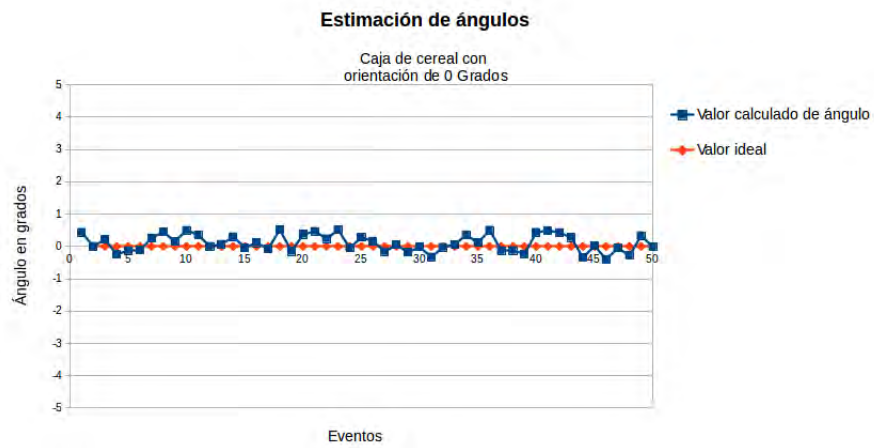
Con la información de los vectores ordenados se puede comparar si el mayor eje de distribución ocurre en el eje z del robot o si ocurre en alguno de los vectores paralelos al conjunto de vectores que definirían el plano sobre el cual se encuentran los objetos.

El algoritmo para calcular el ángulo del objeto con respecto del eje z del robot, se explica de la siguiente manera: se toma el vector paralelo al plano con mayor magnitud, puesto que sabemos del ordenamiento cual es el vector con una componente mayor en el eje z lo descartamos del proceso, con los dos vectores restantes obtenemos el de mayor magnitud.

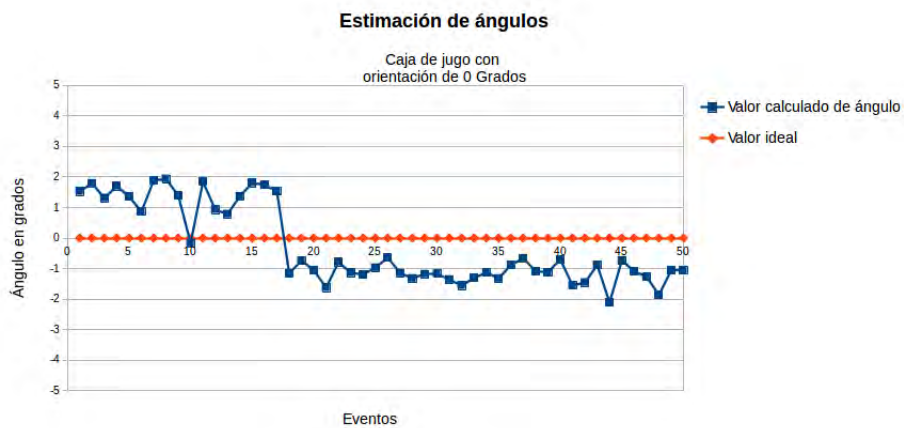
Este vector apuntaría en la dirección y o $-y$ para un caso ideal en que el ángulo del objeto fuera de cero grados medido sobre el eje z del robot. en este punto se realiza un acotamiento para que dicho vector quede en el primer y segundo cuadrante de un sistema coordenado, posteriormente se calcula el ángulo de rotación por medio del producto punto que existe entre el ángulo del vector estimado para el objeto y el vector que apunta en la dirección del vector unitario y del robot.

6.3.1. Pruebas para objetos a 0 grados

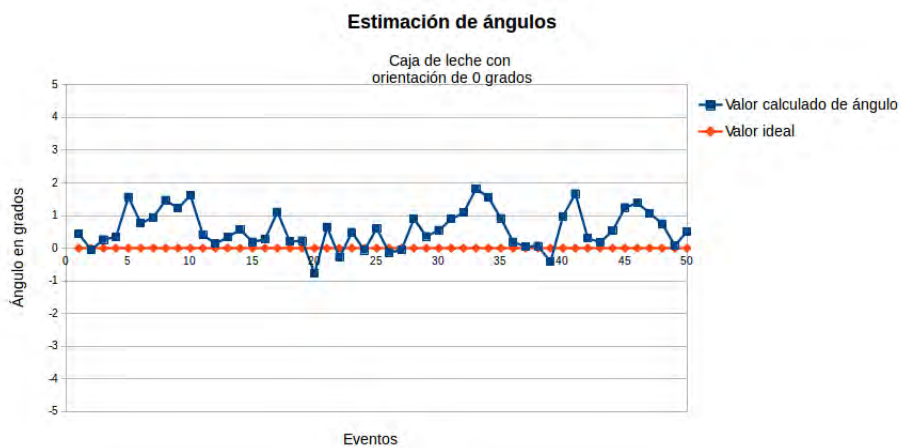
Los resultados que se obtuvieron de la prueba antes mencionada, se muestran en las siguientes gráficas.



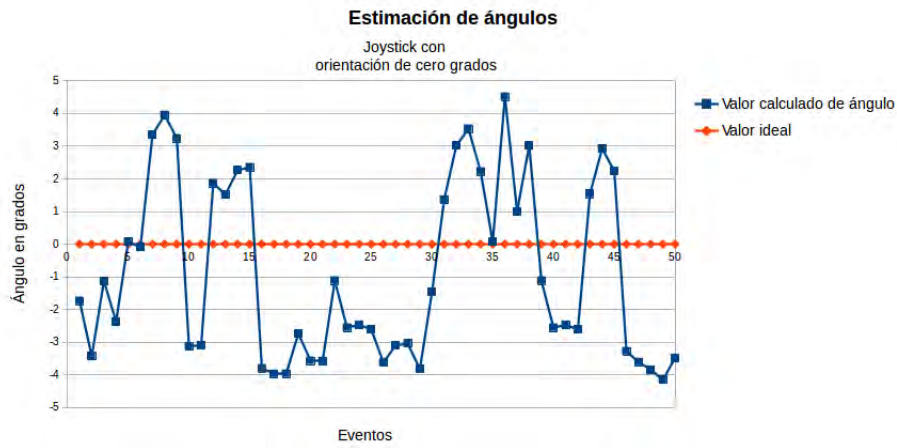
(a)



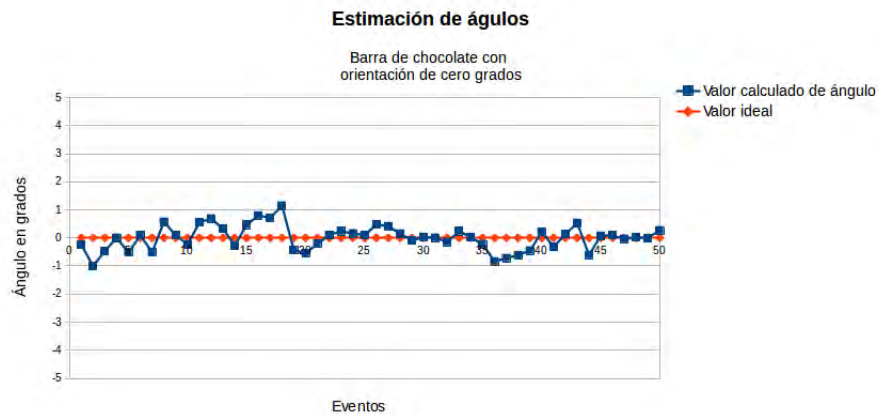
(b)



(c)



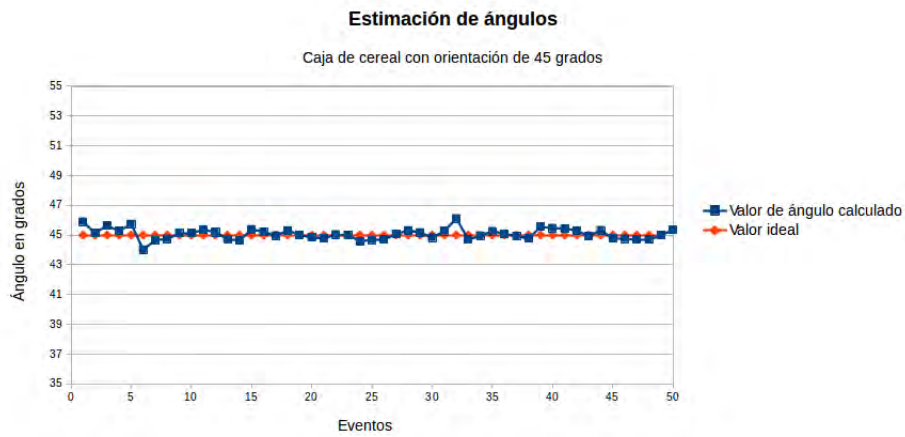
(d)



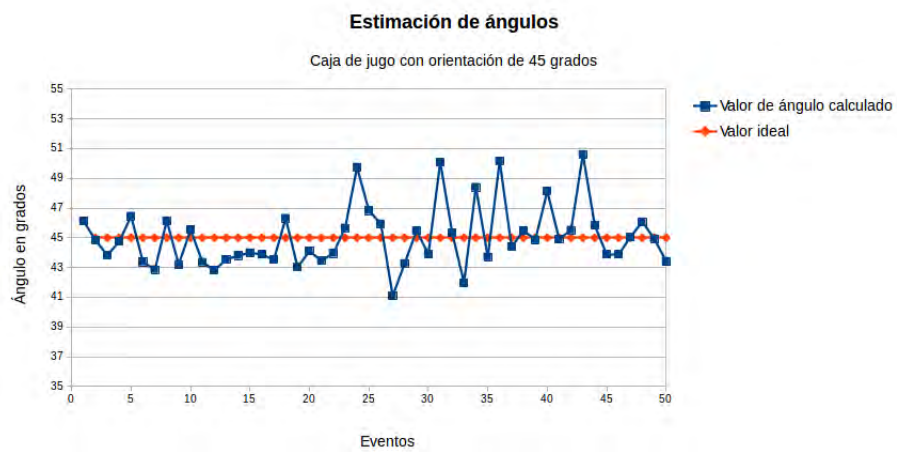
(e)

Figura 6.15: Gráficas de estimaciones de ángulos para: (a) caja de cereal, (b) caja de jugo, (c) envase de leche, (d) control de videojuegos, (e) una barra de chocolate con orientación de 0 grados respecto al eje y del robot.

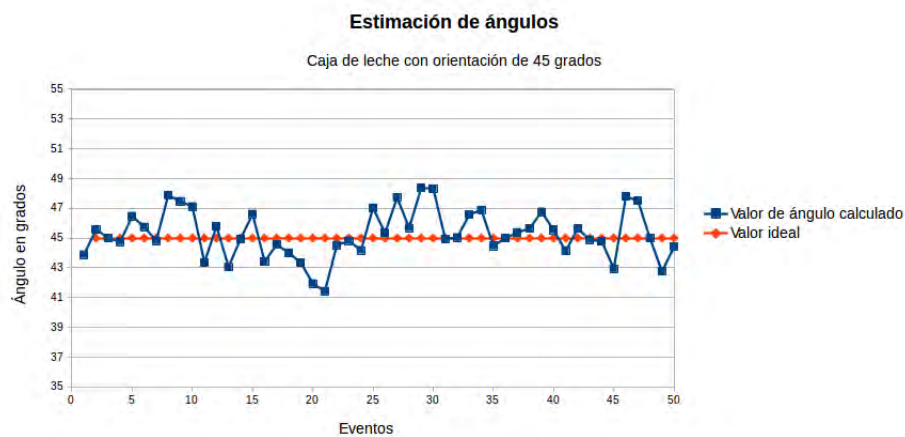
6.3.2. Pruebas para objetos a 45 grados



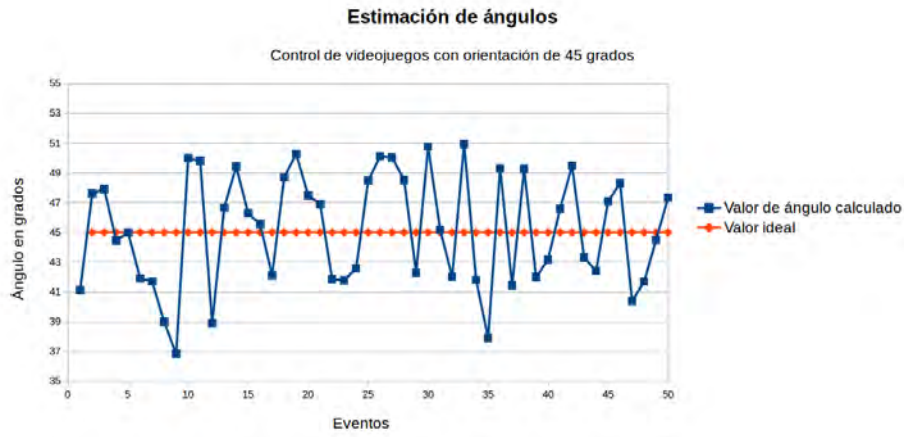
(a)



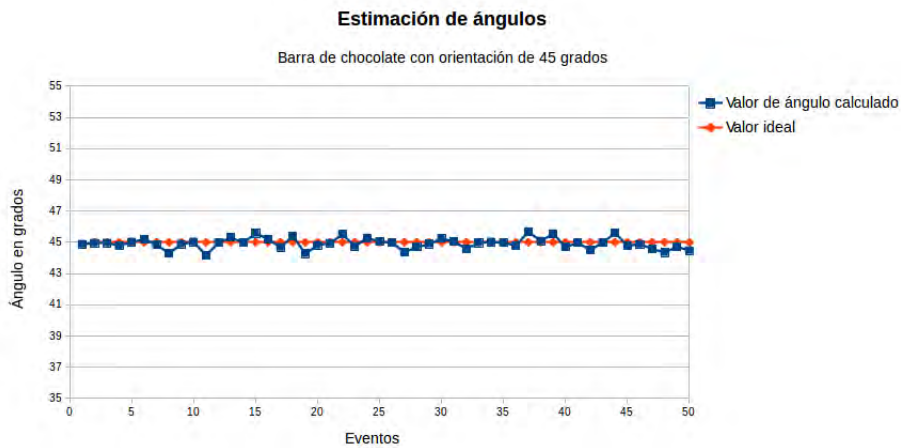
(b)



(c)



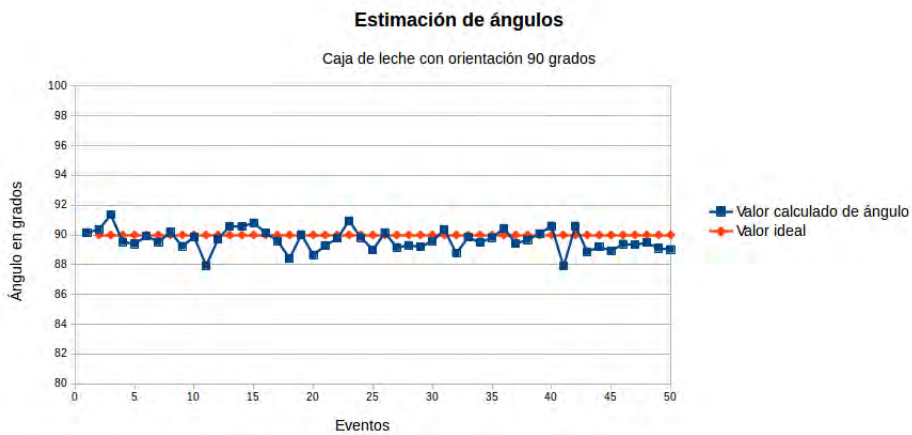
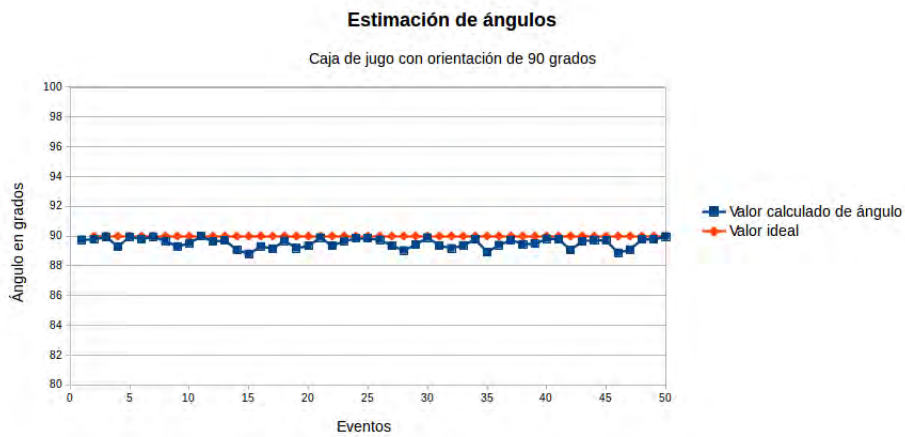
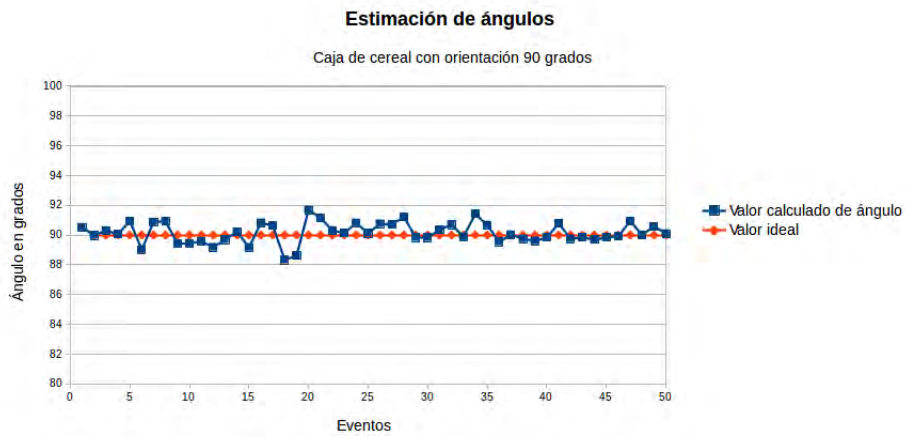
(d)



(e)

Figura 6.16: Gráficas de estimaciones de ángulos para: (a) caja de cereal, (b) caja de jugo, (c) envase de leche, (d) control de videojuegos, (e) una barra de chocolate con orientación de 45 grados respecto al eje y del robot.

6.3.3. Pruebas para objetos a 90 grados



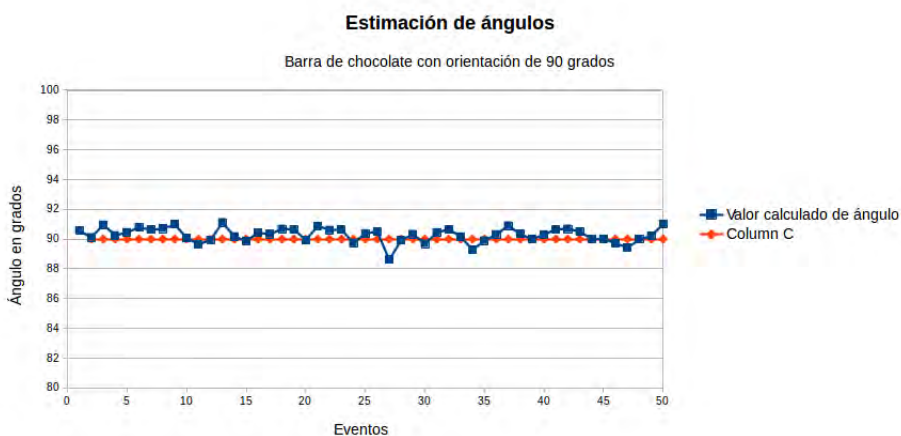


Figura 6.17: Gráficas de estimaciones de ángulos para: (a) caja de cereal, (b) caja de jugo, (c) envase de leche, (d) control de videojuegos, (e) una barra de chocolate con orientación de 90 grados respecto al eje y del robot.

6.4. Tiempo de ejecución para diferentes algoritmos de cinemática inversa.

Como parte de este trabajo se propone evaluar y comparar el desempeño de dos algoritmos empleados para el cálculo de la cinemática inversa de un manipulador de 7 grados de libertad. Para ello se puso a prueba un método geométrico desarrollado previamente y una instancia de solución usando la paquetería moveIt!. La paquetería moveIt! ofrece una solución numérica de cinemáticas para manipuladores. En este caso se puso a prueba el solucionador OMPL (Open Motion Planning Library) [31].

A continuación se reportan los resultados obtenidos. Se muestran gráficas de rapidez de ejecución, cantidad de puntos para los cuales ambos métodos encontraron solución y el valor de una función de costo representativa de una función de energía requerida para mover el manipulador.

6.4.1. Tiempo de ejecución para los dos algoritmos de cinemática inversa.

En esta sección se reportan los resultados obtenidos de evaluar la función de costo para los respectivos algoritmos del cálculo de la cinemática inversa. En la figura 6.18 se muestran los resultados del tiempo de ejecución para en el caso en que ambos algoritmos encontraron una solución. Notamos que no difieren más de 1 [ms], por tanto es un tiempo de ejecución aceptable.

Por otro lado, en la figura 6.19 se reportan los tiempos de ejecución en el caso que los algoritmos no encontraron una solución. Podemos observar en el caso del algoritmo iterativo se supera un tiempo de 3[s], lo cual es totalmente inconveniente si lo que se requiere es velocidad de respuesta.

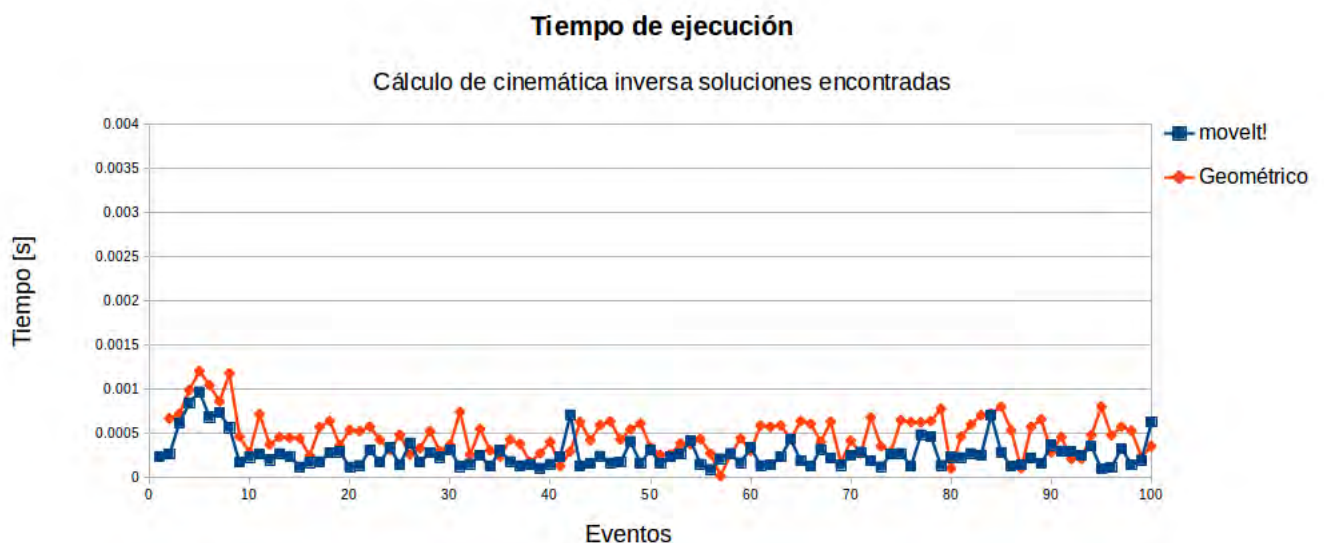


Figura 6.18: Gráfica de tiempo de ejecución para el cálculo de la cinemática inversa por método geométrico(rojo) y por método numérico (azul). Caso de solución encontrada.

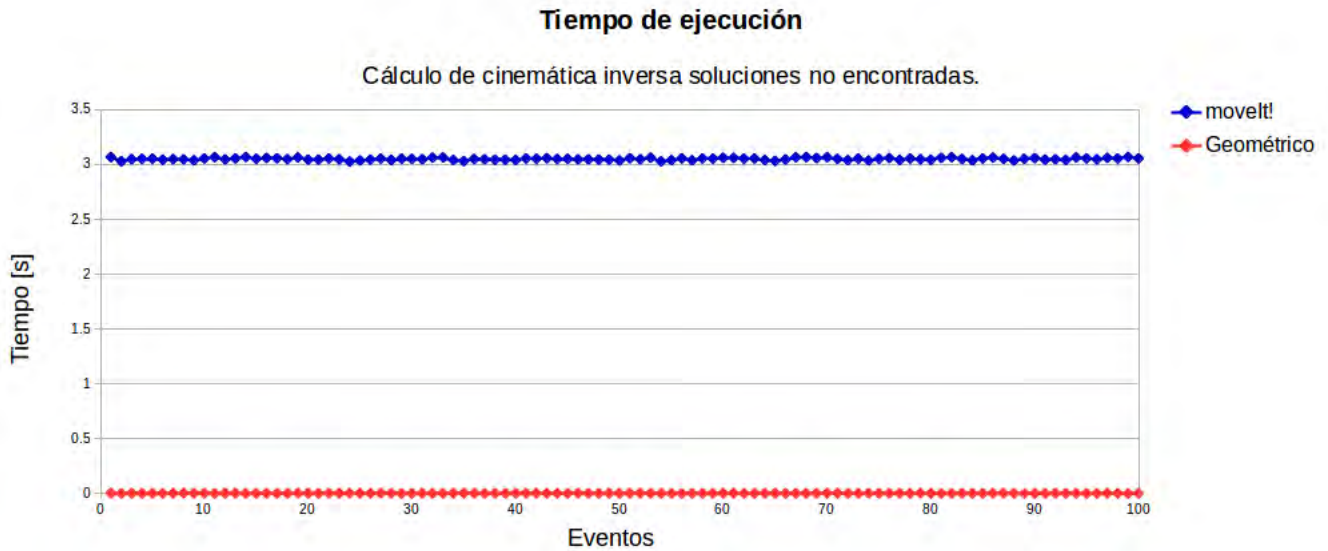


Figura 6.19: Gráfica de tiempo de ejecución para el cálculo de la cinemática inversa por método geométrico(rojo) y por método numérico (azul). Caso de **solución no encontrada**.

Es en este apartado donde cobra sentido la caracterización del espacio de trabajo de manipulador de 7DOF realizada en el apartado 4.4, en el caso de los algoritmos numéricos se carece del conocimiento sobre si una posición objetivo del manipulador se encuentra dentro del espacio de trabajo. En la gráfica 6.19 se puede observar que para un punto que está fuera del alcance del manipulador le toma 3 segundos determinar que la solución no existe, mientras que para el algoritmo geométrico solo le toma fracciones de segundo determinar esta condición.

El conocimiento del espacio de trabajo nos ayuda a determinar por anticipado si un punto se encuentra al alcance del manipulador y de esta manera reducir el tiempo de ejecución de la tarea de toma de objetos.

6.4.2. Evaluación del valor de la función de costo.

Otra de las pruebas que se realizaron con la finalidad de comparar los algoritmos de cálculo de cinemática inversa fue la evaluación de una función de costo. Esta función esta planteada en términos de un mínimo consumo energético, es decir que los actuadores se muevan lo menos posible cuando se parte de la posición cero. En la figura 6.20 se muestra el valor resultante de evaluar la función (4.14) para diferentes puntos cartesianos.

En gráfica 6.21 se muestra la cantidad de ocasiones en que fue menor el valor de la función para cada uno de los algoritmos. Se observó que el método geométrico obtuvo un menor valor en 59 ocasiones, por otro lado el algoritmo iterativo solo obtuvo un menor valor en 4 ocasiones. Estas pruebas se realizaron un total de 150 ocasiones, en las cuales el algoritmo iterativo solo encontró solución 63 ocasiones, como se muestra en la figura 6.22.

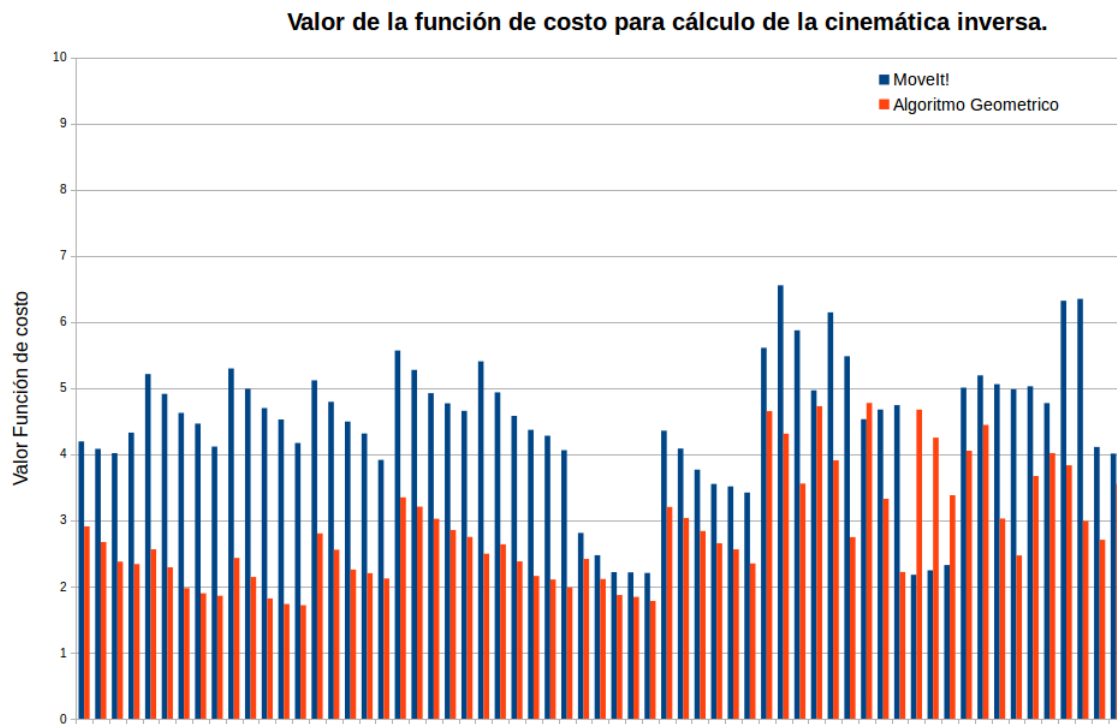


Figura 6.20: Gráfica comparativa de la función de costo para diferentes algoritmos de la cinemática inversa.

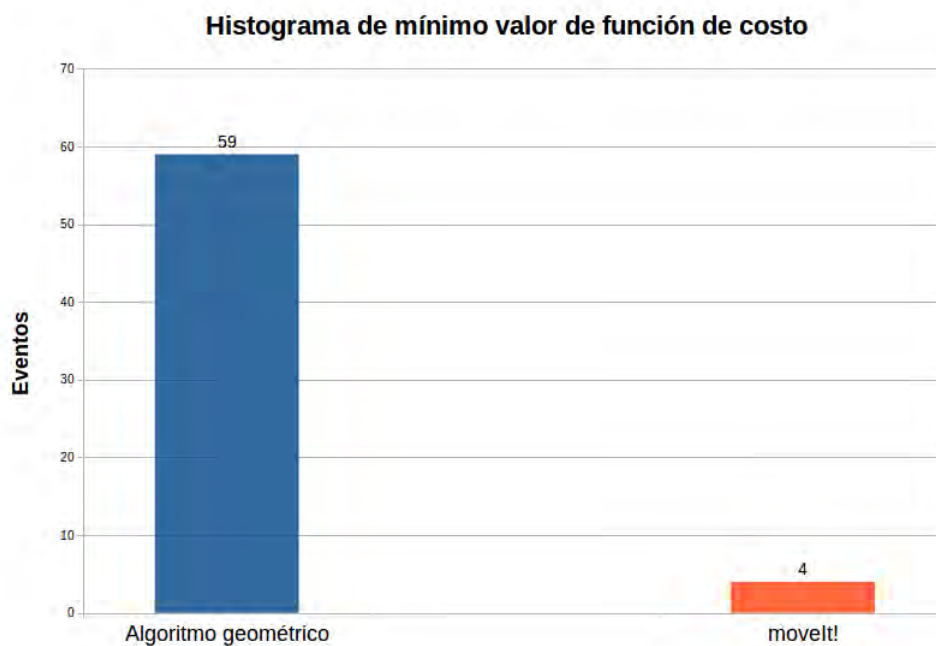


Figura 6.21: Comparación de eventos en los cuales se obtuvo en menor valor en la función de costo 4.31.

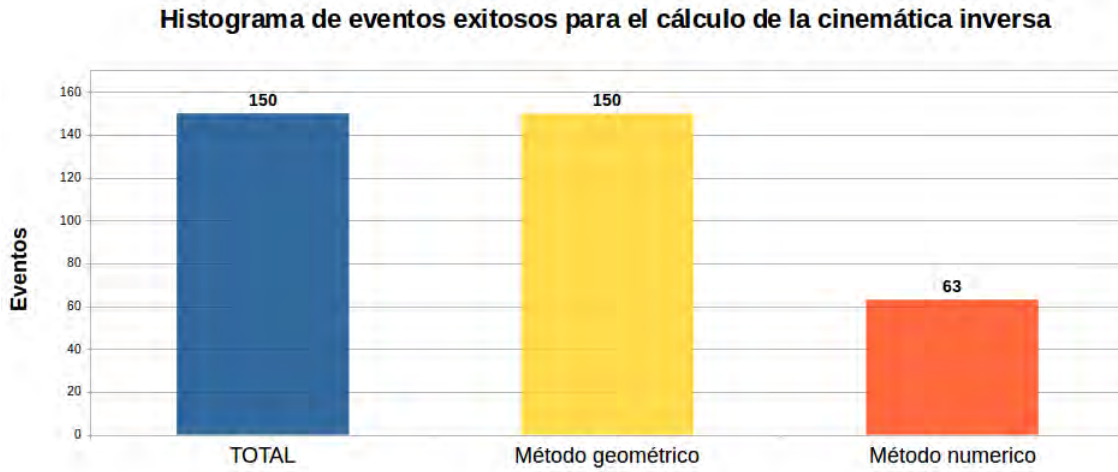


Figura 6.22: Histograma de soluciones encontradas para ambos algoritmos de cinemática inversa.

Se realizó una prueba T para observar con exactitud si las medias de los valores obtenidos por ambos algoritmos son significativamente diferentes. Los resultados se muestran en la tabla 6.3.

| Algoritmo previo | |
|------------------|---------------------------|
| T_{value} | P_{value} |
| 11.011 | $p_{value} = 3.16e^{-16}$ |

Tabla 6.3: Tabla de resultados de la prueba T a medidas repetidas para la función de costo evaluada en dos algoritmos de cinemática inversa.

Se observa que el valor p es menor que 0.05 por lo tanto existe una diferencia significativa de medias entre ambos algoritmos.

6.5. Pruebas de manipulación con el robot real

Como reporte concluyente se realizaron pruebas físicas con el robot de servicio Justina. Para tener una prueba estadística que pueda servir de comparación se realizaron un total de 70 eventos, divididos en 10 repeticiones para 7 objetos. Los objetos con los cuales se realizaron las pruebas fueron: una caja de cereal, un envase de jugo, un envase de bebida láctea, un control de videojuegos, una barra de chocolate, un libro y una bolsa de cartón.

Las orientaciones de los objetos en cada uno de los eventos fueron posiciones. Esto con el fin de poner a prueba las características de exactitud en la orientación de los objetos para el algoritmo propuesto.

En la primera parte de la prueba se realizó la toma de objetos sin considerar la información de orientación, en la segunda fase se realizaron las respectivas pruebas considerando la información de orientación, para determinar si hubo mejora significativa.



(a) Caja de jugo.



(b) Cereal.

Figura 6.23: Robot Justina realizando la tarea de manipulación con información de orientación.

Los resultados se muestran en una tabla de éxitos contra fracasos para cada una de las implementaciones. Posteriormente se muestra la gráfica 6.24 donde se refleja el porcentaje de éxitos para la tarea de toma de objetos.

| Pruebas de manipulación sin considerar información de orientación (Estado actual) | | | | | | | | | | |
|---|---------|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | Eventos | | | | | | | | | |
| Cereal | △ | × | × | × | × | × | × | × | × | × |
| Jugo | × | △ | △ | △ | × | △ | × | △ | △ | × |
| Leche | △ | △ | × | × | △ | × | △ | △ | △ | △ |
| Control de videojuegos | × | × | × | × | × | × | × | × | × | × |
| Barra de chocolate | × | × | × | × | × | × | × | × | × | × |
| Libro | × | × | × | × | × | × | × | × | × | × |
| Bolsa de cartón | × | × | × | × | △ | × | × | × | × | × |

Tabla 6.4: Tabla de éxitos-fracasos para la tarea de manipulación de objetos (**Sin información de orientación**) △ Éxitos – × Fracasos.

| Pruebas de manipulación con información de orientación (Implementación) | | | | | | | | | | |
|---|---------|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | Eventos | | | | | | | | | |
| Cereal | △ | △ | △ | △ | × | △ | × | △ | × | × |
| Jugo | × | △ | △ | △ | △ | △ | △ | × | △ | △ |
| Leche | △ | △ | △ | × | △ | △ | △ | × | △ | △ |
| Control de videojuegos | △ | △ | △ | × | × | △ | △ | × | △ | △ |
| Barra de chocolate | △ | △ | △ | △ | × | △ | × | △ | △ | × |
| Libro | △ | △ | △ | △ | × | △ | × | △ | × | △ |
| Bolsa de cartón | △ | △ | × | △ | △ | △ | × | △ | △ | △ |

Tabla 6.5: Tabla de éxitos-fracasos para la tarea de manipulación de objetos (**Con información de orientación**) △ Éxitos – × Fracasos.

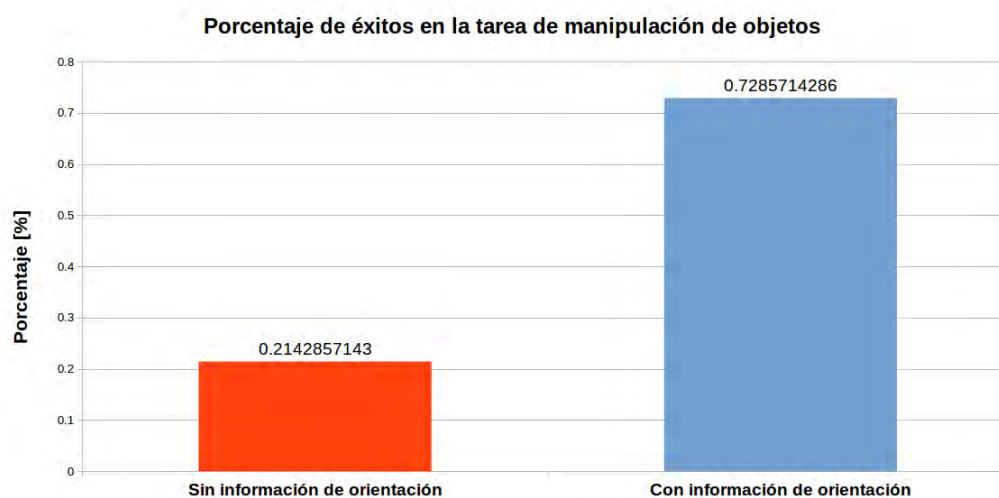


Figura 6.24: Gráfica comparativa de éxitos fracasos con información de orientación y sin información de la orientación de los objetos.

| Objeto | Sin información de orientación | | Con información de orientación | |
|------------------------|--------------------------------|----------|--------------------------------|----------|
| | Éxitos | Fracasos | Éxitos | Fracasos |
| Cereal | 1 | 9 | 6 | 4 |
| Jugo | 6 | 4 | 8 | 2 |
| Leche | 7 | 3 | 8 | 2 |
| Control de videojuegos | 0 | 10 | 7 | 3 |
| Barra de chocolate | 0 | 10 | 7 | 3 |
| Libro | 0 | 10 | 7 | 3 |
| Bolsa de cartón | 1 | 9 | 8 | 2 |

Tabla 6.6: Tabla de éxitos fracasos.

| Media de éxitos sin información de orientación | Media de éxitos con información de orientación | Valor T | Valor P |
|--|--|---------|---------|
| 2.1428 | 7.2857 | -5.2143 | 0.00198 |

Tabla 6.7: Tabla de resultados de la prueba T para la tarea de manipulación de objetos en un robot de servicio.

Se obtuvo un mayor valor de media de éxitos para el caso de la implementación utilizando información de la orientación de los objetos. Posteriormente se realizó una prueba T para observar si existía diferencia significativa entre estas medias, como el valor P obtenido de esta prueba es menor que 0.05 se considera que la diferencia es significativa; por tanto, con incluir información del objeto a la tarea de manipulación esta mejora significativamente.

Capítulo 7

Conclusiones y trabajo futuro

En este capítulo se resumen los resultados obtenidos de la realización de este trabajo de tesis y se presentan algunas consideraciones que se deben tener en cuenta al implementar el sistema de manipulación desarrollado. De la misma manera se plantean propuestas para continuar con este trabajo de investigación.

7.1. Conclusiones

Partiendo de la información obtenida de los resultados podemos concluir que un algoritmo RANSAC con un umbral de 0.02 [m] y un número de 1000 iteraciones nos ayudará a encontrar la ecuación de un plano así como una lista de puntos pertenecientes al mismo. Esta implementación tomará 8 veces más tiempo que la implementación con la cual cuenta el robot de servicio Justina; sin embargo reducirá el error relativo respecto al modelo real de un 39.9% al 8.83% (Figura: 6.1) lo que puede ayudar a mejorar el sistema de manipulación de objetos.

Se pueda añadir que es posible extraer características de los objetos sobre un plano utilizando una segmentación por planos y una posterior extracción de los puntos sobre el plano. La extracción de la nube de puntos ordenada perteneciente a los objetos sobre el plano puede aportar características espaciales tales como el centroide, altura y orientación. Para el caso de la altura de los objetos, la implementación desarrollada en este documento de tesis muestra un valor de estimación más cercano a la medida real que el algoritmo actual, como se muestra en las gráficas 6.10 - 6.12; por lo tanto se puede decir que la implementación reportada en este documento es más exacta en comparación con el algoritmo ya existente en el robot de servicio Justina.

Las pruebas T realizadas para el caso de las alturas ayuda a observar que en general la propuesta de algoritmo descrito en este documento presenta diferencias significativas entre las medias de alturas, aunado a eso se observa para los objetos con mayor altura una media más cercana a la real (Figura: 6.6). Por tanto se concluye que la propuesta de este trabajo estima mejor la altura de los objetos con mayor altura.

El análisis de componentes principales aplicado a nubes de puntos de objetos segmentados ayuda a calcular el ángulo de orientación de un objeto sobre el plano. El algoritmo para obtener la orientación de los objetos descrita en este documento no presenta un error mayor a 5 grados en ninguno de los casos. Esto, para las tareas dirigidas a los robots de servicio, se encuentra en términos aceptables, dado que los elementos a manipular no exigen extremar precauciones en cuanto a manipulabilidad.

Podemos hacer notar, además, que el objeto que presenta una mayor varianza en la estimación de su orientación es el control para videojuegos, esto debido a que es el único que no posee una forma basada en primitivas.

Por otro lado, en cuanto a los algoritmos del cálculo de la cinemática inversa, podemos mencionar que la paquetería *moveIt!* con el solucionador *OMPL* para el caso del manipulador específico del robot de servicio *Justina*, no resulta en una mejora significativa. Es menos óptimo tomando como costo la cantidad de movimiento que el manipulador tiene que realizar, en cuanto al número de soluciones que puede encontrar (figura 6.34), y en caso de no encontrar solución el tiempo de ejecución es significativamente mayor que en el caso del algoritmo geométrico (figura 6.31) lo cual no es conveniente para un manipulador si se requiere velocidad de ejecución.

Fue importante poner a prueba este algoritmo puesto que existía la hipótesis que podría dar mejores resultados por ser uno de los algoritmos más utilizados en el ámbito de la robótica de manipuladores. Con las pruebas realizadas en este trabajo, se observó que no hay mejora significativa con la implementación de este algoritmo en un manipulador de 7DOF con configuración antropomórfica.

En cuanto a los eventos en los cuales fue exitoso el cálculo de la cinemática inversa para ambos algoritmos, se observó que el algoritmo geométrico ofrece un conjunto de soluciones en las cuales requiere un menor gasto energético para su solución (figura 6.32).

Incluir información sobre la orientación de los objetos a la tarea de manipulación mejora de un 21.4% a un 72.8%. Por lo tanto podemos decir que incluir esta información mejora significativamente la tarea de manipulación para un robot de servicio con un manipulador de 7DOF como *Justina* (Figura: 6.24). Aunque pareciera evidente que el incluir una mayor cantidad de información a la tarea de manipulación de objetos se obtendrían mejores resultados, es conveniente mencionar que la actual metodología de solución ha dado buenos resultados, prueba de ello es la competencia internacional *Robocup 2017* donde el robot de servicio *Justina* obtuvo un puntaje de 15 puntos en las tareas de manipulación de objetos.

Con el sistema propuesto (extracción del plano, cálculo de la altura y orientación) la manipulación de objetos presentó una mejora significativa con respecto a la implementación actual en el robot de servicio doméstico *Justina*.

7.2. Trabajo futuro

Como parte de la continuidad de este trabajo se sugiere incluir la generación de una trayectoria para el efector final del brazo manipulador, con lo cual se evitarían posibles colisiones con objetos estáticos. Este es uno de los aspectos más importantes a considerar en el manipulador de 7DOF, en este trabajo de tesis solo se muestra la capacidad de llevar el efector final (gripper) una posición objetivo; sin embargo es importante revisar la trayectoria que este seguiría para observar posibles colisiones e incluir esa información en el planeador de acciones.

Por otro lado, se observó que el sistema de manipulación no cuenta con algoritmos de control que ayuden a realizar movimientos estables, tal es el caso de la reducción de velocidad cuando el manipulador llega a la posición objetivo. Se propone como trabajo futuro incluir algoritmos de control que permitan realizar movimientos más rápidos y precisos, se proponen control de par y control de posición para el manipulador, así como la generación de un perfil de velocidad que contribuya a mejorar la estabilidad del manipulador.

Bibliografía

- [1] R. C. Arkin, *Behavior-based robotics*. MIT press, 1998.
- [2] “Sitio electrónico de la federación internacional de robótica. robots de servicio, definición y clasificación..” https://ifr.org/img/office/Service_Robots_2016_Chapter_1_2.pdf. Consultado: 2-2018.
- [3] SEDESOL, “Diagnóstico sobre la situación de las personas con discapacidad en México.” <https://www.gob.mx/sedesol>, 2016. Consultado: 12-2017.
- [4] INEGI, “La discapacidad en México, datos al 2014.” <http://www.inegi.org.mx/>, 2014. Consultado: 12-2017.
- [5] “Robot de servicios hsr (human support robot). robot de asistencia humana desarrollado por la compañía Toyota (c).” http://www.toyota-global.com/innovation/partner_robot/family_2.html. Consultado: 12-2017.
- [6] T. Wisspeintner, T. Van Der Zant, L. Iocchi, and S. Schiffer, “Robocup home: Scientific competition and benchmarking for domestic service robots,” *Interaction Studies*, vol. 10, no. 3, pp. 392–426, 2009.
- [7] “Sitio electrónico de la federación mexicana de robótica.” <https://www.femexrobotica.org/tmr2016/rcm-at-home>. Consultado: 8-2017.
- [8] J. Stückler, M. Schwarz, and S. Behnke, “Mobile manipulation, tool use, and intuitive interaction for cognitive service robot Cosero,” *Frontiers in Robotics and AI*, vol. 3, p. 58, 2016.
- [9] R. Bloss, “Mobile hospital robots cure numerous logistic needs,” *Industrial Robot: An International Journal*, vol. 38, no. 6, pp. 567–571, 2011.
- [10] H. Endres, W. Feiten, and G. Lawitzky, “Field test of a navigation system: Autonomous cleaning in supermarkets,” in *Robotics and Automation, 1998. Proceedings. 1998 IEEE International Conference on*, vol. 2, pp. 1779–1781, IEEE, 1998.
- [11] M. Quigley, K. Conley, B. Gerkey, J. Faust, T. Foote, J. Leibs, R. Wheeler, and A. Y. Ng, “Ros: an open-source robot operating system,” in *ICRA workshop on open source software*, vol. 3, p. 5, Kobe, Japan, 2009.
- [12] “Robot Carnegie Mellon herramientas de navegación.” <http://carmen.sourceforge.net/>. Consultado: 10-2016.
- [13] “Página principal universidad Carnegie Mellon.” <http://www.cmu.edu/>. Consultado: 1-2017.
- [14] S. Balakirsky, C. Scrapper, S. Carpin, and M. Lewis, “Usarsim: providing a framework for multirobot performance evaluation,” in *Proceedings of PerMIS*, vol. 2006, 2006.

- [15] “Simulador gráfico rViz.” <http://wiki.ros.org/rviz>. Consultado: 11-2016.
- [16] “Simulador gráfico Gazebo.” <http://gazebo.org/>. Consultado: 11-2016.
- [17] “Biblioteca abierta visión computacional.” <http://sourceforge.net/projects/opencv/>. Consultado: 10-2016.
- [18] G. R. Bradski and V. Pisarevsky, “Intel’s computer vision library: applications in calibration, stereo segmentation, tracking, gesture, face and object recognition,” in *Computer Vision and Pattern Recognition, 2000. Proceedings. IEEE Conference on*, vol. 2, pp. 796–797, IEEE, 2000.
- [19] T. Wisspeintner and W. Nowak, *VolksBot-A Construction Kit for Multi-purpose Robot Prototyping*. INTECH Open Access Publisher, 2007.
- [20] “ActivRobots.” <http://www.activrobots.com>. Consultado: 10-2016.
- [21] “Robot de plataforma Standar Pepper.” <https://www.ald.softbankrobotics.com/en/cool-robots/pepper>. Consultado: 11-2016.
- [22] A. O. Baturone, *Robótica: manipuladores y robots móviles*. Marcombo, 2005.
- [23] M. W. Spong and M. Vidyasagar, *Robot dynamics and control*. John Wiley & Sons, 2008.
- [24] J.-J. Hernandez-Lopez, A.-L. Quintanilla-Olvera, J.-L. López-Ramírez, F.-J. Rangel-Butanda, M.-A. Ibarra-Manzano, and D.-L. Almanza-Ojeda, “Detecting objects using color and depth segmentation with kinect sensor,” *Procedia Technology*, vol. 3, pp. 196–204, 2012.
- [25] Z. Zhang, “Microsoft kinect sensor and its effect,” *IEEE multimedia*, vol. 19, no. 2, pp. 4–10, 2012.
- [26] S. M. Holland, “Principal components analysis (pca),” *Department of Geology, University of Georgia, Athens, GA*, pp. 30602–2501, 2008.
- [27] “Repositorio utilizado para el desarrollo de esta tesis..” <https://github.com/edgarVazquez43/tesis/tree/master/ROS>. Consultado: 12-2017.
- [28] A. Mensink, “Characterization and modeling of a dynamixel servo,” *Trabajo Individual de Investigación en el Electrical Engineering Control Engineering de la University of Twente*, 2008.
- [29] “Sitio electronico oficial robotis.” <http://www.robotis.us/dynamixel/>. Consultado: 8-2017.
- [30] Y. Cao, K. Lu, X. Li, and Y. Zang, “Accurate numerical methods for computing 2d and 3d robot workspace,” *International Journal of Advanced Robotic Systems*, vol. 8, no. 6, p. 76, 2011.
- [31] S. Chitta, I. Sucan, and S. Cousins, “Moveit![ros topics],” *IEEE Robotics & Automation Magazine*, vol. 19, no. 1, pp. 18–19, 2012.
- [32] “Página electronica principal del framework moveit!.” <https://moveit.ros.org/>. Consultado: 11-2017.
- [33] J. Cruz, *Detección y reconocimiento de objetos usando imágenes RGB y nubes de puntos organizadas*. Tesis de licenciatura Universidad Nacional Autónoma de México, 2016.