



POSGRADO INTERINSTITUCIONAL EN CIENCIA Y TECNOLOGÍA

CENTRO DE INGENIERÍA Y DESARROLLO INDUSTRIAL

Reconstrucción Tridimensional para Control Simultáneo de Fuerza y Posición de un Robot

TESIS

QUE PARA OBTENER EL GRADO ACADÉMICO DE:

MAESTRA EN CIENCIA Y TECNOLOGÍA CON ESPECIALIDAD EN
MECATRÓNICA

PRESENTA:

Ing. Lina Teresa Musni Erants Solórzano

ASESORES

Dr. Hugo Jiménez Hernández

Dr. Luis Govinda García Valdovinos



Santiago de Querétaro, Querétaro, octubre 2016

Resumen

El proceso necesario para que un robot manipulador pueda generar una trayectoria a lo largo de una superficie mientras al mismo tiempo ejerce fuerza sobre ella, implica conocer el ambiente o superficie sobre el que se ejecuta la tarea; sin embargo en la mayoría de las ocasiones ese ambiente es incierto, y por ello es necesario buscar una forma de lidiar con este problema.

En este proyecto se presenta una metodología para implementar un control simultáneo de fuerza y posición basado en el principio de ortogonalización sobre una superficie altamente rígida desconocida. La propuesta consiste en reconstruir tridimensionalmente la superficie desconocida usando un par-estéreo de cámaras y posteriormente aplicar a la superficie reconstruida un esquema de control simultáneo de fuerza y posición, usando una ley de control por modos deslizantes de segundo orden; sin embargo, aplicar el esquema de control resulta no ser trivial, puesto que se requiere conocer la geometría de la superficie, así como su orientación respecto al manipulador, por ello reconstruir la superficie adquiere una gran importancia dentro del proyecto.

La metodología propuesta consta de diversos procesos divididos en dos etapas 1) reconstrucción tridimensional (3D) haciendo uso de los mapas de disparidad para detección de profundidad y 2) el mapeo de trayectorias sobre el ambiente reconstruido. El último proceso a su vez es dividido en sub-etapas que se desarrollan a lo largo de este trabajo, y que representan el mayor aporte de este proyecto, porque se estima una transformación entre la nube de puntos obtenida a partir de reconstrucción tridimensional y la generación de una trayectoria sobre una superficie incierta.

La importancia del proyecto recae en la obtención de los vectores normales que se generan a partir de la nube 3D del ambiente reconstruido; dichos vectores repre-

sentan la orientación del ambiente respecto a la base del manipulador.

El proceso metodológico desarrollado es validado semi-experimentalmente usando un manipulador industrial Catalyst-5 para generar una trayectoria circular. Se cuenta con el modelo dinámico de los tres primeros grados de libertad del robot Catalyst-5 y además se obtiene la nube de puntos generada a partir de la reconstrucción tridimensional de una placa de nylamid, de modo que es posible obtener una función que describa a la superficie desconocida para poder implementar el esquema de control propuesto.

El resultado del proyecto es el desarrollo de una metodología que permite la implementación de un control simultáneo de fuerza y posición basado en el principio de ortogonalización sobre superficies o ambientes inciertos, aportando así, versatilidad al esquema de control propuesto.

Finalmente, es importante mencionar que este proyecto tiene aplicación directa en la manufactura de palas de aerogeneradores, expuesta al final del presente trabajo, lo que hace su aporte más interesante.

Abstract

The fundamental process for a robotic arm that generates a path across a surface and at the same time applies force over that surface, requires knowing the environment or the surface, where the task is performed; nevertheless most of the time that environment is unknown. That is why it is important to find a way to deal with this problem.

This project presents a methodology for applying a hybrid force/position control based on the orthogonalization principle over an unknown surface. The proposal consist in reconstructing a surface on a tridimensional model using stereopsis of cameras, and after that, applying a hybrid control scheme using a second order sliding control law. However, applying this kind of control is not as trivial as it seems, because it is required to know the surface geometry and its orientation in regard to the robotic arm. Therefore the tridimensional reconstruction of the surface becomes important in this project.

The proposed methodology includes the following processes: 1) tridimensional reconstruction using disparity maps, 2) path mapping over a reconstructed surface. The second process is divided into sub processes that will be described in this document and these sub processes represent the main contribution of this project, because in step two the relation between the point cloud obtained by the reconstruction and the robot path is estimated.

The proposed methodology is semi-experimentally validated using an industrial robot called Catlayst-5 for a circular path generation. The dynamic model of the th-

ree degrees of freedom of the robotic arm is known, and a point cloud is generated with the three-dimensional reconstruction of a polyamide nylon plate. In consequence, it is possible to estimate a function that describes an unknown surface for implementing the proposed control scheme.

The final result is the development of a methodology that leads to implement a simultaneous force/position control based on the orthogonalization principle over uncertain surfaces, giving versatility to the proposed control scheme.

Finally, it is important to say that this project has a direct application in the manufacturing of wind turbines, which adds value to this project.

Dedicatoria

Dedico este trabajo a mis padres, Guillermina y Martín, por apoyarme en este proyecto y en los muchos que he tenido a lo largo de mi vida. Gracias por guiarme por el camino correcto.

A mis hermanos Yhala y Martín, porque a pesar de la distancia siempre los llevo en mis pensamientos.

A José Antonio, la persona que estuvo apoyándome en todo momento. Gracias por motivarme a no desistir en ningún momento.

*“La única manera de encontrar los límites de lo posible
es yendo más allá de ellos en el imposible”.*

Arthur C. Clarke

Agradecimientos

Agradezco a Dios por guiarme y permitirme concluir esta meta de mi vida.

A mis padres, Guillermina y Martín, porque siempre apoyaron mis proyectos de vida. Gracias por la comprensión y el amor que me brindaron siempre.

A José Antonio por las palabras de aliento que siempre me dió.

A mi asesor, Dr. Hugo Jiménez Hernández, por darme la oportunidad de conocer el mundo de la visión por computadora.

A mi co-asesor el Dr. Luis Govinda García Valdovinos, por ofrecerme la oportunidad de trabajar con él desde el primer momento en que llegué a CIDESI y compartirme su conocimiento.

Al Centro Mexicano de Innovación en Energía Eólica (CEMIE-Eólico) por el apoyo que me brindaron para concluir mi proyecto.

Al Dr. Hugo Gámez Cuatzin y al Mc. Roberto Sosa Cruz por tomar en cuenta mi trabajo para tan importante proyecto.

A mis grandes amigos, Alan, Hugo, Irene, Jaqueline, Victor Hugo y a los compañeros del edificio de Mecatrónica, gracias por los buenos momentos.

A CONACYT, PICyT y CIDESI por hacerme parte de esta gran familia.

Índice

Resumen	I
Abstract	III
Dedicatoria	V
Agradecimientos	VI
1. Introducción	1
1.1. Antecedentes	2
1.2. Definición del Proyecto	4
1.3. Objetivos	5
1.3.1. Objetivo General	5
1.3.2. Objetivos Específicos	5
1.4. Justificación	6
1.5. Hipótesis	7
1.6. Aportaciones	7
1.7. Alcances y Limitaciones	7
1.8. Organización	8
2. Fundamentos de Robótica y Visión por Computadora	9
2.1. Visión por Computadora	9
2.1.1. Calibración de Cámara	9
2.1.2. Reconstrucción Tridimensional	17
2.1.3. Estéreo Visión	17

2.2. Entorno de Manipuladores	20
2.2.1. Cinemática	21
2.2.2. Modelo Dinámico	27
2.3. Control Fuerza/Posición	28
2.3.1. Modelo Dinámico del Manipulador Restringido	28
2.3.2. Principio de Ortogonalización	29
3. Integración del Control Fuerza/Posición con la Superficie Recons-	
truida	33
3.1. Metodología	33
3.2. Adquisición de Imágenes	35
3.3. Calibración de Cámaras	36
3.4. Proceso de Reconstrucción	36
3.5. Orientación de Manipulador y Transformación de Nube	37
3.6. Obtención de Vectores Normales $J\varphi(q)$	38
3.7. Componentes ABC de $J\varphi(q)$	39
3.8. Mapeo y Generación de Trayectoria Deseada	41
4. Resultados Experimentales	42
4.1. Resultados de la Etapa de Visión por Computadora	42
4.1.1. Consideraciones Experimentales	42
4.1.2. Proceso de Calibración	43
4.1.3. Proceso de Reconstrucción	46
4.2. Resultados de la Etapa de Mapeo de Trayectoria	51
4.2.1. Consideraciones Experimentales	51
4.2.2. Proceso de Mapeo de Trayectoria	51
4.3. Resultados y Consideraciones Finales del Control Simultáneo	59
4.3.1. Consideraciones Experimentales	59
4.3.2. Plataforma Semiexperimental	60
4.3.3. Resultados de Experimentación	61
4.4. Comentarios Generales	68

5. Aplicación Directa del Proyecto	69
5.1. Acomodo Automático de Fibra	70
5.2. Forma de Aplicación	70
5.3. Experimentos	72
5.3.1. Condiciones Experimentales	72
5.3.2. Resultados	74
5.4. Comentarios Generales	76
6. Conclusiones del Proyecto y Trabajo Futuro	77
6.1. Conclusiones	77
6.2. Trabajo Futuro	78
Bibliografía	79

Índice de Figuras

1.1. Esquema General del Proyecto.	4
2.1. Modelo geométrico de la cámara.	10
2.2. Patrones de Calibración.	11
2.3. Ejemplo de Reconstrucción 3D.	17
2.4. Estéreo Visión.	18
2.5. Búsqueda de Correspondencia entre Imágenes.	18
2.6. Ejemplo de SAD para correspondencia.	20
2.7. Robot Catalyst-5.	21
2.8. Diagrama de Robot 5 gdl.	22
2.9. Robot 3gdl.	24
2.10. Robot eslabón 2 y 3.	25
2.11. Principio de Ortogonalización.	29
3.1. Diagrama de las etapas del proyecto	34
3.2. Etapas del Proyecto Representadas Gráficamente	34
3.3. Metodología propuesta	35
3.4. Vectores de Nube 3D.	39
3.5. Vectores Normales.	39
3.6. Vectores de nube 3D	40
4.1. Patrón de Calibración.	43
4.2. Resultado del Detector de Esquinas Harris.	44
4.3. Orientaciones del Patrón Usadas.	44
4.4. Reproyección de Parámetros de Calibración.	46

4.5. Imágenes Obtenidas Mediante Cámara 3D.	47
4.6. Diagrama del Proceso de Reconstrucción.	47
4.7. Disparidad de las Imágenes.	48
4.8. Mapa de Disparidad Inicial.	48
4.9. Mapa de Disparidad Final.	49
4.10. Nube de puntos 3D.	50
4.11. Relación de Calibración.	52
4.12. Calibración del Robot.	53
4.13. Programa Labwindows.	53
4.14. Reproyección de Puntos.	54
4.15. Nube de puntos 3D Placa Vertical.	55
4.16. Reproyección de Puntos.	55
4.17. Nube de puntos 3D Placa Inclinada.	56
4.18. Segmento de Vectores Normales de Nube 3D.	57
4.19. Orientaciones de Placa Nylamid.	57
4.20. Descripción de Plataforma Semiexperimental.	61
4.21. Trayectoria sobre Ambiente Reconstruido.	62
4.22. Seguimiento de Trayectoria en el Espacio Cartesiano.	63
4.23. Trayectoria Espacio Articular.	63
4.24. Pares de Control.	64
4.25. Seguimiento de Perfil de Fuerza.	65
4.26. Trayectoria sobre Ambiente Reconstruido.	66
4.27. Seguimiento de Trayectoria en el Espacio Cartesiano.	66
4.28. Trayectoria Espacio Articular.	67
4.29. Pares de Control.	67
4.30. Seguimiento de Perfil de Fuerza.	68
5.1. Elementos de un aerogenerador	69
5.2. Diagrama de elementos propuestos	71
5.3. Metodología Propuesta.	72
5.4. Propuesta Experimental.	73
5.5. Trayectoria sobre Ambiente Reconstruido.	74
5.6. Trayectoria Espacio Cartesiano.	74

5.7. Trayectoria Espacio Articular.	75
5.8. Perfil de fuerza aplicado	75
5.9. Baseline de Trayectoria Generada	76

Capítulo 1

Introducción

La robótica es una tecnología relativamente nueva que con ayuda de otras disciplinas como la electrónica, mecánica, programación e incluso inteligencia artificial, ha permitido desarrollar diversas configuraciones de robots, cada una de ellas orientada a tareas específicas.

El uso de robots manipuladores industriales ha incrementado en las últimas décadas, gracias a que facilita el trabajo en áreas como la automotriz o siderúrgica [18], [8], e incluso permiten realizar tareas en lugares que representan un peligro para el ser humano, además el uso de los manipuladores incrementa la productividad y proveen la precisión y repetitibilidad en las tareas [14]. Según [26], las aplicaciones de los manipuladores pueden clasificarse en dos tipos, en el primero el manipulador realiza movimientos a posiciones específicas, mientras que en el segundo además del posicionamiento es necesario un control de fuerza para conocer el entorno del manipulador.

En esta tesis se plantea usar un esquema de control simultáneo de fuerza y posición, basado en el principio de ortogonalización, sin embargo, este esquema de control requiere conocer la superficie o ambiente sobre el que se genera la trayectoria deseada. Es por ello que se propone un método, basado en reconstrucción 3D usando un par-estéreo de cámaras, que permita conocer el ambiente sin previo conocimiento de su forma.

1.1. Antecedentes

Existen diversos esquemas de control, uno de ellos es el control simultáneo de fuerza y posición que consiste en un esquema de control híbrido que satisface al mismo tiempo el seguimiento de una trayectoria de posición deseada y la aplicación de un perfil de fuerza deseado sobre una superficie, dando como resultado un control estable y preciso para la realización de tareas de alto desempeño [24]. En [3] proponen un esquema de control simultáneo basado en modelo que garantiza la estabilidad asintótica del sistema e introduce el concepto de ortogonalización como una generalización estricta del control híbrido. Por otro lado en [35] proponen un esquema de control simultáneo por modos deslizantes en el cual la dinámica y la superficie de trabajo es desconocida. En [30] proponen un control simultáneo con modos deslizantes de segundo orden que garantiza la estabilidad exponencial de los errores de fuerza y posición, es robusto y libre de modelo. Sin embargo, para poder llevar a cabo el esquema de control mencionado, es necesario conocer la superficie de trabajo sobre la cual se genera la trayectoria de posición y fuerza deseada.

Si se sabe que la reconstrucción recupera la información de profundidad a partir de imágenes y analiza las características de una imagen, de tal forma que permite detectar, localizar y reconocer objetos en imágenes [34], [11], se asume que mediante esta herramienta es posible conocer un ambiente incierto.

Los primeros estudios acerca de la reconstrucción geométrica tridimensional se realizaron hace varios años, por ejemplo en [10] muestran un resumen de varios trabajos sobre la reconstrucción de objetos tridimensionales a partir de sus vistas 2D. Por otro lado [34] hace una revisión de las técnicas de reconstrucción desarrolladas usando de dos a cuatro vistas. Finalmente [16] hace un análisis de la evolución de la reconstrucción tridimensional, demostrando que aún existe un campo amplio de investigación en éste tema. Esto sustenta la idea de que la reconstrucción no es un

tema nuevo y por lo tanto existe amplia información acerca de las técnicas de reconstrucción 3D.

En cuanto al uso de sistemas de visión para la aplicación de un control simultáneo, hay autores como [12] que proponen un estimador que describe la relación entre las características de la imagen con la posición y orientación del efector final del manipulador, además proponen un método para estimar el vector normal vector de la superficie. Por su parte, en [23] proponen un esquema de control basado en el principio de ortogonalización en un ambiente semiestructurado usando un estimador similar al de Hosoda. En [38] proponen un control híbrido basado en sistemas de visión con una superficie, cinemática y dinámica incierta. Finalmente en [17] proponen un control híbrido usando sistemas de visión para el seguimiento de una trayectoria deseada, manteniendo al efector final del robot en contacto ortogonal con una superficie suavizada y ejerciendo una fuerza de contacto prescrito, se propone también que los parámetros de la cámara, así como la superficie de limitación son inciertos .

Hasta el momento las referencias planteadas usan sistemas de visión con el objetivo de relacionar el marco de la cámara con el marco del manipulador, y así determinar el correcto seguimiento de una trayectoria, pero no para reconstruir tridimensionalmente un ambiente desconocido. Sin embargo, sí existen trabajos en los que se reconstruye tridimensionalmente y se hace uso de manipuladores, pero no se aplica un esquema de control simultáneo de fuerza y posición basado en el principio de ortogonalización. Las tareas principales que se planten en estos trabajos son, la ubicación del ambiente y evitación de colisiones [15], [27]; el análisis de deformaciones en el ambiente [22]; y finalmente, aplicaciones médicas [32].

Se concluye que a pesar de la amplia información existente sobre reconstrucción tridimensional y el esquema de control simultáneo propuesto, la exploración de las áreas en conjunto no es un tema comúnmente abordado.

1.2. Definición del Proyecto

Un control de fuerza y posición basado en el principio de ortogonalización necesita conocer el ambiente sobre el cual genera una trayectoria, pero esta condicional pocas veces se cumple. Por esta razón se propone el uso del par-estéreo de cámaras para reconstruir en 3D un ambiente desconocido y con ello proponer una metodología que permita la implementación del esquema de control propuesto ante superficies desconocidas, proporcionando así versatilidad en las superficies sobre las cuales es posible generar una trayectoria.

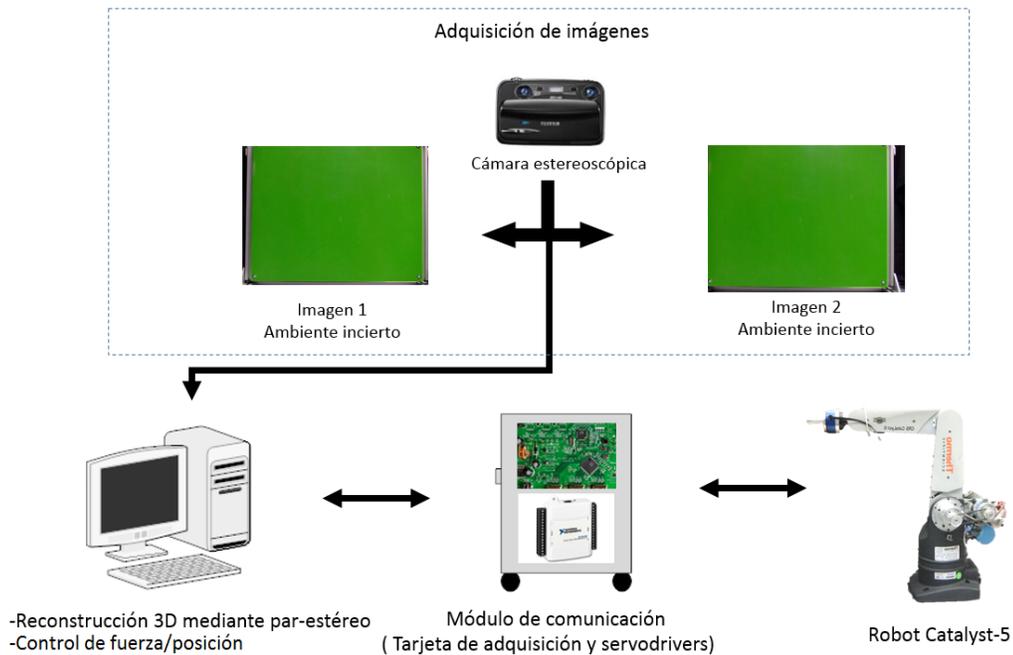


Figura 1.1: Esquema General del Proyecto.

El diagrama de la figura 1.1 ejemplifica un esquema del proyecto, dónde se observa que el proceso de adquisición de imágenes se realiza mediante una cámara estereoscópica y a partir de las dos imágenes generadas es posible reconstruir tridimensionalmente el ambiente incierto.

El manipulador Catalyst-5 tiene arquitectura abierta [33], por lo que el esquema de control propuesto puede implementarse y analizarse en un computador, éste

procesa la información recibida por la tarjeta de adquisición de datos y permite controlar al manipulador mediante servocontroladores.

Es importante mencionar que el proceso se realiza de forma semiexperimental; en este caso los datos obtenidos del robot Catalyst-5 permiten orientar el ambiente respecto al manipulador, para así generar la trayectoria deseada en simulación.

1.3. Objetivos

Con base en el problema planteado, se establecen los siguientes objetivos.

1.3.1. Objetivo General

- Aproximar la superficie geométrica de un objeto desconocido mediante reconstrucción 3D basada en el par-estéreo de cámaras y para implementar un control de fuerza y posición en un robot manipulador industrial, creando así un enfoque poderoso que combina las fortalezas de la visión por computadora, la robótica y el control automático.

1.3.2. Objetivos Específicos

- Extraer la geometría del objeto mediante reconstrucción 3D.
- Integrar el resultado de la reconstrucción con el control de fuerza/posición, es decir, a partir de la nube 3D generar los vectores normales $J\varphi$ a los planos tangentes formados en los puntos de contacto del efector final del robot.
- Mapear la trayectoria deseada de posición y el perfil de fuerza deseado a la superficie reconstruida.
- Validar semi-experimentalmente el modelo de control con la metodología propuesta.

1.4. Justificación

Una restricción del esquema de control simultáneo de fuerza y posición, basado en el principio de ortogonalización, es que el efector final del manipulador debe estar en contacto con el ambiente. Para poder garantizar esa restricción es necesario conocer el ambiente donde la trayectoria es generada. Se han realizado varios trabajos con esquemas de control simultáneo de fuerza y posición pero suponiendo ambientes estructurados (conocidos) o semi-estructurados, y solo en menor medida a superficies inciertas [38].

En la actualidad existen diversas tareas en la industria tales como la soldadura, pulido de superficies, serigrafía, aplicación de materiales compuestos o grabado de materiales que requieren seguir una trayectoria y al mismo tiempo aplicar una fuerza específica sobre el ambiente, es decir, aplicar un control simultáneo de fuerza y posición, sin embargo, en la mayoría de las ocasiones esta superficie es desconocida.

Mediante este proyecto es posible aplicar el esquema de control simultáneo de fuerza y posición a un objeto de geometría no conocida, utilizando un método de reconstrucción 3D basado en la técnica de un par-estéreo de cámaras, proporcionando así versatilidad al esquema de control propuesto.

La importancia de la reconstrucción 3D de la superficie en el proyecto, reside en que el esquema de control basado en el principio de ortogonalización requiere el cálculo de la función geométrica del ambiente sobre el que se genera una trayectoria, y mediante el uso del par-estéreo de cámaras la superficie puede ser reconstruida con una mejor aproximación.

En la mayor parte de los trabajos relacionados con el control simultáneo de fuerza y posición basado en el principio de ortogonalización, se asume que el modelo exacto de la superficie es conocida o parcialmente conocida, por ello se considera que este problema no ha sido resuelto del todo.

1.5. Hipótesis

Si se cuenta con un método para extraer la geometría de un objeto con suficiente exactitud, entonces es posible calcular el vector $J\varphi(q)$ normal al plano tangente $Q(q)$ que se forma en el punto de contacto, que son requeridos para el control simultáneo de fuerza y posición en superficies altamente rígidas.

1.6. Aportaciones

De acuerdo a la revisión del estado del arte, se definen las siguientes aportaciones:

- Desarrollo de una metodología capaz de generar los vectores normales necesarios para la implementación un control simultáneo basado en el principio de ortogonalización, sobre un ambiente no estructurado (desconocido).
- Mapeo de una trayectoria deseada sobre una superficie reconstruida tridimensionalmente.
- Base para experimentar con otras técnicas para obtención de nube de puntos tridimensionales, aplicadas a diversas áreas dentro de la industria.

1.7. Alcances y Limitaciones

El objetivo del proyecto es desarrollar una metodología que permita generar una trayectoria sobre una superficie incierta cuya geometría pueda determinarse usando un par-estéreo de cámaras. Por ello se presentan las siguientes consideraciones:

- El robot usado para validar la metodología propuesta es el manipulador Catalyst-5 de cinco grados de libertad, sin embargo, para este fin sólo se usan los primeros tres grados de libertad del manipulador.
- Las incertidumbres y los errores intrínsecos de la instrumentación (cámara y brazo manipulador) no se consideran. El propósito de este proyecto se centra en que la metodología propuesta permita generar la trayectoria deseada sobre un ambiente incierto.

- La validación del proceso se realiza de forma semi-experimental, es decir, en un sólo simulador se integran la nube de puntos de la reconstrucción 3D del ambiente real junto con el esquema de control fuerza/posición propuesto.
- El esquema de control restringe a que la superficie sobre la que se genera la trayectoria debe ser altamente rígida. Aún validando la metodología propuesta de forma semi-experimental, esta restricción fue tomada en cuenta para el desarrollo del proyecto.

1.8. Organización

La tesis se divide en 6 capítulos, los cuales presentan la siguiente información:

- En los capítulos 1 y 2 se presentan el planteamiento del problema, así como la teoría necesaria para comprender el desarrollo del proyecto.
- En el capítulo 3 se describe el proceso necesario para validar la hipótesis planteada.
- El capítulo 4 expone los resultados obtenidos a partir de lo planteado en el capítulo 3.
- El capítulo 5 plantea una aplicación directa del proyecto en la industria.
- Finalmente, en el capítulo 6 se presentan las conclusiones del proyecto, así como el trabajo futuro que puede desarrollarse a partir del presente trabajo.

Capítulo 2

Fundamentos de Robótica y Visión por Computadora

En este capítulo se presenta una pequeña introducción del proceso de calibración de cámaras y reconstrucción tridimensional. Por otro lado, se analiza al manipulador Catalyst-5, y lo referente al esquema de control propuesto.

2.1. Visión por Computadora

En visión por computadora el objetivo es representar el mundo tal como es percibido por el ser humano mediante imágenes, reconstruyendo su forma, color, tamaño e incluso el nivel de iluminación [29].

2.1.1. Calibración de Cámara

El proceso de calibración consiste en determinar un sistema de ecuaciones en función de las relaciones entre coordenadas 3D conocidas y su proyección en distintos espacios de trabajo, como el de la cámara o el de la imagen.

El principal objetivo en la calibración de cámaras es entonces determinar los parámetros intrínsecos y extrínsecos de la cámara u otros sistema de visión [31]. Los parámetros intrínsecos son los parámetros ópticos del sistema de visión, tales como

la distancia focal, los centros de la imagen y las distorsiones radiales y tangenciales. Por su parte los extrínsecos son parámetros referentes a la orientación y traslación de la cámara respecto a un sistema de referencia.

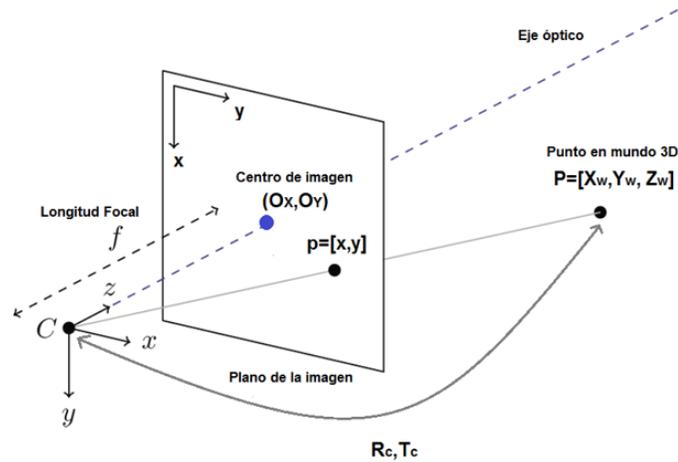


Figura 2.1: Modelo geométrico de la cámara.

La imagen 2.1 muestra el modelo de perspectiva de la cámara y como se relacionan los parámetros internos (intrínsecos) y externos (extrínsecos) de la cámara. La longitud focal f es la distancia que va desde las coordenadas de la cámara en 3D hasta el plano de la imagen (plano xy ,) a través del eje óptico de la cámara. Por otro lado los centros O_x, O_y se forman en el punto de intersección del eje óptico y el plano de la imagen. Finalmente los parámetros externos de la cámara consideran la rotación R_c y el vector de traslación T_c de un punto en el mundo transformado al espacio de la cámara [31].

El objetivo del proceso de calibración es relacionar las coordenadas 3D conocidas y su proyección en las coordenadas de la cámara. Las coordenadas conocidas son estimadas a partir de un patrón de calibración con dimensiones conocidas, este patrón puede ser una cuadrícula de cuadros blancos y negros (tipo ajedrez) coplanar o en tres dimensiones, o círculos con centros a distancias conocidas (ver figura 2.2).

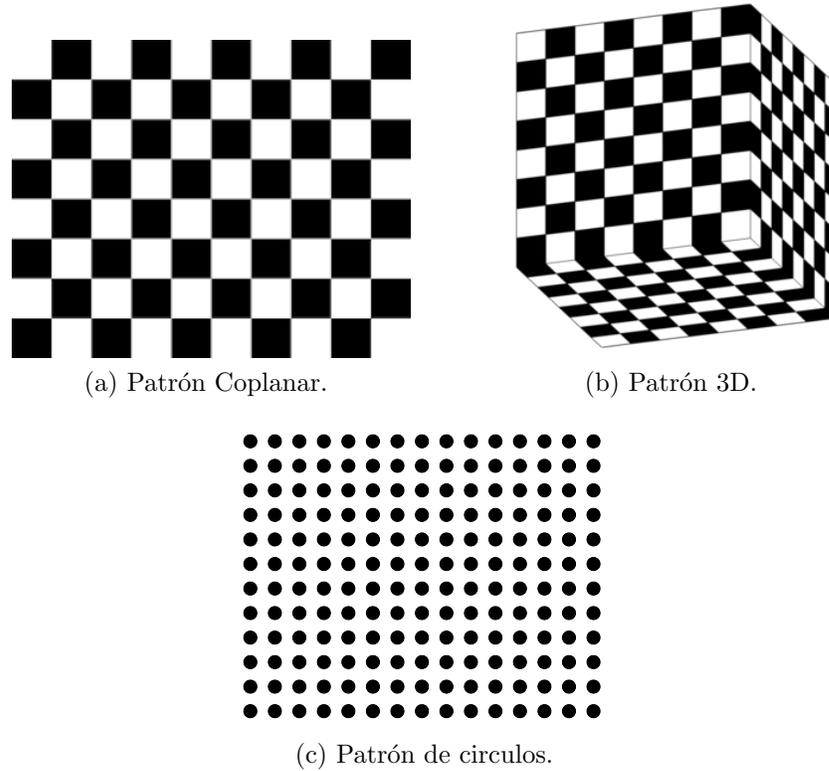


Figura 2.2: Patrones de Calibración.

Detección de Esquinas

Harris et al. propusieron el uso de máximos locales para determinar características invariantes a rotación y escala haciendo uso de la matriz de tensores [5]. La matriz de tensores se puede escribir como:

$$A = w \begin{bmatrix} I_x^2 & I_x I_y \\ I_y I_x & I_y^2 \end{bmatrix}$$

donde I_x y I_y son los gradientes de la imagen de entrada en la dirección de x y y respectivamente, a cada uno de los elementos de la matriz A se le aplica convolución con una función w , la cual aplica un filtro de suavizado a los valores de salida. Finalmente A contiene el eigenvalor más pequeño de la sumatoria de los parámetros de la matriz A de una ventana Q , que a fin de cuenta resulta ser el área que contiene

a la esquina.

Dicho de otra forma, al existir un cambio de intensidad o textura pronunciado en una imagen, la matriz A genera dos eigenvalores, donde el objetivo es encontrar el valor máximo del eigenvalor más pequeño para localizar una buena característica [29].

Método de Calibración de Zhang

El método de Zhang está basado en homografía o matriz de proyección y toma referencia un patrón coplanar de al menos cuatro puntos [2].

El modelo de la cámara también llamado modelo pin-hole (ver figura 2.1), representa la transformación de las coordenadas del mundo $P = [X_w, Y_w, Z_w, 1]^T$ a las coordenadas de la imagen $p = [x_{im}, y_{im}, 1]^T$, determinadas a partir de las coordenadas de la cámara $C = [X_c, Y_c, Z_c, 1]^T$ de la forma:

$$sp = A[R \ t]P$$

donde

$$A = \begin{bmatrix} \alpha & \gamma & u_0 \\ 0 & \beta & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

donde s es un factor de escala, R es la rotación y t es la traslación entre las coordenadas del sistema y A es la matriz de parámetros intrínsecos de la cámara. Debido a la representación que se hace del modelo de la cámara en la fig 2.1 puede ser escrita como:

$$A = \begin{bmatrix} f_x & \alpha & O_x \\ 0 & f_y & O_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

donde f_x y f_y representan las longitudes focales de cada eje, O_x y O_y representan los centros de la imagen en su respectivo eje y α es un factor que representa la cuadratura del pixel, normalmente ese vector es tomado como cero, por que no se determina

el sesgo del pixel, pero realidad ese vector no es totalmente cuadrado [13].

Debido a que los puntos 3D en realidad están sobre un plano coplanar, los valores en el plano Z son cero, es decir $Z_w = 0$, y ahora la ecuación 2.1.1 se puede describir como:

$$sp = A[r_1 \ r_2 \ t] [X_w \ Y_w]^T$$

ahora $X' = [X_w \ Y_w \ 1]^T$ entonces P y p pueden relacionarse mediante una homografía H .

$$sp = HX'$$

donde $H = A[r_1 \ r_2 \ t]$ y puede ser denotada como $H = [h_1 \ h_2 \ h_3]$, de forma que:

$$[h_1 \ h_2 \ h_3] = \lambda A[r_1 \ r_2 \ t]$$

donde λ es un escalar. Por otro lado se sabe que r_1 y r_2 son ortogonales, por lo tanto:

$$h_1^T A^{-T} A^{-1} h_2 = 0$$

$$h_1^T A^{-T} A^{-1} h_1 = h_2^T A^{-T} A^{-1} h_2$$

Las ecuaciones 2.1.1 y 2.1.1 son dos restricciones básicas en los parámetros intrínsecos, dada una homografía Por otro, es fácil notar que los parámetros extrínsecos pueden ser encontrados fácilmente de forma que:

$$r_1 = \lambda A^{-1} h_1$$

$$r_2 = \lambda A^{-1} h_2$$

$$r_3 = r_1 \times r_2$$

$$t = \lambda A^{-1} h_3$$

donde:

$$\lambda = 1/\|A^{-1} h_1\| = 1/\|A^{-1} h_2\|$$

Sin embargo, el problema es encontrar la solución de la matriz A , es decir la matriz de parámetros intrínsecos. Para la solución de este problema, Zhang plantea iniciar con una solución analítica y luego optimizar el proceso con una solución no lineal, basada en la máxima verosimilitud [37]. Expuesto lo anterior, Zhang establece:

$$B = A^{-T} A^{-1} = \begin{bmatrix} B_{11} & B_{12} & B_{13} \\ B_{21} & B_{22} & B_{23} \\ B_{31} & B_{32} & B_{33} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{\alpha^2} & -\frac{\gamma}{\alpha^2\beta} & \frac{v_0\gamma - u_0\beta}{\alpha^2\beta} \\ -\frac{\gamma}{\alpha^2\beta} & \frac{\gamma}{\alpha^2\beta^2} + \frac{1}{\beta^2} & -\frac{\gamma(v_0\gamma - u_0\beta)}{\alpha^2\beta^2} - \frac{v_0}{\beta^2} \\ \frac{v_0\gamma - u_0\beta}{\alpha^2\beta} & -\frac{\gamma(v_0\gamma - u_0\beta^2)}{\alpha^2\beta^2} - \frac{v_0}{\beta^2} & \frac{(v_0\gamma - u_0\beta)^2}{\alpha^2\beta^2} + \frac{v_0^2}{\beta^2} + 1 \end{bmatrix}$$

definiendo

$$b = [B_{11}, B_{12}, B_{22}, B_{13}, B_{23}, B_{33}]$$

y

$$h_i = [h_{i1}, h_{i2}, h_{i3}]$$

entonces se puede definir

$$h_i^T B h_j = v_{ij}^T b$$

donde

$$b = [h_{i1}h_{j1}, h_{i1}h_{j2} + h_{i2}h_{j1}, h_{i2}h_{j2}, h_{i3}h_{j1} + h_{i1}h_{j3}, h_{i3}h_{j2} + h_{i2}h_{j3}, h_{i3}h_{j1}]$$

Ahora las ecuaciones 2.1.1 y 2.1.1, pueden ser reescritas como:

$$\begin{bmatrix} v_{12}^2 \\ (v_{11} - v_{12})^T \end{bmatrix} b = 0$$

y ahora tenemos:

$$Vb = 0$$

la solución del sistema puede obtenerse mediante descomposición de valores singu-

lares (SVD, por sus siglas en ingles), de forma que los parámetros de B pueden ser calculados, para determinar los parámetros intrínsecos, entonces se tiene que:

$$\begin{aligned}
 v_0 &= (B_{12}B_{13} - B_{11}B_{23})/(B_{11}B_{22} - B_{12}^2) \\
 \lambda &= B_{12}[B_{13}^2 + v_0(B_{12}B_{13} - B_{11}B_{23})]/B_{11} \\
 \alpha &= \sqrt{\lambda/B_{11}} \\
 \beta &= \sqrt{\lambda B_{11}/(B_{11}B_{22} - B_{12}^2)} \\
 \gamma &= -B_{12}\alpha^2\beta/\lambda \\
 u_0 &= \gamma v_0/\beta - B_{13}\alpha^2/\lambda
 \end{aligned}$$

Finalmente, al obtener los valores de los parámetros intrínsecos, ahora sí es posible determinar los valores extrínsecos de la cámara y finalizar con el proceso de calibración. Para comprobar el proceso de calibración, se re proyectan las coordenadas en el espacio de trabajo de la imagen contra las coordenadas resultantes de la calibración.

Transformación Lineal Directa (DLT)

Se ha mencionado que para poder transformar un punto del espacio de las coordenadas 3D, al espacio de referencia de la cámara, es necesario conocer una matriz M tal que

$$p = MP$$

$$\begin{bmatrix} u_i \\ v_i \\ w_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} & m_{13} \\ m_{21} & m_{22} & m_{23} \\ m_{31} & m_{32} & m_{33} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{bmatrix}$$

donde $x_{im} = \frac{u_i}{w_i}$ y $y_{im} = \frac{v_i}{w_i}$

La matriz M , puede ser resuelta a través sistema lineal de ecuaciones, M puede ser estimado a través de SVD asumiendo que:

$$Am = 0$$

donde

$$A = \begin{bmatrix} X_1 & Y_1 & Z_1 & V_1 & -x_1X_1 & -x_1Y_1 & -x_1Z_1 & -x_1 \\ V_1 & X_1 & Y_1 & Z_1 & -y_1X_1 & -y_1Y_1 & -y_1Z_1 & -y_1 \\ \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot \\ X_n & Y_n & Z_n & V_n & -x_nX_n & -x_nY_n & -x_nZ_n & -x_n \\ V_n & X_n & Y_n & Z_n & -y_nX_n & -y_nY_n & -y_nZ_n & -y_n \end{bmatrix}$$

y

$$m = \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} & \cdots & m_{33} & m_{34} \end{bmatrix}$$

donde $V_1 = V_n = [1, 0, 0, 0]$ y n representa el número de puntos a transformar del espacio del mundo al de la imagen [31].

Una forma de obtener los valores de la matriz de proyección M es hacer el elemento $m_{34} = 1$ a lo que se conoce como solución no homogénea. Entonces la ecuación 2.1.1, puede definirse como:

$$A'm' = b$$

siendo A' la matriz formada por las primeras once columnas de A y b el vector columna formada por la última columna de A , el resultado va a ser la matriz m , pero sin el elemento m_{34} . El valor del vector m' puede ser determinado mediante mínimos cuadrados y entonces puede ser conocida la matriz M , que es la matriz de proyección [25].

La matriz m , puede descomponerse para encontrar los valores de los parámetros intrínsecos y extrínsecos de la cámara, sin embargo para los fines de este proyecto, se limitará simplemente a conocer la matriz M .

2.1.2. Reconstrucción Tridimensional

La reconstrucción es el proceso que permite conocer la geometría de un objeto, recuperando la información de dimensión, volumen y forma de a partir de una imagen u otro medio, tal como muestra la figura 2.3.

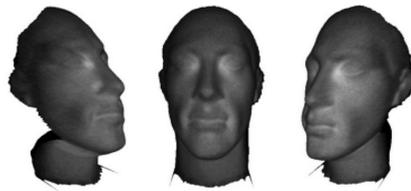


Figura 2.3: Ejemplo de Reconstrucción 3D.

Existen diversas técnicas para realizar la reconstrucción 3D de un objeto, se clasifican en dos grandes grupos: métodos activos y métodos pasivos, donde los métodos activos emiten algún tipo de energía para obtener información de la escena, mientras que los métodos pasivos se basan en imágenes para obtener la información de profundidad. Dentro de los métodos pasivos se encuentra la estereoscopia y dentro de los activos la proyección de planos mediante luz estructurada, telemetría laser y sensores ultrasónicos [21].

Puntualizando, en el proceso de reconstrucción 3D es importante conocer los parámetros internos y externos de la cámara, para orientar las cámaras respecto a un marco de referencia y dar un valor de dimensión real al objeto reconstruido.

2.1.3. Estéreo Visión

La estereoscopia es uno de los métodos más usados en la actualidad ya que emulan la visión humana. La visión estereoscópica o estéreo visión es un técnica que permite obtener la información 3D de un objeto, donde dos cámaras, separadas a una distancia b , captan el mismo objeto o escena desde diferentes puntos de refencia [21], la figura 2.4 ejemplifica ésta definición.

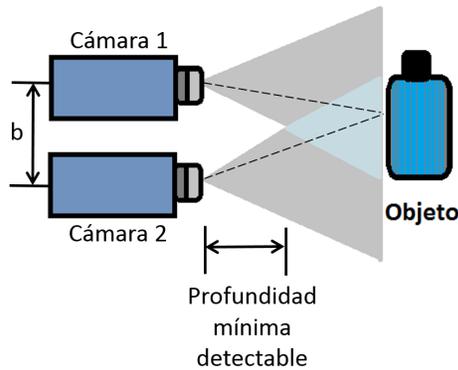


Figura 2.4: Estéreo Visión.

El proceso consiste en encontrar correspondencias de píxeles entre las imágenes y la profundidad se determina a partir de la triangulación de las correspondencias [29]

Búsqueda de Correspondencias

Un problema generalizado en los procesos de reconstrucción multicámara es la búsqueda de correspondencias, por ello es un proceso primordial en la visión estereoscópica [21]. La correspondencia consiste en determinar que punto en la imagen representa una proyección 2D de un punto 3D en el espacio, es decir dado P se tiene que encontrar el punto U_1, V_1 y U_2, V_2 en cada imagen.

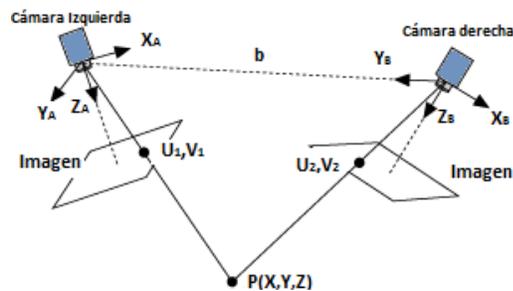


Figura 2.5: Búsqueda de Correspondencia entre Imágenes.

El reto de encontrar una correspondencia adecuada se debe a que las cámaras están orientadas de forma distinta y esto puede causar problemas de iluminación al

objeto o escena [21].

Existen distintas formas de encontrar la semejanza entre puntos, métodos basados en la correlación y métodos basados en las características [31]. El método usado en este proyecto es el método basado en la correlación entre puntos.

En los métodos basados en correlación, se elige una ventana W de un tamaño específico que va recorriendo la totalidad de la imagen, en búsqueda de correspondencias. El objetivo es elegir un criterio que permita maximizar la similitud entre ambas regiones de la imagen.

En este proyecto el criterio de similitud está basado en la suma de diferencias absolutas (SAD, por sus siglas en inglés), esto consiste en calcular la diferencia absoluta entre cada píxel de la ventana W elegida y luego sumar el total de los elementos resultantes, de forma que la ventana con el valor más pequeño representa una correspondencia, de forma que:

$$SAD = \sum_{(x,y) \in W} |I_{der}(x, y) - I_{izq}(x + d, y)| \quad (2.1)$$

donde $I_{(x,y)}$, representa el valor del píxel en la posición xy de la ventana w de la imagen. La figura 2.6, muestra un ejemplo simple de como funciona el criterio de la suma de diferencias absolutas.

Determinando la Profundidad

Determinar el valor de un punto en el espacio 3D, requiere de tener un proceso anterior extenso e independiente. Es decir, para poder reconstruir en 3D mediante la técnica del par-estéreo de cámaras es necesario encontrar correspondencias apropiadas, pero para también es necesario un proceso de calibración de cámaras. De forma que, para encontrar la profundidad o Z se establece lo siguiente:

$$Z = f \frac{b}{d} \quad (2.2)$$

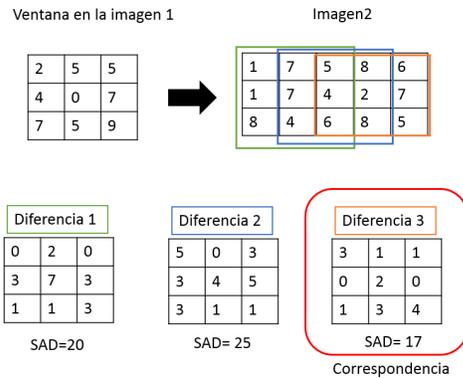


Figura 2.6: Ejemplo de SAD para correspondencia.

donde b es conocida como *baseline*, que es la distancia (en mm) de los centros de proyección entre las dos imágenes, f es la longitud focal (en píxeles) común entre ambas imágenes y d es la disparidad, que mide la diferencia (en píxeles) entre los puntos correspondidos en ambas imágenes. La ecuación 2.2, exhibe que para poder encontrar un valor de Z correcto, es necesario encontrar los parámetros de calibración intrínsecos y encontrar correctas correspondencias.

2.2. Entorno de Manipuladores

La robótica es un área que se encarga del diseño, desarrollo y aplicación de robots. La palabra robot tiene su origen en la obra RUR (Robots Universales Rossum) [5], [6], a partir de entonces el término se popularizó y empezó la fabricación de artefactos con el fin de automatizar un proceso.

Un robot de tipo articular está formado por eslabones y uniones, donde el número de movimientos independientes del robot indican los grados de libertad (gdl) del manipulador. En este proyecto se trabaja con un manipulador articular que simula el movimiento de un brazo humano (robot antropomórfico) de 5 gdl, donde sólo se usan 3gdl para el propósito de este proyecto.

El manipulador Catalyst-5, de la marca Thermo Scientific (ver la figura 2.7), es

un robot serial antropomórfico de 5 grados de libertad, cuyas dimensiones y parámetros pueden visualizarse en la tabla 2.1.

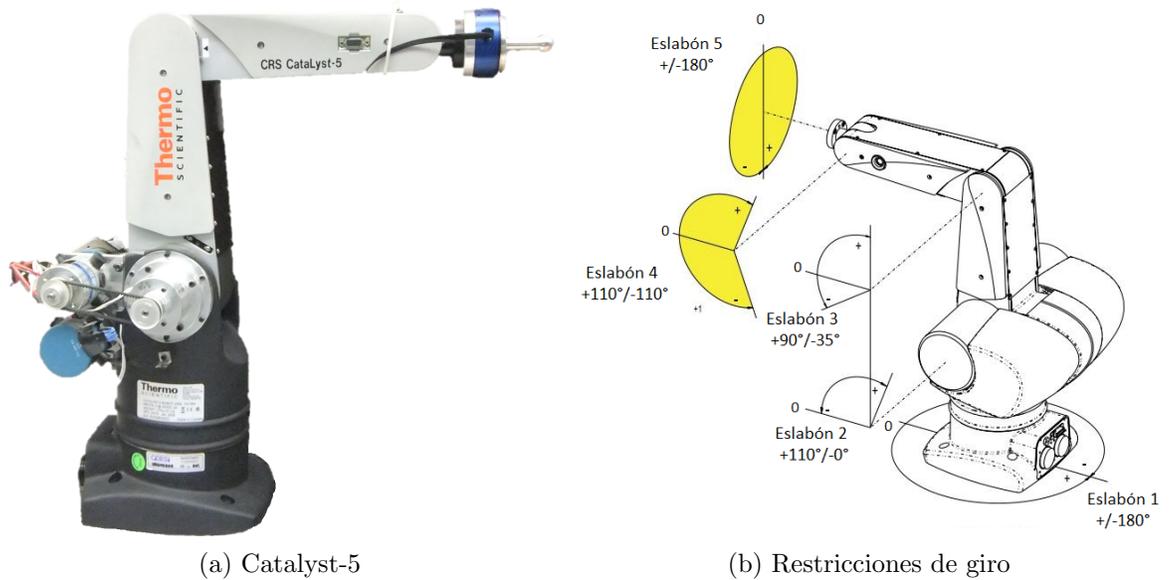


Figura 2.7: Robot Catalyst-5.

<i>Elemento</i>	<i>Variable</i>	<i>Valor</i>	<i>Unidades</i>
Longitud eslabón 1	l_1	0.2504	m
longitud eslabón 2	l_2	0.2504	m
longitud eslabón 3	l_3	0.3914	m
Masa eslabón 1	m_1	9.0	kg
Masa eslabón 2	m_2	2.0	kg
Masa eslabón 3	m_3	2.1	kg

Tabla 2.1: Parámetros de manipulador.

2.2.1. Cinemática

La cinemática ayuda a determinar los movimientos de un manipulador, mediante propiedades geométricas, sin tomar en cuenta las fuerzas que lo producen [6].

Cinemática Directa

El objetivo de la cinemática directa es representar la posición del efector final del manipulador del espacio articular al espacio cartesiano. El primer paso para que ésta sea calculada es determinar los parámetros de Denavit-Hartenberg [28].

Los parámetros de Denavit-Hartenberg (D-H) son una forma de representar la orientación y traslación de los manipuladores, analizando cada uno de los eslabones respecto al siguiente. Para poder conocer los parámetros mencionados es necesario establecer las dimensiones de cada eslabón y la dirección de rotación de cada una de las uniones. La imagen 2.8 muestra cómo se establecieron los elementos mencionados.

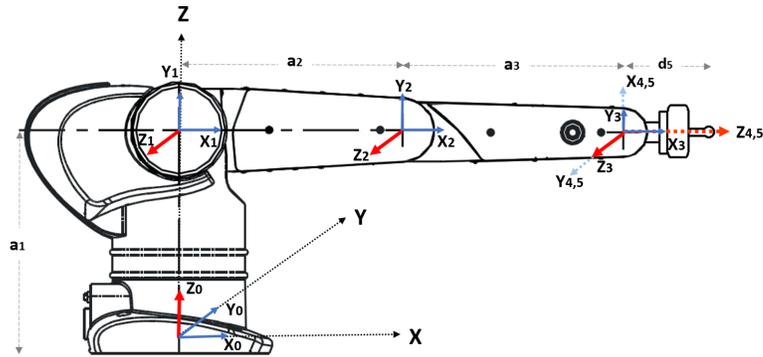


Figura 2.8: Diagrama de Robot 5 gdl.

Para visualizar fácilmente los parámetros D-H se genera una tabla que contiene los desplazamientos y rotaciones de cada eslabón, donde las variables articulares pueden ser rotacionales (denotadas por θ_i), primáticas o lineales (ambas denotadas por d_i), además la longitud del eslabón se representa por a_i (distancia entre Z_{i-1} hasta Z_i medida a lo largo del eje X) y α_i (es el ángulo entre Z_{i-1} Y Z_i) :

Eslabón	a_i	d_i	α_i	θ_i
1	0	d_1	90°	θ_1^*
2	a_2	0	0	θ_2^*
3	a_3	0	0	θ_3^*

Tabla 2.2: Parámetros de D-H.

Al sustituir cada parámetro en la matriz de transformación homogénea de la ecuación (2.1):

$$A_i = R(z, \theta), T(z, d), T(x, a), R(x, \alpha)$$

$$A_i = \begin{bmatrix} \cos \theta_i & -\cos \alpha_i \sin \theta_i & \sin \alpha_i \sin \theta_i & a_i \cos \theta_i \\ \sin \theta_i & \cos \alpha_i \cos \theta_i & -\sin \alpha_i \cos \theta_i & a_i \sin \theta_i \\ 0 & \sin \alpha_i & \cos \alpha_i & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.3)$$

se obtiene las siguientes transformaciones para cada eslabón:

$$A_0^1 = \begin{bmatrix} \cos \theta_1 & 0 & \sin \theta_1 & 0 \\ \sin \theta_1 & 0 & -\cos \theta_1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & d_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$A_1^2 = \begin{bmatrix} \cos \theta_2 & -\sin \theta_2 & 0 & a_2 \cos \theta_2 \\ \sin \theta_2 & \cos \theta_2 & 0 & a_2 \sin \theta_2 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$A_2^3 = \begin{bmatrix} \cos \theta_3 & -\sin \theta_3 & 0 & a_3 \cos \theta_3 \\ \sin \theta_3 & \cos \theta_3 & 0 & a_3 \sin \theta_3 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$T = A_0^1 A_1^2 A_2^3$$

Entonces el vector de posición de la matriz transformación nos da el valor final de la cinemática directa:

$$px = a_2 \cos(\theta_1) \cos(\theta_2) + a_3 \cos(\theta_1) \cos(\theta_2 + \theta_3)$$

$$py = a_2 \sin(\theta_1) \cos(\theta_2) + a_3 \sin(\theta_1) \cos(\theta_2 + \theta_3)$$

$$pz = d_1 + a_2 \sin(\theta_2) + a_3 \sin(\theta_2 + \theta_3)$$

Cinemática Inversa

La cinemática inversa permite calcular el valor de las coordenadas articulares $[q_1, q_2, q_3] = [\theta_1, \theta_2, \theta_3]$ a partir de la posición en el espacio cartesiano del efector final. A diferencia de la cinemática directa, el cálculo de la cinemática inversa es más complicado ya que a mayor número de grados de libertad el proceso para encontrar el valor de las coordenadas articulares es más complejo. Se sabe que el manipulador es un robot antropomórfico de 5gdl, por lo tanto el análisis puede basarse en la figura 2.9.

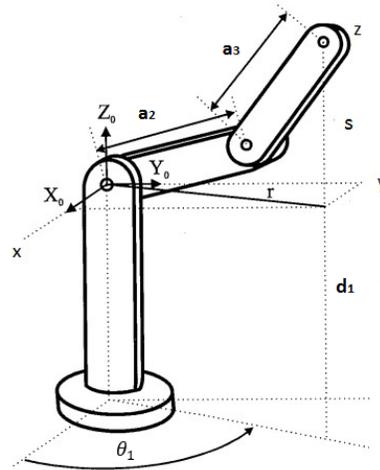


Figura 2.9: Robot 3gdl.

El calculo de θ_2 y θ_3 se puede determinar fácilmente, sólo que ahora no se trabaja en el plano xy , si no en el plano rs .

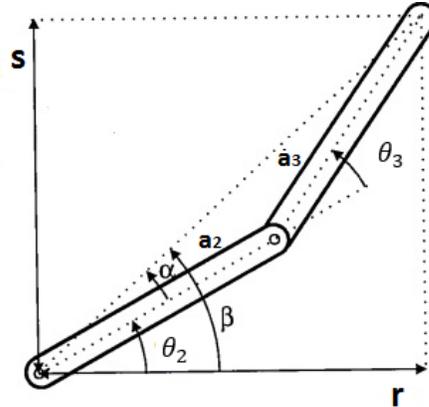


Figura 2.10: Robot eslabón 2 y 3.

donde:

$$r^2 = x^2 + y^2$$

$$s = z - d_1$$

de forma que:

$$D = \frac{r^2 + s^2 - d_1^2 - a_2^2}{2d_1a_2}$$

y por trigonometría que:

$$\text{sen } \theta_3 = \sqrt{1 - D^2}$$

finalmente, θ_3 es dada por:

$$\theta_3 = \text{atan2} \left(\sqrt{1 - D^2}, D \right) \quad (2.4)$$

Ahora para calcular θ_2 :

$$\text{sen } \alpha = \frac{a_3(\text{sen } \theta_3)}{r^2 + s^2}$$

$$\text{cos } \alpha = \frac{a_2 + a_3(\text{sen } \theta_3)}{r^2 + s^2}$$

resulta que:

$$\alpha = \text{atan2}(a_2 + a_3(\text{sen } \theta_3), a_3(\text{sen } \theta_3))$$

y ahora θ_2 se puede calcular mediante :

$$\theta_2 = \beta - \alpha$$

donde :

$$\beta = \text{atan2}(r, s)$$

Finalmente, θ_1 es dado por:

$$\theta_1 = \text{atan2}(y, x)$$

Cinemática Diferencial Directa

Cuando se desea que el manipulador genere una trayectoria a una velocidad específica es necesario conocer la relación entre las velocidades articulares y las velocidades lineales del manipulador.

Para el caso de la cinemática diferencial directa se desea encontrar la velocidad del efector final con la información de las velocidades articulares [8], de forma que la relación se describe como:

$$\dot{x} = J(q) \dot{q}$$

donde las velocidades lineales y angulares se definen por el vector $\dot{x} = [\dot{x}_1, \dot{x}_2, \dot{x}_3]^T$ y las velocidades articulares se definen por el vector $[\dot{q}_1, \dot{q}_2, \dot{q}_3] = [\dot{\theta}_1, \dot{\theta}_2, \dot{\theta}_3]^T$, donde $J(q)$ es la matriz Jacobiana, determinada a partir de las derivadas parciales de la cinemática directa del manipulador respecto a las variables articulares del manipulador.

$$J(q) = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial q_1} & \frac{\partial f_1}{\partial q_2} & \frac{\partial f_1}{\partial q_3} \\ \frac{\partial f_2}{\partial q_1} & \frac{\partial f_2}{\partial q_2} & \frac{\partial f_2}{\partial q_3} \\ \frac{\partial f_3}{\partial q_1} & \frac{\partial f_3}{\partial q_2} & \frac{\partial f_3}{\partial q_3} \end{bmatrix}$$

Cinemática Diferencial Inversa

Por otro lado la cinemática diferencial inversa relaciona la velocidad articular \dot{q} con la velocidad lineal y articular definidas por \dot{x} , de forma que:

$$\dot{q} = J^{-1}(q) \dot{x}$$

donde J^{-1} es la inversa del jacobiano.

La importancia del cálculo del jacobiano recae entonces en el cálculo de las singularidades del manipulador, es decir, que debe verificarse que la condición $\det(J(q)) \neq 0$, de otra forma existe una singularidad en el manipulador.

2.2.2. Modelo Dinámico

El modelo dinámico del manipulador permite simular los fenómenos físicos del robot, es decir, fenómenos inerciales, fuerzas centrípetas e incluso fricciones, a partir de ecuaciones diferenciales [7].

Este proceso es de suma importancia dado que se puede analizar el comportamiento del manipulador a nivel simulación antes de implementar un esquema de control en la realidad. El modelo dinámico de un manipulador de n grados de libertad, puede definirse como:

$$H(q) \ddot{q} + C(q, \dot{q}) \dot{q} + g(q) = \tau$$

donde q es el vector de coordenadas articulares, \dot{q} es el vector de velocidades articulares, \ddot{q} es el vector de aceleraciones articulares, $H(q)$ es la matriz de inercia, $C(q, \dot{q})$ es la matriz de Coriolis y fuerzas centrípetas y $g(q)$ es el vector de fuerzas gravitacionales y τ es el vector de control.

2.3. Control Fuerza/Posición

El control de fuerza/posición que se basa en el principio de ortogonalización requiere del conocimiento exacto de la función geométrica de la superficie o ambiente con el fin de calcular el vector normal $J_\phi(q)$, que indica la dirección en que el manipulador debe ser aplicar la fuerza sobre la superficie. Sin embargo, en la mayoría de las tareas realizadas por manipuladores el ambiente es desconocido, por ello, se plantea el uso de técnicas de reconstrucción tridimensional para conocer la función que describe al contorno de la superficie [9].

El esquema de control usado es libre de modelo y proporciona estabilidad exponencial de los errores de fuerza y posición.

2.3.1. Modelo Dinámico del Manipulador Restringido

Con anterioridad se estableció que el modelo dinámico del manipulador permite analizar el comportamiento del manipulador dependiendo de ciertos fenómenos físicos y fuerzas. El modelo dinámico de un manipulador en un ambiente restringido puede definirse como:

$$H(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} + g(q) = \tau + J_{\phi+}^T(q)\lambda \quad (2.5)$$

$$\varphi(x(q)) = 0 \quad (2.6)$$

donde q es el vector de coordenadas articulares, \dot{q} es el vector de velocidades articulares, \ddot{q} es el vector de aceleraciones articulares, $H(q)$ es la matriz de inercia, $C(q, \dot{q})$ es la matriz de Coriolis y fuerzas centrípetas, $g(q)$ es el vector de fuerzas

gravitacionales, τ es el vector de control, λ es un escalar que representa la magnitud de la fuerza en el punto de contacto. Por otro lado, la restricción se limita a una superficie altamente rígida definida por la función geométrica de la ecuación 2.6.

En la ecuación 2.5, $J_{\varphi+}^T(q)$ es la proyección normalizada del Jacobiano de la restricción denotado por:

$$J_{\varphi}(q) = \frac{\partial \varphi(x(q))}{\partial x} \frac{\partial x}{\partial q} = J_{\varphi}(q)J(q)$$

donde $J_{\varphi}(q)$ y $J_{\varphi}(x)$ son normales a la superficie, por otro lado $x = f(q)$ y $J(q)$ son la cinemática directa y el jacobiano del manipulador respectivamente. Es importante comentar que el sistema planteado puede ser resuelto únicamente si el efector final del manipulador está en contacto con la superficie altamente rígida.

2.3.2. Principio de Ortogonalización

El principio de ortogonalización está basado en la propiedad física de cuando se ejerce fuerza sobre una superficie altamente rígida y al mismo tiempo se desplaza sobre ella, el vector de velocidad está contenido en el plano tangente que se forma en el punto de contacto, mientras la fuerza es perpendicular al plano. Mediante la manipulación de la restricción se derivan dos subespacios ortogonales que ayudan a formular controles sencillos que convergen en fuerza y posición [9].

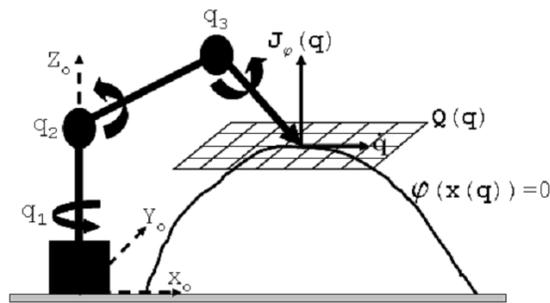


Figura 2.11: Principio de Ortogonalización.

En la figura 2.11 se observa que existe un plano tangente Q que puede ser representado como:

$$Q(q) = I_{n \times n} - J_{\varphi+}^T(q) J_{\varphi}(q)$$

donde $I_{n \times n}$ representa a la matriz identidad.

Existen dos proposiciones de ortogonalidad que se cumplen cuando el manipulador se desplaza sobre la superficie tal como:

$$Q(q) J_{\varphi}^T(q) = 0 \quad y \quad Q(q) J_{\varphi+}^T(q) = 0$$

$$J_{\varphi}(q) (\dot{q}) = 0 \quad y \quad Q_{\varphi}(q) (\dot{q}) = \dot{q}$$

Control PD Deslizante Ortogonal de Fuerza/Posición de un Ambiente Estructurado

Se llama ambiente estructurado a una superficie cuya función de restricción $\varphi(x(q))$ es conocida. Por otro lado, si la función geométrica que la describe es parcialmente conocida (la forma es conocida pero los vectores normales en el punto de contacto son desconocidos), el ambiente es incierto y por tanto, semi estructurado [9]. De lo anterior se puede concluir que, si no se tiene conocimiento previo de la forma de la superficie, ni de los vectores normales $J_{\varphi}(q)$ que se forman en el punto de contacto del manipulador, entonces el ambiente es no estructurado.

Al principio de este proyecto se tiene un ambiente desconocido que es estimado mediante la reconstrucción 3D del mismo. La nube 3D generada es transformada en función al marco de referencia del manipulador y como consecuencia, se generan vectores normales $J_{\varphi}(q)$ en cada puntos de contacto. A partir de la estimación de los vectores normales, es posible conocer la dirección en la que la fuerza debe ser aplicada y así, indirectamente mostrar la orientación del plano tangente que se forma en el punto de contacto. Por tanto, desde ese momento el ambiente se considera estructurado.

El control propuesto, no necesita el esquema de control de la planta y no presenta castaño en los pares de control al ser un esquema de control basado en modos deslizantes segundo orden. El modo deslizante es inducido tanto en el subespacio normal (de fuerza), como en el tangencial (de posición) al punto de contacto.

Sabiendo que, el modelo dinámico del manipulador puede ser parametrizado linealmente gracias a la propiedad:

$$Y_r \theta = \tau \quad (2.7)$$

entonces,

$$H\ddot{q}_r + B_0\dot{q}_r + C\dot{q}_r + g = Y_r\theta \quad (2.8)$$

donde $Y_r(q, \dot{q}, \ddot{q}_r)$ es un regresor compuesto de elementos no lineales conocidos y θ representa los parámetros constantes desconocidos. Entonces al restar la ecuación 2.8 en ambos miembros de la ecuación 2.5, se origina la ecuación 2.9

$$H\dot{S}_r = \tau + J_{\varphi+}^T \lambda - B_0 S_r - C S_r - Y_r \theta \quad (2.9)$$

donde $S_r = \dot{q} - \dot{q}_r$ representa al error extendido. Éste, conduce al diseño de una ley de control que produce convergencia exponencial de posición y fuerza. Dicho lo anterior, se propone la referencia nominal de la ecuación:

$$\begin{aligned} \dot{q}_r = & Q \left[\dot{q}_d - \alpha \Delta q + S_{qp} - \gamma_{p1} \int_{t_0}^t S_{qp}(\sigma) d\sigma - \gamma_{p2} \int_{t_0}^t \text{sign}(S_{qp})(\sigma) d\sigma \right] \\ & + \beta J_{\varphi}^T \left[\Delta F - S_{qF} + \gamma_{F1} \int_{t_0}^t (S_{qF}(\sigma)) d\sigma + \gamma_{F2} \int_{t_0}^t \text{sign}(S_{qF})(\sigma) d\sigma \right] \end{aligned}$$

donde $\Delta q = q - q_d$, $\Delta = \int_{t_0}^t (\lambda - \lambda_d)(\sigma) d\sigma$. Asimismo, σ , γ_{P1} , γ_{P2} son matrices diagonales definidas positivas y β , γ_{F1} , γ_{F2} son ganancias constantes positivas, dado

que sólo existe un punto de contacto sobre el ambiente. Los subíndices p y F indican al subespacio de posición y fuerza respectivamente. Ahora se puede definir el error extendido como:

$$S_r = QS_{vp} - \beta J_\varphi^T S_{vF} \quad (2.10)$$

donde

$$S_{vp} = S_{qp} + \gamma_{p1} \int_{t_0}^t S_{qp}(\sigma) d\sigma + \gamma_{p2} \int_{t_0}^t \text{sign}(S_{qp})(\sigma) d\sigma$$

$$S_{vF} = S_{qF} + \gamma_{F1} \int_{t_0}^t (S_{qF}(\sigma)) d\sigma + \gamma_{F2} \int_{t_0}^t \text{sign}(S_{qF})(\sigma) d\sigma$$

cuyos elementos se definen como:

$$S_{qp} = S_p - S_{dp} \quad \text{variedad extendida de posición}$$

$$S_p = \Delta \dot{q} + \alpha \Delta q \quad \text{superficie deslizante de posición}$$

$$S_{dp} = S_p(t_0) e^{-k_p t} \quad \text{sesgo de posición}$$

$$S_{qF} = S_F - S_{dF} \quad \text{variedad extendida de fuerza}$$

$$S_F = \Delta F \quad \text{superficie deslizante de fuerza}$$

$$S_{dF} = S_F(t_0) e^{-k_F t} \quad \text{sesgo de fuerza}$$

donde k_p, k_F son constantes positivas. Por lo anterior, la ley de control queda entonces como:

$$\tau = -K_d S_r + J_{\varphi+}^T [-\sigma_d + \eta \Delta F + \gamma_{F1} S_{qF} + \gamma_{F2} \tanh(\rho S_{qF})]$$

$$+ J_{\varphi+}^T [\eta \gamma_{F2} \int_{t_0}^t S_{qF}(\sigma) d\sigma + \eta_{F2} \int_{t_0}^t \text{sign}(S_{qF})(\sigma) d\sigma]$$

donde η, ρ son constantes positivas y K_d es una matriz diagonal definida positiva. Finalmente, en la ecuación 2.10 se identifica que $Q(q, \dot{q})$ es el subespacio donde residen los errores de seguimiento en posición y velocidad, mientras que en J_φ los de la integral de fuerza.

Capítulo 3

Integración del Control Fuerza/Posición con la Superficie Reconstruida

En este capítulo se presenta la metodología propuesta para la generación de una trayectoria deseada sobre una superficie reconstruida tridimensionalmente, es decir, se muestran los procedimientos necesarios para implementar la metodología propuesta desde la adquisición de imágenes hasta la generación de la trayectoria deseada con el esquema de control propuesto. Por otro lado, se describen de forma gráfica las variables de entrada y salida de cada sub-etapa, así como la relación entre ellas.

3.1. Metodología

El proyecto está dividido en dos grandes etapas: la etapa de reconstrucción 3D, que incluye también el proceso de calibración de cámaras y la etapa del mapeo de trayectorias sobre la superficie o ambiente. Es en la última etapa donde se encuentra la aportación total del proyecto, ya que en esta etapa se expone la relación existente entre la nube de puntos generada y el mapeo de la trayectoria sobre el ambiente reconstruido.

La figura 4.1 muestra un diagrama de las sub-etapas de cada proceso. La metodología puede dividirse en dos etapas, cada una con diversas sub-etapas necesarias para la obtención del resultado deseado.

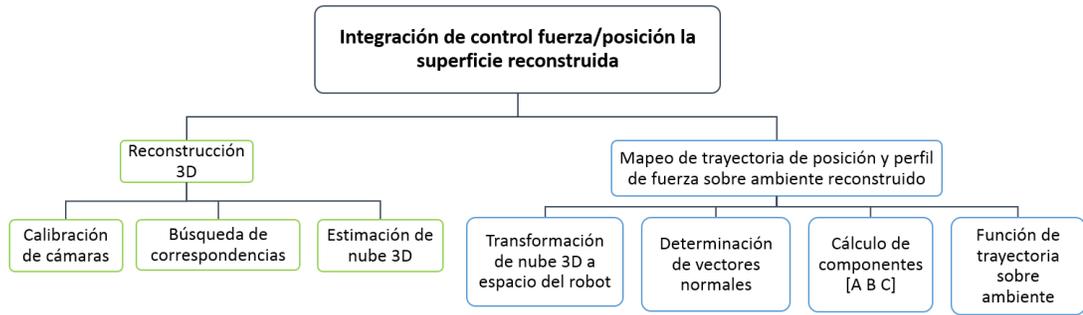


Figura 3.1: Diagrama de las etapas del proyecto

Por otro lado la figura 3.2 muestra de forma gráfica las variables de entrada y salida de cada etapa,

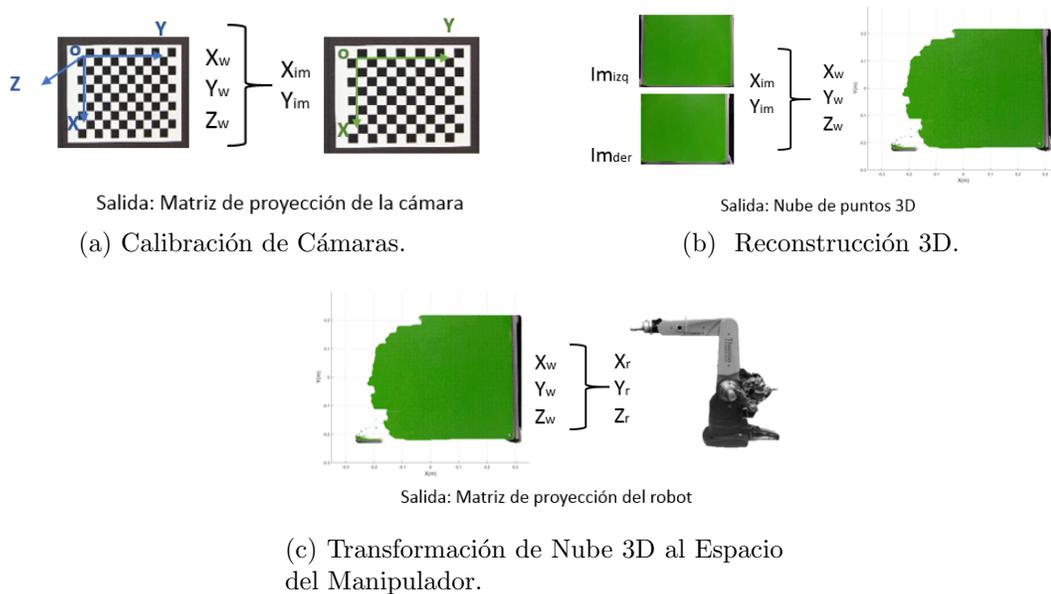


Figura 3.2: Etapas del Proyecto Representadas Gráficamente

donde X_w, Y_w, Z_w representa un punto en el mundo 3D, X_{im}, Y_{im} representa al mismo punto en el espacio de la imagen y X_r, Y_r, Z_r representa al punto en el espacio del manipulador.

El diagrama pretende mostrar las variables de entrada y salida de cada etapa, así como el resultado final de cada proceso. Con base en el esquema mostrado, en la figura 3.3 se puede establecer la siguiente metodología:

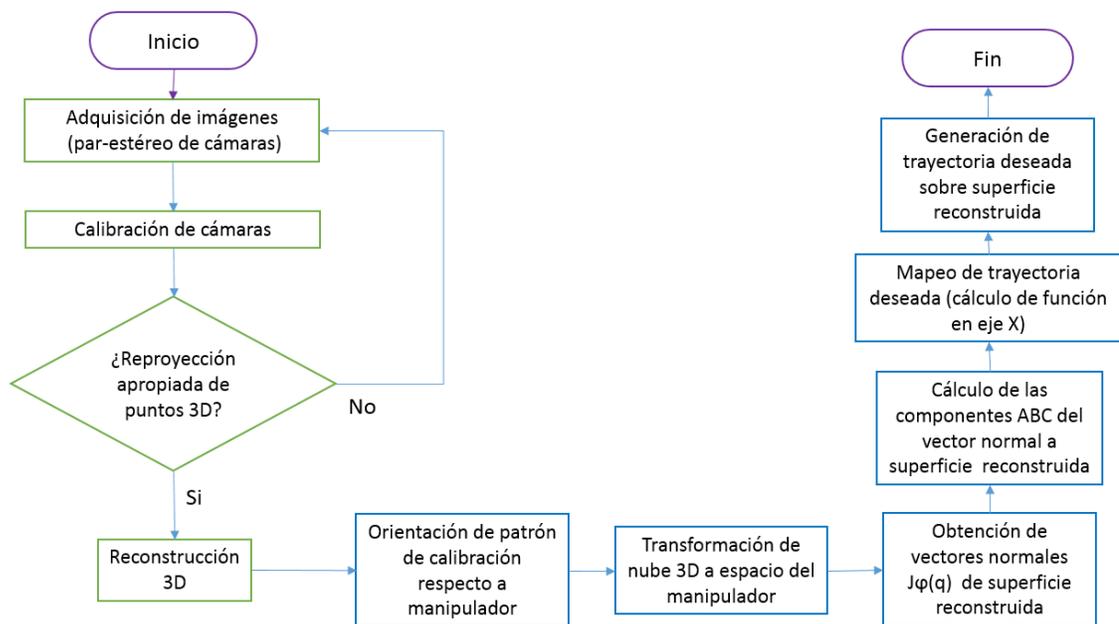


Figura 3.3: Metodología propuesta

3.2. Adquisición de Imágenes

El primer proceso dentro de la metodología implica la obtención de las imágenes por medio de un par-estéreo de cámaras, dichas cámaras pueden ser montadas individualmente sobre una estructura con cierta separación una de otra y así recuperar la información de distancia, tal como se planteó en el capítulo anterior. La cámara utilizada en este proyecto, ya cuenta con dos lentes integrados en un sólo dispositivo,

lo que hace el proceso de adquisición de imágenes más sencillo al no tener que diseñar y maquinar una estructura para montar ambas cámaras. El proceso de la adquisición de imágenes es importante, ya que existen factores tal como la iluminación, la sensibilidad de la cámara, e incluso el número de imágenes procesadas que pueden afectar al proceso posterior que es la calibración de las cámaras.

3.3. Calibración de Cámaras

El proceso de calibración implica la elección del tipo de patrón, el diseño de una plantilla de calibración, la selección de las dimensiones del patrón y la elección del número de características de interés. El presente proyecto define a las esquinas como una características de interés y define el método de Harris como el algoritmo usado para la detección de dichas características.

Después de que se ha establecido el tamaño y el número de esquinas analizadas en el patrón, es necesario usar un detector de esquinas para conocer el valor que cada esquina tiene en píxeles y así encontrar una matriz de transformación que transforme las características de interés del espacio en el mundo 3D X_w, Y_w, Z_w al espacio de la imagen X_{im}, Y_{im} (ver figura 3.2 a)).

Por otro lado el proceso de validación de la matriz de calibración implica la reproyección de los puntos del mundo 3D al mundo de la imagen, de forma que el resultado obtenido mediante Harris debe coincidir con los puntos reproyectados, en caso de lo contrario, es necesario regresar al proceso de adquisición de imágenes para descartar posibles factores que afectan el proceso de calibración (ver el proceso de decisión en figura 3.3).

3.4. Proceso de Reconstrucción

El proceso de reconstrucción, tal como se ilustra en la figura 3.2 b), implica transformar un punto X_{im}, Y_{im} del espacio de la imagen al espacio 3D X_w, Y_w, Z_w (caso contrario al de calibración). En este proyecto se propone un método de construc-

ción 3D basado en mapas de disparidad, cuyo proceso de funcionamiento se describe como:

1. Transformación de imágenes a escala de gris, sólo se trabaja un canal de color.
2. Búsqueda de correspondencias usando el algoritmo de suma de diferencias absolutas (SAD).
3. Búsqueda de correspondencias a nivel subpixelico.
4. Optimización del proceso de búsqueda usando programación dinámica.
5. Optimización a nivel computacional, usando imágenes piramidales.
6. Obtención de mapa de disparidad.

En el proceso anterior, 2) genera un mapa de profundidad, sin embargo se realizan los procesos posteriores para la optimización del mapa de disparidad generando una imagen que muestra la forma del objeto y sus profundidades. En 3) la estimación subpixelica realiza el proceso partiendo de números no enteros, así es posible encontrar transiciones suavizadas entre píxeles. Por otro lado en 4) la programación dinámica es un método en el cual el valor de la disparidad es afectada por las disparidades de un vecindario. Sin embargo, a pesar de que la estimación del mapa de disparidad tiene mejores resultados, el proceso tiene un costo operacional alto, por ello al usar imágenes piramidales 5), el proceso 6) se agiliza.

3.5. Orientación de Manipulador y Transformación de Nube

Este proceso implica calibrar el patrón de calibración respecto al manipulador, para ello, se transforman puntos en el mundo 3D X_w, Y_w, Z_w al espacio de manipulador X_r, Y_r, Z_r y así, generar una nueva matriz de transformación (ver figura 3.2 c)).

Para conocer el valor de un punto en X_r, Y_r, Z_r se analiza la cinemática directa del manipulador en cuestión y se almacenan los valores obtenidos. Los valores de

la posición del efector final, determinados mediante la cinemática del manipulador, no sólo sirven para orientar al manipulador, sino también como características de interés que ayudan a validar la matriz de transformación encontrada.

3.6. Obtención de Vectores Normales $J_\varphi(q)$

Tal como se definió en el capítulo anterior, el esquema de control simultáneo de fuerza/posición basado en el principio de ortogonalización requiere conocer el ambiente sobre el que se genera la trayectoria deseada. Conocer los vectores que se generan en cada punto de la nube reconstruida es parte esencial del proceso de conocer el Jacobiano de la restricción $J_\varphi(q)$ que toma parte en la implementación de la ley de control propuesta.

El algoritmo para la obtención de los vectores normales $J_\varphi(q)$ implica buscar un vecindario que cumpla con la norma dada por:

$$d(z, y) = \|z - y\| = \sqrt{\sum_{i=1}^n (z_i - y_i)^2} \quad (3.1)$$

A partir de un punto pivote, con coordenadas x, y, z conocidas, se generan dos vectores positivos (vector a y vector b), cuyo producto cruz, dado por:

$$a \times b = \begin{vmatrix} i & j & k \\ a_1 & a_2 & a_3 \\ b_1 & b_2 & b_3 \end{vmatrix} \quad (3.2)$$

genera el vector normal buscado. Dichos vectores son calculados para cada punto de la rejilla y a cada punto le corresponde un vector normal $J_\varphi(q)$ (ver figura 3.4).

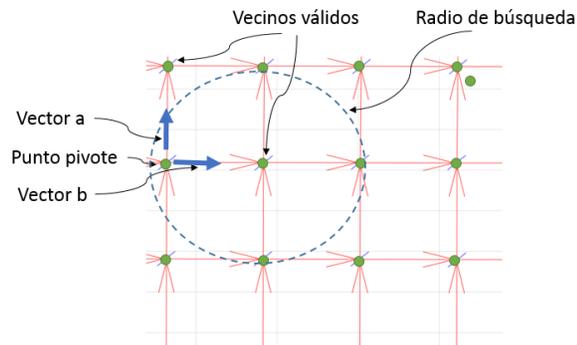


Figura 3.4: Vectores de Nube 3D.

El resultado en este proceso es un vector normal que contiene tres elementos A, B, C , referentes a las componentes unitarias del propio vector (ver figura 3.5).

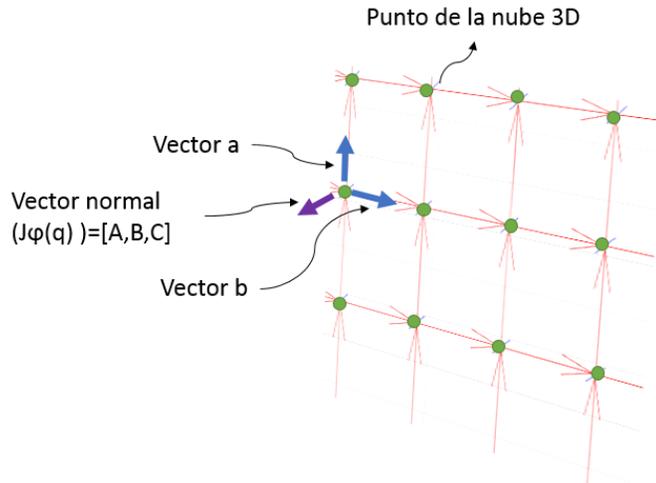


Figura 3.5: Vectores Normales.

3.7. Componentes ABC de $J\varphi(q)$

La ecuación 2.6 planteada en el capítulo 2, que representa a la restricción altamente rígida, puede ser descrita por la ecuación del plano como:

$$\varphi(x(q)) = Ax + By + Cz + D = \mathbf{n} \cdot \mathbf{x} = 0 \quad (3.3)$$

donde $\mathbf{n} = [A, B, C]$ representa el vector normal al plano Q que contiene $\mathbf{x} = [x, y, z]$.

La figura representa a los vectores que se generan para cada punto p que pertenece al plano Q .

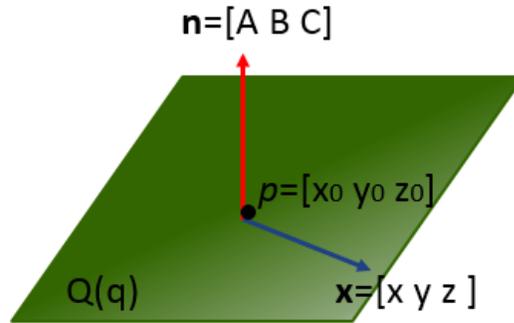


Figura 3.6: Vectores de nube 3D

A partir de ahora \mathbf{n} , será representado como el vector $J_\varphi(q)$.

Las componentes del vector \mathbf{x} pueden ser conocidas mediante la cinemática del manipulador. Por otro lado, los parámetros del vector normal $J_\varphi(q)$ son desconocidos, por ello se considera que la superficie $\varphi(x(q))$ es desconocida [9].

Así entonces, para cada punto obtenido de la nube 3D en el espacio del manipulador corresponde un vector normal $J_\varphi(q)$ que describe la dirección en que la fuerza debe ser aplicada y de forma implícita la orientación del ambiente respecto al manipulador.

Debido a que la resolución del manipulador no corresponde con la nube de puntos 3D obtenida, es necesario proponer un método que asigne un vector normal para cualquier punto sobre el que se desplace el manipulador. Para el objetivo de éste proyecto, mínimos cuadrados permite generar una matriz de transformación que para cada valor de X_r, Y_r, Z_r , determina las componentes del vector normal A, B, C .

3.8. Mapeo y Generación de Trayectoria Deseada

El proceso anterior permite encontrar las componentes A, B, C , del vector normal $J_\varphi(q)$, para cada punto de la nube reconstruida. Sin embargo, cuando el robot genere la trayectoria deseada no todos los valores de la cinemática tendrán una componente A, B, C asociada, por ello es necesario usar un método para aproximar valores A, B, C , cualquiera que sea la trayectoria deseada. Para lo anteriormente establecido se hizo uso de las transformaciones lineales, donde:

$$V_n = M_3 Q \quad (3.4)$$

Donde $V_n = [A, B, C]$ es el vector normal y $Q = [X_r, Y_r, Z_r]$ es la cinemática directa del manipulador, y :

$$M_3 = \begin{bmatrix} m_{311} & m_{312} & m_{313} & m_{314} \\ m_{321} & m_{322} & m_{323} & m_{324} \\ m_{331} & m_{332} & m_{333} & m_{334} \\ m_{341} & m_{342} & m_{343} & m_{344} \end{bmatrix} \quad (3.5)$$

Mediante mínimos cuadrados es posible dar solución al sistema de ecuaciones planteado, determinando así, una función que describe a la superficie sobre la que se genera la trayectoria deseada.

Capítulo 4

Resultados Experimentales

Con el propósito de validar los objetivos propuestos en el trabajo, en este capítulo se establecen las condiciones experimentales, establecidas tanto para reconstruir la superficie incierta, como las del esquema de control propuesto. Los resultados iniciales se dividen en dos etapas con el objetivo de ser analizados fácilmente.

4.1. Resultados de la Etapa de Visión por Computadora

4.1.1. Consideraciones Experimentales

Se tomaron en consideración los siguientes factores:

- Tamaño de imágenes usadas para la calibración de cámaras y el proceso de reconstrucción 728×1024 pixeles.
- Patrón de calibración coplanar basado en tablero de ajedrez.
- Condiciones de iluminación controladas.
- Cámara estereoscópica utilizada para reconstruir modelo 3D FinePix de Fuji-film.

4.1.2. Proceso de Calibración

El primer proceso dentro del diagrama planteado, corresponde a la calibración de cámaras. Como se planteó en el capítulo 2, el objetivo es transformar puntos 3D (mundo) a un espacio 2D (imagen), sin embargo, se necesita un sistema de referencia en el mundo llamado patrón de calibración. En este proyecto se usa un patrón coplanar con dimensiones de $400\text{mm} \times 320\text{mm}$, cada uno de los cuadros mide 40mm , dando como resultado 99 esquinas, las cuales serán tomadas como referencias en las coordenadas del mundo.

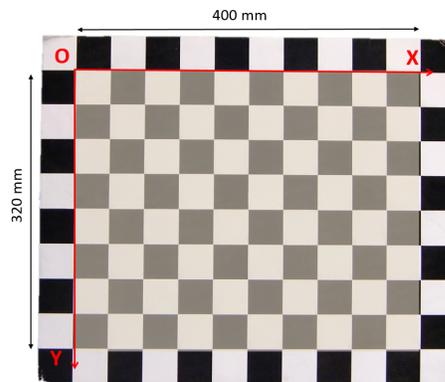


Figura 4.1: Patrón de Calibración.

Una vez que se ha establecido, el tamaño y el número de esquinas analizadas en el patrón, es necesario usar un detector de esquinas para conocer el valor que cada esquina tiene en píxeles y así poder encontrar una matriz de transformación. Antes de describir el resultado de la detección de las esquinas es necesario mencionar que a partir de este momento se tiene que definir el tamaño de todas las imágenes que se van a usar, es decir, tanto las imágenes adquiridas con el patrón y las de la superficie a reconstruir, deben tener el mismo tamaño. De igual forma al tomar las imágenes con la cámara, si existe un *zoom* óptico, este debe ser el mismo para todo el proceso, de otra forma el resultado de reconstrucción no es correcto.

Durante el proceso de detección de esquinas se usó una ventana de búsqueda w de 45×45 píxeles y un factor de sensibilidad k de $0.242u$. La imagen 4.2 muestra con cruces rojas las esquinas encontradas en la imagen del patrón de calibración.

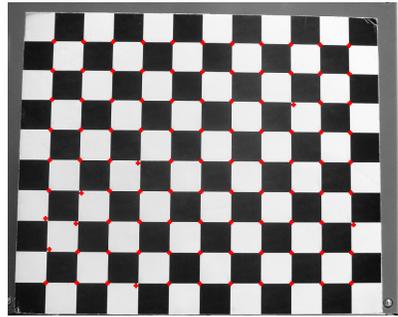


Figura 4.2: Resultado del Detector de Esquinas Harris.

En el proceso de calibración es necesario elegir un número suficiente de imágenes, tal que los parámetros de calibración sean los adecuados, por ello, se eligieron 10 diferentes orientaciones del patrón de calibración (ver figura 4.3), donde cada esquina de cada imagen debe ser identificada y numerada en el mismo orden.

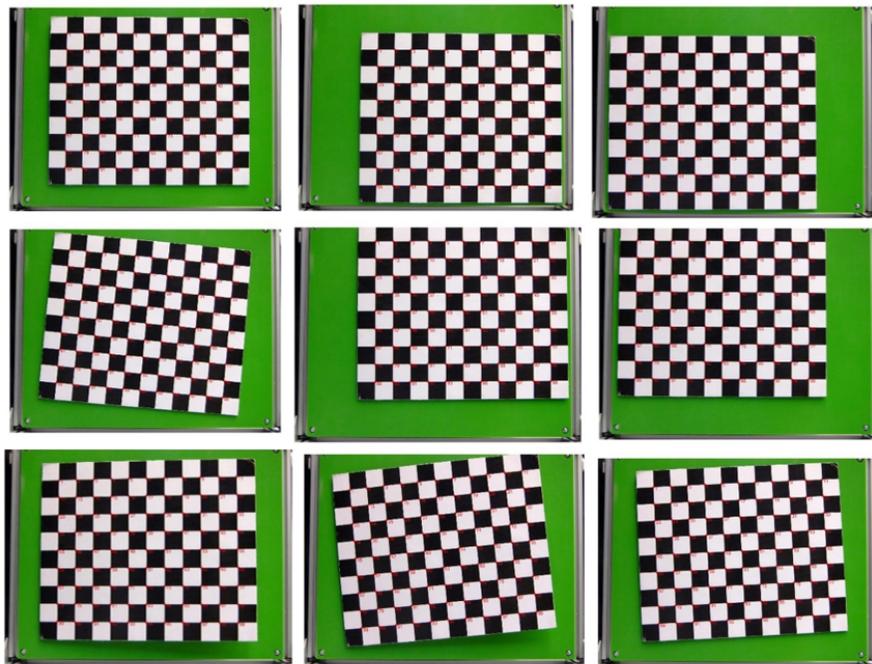


Figura 4.3: Orientaciones del Patrón Usadas.

Para el sensor izquierdo de la cámara estereoscópica los resultados dentro del proceso de calibración fueron las siguientes :

$$\begin{aligned}
 O_x &= 540.94 \text{ pixeles} \\
 O_y &= 374.94 \text{ pixeles} \\
 f_x &= 1671.46 \text{ pixeles} \\
 f_y &= 1678.30 \text{ pixeles}
 \end{aligned}
 \tag{4.1}$$

$$T = \begin{bmatrix} -160.69 \\ 207.97 \\ 1065.78 \end{bmatrix}
 \tag{4.2}$$

Por otro lado el sensor derecho tiene los siguientes parámetros:

$$\begin{aligned}
 O_x &= 586.86 \text{ pixeles} \\
 O_y &= 375.86 \text{ pixeles} \\
 f_x &= 1668.33 \text{ pixeles} \\
 f_y &= 1674.58 \text{ pixeles}
 \end{aligned}
 \tag{4.3}$$

$$T = \begin{bmatrix} -228.23 \\ 213.34 \\ 1066.14 \end{bmatrix}
 \tag{4.4}$$

Para verificar qué los parámetros en el proceso de calibración es necesario re-proyectar los valores, tal como muestra 2.1.1. La figura 4.4 muestra el resultado de la reproyección con los parámetros de la cámara, se observa que los puntos en color azul (esquinas determinadas con Harris) se empalman con los círculos rojos (esquinas reproyectadas), esto quiere decir que el proceso de calibración de cámara es correcto.



Figura 4.4: Reproyección de Parámetros de Calibración.

Para verificar lo anterior, se usa el error cuadrático medio de los valores, donde:

$$ECM = \frac{\sum_{i=1}^n (p_{real} - p_{estimado})^2}{n} \quad (4.5)$$

Para el sensor izquierdo, el error cuadrático medio resulta ser:

$$ECM = 0.1290 \text{ pixeles} \quad (4.6)$$

y para el sensor derecho, el error cuadrático medio es igual a:

$$ECM = 0.1306 \text{ pixeles} \quad (4.7)$$

4.1.3. Proceso de Reconstrucción

Una vez que se ha calibrado la cámara es necesario determinar, qué parámetros van a ser usados para reconstruir la superficie sobre la que se genera la trayectoria. Como se mencionó anteriormente se usa una cámara 3D, por ello, se optó por usar los parámetros que representaran el error de proyección mínimo entre los dos sensores de la cámara, es decir, fueron tomados en cuenta los parámetros de la ecuación 4.8

y 4.11 con el mínimo error de transformación.

Las imágenes de entrada del algoritmo de reconstrucción son las siguientes:

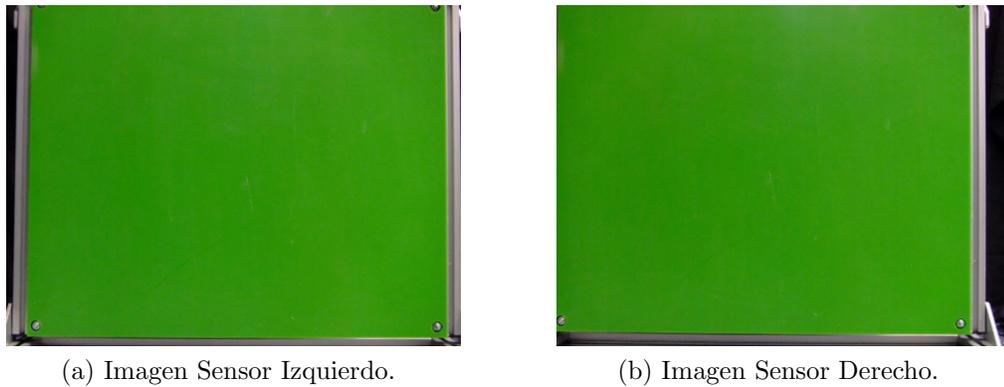


Figura 4.5: Imágenes Obtenidas Mediante Cámara 3D.

Algoritmo de Reconstrucción

El algoritmo de reconstrucción sigue los pasos, tal como se observa en la figura 4.6, a lo largo de esta sección se irá describiendo cada uno de los procesos.



Figura 4.6: Diagrama del Proceso de Reconstrucción.

El primer paso para reconstruir la imagen, es el procesamiento de la imagen. Las imágenes pasan a escala de grises y se muestran las imágenes concatenadas y con una componente de color diferente tal como se ve en la figura 4.7.

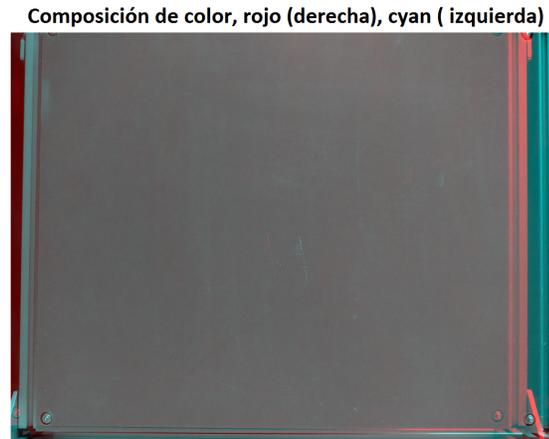


Figura 4.7: Disparidad de las Imágenes.

El siguiente bloque es el de búsqueda de correspondencias. Anteriormente se mencionó que el criterio para determinar una correspondencia, para este caso, es el de suma de diferencias absolutas. La ventana de calculo de SAD , definida en el Capítulo 2 por la ecuación 2.1, es una ventana W de 15×15 píxeles, que va desplazándose sobre la imagen derecha para buscar las mejores correspondencias en la imagen izquierda.

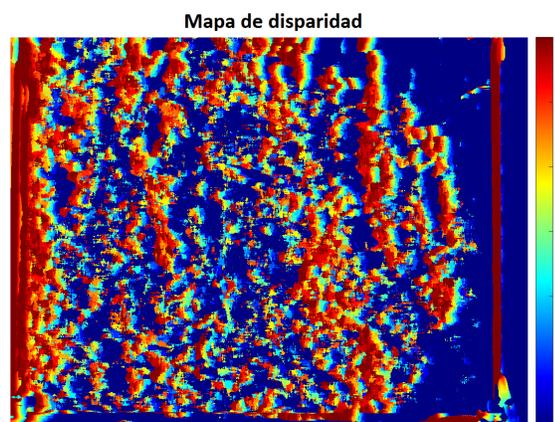


Figura 4.8: Mapa de Disparidad Inicial.

El proceso anterior, genera un mapa de disparidad, es decir, se genera una imagen que muestra la forma del objeto y sus profundidades. Los colores en tonalidad azul denotan las partes más alejadas a la cámara, y las rojas, las más cercanas. La dis-

paridad es inversamente proporcional a la profundidad (ver ecuación 2.2), pequeñas disparidades producen diferencias en profundidad, y grandes disparidades pequeños cambios en profundidad [1].

Sin embargo, ésta primera aproximación del mapa de diparidad tiene que ser suavizada, para dar una reconstrucción más aproximada. Los bloques 3,4 y 5 de la figura 4.6 son bloques exclusivos, para generar ese suavizado. La estimación subpíxelica encuentra transiciones suavizadas entre píxeles. Por otro lado la programación dinámica es un método en el cual el valor de la disparidad es afectada por las disparidades de un vecindario. Sin embargo, a pesar de que la estimación del mapa de disparidad tiene mejores resultados, el proceso tiene un costo operacional alto, por ello al usar imágenes piramidales, el proceso se agiliza. La figura 4.9, muestran el mapa de disparidad final aplicando las técnicas anteriores.

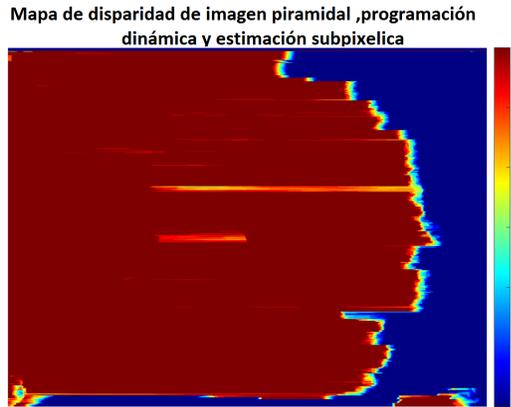


Figura 4.9: Mapa de Disparidad Final.

Finalmente al aplicar la ecuación 2.2, podemos obtener un valor para la profundidad, de forma que ahora tenemos una nube de puntos en 3D que modelan una placa de Nylamid. Los valores tomados para reconstruir fueron:

$$\begin{aligned}
 O_x &= 540.94 \text{ pixeles} \\
 O_y &= 374.94 \text{ pixeles} \\
 f_x &= 1671.46 \text{ pixeles} \\
 f_y &= 1678.30 \text{ pixeles}
 \end{aligned}
 \tag{4.8}$$

$$T = \begin{bmatrix} -160.69 \\ 207.97 \\ 1065.78 \end{bmatrix} \quad (4.9)$$

donde el baseline es:

$$b = \begin{bmatrix} -75.3627 \text{ mm} \\ 0.4882 \text{ mm} \\ -6.6672 \text{ mm} \end{bmatrix} \quad (4.10)$$

y el valor de disparidad es:

$$b = \begin{bmatrix} -117.67 \text{ pixeles} \\ 0.2473 \text{ pixeles} \\ 0.9364 \text{ pixeles} \end{bmatrix} \quad (4.11)$$

La nube 3D, queda entonces como:

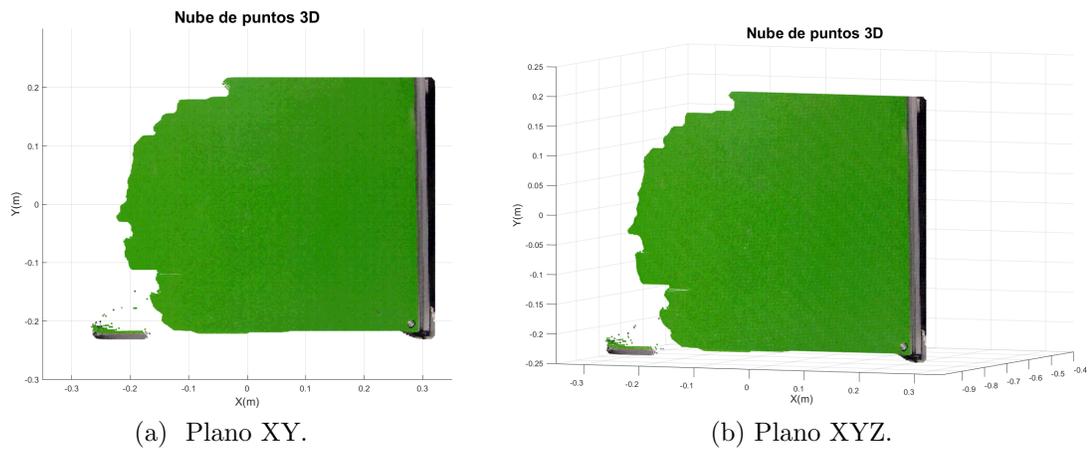


Figura 4.10: Nube de puntos 3D.

4.2. Resultados de la Etapa de Mapeo de Trayectoria

4.2.1. Consideraciones Experimentales

Se tomaron en consideración los siguientes factores:

- Se consideran sólo dos vectores positivos para la obtención del vector normal $J\varphi(q)$
- Se define la transformación lineal como el método de transformación del espacio del mundo, al del manipulador.
- Se realizan los experimentos sobre la superficie desconocida orientada en dos diferentes posiciones (ver figura 4.19).

4.2.2. Proceso de Mapeo de Trayectoria

Este es el proceso más importante dentro del proyecto, ya que la propuesta para resolver el problema planteado en el capítulo 1, se explica en este apartado. Una vez que se obtiene la nube de puntos, es necesario transformarla al espacio de trabajo del manipulador, y para ello, se toma al patrón de calibración como una referencia común entre la cámara y el robot. La figura 4.11 muestra como se relacionan ambos procesos.

Calibración del Robot

Ya que el patrón es la referencia común entre ambos espacios de coordenadas, y sabiendo que:

$$Cam = M_1 Pat \quad (4.12)$$

$$Rob = M_2 Pat \quad (4.13)$$

donde M_1 representa la matriz de transformación del patrón a las coordenadas de la cámara, y M_2 es la matriz de transformación del patrón a las coordenadas del robot, entonces de la ecuación 4.12:

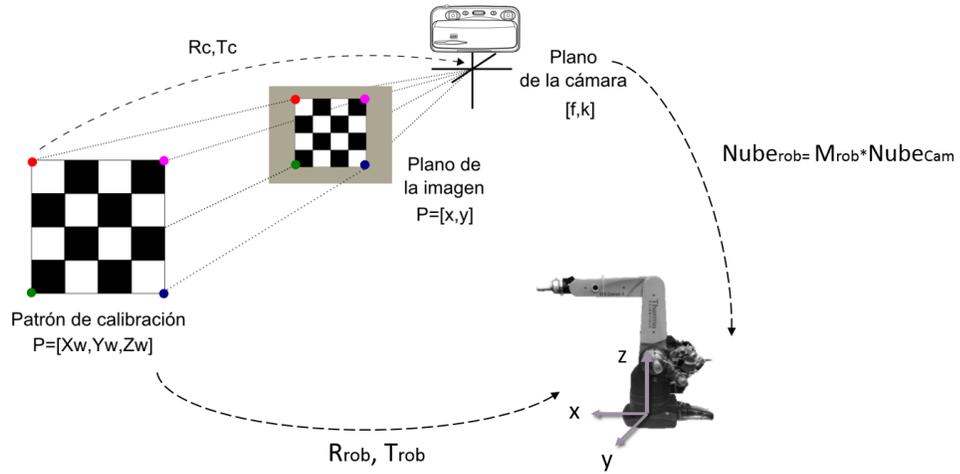


Figura 4.11: Relación de Calibración.

$$Pat = M_1^{-1}Cam \quad (4.14)$$

y sustituyendo 4.15 en 4.13, tenemos:

$$Rob = M_2 M_1^{-1}Cam \quad (4.15)$$

donde $M_1^{-1}Cam$, representa la nube de puntos calculada con anterioridad. Dicho de otra forma:

$$Nube_{Robot} = M_2 Nube_{Camara} \quad (4.16)$$

Para determinar la matriz de transformación M_2 , es necesario calibrar al manipulador, para ello se sigue un proceso similar al de la calibración de cámara. Se requiere almacenar valores del mundo = $[X_w, Y_w, Z_w]$ (patrón), para ser transformados al espacio del manipulador $Q = [X_r, Y_r, Z_r]$, donde Q , representa los valores de la cinemática directa del manipulador.

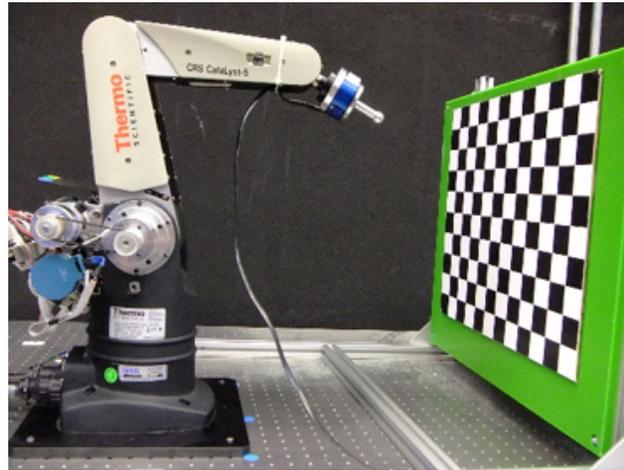


Figura 4.12: Calibración del Robot.

Para guardar los valores de Q se realizó un programa en LabWindows, en el cual, las esquinas eran determinadas mediante la cinemática del manipulador, de forma que ahora el valor de las esquinas no está en unidades pixelicas, sino en unidades métricas.



Figura 4.13: Programa Labwindows.

Los datos almacenados son usados para realizar una transformación lineal directa entre patrón y manipulador, que permita encontrar el valor de M_2 . Siguiendo lo establecido en la ecuación 2.1.1, se tiene que para la placa orientada a 90° , la matriz

4.17 define el valor de M_2 .

$$M_2 = \begin{bmatrix} -0.002 & -1.024 & 0 & 245.114 \\ -1.001 & 0.003 & 0 & 13.082 \\ -0.0125 & -0.0343 & 0 & 565.337 \\ -1.743 & -6.660 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.17)$$

y para la placa orientada a 113° , la matriz 4.18 define el valor de M_2 .

$$M_2 = \begin{bmatrix} 0.011 & -0.934 & 0 & 415.090 \\ -1.02 & 0.006 & 0 & 197.330 \\ -0.016 & -0.430 & 0 & 499.785 \\ -0.0125 & -3.092^{-05} & 0 & 565.337 \end{bmatrix} \quad (4.18)$$

Nuevamente se verifica la reproyección de puntos, sin embargo, ahora la cinemática del manipulador debe coincidir con los valores estimados por M_2 . Para el caso donde la superficie está inclinada verticalmente la reproyección de puntos se muestra en la figura 4.14.

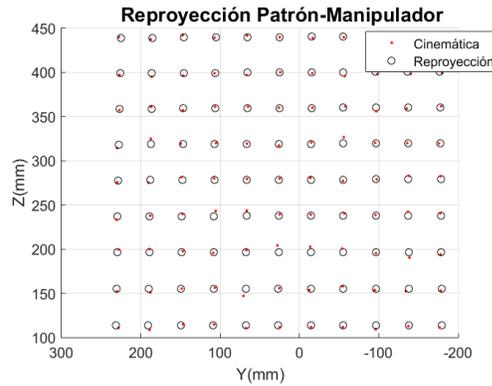


Figura 4.14: Reproyección de Puntos.

El error cuadrático medio de la reproyección para este caso es:

$$ECM = 11.60mm$$

Finalmente para la superficie vertical, la nueva nube transformada al espacio del manipulador dada por la ecuación 4.16, queda como se observa en la figura 4.15.

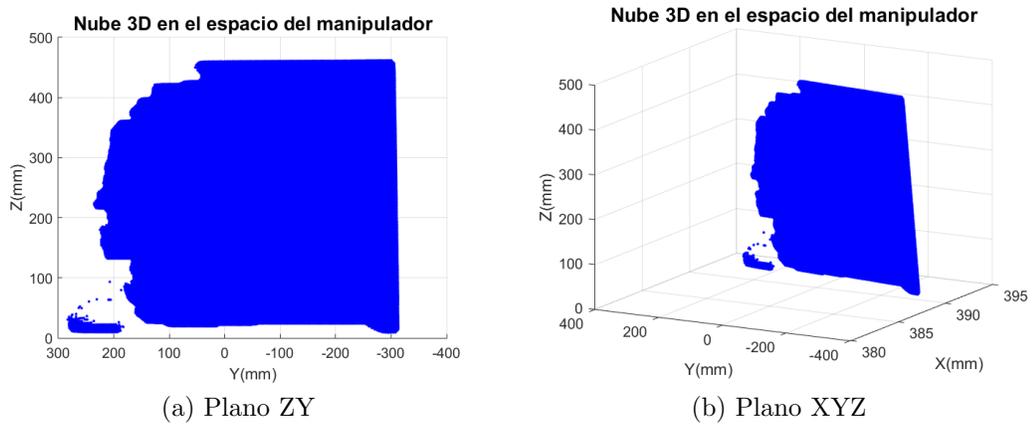


Figura 4.15: Nube de puntos 3D Placa Vertical.

El segundo caso es el de la placa inclinada, donde la reproyección de puntos estimada por 4.18 se muestra en la figura 4.16.

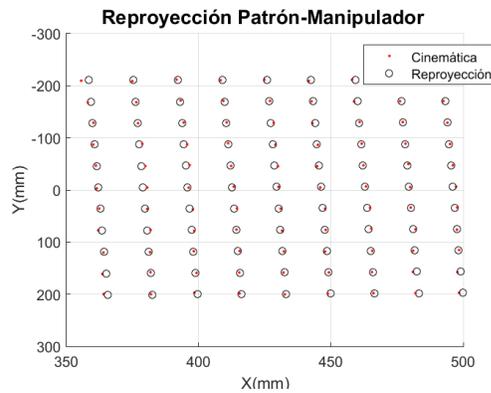


Figura 4.16: Reproyección de Puntos.

El error cuadrático medio de la reproyección para éste caso es:

$$ECM = 5.17mm$$

La nube transformada al espacio del manipulador para la superficie inclinada se observa en la figura 4.17.

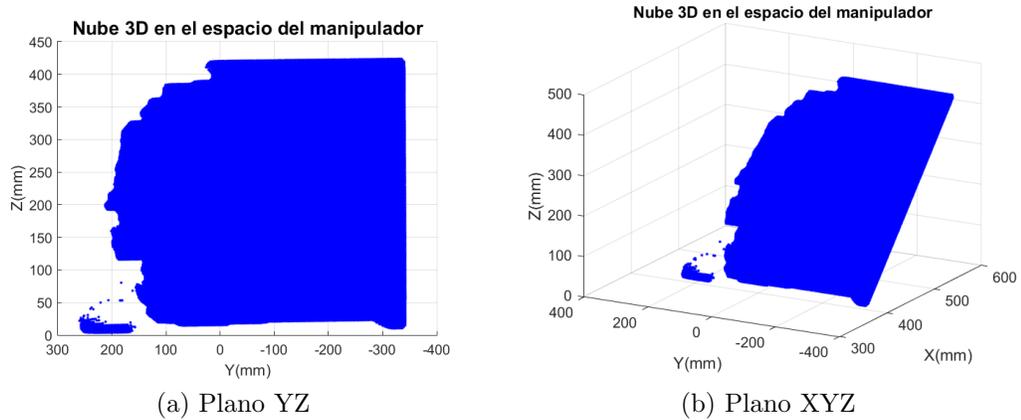


Figura 4.17: Nube de puntos 3D Placa Inclinada.

Calculando Vectores Normales

El proceso consiste en encontrar los vectores normales a cada punto de la reconstrucción 3D. Si se hace un acercamiento a la nube de puntos generada, puede observarse que la distribución de los puntos en el eje X y Y es equidistante, por tanto, el eje de profundidad es el que está variando, para dar la forma y dimensión al objeto reconstruido, tal como se ve en la figura 3.4.

Los puntos que se encuentran dentro del valor deseado establecido por 3.1, determinan dos vectores a y b , a partir de los cuales, se calcula el vector normal $J_\varphi(q)$. Para este caso la distancia debía ser:

$$2.10[mm] < d(z, y) > 2.80[mm] \quad (4.19)$$

La restricción para determinar los vectores a y b válidos, es que estos sean positivos, de forma que, se crea una rejilla de vectores, que determinarán al vector normal $J_\varphi(q)$.

La figura 4.18 muestra un segmento de la nube de puntos reconstruida, junto con los vectores normales (vector azul) generados a partir de los vectores a y b (vectores rojos).

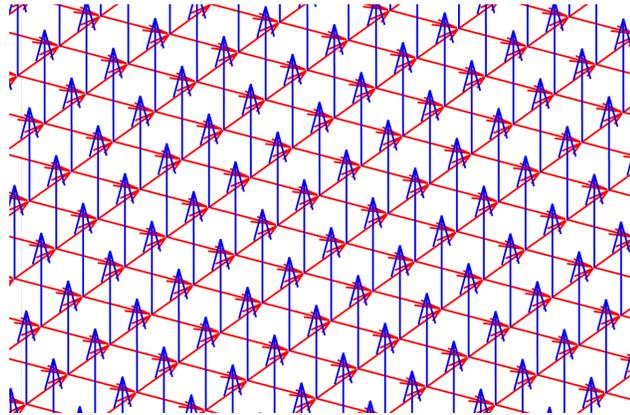
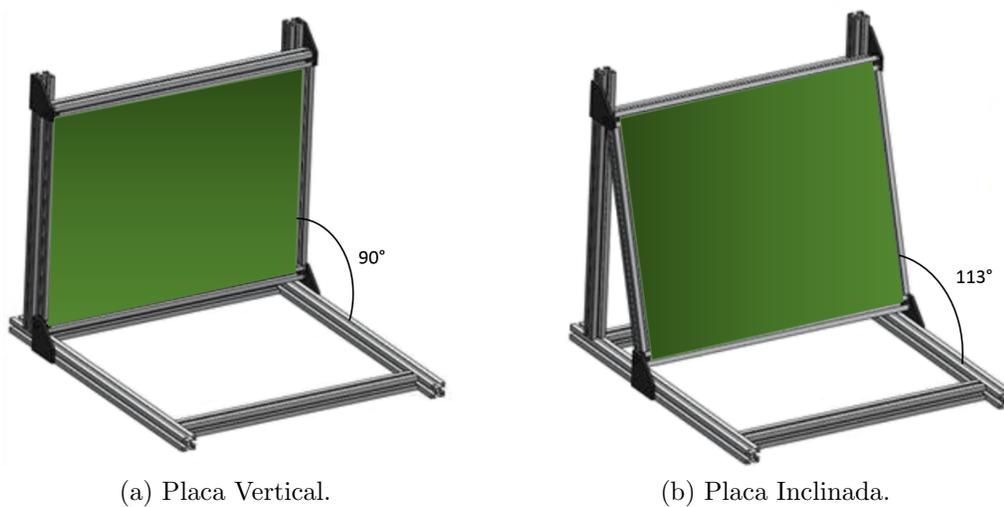


Figura 4.18: Segmento de Vectores Normales de Nube 3D.

Generación de Trayectorias

Tal como se menciona en las consideraciones experimentales, la superficie reconstruida se orienta respecto al manipulador en dos posiciones distintas, en la primera la placa está orientada a 90 grados respecto de la base de la estructura que la soporta y la segunda a 113 grados respecto a la misma base (ver figura 4.19), en consecuencia, según la matriz 3.5, se obtienen dos diferentes matrices que permiten obtener las componentes ABC del vector $J\varphi(q)$.



(a) Placa Vertical.

(b) Placa Inclinada.

Figura 4.19: Orientaciones de Placa Nylamid.

Para la placa vertical se determinó que la matriz 4.20 estima las componentes A, B, C del vector normal $J\varphi(q)$ a la superficie para cualquier posición del efector final al tener contacto sobre la superficie sobre la que se genera la trayectoria.

$$M_3 = \begin{bmatrix} -1.559^{-05} & 1.922^{-05} & 0.006 & -0.003 \\ 1.2654^{-05} & -1.559^{-05} & -0.004 & 0.003 \\ -0.004 & 0.006 & 1.766 & 0.999 \\ 0.004 & -0.006 & -1.766 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.20)$$

Por otro lado las componentes A, B, C del vector normal a la superficie de la placa inclinada son determinadas por (4.21).

$$M_3 = \begin{bmatrix} 0.023 & 0.456 & -1.018 & 0.408 \\ 0.001 & 0.023 & -0.051 & 0.021 \\ -0.052 & -1.018 & 2.275 & -0.912 \\ 0.006 & 1.116 & -2.493 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.21)$$

Es importante que al generar la trayectoria sobre el plano, en este caso un plano vertical, el eje X varíe de acuerdo a la forma de la superficie. Este es un aspecto de suma importancia, debido a que el esquema de control requiere que en todo momento el efector final esté en contacto con el ambiente. Para estimar X_d , se usó el método de mínimos cuadrados para aproximar una función a X_d con base en la nube de puntos calculada. De forma que para el caso donde la placa es vertical X_d es :

$$X_d = 0.5661 + (0.0026)Y_d + (0.0032)Z_d$$

Para el caso donde la placa está inclinada X_d es:

$$X_d = 0.4010 + (0.0228)Y_d + (0.4476)Z_d$$

donde X_d, Y_d y Z_d , son las componentes cartesianas de la trayectoria deseada generadas por el manipulador.

Hasta este punto, la hipótesis se cumple ya que es posible determinar las compo-

nentes A, B, C del vector normal $J_\phi(q)$ para cualquier punto de la superficie desconocida.

4.3. Resultados y Consideraciones Finales del Control Simultáneo

4.3.1. Consideraciones Experimentales

Se tomaron en consideración los siguientes factores generales:

- Robot a controlar semi-experimentalmente manipulador Catalyst-5 de la marca Thermo scientific.
- Se usa un robot de 5 gdl, limitando su uso a sólo 3gdl.
- La trayectoria será generada sobre el plano YZ respecto al marco de referencia del manipulador.
- El ambiente es una superficie altamente rígida, placa de Nylamid tipo XL, dimensiones aproximadas de $50cm \times 60cm$ y espesor de $2.54cm$.
- Se generan dos trayectorias sobre dos orientaciones distintas, dando como resultado cuatro diferentes experimentos . La primera trayectoria deseada de posición es un círculo y el perfil deseado de fuerza es una función cosenoidal centrada en 10 N, la segunda trayectoria es un semic cuadrado con dimensión de $10cm$ de cada lado, aplicando el mismo perfil de fuerza. En este apartado se analiza únicamente el resultado de las trayectorias circulares sobre ambas orientaciones.
- Implementación de una ley de control PD con modos deslizantes de segundo orden bajo un esquema de control simultáneo basado en el principio de ortogonalización.
- El tiempo de simulación de la trayectoria es de 15 segundos.

Antes de establecer las condiciones sobre las que se llevó a cabo el experimento, se describe el proceso general seguido para la obtención de los resultados.

1. Establecer la inclinación de la placa ajustando la estructura de aluminio al valor deseado.
2. Colocar la cámara a una distancia, donde el área a reconstruir pueda verse completamente.
3. Colocar el patrón de calibración en las distintas orientaciones, de forma que se abarque la mayor área posible.
4. Determinar los parámetros de la cámara y reconstruir el ambiente.
5. Verificar que los resultados son los deseados, si no es así, hay que volver a calibrar.
6. Establecer la última orientación del patrón como referencia para el manipulador y calibrar manipulador.
7. Transformar del espacio del patrón al espacio del manipulador.
8. Transformar la nueva nube 3D con la matriz de transformación encontrada.
9. Determinar el vector normal en cada punto de la nube.
10. Aproximar una función a la nube 3D mediante mínimos cuadrados .
11. Generar una trayectoria, sobre los planos X, Y, Z del manipulador, sobre la superficie previamente reconstruida.

4.3.2. Plataforma Semiexperimental

En el semiexperimento planteado se puede identificar la integración de dos áreas (ver figura 4.20). Por un lado, se tiene una nube de puntos 3D real de una superficie, que tiene vectores normales $J_\varphi(q)$ y sus componentes A, B, C asociados a cada punto que forman la nube y por otro lado, se tiene el modelo dinámico del manipulador Catalyst-5, con su respectivo análisis cinemático. Lo que permite, que puedan interactuar en un solo simulador, mediante la ecuación 3.3 y la plataforma Matlab-Simulink.

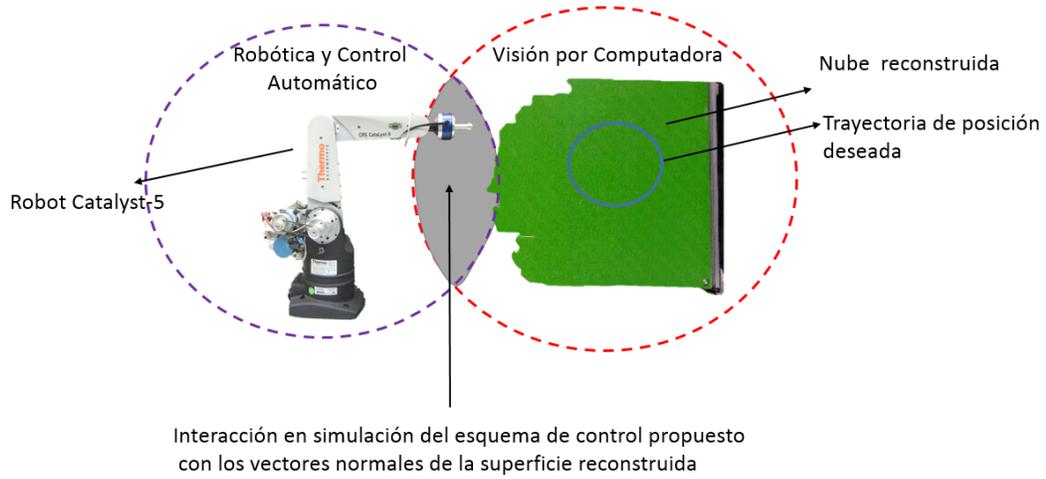


Figura 4.20: Descripción de Plataforma Semiexperimental.

4.3.3. Resultados de Experimentación

Placa Vertical

El esquema de control utilizado es un control PD deslizante cuyas ganancias de control se muestran en la tabla 4.1.

Eslabón	Kd_i	α	γ_{p1}	γ_{p2}
1	200	50	0.2	0.1
2	200	50	0.2	0.1
3	200	50	0.1	0.1

Tabla 4.1: Parámetros de control

Las constantes de control pueden verse en la tabla 4.2.

La ecuación paramétrica de la trayectoria deseada es un círculo con:

$$\begin{aligned}
 X_d &= 0.566 + (0.0026)Y_d + (0.0032)Z_d \\
 Y_d &= r \cos(\omega t) + hy \\
 Z_d &= r \cos(\omega t) + hz
 \end{aligned}
 \tag{4.22}$$

donde el centro del eje Y es $hy = -0.10m$, el centro del eje Z es $hz = 0.22m$ y el radio del círculo es $r = 0.05m$.

Variable	Valor
ρ	5
η	5
γ_{F1}	0.1
γ_{F2}	0.1
β	500.0
κ	100.0

Tabla 4.2: Constantes de control

La figura 4.21 muestra la generación del círculo sobre la superficie reconstruida, para ello, en todo momento se está determinando el valor de las componentes ABC del vector normal de cada punto sobre el que se genera la trayectoria deseada, así como el valor de la ecuación paramétrica en el eje X para mapear la trayectoria sobre la superficie reconstruida.

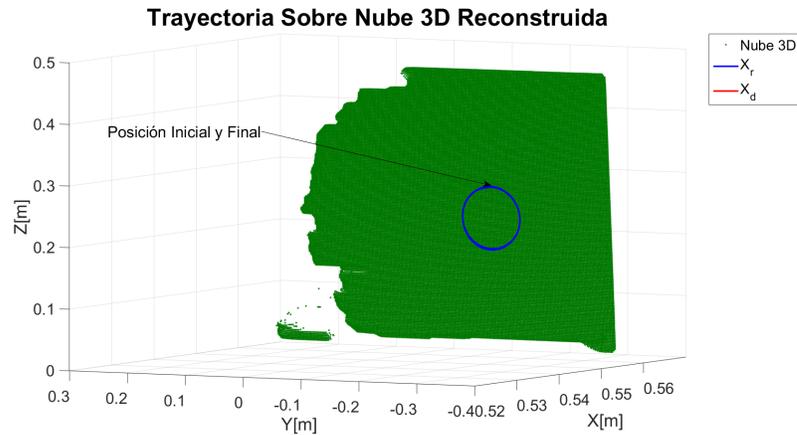
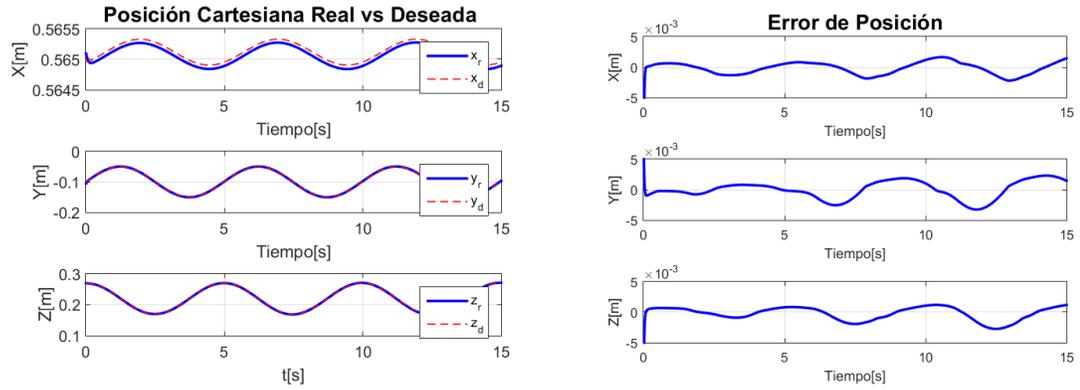


Figura 4.21: Trayectoria sobre Ambiente Reconstruido.

Para observar desde otra perspectiva el desempeño del control, se muestran las gráficas de la generación de la trayectoria en el espacio cartesiano (ver figura 4.22 a). Se observa que existe buen seguimiento de trayectoria sobre el plano YZ , sin embargo en el eje X , existe un error de $1mm$, entre la trayectoria deseada y la real, este error representa la separación entre la placa y el efector final, sin embargo, debido a la robustez del control, se puede realizar el seguimiento de la trayectoria. El error de

seguimiento de la trayectoria de posición se muestra en la figura 4.22 b).



(a) Trayectoria Espacio Cartesiano.

(b) Error de Seguimiento Espacio Cartesiano.

Figura 4.22: Seguimiento de Trayectoria en el Espacio Cartesiano.

En la figura 4.23 es posible visualizar el movimiento que realiza cada uno de los eslabones para ejecutar la trayectoria deseada.

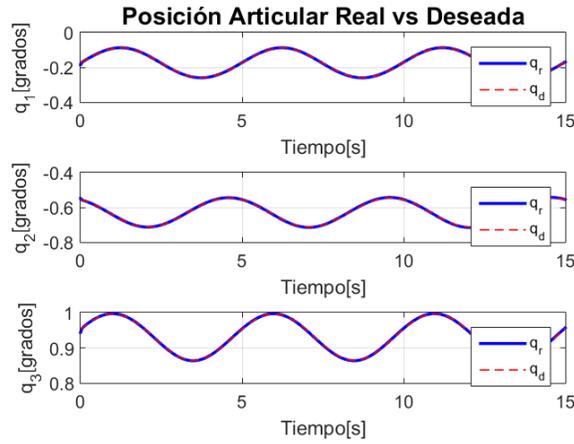


Figura 4.23: Trayectoria Espacio Articular.

Es importante observar también el comportamiento de los torques de control, para evitar daño en los motores del manipulador. La figura 4.24 muestra los pares de control para cada una de las articulaciones, se observa un ligero sobretiro al iniciar el seguimiento de trayectoria debido al esfuerzo necesario para ir de la posición inicial del manipulador al plano de la superficie reconstruida, sin embargo antes del primer segundo, el τ logra estabilizarse.

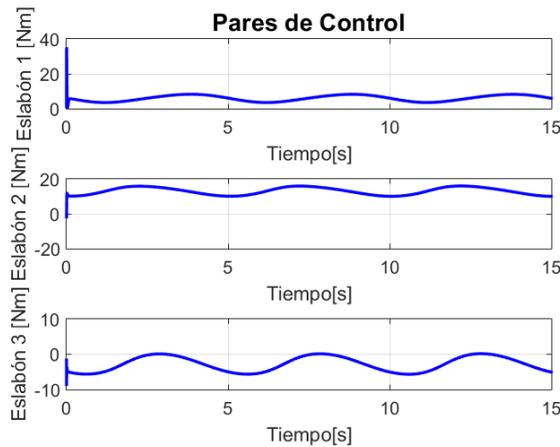
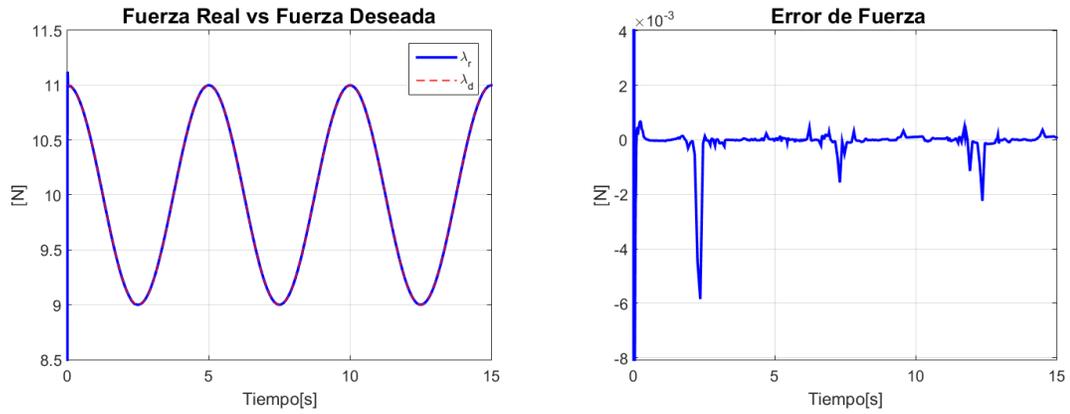


Figura 4.24: Pares de Control.

Finalmente, se observa en la figura 4.25 a) que al mismo tiempo que se sigue la trayectoria de posición, también existe seguimiento en la trayectoria de fuerza, aunque presenta un ligero sobretiro al iniciar la trayectoria, el control es capaz de estabilizar el seguimiento de fuerza. Por otro lado, la figura 4.25 b) muestra el error del seguimiento del perfil de fuerza sobre la superficie reconstruida.

Es importante mencionar que a pesar de que la fuerza y el seguimiento de posición trabajan sobre espacios ortogonales, existe cierta afectación de un espacio sobre el otro.



(a) Trayectoria Perfil de Fuerza.

(b) Error de Seguimiento de Perfil de Fuerza.

Figura 4.25: Seguimiento de Perfil de Fuerza.

Placa Inclinada

En el caso de la placa inclinada los parámetros de control son iguales que en el experimento anterior. Las ecuaciones paramétricas para la trayectoria deseada son las que definen la nueva orientación de la placa y por tanto son distintas.

$$\begin{aligned}
 X_d &= 0.401 + (0.022)Y_d + (0.4472)Z_d \\
 Y_d &= r \cos(\omega t) + h_y \\
 Z_d &= r \cos(\omega t) + h_z
 \end{aligned}
 \tag{4.23}$$

La figura 4.26 muestra la generación del círculo sobre la superficie reconstruida, con las mismas características que el experimento anterior, sin embargo, se observa que la trayectoria se mapea sobre la superficie a una inclinación diferente.

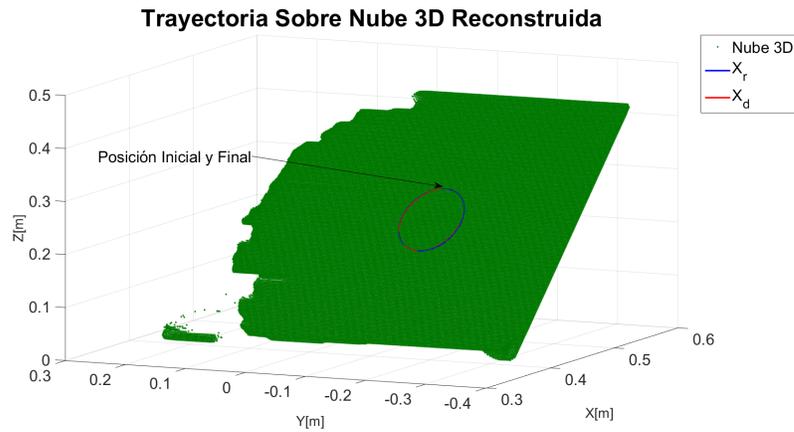
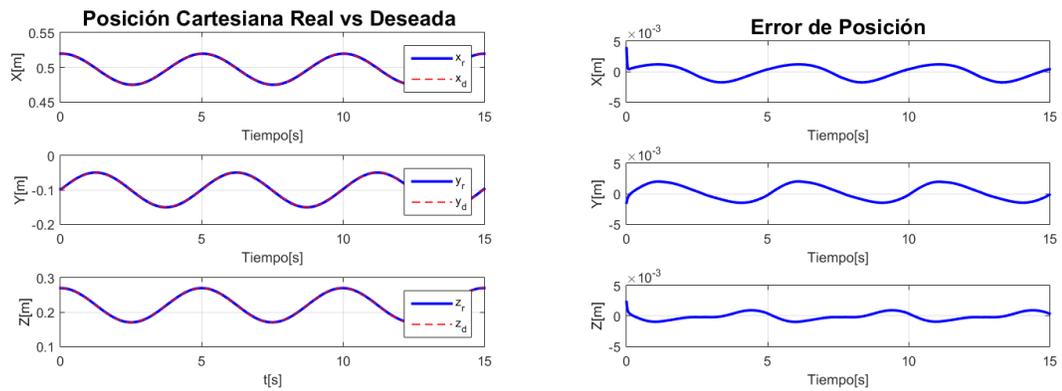


Figura 4.26: Trayectoria sobre Ambiente Reconstruido.

Las gráficas en el espacio cartesiano muestran el desempeño del manipulador al generar la trayectoria deseada.



(a) Trayectoria Espacio Cartesiano.

(b) Error de Seguimiento Espacio Cartesiano.

Figura 4.27: Seguimiento de Trayectoria en el Espacio Cartesiano.

Por otro lado el comportamiento de las articulaciones se observa en la figura 4.28.

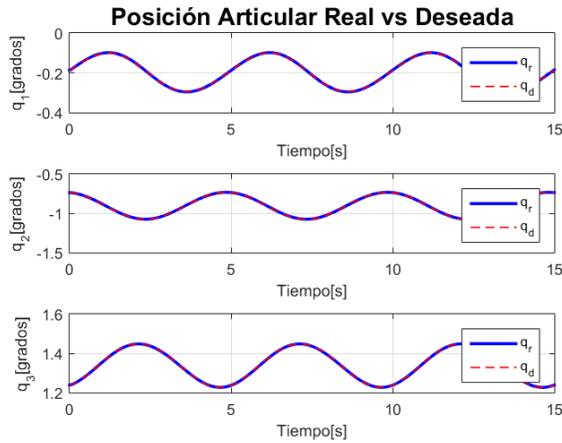


Figura 4.28: Trayectoria Espacio Articular.

A diferencia del caso anterior, no se presenta un sobretiro considerable al inicio del seguimiento de trayectoria (ver figura 4.29).

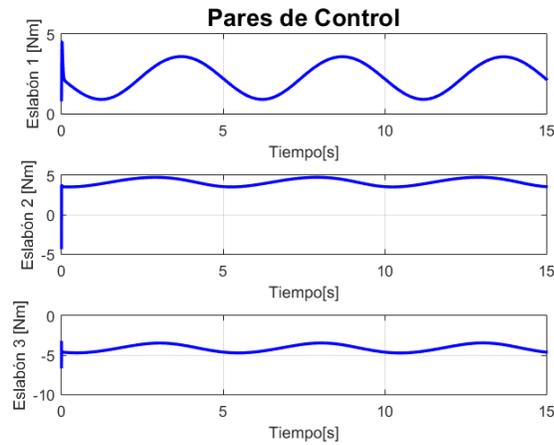
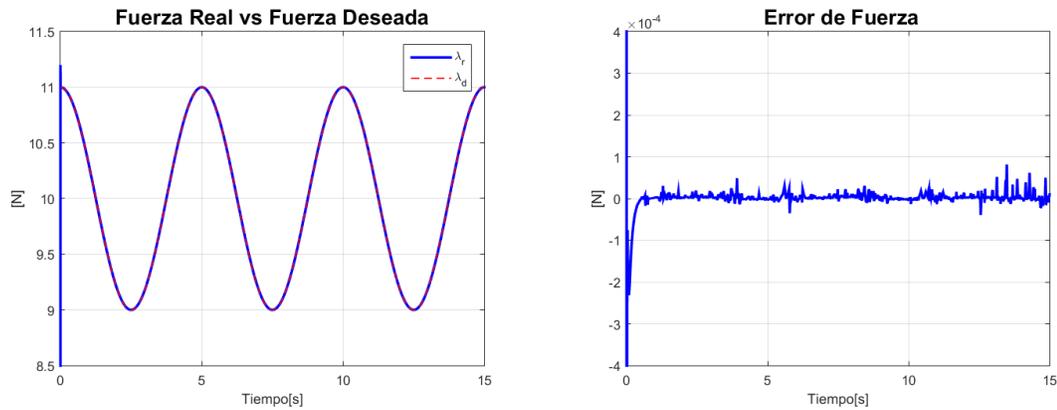


Figura 4.29: Pares de Control.

Finalmente, al mismo tiempo que se genera la trayectoria se aplica el perfil de fuerza plantado anteriormente. Se observa que es posible realizar un buen seguimiento de fuerza y que el error de λ es pequeño.



(a) Trayectoria Perfil de Fuerza.

(b) Error de Seguimiento de Perfil de Fuerza.

Figura 4.30: Seguimiento de Perfil de Fuerza.

4.4. Comentarios Generales

A lo largo de este capítulo se planteó el desarrollo de una metodología para la generación de trayectorias sobre una superficie incierta aplicando un control de fuerza y posición basado en el principio de ortogonalización. Un proceso amplio que se sintetiza en la obtención de las componentes del vector normal generado en la nube de puntos reconstruida y orientada de acuerdo al espacio de trabajo del manipulador. Así mismo se plantea generar una ecuación que describa la superficie sobre la que se genera la trayectoria deseada, cuyo método propuesto en este proyecto puede ser comparado respecto a otros métodos de estimación para determinar si existe mejora en el desempeño del mapeo de trayectoria.

Capítulo 5

Aplicación Directa del Proyecto

En la actualidad un área que ha tomado importancia tanto en su investigación y desarrollo, es la generación de energías eléctrica tal como la energía solar, energía eólica, energía hidráulica, energía de biomasa, etc.

Una forma de generación de energía que ha sido implementada desde hace varios años en México, es la energía eólica, según la Asociación Mexicana de Energía Eólica (amdee) en México existen 31 parques eólicos y 1570 aerogeneradores [4], y se planea que en los próximos años el uso de aerogeneradores incremente, y por ende el mantenimiento y reparación también. Un aerogenerador está conformado por diversos elementos, tal como se observa en la figura 5.1, sin embargo, este capítulo se abordará en el tema de las palas.

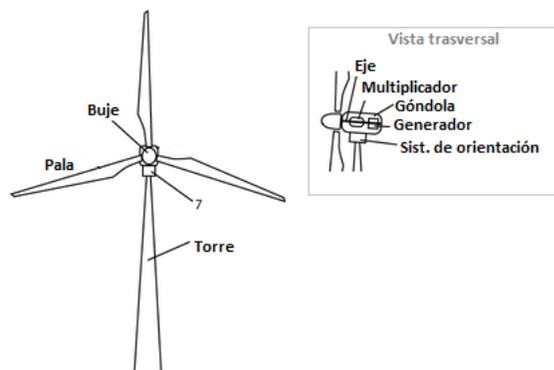


Figura 5.1: Elementos de un aerogenerador

5.1. Acomodo Automático de Fibra

Al igual que en el proceso de fabricación de palas, el uso de manipuladores en la industria aeroespacial ha incrementado en los últimos años debido a la necesidad de reducir el peso de las palas o de las aeronaves, sin poner en riesgo la resistencia de los materiales usados. Para lograr este propósito se aplican tiras de fibra de material compuesto sobre la superficie de interés, a este proceso se conoce como acomodo automático de fibras (AFP por sus siglas en inglés) [36].

La tecnología AFP consiste en la aplicación automática de varias bandas de material compuesto pre-impregnadas individuales a través de un mandril a alta velocidad, utilizando un cabezal de control numérico para colocar, fijar, y cortar cada banda durante la colocación de la fibra de material [19].

Es importante no confundir la tecnología AFP con la ATL, la primera es usada para superficies curvas o de contornos complejos y la segunda para superficies grandes planas o mínimamente curvas, lo que implica que en AFP la velocidad del proceso de compactación de las fibras de material compuesto disminuya [20].

5.2. Forma de Aplicación

En el presente proyecto se propuso el uso de la reconstrucción tridimensional para poder conocer la geometría de una superficie desconocida y así implementar un control simultáneo de fuerza y posición en un manipulador de tres grados de libertad, sin embargo, a lo largo del proceso se determinó que además de las aplicaciones mencionadas dentro del capítulo 1, la metodología realizada podría implementarse para la aplicación de fibras de material compuesto para el recubrimiento de palas de aerogeneradores, lo que representa un nuevo método de automatización para el acomodo de capas sobre las palas.

La figura 5.2, muestra un esquema de los elementos propuestos para este fin. Cada uno de los elementos se describe como:

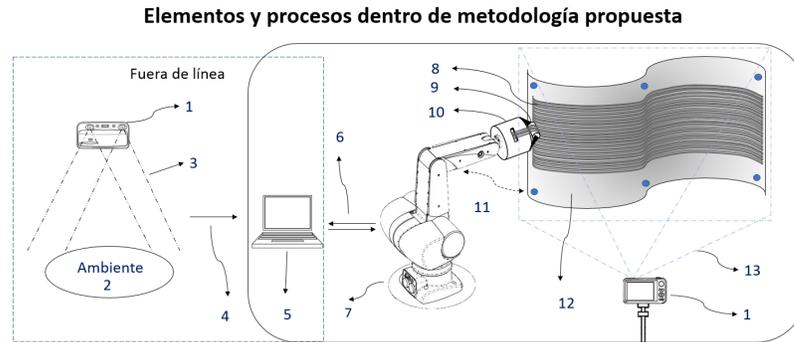


Figura 5.2: Diagrama de elementos propuestos

1. Cámara estereoscópica.
2. Ambiente o superficie desconocida.
3. Campo de visión de cada lente de la cámara (dos imágenes).
4. Procesos computacionales.
 - a) Procesamiento y registro de imágenes.
 - b) Reconstrucción 3D.
 - c) Obtención de vectores normales $J_{\varphi}(q)$ de la nube de puntos reconstruida.
 - d) Ejecución de software del control PD-Deslizante ortogonal.
5. Computadora de escritorio, para comunicación con manipulador.
6. Señales de encoder y de fuerza para retroalimentación de control.
7. Robot manipulador Catalyst-5.
8. Tiras de material compuesto sobre superficie.
9. Rodillo de compactación.
10. Cabezal de maquina de aplicación de material compuesto.
11. Proceso de orientación y posicionamiento de superficie respecto a la cámara.
12. Superficie con marcas activas.

13. Campo de visión de cámara estereoscópica.

Una vez que se han descrito los elementos necesarios para la implementación de este método de acomodo de capas se establece la siguiente metodología:

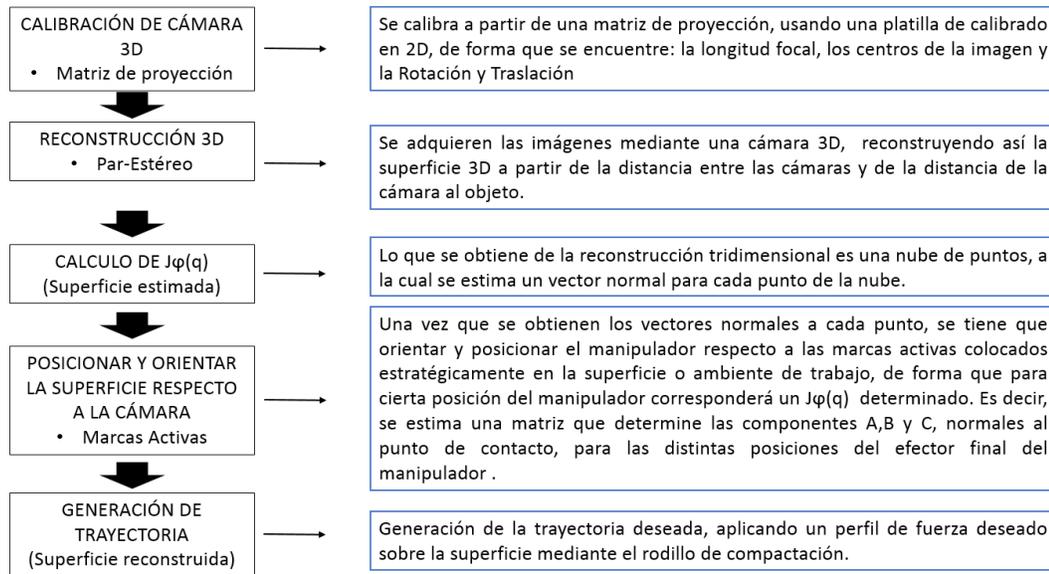


Figura 5.3: Metodología Propuesta.

5.3. Experimentos

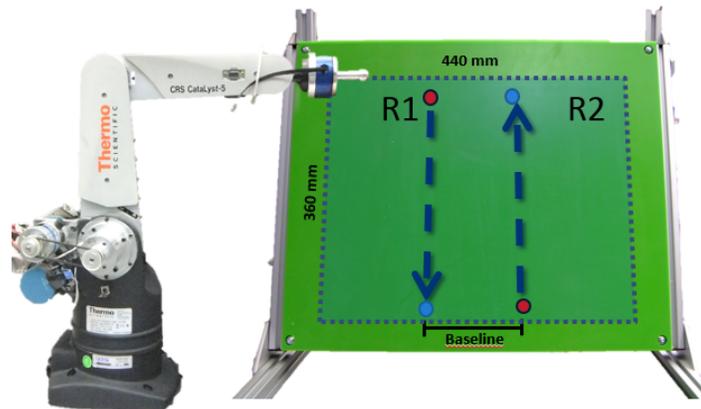
Como se estableció anteriormente, la técnica de aplicación de tiras de material compuesto implica conocer la superficie sobre la cual se aplica el material y al mismo tiempo se genera una fuerza de compactación para que la tira pueda adherirse a la superficie tratada, dichas tiras se aplican a una distancia específica una de la otra, dependiendo de las especificaciones establecidas. Por tanto se propone generar una trayectoria en forma de semicuarto sobre la superficie reconstruida, para así plantear una posible alternativa para la aplicación de tiras de material compuesto.

5.3.1. Condiciones Experimentales

- La trayectoria generada sobre el ambiente es un semicuarto con dimensiones de 10cm por lado.

- La trayectoria deseada se genera sobre la superficie inclinada y sobre la superficie vertical, sin embargo gracias a que los resultados obtenidos son similares, se presentan únicamente los resultados sobre la placa inclinada.
- El proceso de validación consiste en la medición del *baseline* existente entre las rectas laterales del semic cuadrado. El error del método propuesto es definido mediante la diferencia entre el B_d (*baseline* deseado) y el B_r (*baseline* real).
- Los parámetros de control usados coinciden con los planteados en el capítulo anterior .

La figura 5.4, plantea las condiciones experimentales propuestas y ejemplifica los segmentos de trayectoria que se toman en cuenta para el cálculo del error. La posición inicial del experimento se sitúa en $Z = 0.27m$, $Y = -0.05m$ y la final en $Z = 0.17m$, $Y = -0.05m$ para $R1$, mientras para $R2$ la posición inicial es $Z = 0.17m$, $Y = -0.15m$ y la final es $Z = 0.27m$, $Y = -0.15m$.



- Área de trabajo
- Posición Inicial
- Posición Final
- ➔ Dirección de Trayectoria

Figura 5.4: Propuesta Experimental.

5.3.2. Resultados

La figura 5.5 muestra la generación del círculo sobre la superficie reconstruida, con las mismas características que el experimento anterior, sin embargo, se observa que la trayectoria se mapea sobre la superficie a una inclinación diferente.

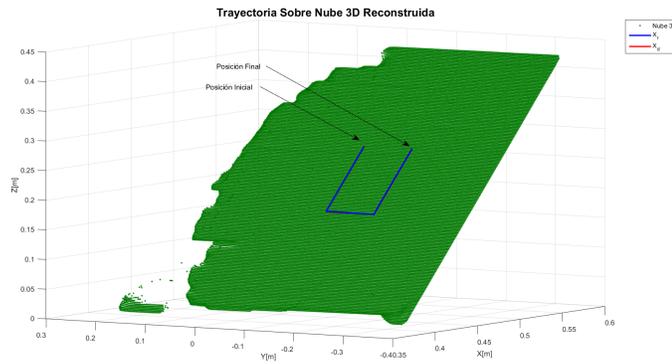


Figura 5.5: Trayectoria sobre Ambiente Reconstruido.

Las gráficas en el espacio Cartesiano muestran el desempeño del manipulador al generar la trayectoria deseada.

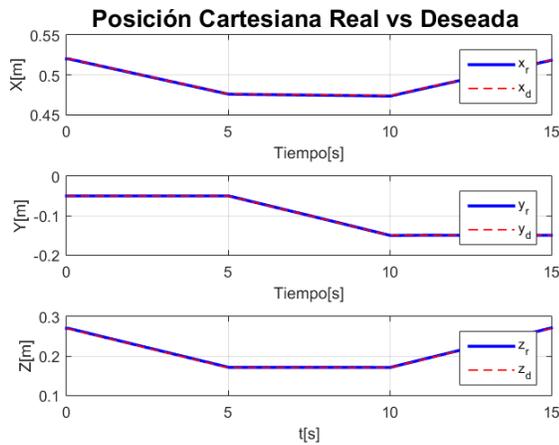


Figura 5.6: Trayectoria Espacio Cartesiano.

Por otro lado, el comportamiento de las articulaciones se observa en la figura 5.7.

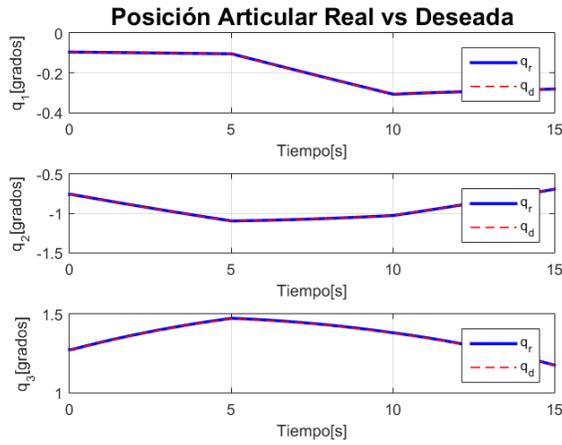


Figura 5.7: Trayectoria Espacio Articular.

Se observa que el comportamiento en fuerza es parecido al de los experimentos planteados en el capítulo anterior y es posible seguir el perfil de fuerza deseado. Debido a las esquinas del semicuartado, se afecta la suavidad con la que se genera el perfil deseado. En la práctica, del tiempo $t = 5$, hasta el tiempo $t = 10$ no hay aplicación de fuerza, pero sí desplazamiento. Sin embargo en las simulaciones hechas si se considera aplicación de fuerza a lo largo del tiempo.

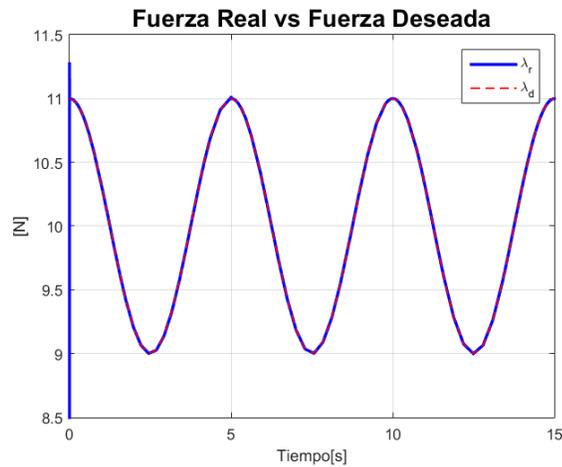


Figura 5.8: Perfil de fuerza aplicado

Se añade el análisis del baseline que se definió como $0.10m$, y la figura 5.9 muestra

que al inicio de la generación de la trayectoria ese error es mayor dado que la posición inicial del experimento no corresponde con la posición deseada de la trayectoria, sin embargo a lo largo del tiempo ese error disminuye y tiende a incrementar al final de la trayectoria. El error obtenido tiene que ser considerado dependiendo de las tolerancias permitidas en la aplicación de tiras de material compuesto.

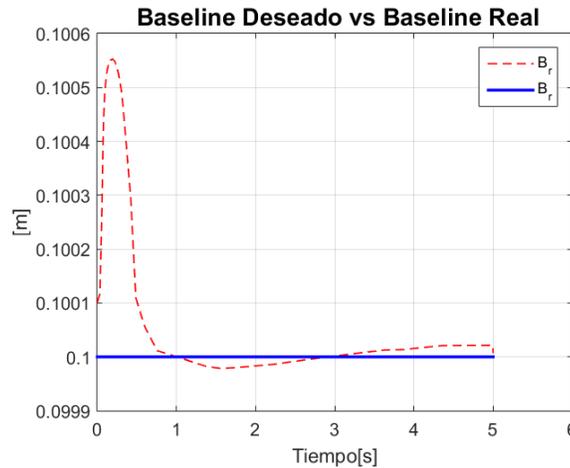


Figura 5.9: Baseline de Trayectoria Generada

5.4. Comentarios Generales

Puede observarse que el proceso propuesto es similar al planteado a lo largo de los capítulos anteriores, excepto que para los experimentos realizados en el capítulo 4, el patrón de calibración servía también como referencia para calibrar al manipulador. Por otro lado las palas presentan cierto nivel de curvatura, por ello se propone el uso de marcas activas que estén sobre la superficie y que permitan el correcto calibrado del manipulador.

Se concluye que el proceso puede ser modificado, dependiendo de las condiciones de trabajo, incluso cambiando el método de obtención de nube de puntos o la técnica usada para mapear una trayectoria sobre la superficie y aún así se estima que la metodología puede funcionar para los fines deseados.

Capítulo 6

Conclusiones del Proyecto y Trabajo Futuro

6.1. Conclusiones

La finalidad de este proyecto consistió en aproximar una función geométrica que describiera el contorno de una superficie, para así, implementar un esquema de control simultáneo basado en el principio de ortogonalización sobre una superficie incierta .

Primero se reconstruyó tridimensionalmente una superficie, haciendo uso de un par-estéreo de cámaras, para así extraer la geometría del objeto. Sin embargo, el problema principal era representar esa superficie reconstruida, de forma que el robot pudiera interpretar la información obtenida del sensor (cámaras) para poder implementar el esquema de control propuesto.

Por ello, se presentó una metodología en la que a cada punto de la nube 3D, representada en el espacio del manipulador, le correspondía un vector normal $J_\varphi(q)$, cuyas componentes A, B, C fueron estimadas para cualquier punto de contacto del efector final sobre la superficie. En consecuencia, era posible mapear una trayectoria sobre una superficie desconocida, previamente reconstruida.

Con base en los resultados mostrados, se determina que es posible generar una trayectoria deseada sobre un ambiente no estructurado haciendo uso de herramientas de visión por computadora e incluso que el presente trabajo es un precedente para la exploración de su uso en manipuladores que hacen aplican esquemas de control de fuerza y posición a nivel industrial.

6.2. Trabajo Futuro

Se proponen los siguientes puntos:

- Experimentar con los diversos parámetros que afectan el proceso de calibración de cámaras, para definir si el proceso de reconstrucción 3D es mejorado de acuerdo a la variación de los distintos parámetros.
- Definir otros métodos de reconstrucción 3D, tal como los sensores de tiempo de vuelo, para determinar vectores normales y definir su nivel de afectación sobre el mapeo de trayectorias.
- Generar un algoritmo capaz de garantizar la estabilidad del control ortogonal sin la restricción inicial del contacto sobre el ambiente, tal como se propone en el presente trabajo.
- Analizar los resultados que se generen con diversos interpoladores, para la generación de los vectores normales de la nube de puntos y así definir si existe mejora sobre el seguimiento de trayectorias.
- Usar más de tres grados de libertad del manipulador, en conjunto con otro método de obtención de nube de puntos 3D para así, generar trayectorias sobre ambientes con curvas complejas.

Bibliografía

- [1] Aplicación de un algoritmo de cálculo de disparidad para la estimación de profundidades usando cámaras estéreo. *Científica*, 14(2):67–73, 2010.
- [2] Diego Aracena Pizarro, Pedro Campos, y Luis Tozzi. Comparación de técnicas de calibración de cámaras digitales. *Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Tarapacá*, 13:57 – 67, 2005. ISSN 0718-1337.
- [3] Suguru Arimoto, Tomohide Naniwa, y Takashi Tsubouchi. *Principle of orthogonalization for hybrid control of robot manipulators*. Elsevier, Amsterdam, NL, 1993.
- [4] Asociación Mexicana de Energía Eólica. <http://www.amdee.org/>.
- [5] K. Capek y D. Wyllie. *R.U.R (Rossum's Universal Robots)*. Echo Library, 2010. ISBN 9781406867114.
- [6] P. Corke. *Robotics, Vision and Control: Fundamental Algorithms in MATLAB*. Springer Tracts in Advanced Robotics. Springer Berlin Heidelberg, 2011. ISBN 9783642201448.
- [7] F.R. Cortés. *Robótica: Control de Robots Manipuladores*. Marcombo, 2011. ISBN 9788426717450.
- [8] John J. Craig. *Introduction to Robotics: Mechanics and Control*. Addison-Wesley Longman Publishing Co., Inc., Boston, MA, USA, 2nd ed^{ón}., 1989. ISBN 0201095289.
- [9] García-Valdovinos Luis G. Teleoperadores bilaterales no lineales de impedancia convergente con ambiente semiestructurado.

-
- [10] Gujar Uday G. y Nagendra I.V. Construction of 3d solid objects from orthographic views. *Computers Graphics*, 13(4):505 – 521, 1989. ISSN 0097-8493.
- [11] Natividad Grandón-Pastén, Diego Aracena-Pizarro, y Clésio Luis Tozzi. Reconstrucción de objeto 3d a partir de imágenes calibradas. *Ingeniare. Revista chilena de ingeniería*, 15:158 – 168, 2007. ISSN 0718-3305.
- [12] K. Hosoda, K. Igarashi, y M. Asada. Adaptive hybrid visual servoing/force control in unknown environment. En *Intelligent Robots and Systems '96, IROS 96, Proceedings of the 1996 IEEE/RSJ International Conference on*, tomo 3, págs. 1097–1103 vol.3. 1996.
- [13] José G. Hoyos-Gutiérrez, Jaiber E. Cardona-Aristizábal, Luís M. Capacho-Valbuena, y Luis F. Orozco. Técnicas de calibración de cámaras para visión estéreo y reconstrucción. 2010.
- [14] Reza N. Jazar. *Theory of Applied Robotics: Kinematics, Dynamics, and Control*. Springer Publishing Company, Incorporated, 2010. ISBN 9781441917492.
- [15] Bojan Jerbić, Filip Šuligoj, Marko Švaco, y Bojan Šekoranja. Robot assisted 3d point cloud object registration. *Procedia Engineering*, 100:847 – 852, 2015. ISSN 1877-7058.
- [16] Xiao Jianxiong. 3d reconstruction is not just a low-level task: retrospect and survey. 2012.
- [17] Antonio Leite, Fernando Lizarralde, y Liu Hsu. Hybrid adaptive vision-force control for robot manipulators interacting with unknown surfaces. *International Journal of Robotics Research archive*, 28(7):911–926, 2009.
- [18] Frank L Lewis, Darren M Dawson, y Chaouki T Abdallah. *Robot manipulator control: theory and practice*. CRC Press, 2003.
- [19] Luis G García- Valdovinos. *Revisión del Estado del Arte y de la Técnica de Sistemas Automatizados para el Acomodo de Fibras de Material Compuesto*.
- [20] George Marsh. Automatic aerospace composites production with fibre placement. *Reinforced Plastics (Reinforc Plast)*, 55(3):32–37, 2011.

-
- [21] G.P. Martinsanz y J.M. de la Cruz García. *Visión por computador: imágenes digitales y aplicaciones*. Ra-Ma, 2001. ISBN 9788478974726.
- [22] Carlos M. Mateo, Pablo Gil, y Fernando Torres. 3d visual data-driven spatio-temporal deformations for non-rigid object grasping using robot hands. *Sensors*, 16(5):640, 2016. ISSN 1424-8220.
- [23] Vicente Parra-Vega y Emmanuel Dean-Leon. Orthogonalization principle for dynamic visual servoing of constrained robot manipulators. En Sadao Kawamura y Mikhail Svinin, eds., *Advances in Robot Control*, págs. 83–105. 2006.
- [24] M. Raibert y J. Craig. Hybrid position/force control of manipulators. *Trans. ASME J. Dyn Sys., Meas. Control*, 102:126–133, 1981.
- [25] Carlos Ricolfe-Viala y Antonio J. Sánchez-Salmerón. Procedimiento completo para el calibrado de cámaras utilizando una plantilla plana. *Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial RIAI*, 5(1):93 – 101, 2008. ISSN 1697-7912.
- [26] A. Schneider y Guenther R. Force control for robot manipulators interacting whit unknown surfaces. *ABCM Symposium series in Mechatronics*, 3:308–315, 1984.
- [27] J. Shen, J. Jin, y N. Gans. A multi-view camera-projector system for object detection and robot-human feedback. En *Robotics and Automation (ICRA), 2013 IEEE International Conference on*, págs. 3382–3388. 2013. ISSN 1050-4729.
- [28] M.W. Spong, S. Hutchinson, y M. Vidyasagar. *Robot Modeling and Control*. Wiley, 2005. ISBN 9780471649908.
- [29] Richard Szeliski. *Computer Vision: Algorithms and Applications*. Springer-Verlag New York, Inc., New York, NY, USA, 1st ed^{ón}., 2010. ISBN 1848829345, 9781848829343.
- [30] H. I. Torres-Rodriguez, V. Parra-Vega, y F.J. Ruiz-Sanchez. Dynamic haptic training system for the operation of an excavator. En *Electrical and Electronics*

-
- Engineering, 2004. (ICEEE). 1st International Conference on*, págs. 350–355. 2004.
- [31] Emanuele Trucco y Alessandro Verri. *Introductory Techniques for 3-D Computer Vision*. Prentice Hall PTR, Upper Saddle River, NJ, USA, 1998. ISBN 0132611082.
- [32] A. Vandini, A. Salerno, C. J. Payne, y G. Z. Yang. Vision-based motion control of a flexible robot for surgical applications. En *2014 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, págs. 6205–6211. 2014. ISSN 1050-4729.
- [33] Arturo Velarde. Control simultáneo de fuerza y posición de un robot industrial.
- [34] Israel Vite. Reconstrucción tridimensional de objetos mediante técnicas evolutivas.
- [35] Woosoon Yim, Manoharan Selvarajan, y WilliamR. Wells. Sliding mode cooperative motion control of dual arm manipulators. *Artificial Life and Robotics*, 3(3):166–169, 1999.
- [36] J. Michasiow David Hauber Zachary August, G. Ostrander. Recent developments in automated fiber placement of thermoplastic composites. *Society for the Advancement of Material and Process Engineering*, 50(2):30–37, 2014.
- [37] Zhengyou Zhang. A flexible new technique for camera calibration. *IEEE Transactions on pattern analysis and machine intelligence*, 22(11):1330–1334, 2000.
- [38] Y. Zhao y C.C. Cheah. Vision-based neural network control for constrained robots with constraint uncertainty. *Control Theory Applications, IET*, 2(10):906–916, 2008.