



**Universidad Autónoma  
de San Luis Potosí**



Facultad de Ingeniería

Centro de Investigación y Estudios de Posgrado

Teleoperación Unilateral Usando Sensores de  
Posición Tridimensional

Tesis

Que para obtener el grado de  
Maestro en Ingeniería Mecánica  
Opción a Sistemas Mecánicos

Presenta:

Ing. Fernando Ramírez Cardona

Asesor:

Dr. Emilio Jorge González Galván

San Luis Potosí, S.L.P., Enero 2012





Universidad Autónoma  
de San Luis Potosí



Facultad de Ingeniería

Centro de Investigación y Estudios de Posgrado

# Teleoperación Unilateral Usando Sensores de Posición Tridimensional

Presenta:

---

Ing. Fernando Ramírez Cardona

Comité:

---

Dr. Emilio Jorge González Galván

---

Dr. Juan Antonio Cárdenas Galindo

---

Dr. Dirk Frederik De Lange

---

Dr. Gilberto Mejía Rodríguez



# Agradecimientos

Dos años han pasado ya, recuerdo que al iniciar este proyecto sentía un poco de miedo de no poder culminarlo o de no poder ser capaz de poder adquirir el conocimiento necesario para poder realizar los retos que se presentarían. Con el tiempo fui saboreando la intensidad de trabajo que éste me demandaba, y ello me llevó a poder tener la confianza necesaria para poder estar dentro del nuevo juego en el que ahora estaba presente. Sin embargo, no estuve del todo solo, durante el trayecto conocí y me relacioné con personas que afortunadamente me tendieron la mano de manera incondicional, los cuales me apoyaron no sólo académicamente, también me brindaron su amistad, llevando esto a tener un vínculo más allá de la escuela o de un laboratorio. Les agradezco a todas ellas por todo su apoyo, ya que de una manera u otra me ayudaron a culminar una etapa más en mi vida.

Agradezco a mis padres por haber creído en mí y haberme apoyado e impulsado a estudiar una licenciatura, de no ser así jamás me hubiera pasado por la mente haber continuado con este proyecto. Ustedes, que sin esperar nada a cambio, hicieron interminables sacrificios, pero les puedo asegurar que no fueron en vano, y espero que la felicidad que me genera la culminación de mi maestría sea satisfactoria también para ustedes, muchas gracias por todo.

A mi hija Ashley, que siempre tuvo la paciencia y nunca exigió nada, por comprender la situación que genera el estar dedicado a un estudio de posgrado. Gracias, dado que este logro también es para ti, ya que siempre fuiste la chispa que generó la inquietud de esta nueva etapa de mi vida.

A mis amigos Mota, Karina y Alberto (amigo!!!!) que me aguantaron durante el transcurso de esta maestría; por haber estado ahí cada día que se necesitaba para estudiar; por haber hecho que esto fuera divertido y por todas las veces que ustedes compartieron sus vidas más allá del aula. Me

---

llevo recuerdos muy gratos y satisfacciones que me han hecho crecer como persona.

A mi hermano Eduardo, por haber hecho posible el inicio de mis estudios, por tener la fe y la confianza en mí.

A mi hermana Gris, por todo el sacrificio y el apoyo brindado, por haber hecho posible el último capricho de volver a estudiar, de otra manera no hubiera podido haber tenido la experiencia de estos dos últimos años.

Agradezco también a César, por todo el conocimiento y todas las experiencias compartidas que me ayudaron mucho para la culminación de esta tesis. Por haberme pasado 80 gigas de puro metal, el cual hizo que el último año no fuese pesado. A mis compañeros del laboratorio de robótica,

Gaby, Lina, Parga, Isela, Marco. Aprendí mucho con sus investigaciones y experiencias compartidas, cada exposición en los seminarios me incitaba a querer más, a conocer más.

Al Dr. Emilio por haberme aceptado y haber tenido la confianza en realizar este proyecto de investigación, a su paciencia durante todo este tiempo, a sus consejos en cada seminario y por darme la libertad de decisión durante este trabajo.

A mi esposa Alba, por haber dejado cumplir mis sueños sin reprocharme nada, por impulsarme y alentarme durante estos dos años que duró mi estudio.

# Resumen

El presente trabajo de tesis aborda el problema de teleoperación de un robot industrial bajo un esquema unilateral y la manipulabilidad del mismo, pensado para diversas aplicaciones en donde la interacción con el ambiente no requiera retroalimentación de fuerzas.

El desarrollo principal de este proyecto es el uso de sensores de posición tridimensional para emitir señales de control que, en un esquema de teleoperación normal, serían generadas por un robot maestro. Estos sensores están unidos a una herramienta, de tal manera que la operación del robot esclavo sea intuitiva en tareas con el entorno.

El proyecto plantea exclusivamente la teleoperación unilateral, esto es, las señales obtenidas de los sensores magnéticos son enviadas al robot esclavo sin que exista reflexión al operador de las fuerzas percibidas en el entorno remoto.

La segunda etapa consiste en la integración de condiciones cinemáticas óptimas para el robot esclavo, es decir, establecer la máxima manipulabilidad del robot para poder ejecutar la maniobra dictada por el robot maestro, y un ajuste de señales generadas de los sensores tridimensionales que asegure una operación suave y segura del robot esclavo.

---



# Índice

<b>Introducción</b>	<b>xv</b>
<b>1 Fundamentos de la Teleoperación</b>	<b>1</b>
1.1 Aplicaciones de la Teleoperación . . . . .	2
1.1.1 Aplicaciones Médicas . . . . .	2
1.1.2 Aplicaciones Militares . . . . .	2
1.1.3 Aplicaciones Marítimas . . . . .	3
1.1.4 Aplicaciones Nucleares . . . . .	3
1.1.5 Aplicaciones Espaciales . . . . .	3
1.1.6 Otras Aplicaciones . . . . .	4
1.2 Teleoperación . . . . .	5
1.2.1 Esquema de Teleoperación Unilateral . . . . .	5
1.3 Índices de Desempeño Cinemático . . . . .	7
1.4 Sensores Tridimensionales . . . . .	13
1.4.1 Adquisición de datos . . . . .	14
1.4.2 Caracterización de los sensores . . . . .	15
1.5 Conclusiones preliminares . . . . .	17
<b>2 Asimetría Cinemática en la Teleoperación</b>	<b>19</b>
2.1 Enlace maestro . . . . .	20
2.1.1 Enlace maestro . . . . .	23
2.2 Asimetría entre enlaces maestro-esclavo . . . . .	25
2.2.1 Asimetría cinemática existente . . . . .	26
2.3 Plano de trabajo . . . . .	28
2.3.1 Matrices de calibración . . . . .	29
2.3.2 Algoritmo de calibración . . . . .	32
2.4 Pruebas preliminares . . . . .	33
2.4.1 Plataforma experimental . . . . .	33

2.5	Conclusiones preliminares . . . . .	38
<b>3</b>	<b>Manipulabilidad del Robot Industrial</b>	<b>39</b>
3.1	Modelo directo del robot industrial . . . . .	39
3.1.1	Modelo directo mediante transformaciones homogéneas	40
3.1.2	Modelo directo del robot industrial Fanuc M16iB 20T .	41
3.2	Modelo inverso del robot industrial . . . . .	42
3.2.1	Cinemática inversa del robot industrial Fanuc M-16iB 20T . . . . .	44
3.2.2	Desacoplamiento cinemático . . . . .	44
3.3	Manipulabilidad . . . . .	45
3.3.1	Manipulabilidad del robot esclavo . . . . .	47
3.3.2	Matriz Jacobiana . . . . .	49
3.4	Pruebas preliminares . . . . .	50
3.4.1	Comunicación con el robot industrial . . . . .	52
3.5	Conclusiones preliminares . . . . .	56
<b>4</b>	<b>Resultados Experimentales</b>	<b>59</b>
4.1	Retardo de comunicación . . . . .	59
4.1.1	Sincronización Maestro-Esclavo . . . . .	59
4.1.2	Retraso de tiempo en la comunicación . . . . .	60
4.2	Optimización de la manipulabilidad . . . . .	62
4.2.1	Implementación de algoritmo de optimización . . . . .	63
4.3	Ponderación de funciones . . . . .	65
4.4	Sistema de teleoperación . . . . .	71
4.4.1	Variabilidad de altura . . . . .	72
4.4.2	Variabilidad estática . . . . .	74
4.4.3	Eficacia del dispositivo maestro . . . . .	77
	<b>Conclusiones y Recomendaciones</b>	<b>83</b>
	<b>Apéndice</b>	<b>87</b>
<b>A</b>	<b>Sistema comercial trakStar</b>	<b>89</b>
A.1	Especificaciones del sistema trakStar . . . . .	89
<b>B</b>	<b>Modelado cinemático del robot industrial Fanuc M-16iB 20T</b>	<b>91</b>
B.1	Modelo Directo . . . . .	92
B.2	Modelo Inverso . . . . .	97

## ÍNDICE

---

<b>C Rotaciones sobre un eje fijo</b>	<b>101</b>
C.1 Ángulos W,P,R . . . . .	101
<b>D Sección dorada</b>	<b>105</b>
<b>Bibliografía</b>	<b>109</b>



# Índice de Figuras

1.1	Componentes de un sistema de teleoperación . . . . .	6
1.2	Esquema de teleoperación unilateral . . . . .	6
1.3	Elipsoide de manipulabilidad . . . . .	9
1.4	Valores singulares de $JJ^T$ . . . . .	11
1.5	Sistema trakStar . . . . .	14
1.6	Trayectoria de un sensor en el plano YZ . . . . .	15
1.7	Orientación . . . . .	15
1.8	Trayectorias de dos sensores . . . . .	16
2.1	Musculo-esqueleto . . . . .	20
2.2	Estación de teleoperación . . . . .	21
2.3	Esquema de teleoperación controlado por visión . . . . .	21
2.4	Enlace maestro rígido . . . . .	22
2.5	Exo-esqueleto en brazo y dedo . . . . .	22
2.6	PDA o teléfono móvil como enlace maestro . . . . .	23
2.7	Partes que complementan el enlace maestro . . . . .	24
2.8	Dimensiones principales de la herramienta . . . . .	25
2.9	Asimetría entre robots . . . . .	26
2.10	Asimetría existente . . . . .	26
2.11	Planos de trabajo comunes . . . . .	27
2.12	Variación del sistema coordenado adjunto al transmisor . . . . .	28
2.13	Correspondencia de coordenadas . . . . .	28
2.14	Puntos contenidos en el plano . . . . .	29
2.15	Transformaciones que relacionan los sistemas coordenados . . . . .	30
2.16	Relación de sistemas coordenados . . . . .	32
2.17	Área de trabajo correspondiente al plano calibrado . . . . .	36
2.18	Comparación de trayectoria . . . . .	36
2.19	Simulación del robot Fanuc M16iB . . . . .	37

2.20	Comparativa de trayectorias entre sensores y simulación del esclavo . . . .	37
3.1	Sistema de referencia 0 situado en la base del Robot . . . . .	41
3.2	Mecanismo de dos grados de libertad . . . . .	47
3.3	Ángulo de giro $\alpha$ del sistema coordinado en la herramienta . . . . .	48
3.4	Sistema coordinado adjunto a la herramienta . . . . .	49
3.5	Manipulabilidad del robot industrial M16iB. . . . .	51
3.6	Configuración articular de las dos posiciones óptimas del robot industrial M16iB. . . . .	52
3.7	Interfaz gráfica que envía valores articulares . . . . .	53
3.8	Posiciones de máxima manipulabilidad del robot industrial M16iB. . . . .	55
4.1	Simulación de trayectorias . . . . .	61
4.2	Manipulabilidad y trayectoria del robot industrial M16iB. . . . .	64
4.3	Sistema coordinado en la punta del maestro . . . . .	65
4.4	Funciones ponderadas . . . . .	66
4.5	Configuración óptima . . . . .	67
4.6	Posiciones óptimas obtenidas por un barrido. . . . .	68
4.7	Posiciones óptimas con integración de función ponderada con $\sigma=0.5$ . . . .	69
4.8	Posiciones óptimas con integración de función ponderada con $\sigma=0.2$ . . . .	70
4.9	El espacio de trabajo en $z = -1400$ . . . . .	72
4.10	Respuesta del esclavo . . . . .	73
4.11	Diferentes orientaciones de la punta de la herramienta para la misma posición tridimensional . . . . .	75
4.12	Respuesta del esclavo para un punto fijo . . . . .	77
4.13	Simulación de trayectoria circular . . . . .	78
4.14	Seguimiento de trayectoria: círculo . . . . .	79
4.15	Seguimiento del esclavo ante el maestro . . . . .	81
B.1	Plataforma experimental, usada como robot esclavo . . . . .	91
B.2	Configuración del robot, cuando los valores articulares son cerca de cero . . . .	93
B.3	Sistemas de referencia en cada articulación . . . . .	94
B.4	Centro de la muñeca, localizado al quitar la distancia del plato $d$ . . . . .	97
B.5	Esquema de la ubicación de la muñeca del robot Fanuc M-16iB 20T . . . . .	98
C.1	Sistema inercial . . . . .	102
C.2	Ángulos de orientación: roll, pitch y yaw . . . . .	102
D.1	Relación de longitudes . . . . .	105

## ÍNDICE DE FIGURAS

---

D.2 Condiciones de sección dorada . . . . .	106
---	-----





# Índice de Tablas

1.1	Ruido y distorsión del equipo trakStar . . . . .	17
2.1	Requisitos de diseño . . . . .	24
2.2	Datos cuando el maestro no está calibrado . . . . .	34
2.3	Datos cuando el maestro está calibrado . . . . .	35
3.1	Datos articulares que representan los dos óptimos . . . . .	54
3.2	Secuencia de comunicación . . . . .	56
4.1	Tiempo de captura . . . . .	60
4.2	Retraso de comunicación para un solo punto . . . . .	61
4.3	Retraso de comunicación de dos trayectorias . . . . .	62
4.4	Variación del plano generado respecto al maestro con el esclavo . . . . .	74
4.5	Variabilidad para un solo punto . . . . .	76
4.6	Variabilidad del radio en el seguimiento de trayectoria . . . . .	80
4.7	Variación promedio del seguimiento de trayectoria . . . . .	81
B.1	Especificaciones técnicas del robot Fanuc M-16B 20T . . . . .	92



# Introducción

La teleoperación tiene un rol importante en la manipulación de objetos usando robots a distancia, sobre todo cuando los ambientes no son aptos para el humano, como aquellos donde se necesita, ya sea precisión en el trabajo realizado, ya sea desempeñar tareas por un experto a distancia; ejemplos de ello se han venido desarrollando en las áreas médica, aeroespacial, industrial, militar, etc., es por eso que se ha puesto énfasis en desarrollar o mejorar los sistemas de teleoperación.

Regularmente el esquema de teleoperación involucra un enlace entre un operador humano y un robot. Los robots teleoperados son sistemas móviles, no siempre autónomos, que son controlados por el usuario en una estación remota y, debido a su gran variedad, se usan en diversos campos. Para obtener una óptima teleoperación se usan herramientas como la visión e inteligencia artificial. Esta última se hace notar en los algoritmos implementados para seguir trayectorias más cortas de un punto a otro, evitar obstáculos, reaccionar ante estímulos, sistemas expertos, etc. La visión se puede notar en el procesamiento de imágenes provenientes de cámaras de video, las cuales permiten el control a distancia, así como la obtención de datos suficientes para decisiones automáticas. Tanto la visión como la inteligencia artificial simplifican las tareas del operador, sin embargo, desarrollar este tipo de sistemas de teleoperación conlleva el tener mecanismos complejos y costosos, y esto los convierte en una tecnología no asequible para variadas aplicaciones. Por otro lado, el ser un sistema de teleoperación indirecta hace que el entrenamiento requiera un esfuerzo mental mayor para el operador, lo que conlleva que la capacitación tenga un costo más elevado en comparación con un sistema de teleoperación directo.

Por otro lado, la demanda de tareas que requieren el uso de robots y más aún, de robots que permitan el uso de sistemas teleoperados donde la

interacción de éste con el entorno no sea directa con humanos, ya no es una situación poco frecuente; cada vez más es una condición funcional, para la cual, surge el problema de tener sistemas teleoperados óptimos, tanto para el operador como para las tareas por realizar.

## Motivación

La motivación de este proyecto consideró la necesidad de desarrollar un sistema de teleoperación unilateral con la finalidad de aportar una mejora en la teleoperación existente, eliminando al robot maestro a través de sensores de posición tridimensional. El impacto tecnológico que esta mejora supone es la optimización de la manipulabilidad del esclavo y la simplificación en la operación de éste, haciendo el proceso de teleoperación más intuitivo. Asimismo, esta investigación contribuye a la eliminación de costos de inversión del mecanismo maestro y a la disminución de tiempos en entrenamiento con mecanismos complejos, todo lo cual tendría una incidencia directa en la asequibilidad de esta tecnología.

Por otro lado, el hecho de que cada vez existan más adelantos tecnológicos en robots industriales, pone al alcance estos mecanismos que pueden ser usados como esclavos, ya que en ocasiones el sistema esclavo tiene que ser diseñado desde cero y para una tarea específica. Por esta razón, en esta investigación se considera implementar estos sistemas de teleoperación en robots diseñados para manufactura, puesto que proveen ventajas, como de poder tener un sin fin de herramientas para diferentes propósitos en las tareas por realizar, así como la seguridad de su buen funcionamiento, ya que en ocasiones la inversión es la misma o, en su debido caso, menor que el diseño de un robot con un solo propósito. Es así que, debido al interés de abordar sistemas de teleoperación, bajo un esquema de teleoperación unilateral y robots industriales como sistemas esclavos, surgieron los siguientes objetivos generales:

1. Sustituir el robot maestro por sensores magnéticos tridimensionales conectados directamente a una herramienta que permita un mejor control por el operador;
2. Desarrollar un sistema de teleoperación unilateral estable, en donde los sensores magnéticos envíen las señales requeridas para mover

al robot esclavo, en este caso un robot industrial, sin que exista retroalimentación hacia el operador de las fuerzas percibidas en el entorno remoto;

3. Determinar la condición de la facilidad y sujeción de la herramienta del operador, en donde se colocan los sensores magnéticos tridimensionales;
4. Maximizar la máxima condición de manipulabilidad del robot esclavo, así como la operación segura y suave.

## Estructura de la tesis

El presente proyecto está escrito en 4 capítulos, mientras que la última sección presenta las conclusiones de los mismos.

El capítulo 1, “*Fundamentos de la teleoperación*”, presenta los antecedentes y aplicaciones más importantes sobre este tema, así como el auge surgido en algunas otras ramas. Asimismo, trata el esquema de teleoperación en que este proyecto se realizará, así como el tipo de arquitectura que constituye el robot industrial que será usado como robot esclavo. Además, aborda algunas teorías de manipulabilidad desarrolladas por algunos investigadores, las cuales darán sustento al algoritmo desarrollado para obtener la máxima manipulabilidad del robot usado en este proyecto. También se aborda la caracterización del sistema que será usado como parte del sistema maestro, así como resultados relevantes a considerar a lo largo del proyecto.

El capítulo 2, “*Asimetría cinemática en la teleoperación*”, aborda el problema existente de asimetría cinemática entre el sistema maestro y el robot industrial usado como sistema esclavo. De la misma manera, describe los componentes que forman al sistema maestro, y la solución propuesta a la asimetría presente, así como de la plataforma experimental. Igualmente, reporta algunos resultados preliminares de la solución propuesta y la interfaz que será usada a lo largo del proyecto.

El capítulo 3, “*Manipulabilidad del robot industrial*”, ahonda en el modelo directo e inverso necesario para implementar el control cinemático que manipulará al robot industrial usado como esclavo. Además, aborda el concepto de manipulabilidad y reporta resultados preliminares de la

manipulabilidad del robot industrial usado en este proyecto, así como el tipo de comunicación realizada entre el sistema maestro y el sistema esclavo.

El capítulo 4, “*Resultados experimentales*”, presenta la implementación del esquema unilateral propuesto entre el enlace maestro y esclavo. En la misma línea, aborda el retraso de tiempo existente en la comunicación entre dichos sistemas, así como las pruebas más relevantes que validan el presente trabajo.

Por último, se mencionan las conclusiones que se generan al finalizar el presente trabajo. De igual manera, los nuevos problemas que surgen en el desarrollo del mismo.

Cabe mencionar que en el apéndice A se describen las características y especificaciones técnicas del equipo comercial trakStar. En el apéndice B se describe a detalle el modelo directo e inverso necesario para modelar el robot industrial usado en este proyecto. Finalmente, el apéndice C aborda a detalle los ángulos de orientación referentes a un sistema fijo denominados  $W, P, R$ , los cuales se usaron para modelar la orientación del sistema maestro y esclavo, así como para obtener la manipulabilidad del sistema esclavo.

# Capítulo 1

## Fundamentos de la Teleoperación

Muchas personas creen que la tecnología de teleoperación es reciente, y esto es debido a que en los últimos años se ha incrementado la atención por su desarrollo por parte de los investigadores. Esto debido a su gran utilidad y a que otros desarrollos tecnológicos han permitido que la teleoperación prospere. Sin embargo, esta tecnología no es reciente, data de muchos años atrás.

Antes del siglo XVI se comenzó a usar la teleoperación en la forma de pinzas para chimenea que removían las cenizas en el fuego, fustas, o cualquier otra extensión de los brazos que permitiera al teleoperador realizar tareas de forma segura. A principios del siglo XIX se presentan otras tecnologías rudimentarias de teleoperación para mover tierra, construcción o tareas relacionadas.

Alrededor de 1945, aparece el primer manipulador maestro-esclavo y fue desarrollado por Ray Goertz en Argonne National Laboratory, cerca de Chicago, U.S. Este era un pantógrafo mecánico, mecanismo utilizado para el manejo materiales radioactivos, ubicado dentro de una *hot cell*, que podía ser manipulado por un operador situado fuera de la celda.

No fue sino hasta 1954 cuando Goertz reemplazó directamente el accionamiento mecánico por servomecanismos eléctricos y presentó su primer manipulador esclavo-maestro por accionamiento eléctrico y servocontrol en ambos manipuladores.

## 1.1 Aplicaciones de la Teleoperación

En los sistemas teleoperados, las tareas de percepción con el entorno, así como la planificación y la manipulación, son realizadas por el humano; es decir, el humano, en este caso el operador, actúa en tiempo real cerrando un bucle de control de alto nivel.

Desde los primeros inicios de la teleoperación, la mayor parte de la investigación se había concentrado en la industria nuclear, con el paso de los años y conforme la tecnología avanzaba, la teleoperación fue emigrando hacia otros sectores conforme su aplicabilidad era demandada, especialmente en la industria de servicio.

### 1.1.1 Aplicaciones Médicas

El campo médico se ha ido transformando de manera sorprendente, conforme las exigencias médicas lo han pedido. Un desarrollo importante ha sido la telemedicina, ya que actualmente ésta puede interactuar con varias disciplinas afines, desde una cirugía de mínima invasión (MIS) hasta análisis epidemiológicos [1]. La telemedicina ha cambiado dramáticamente, permitiendo a los especialistas trabajar colaborativamente a través de grandes distancias [2].

### 1.1.2 Aplicaciones Militares

La historia bélica ha enseñado que el bando tecnológicamente más desarrollado es el que suele ganar. Ahora mismo, los países desarrollados invierten muchos recursos en la investigación militar, y a su vez esta área provee un gran campo de posibilidades para los dispositivos teleoperados. Uno de los principales intereses del ejército es el reconocimiento de situaciones peligrosas para el ser humano. La ventaja de telemanipular un robot militar es que, aparte de poder ser un multiplicador de fuerza, provee seguridad a distancia del ser humano, no entra en pánico, no siente emociones y salva vidas.

Conforme la tecnología de aplicación móvil se ha ido desarrollando, se ha sido capaz de teleoperar dispositivos capaces de proveer vigilancia, adquisición de objetivos militares, detección de enemigos, reconocimiento, etc.



### 1.1.3 Aplicaciones Marítimas

La necesidad del hombre por la exploración y observación de lo desconocido, lo ha llevado a querer adentrarse en las profundidades del océano. Esto lo ha logrado a través de dispositivos teleoperados denominados por sus siglas en inglés ROV (vehículos remotamente operados). Estos vehículos han tomado importancia debido a su gran utilidad y aplicación. Los ROVs son usados para muchos propósitos que incluyen la observación y exploración bajo el agua, la exploración de la construcción del fondo marino, proyectos bajo el agua, mantenimiento de proyectos submarinos y subacuáticos, inspección y limpieza de cascos de barcos, etc.

Hay tres categorías básicas de ROVs: Observación, trabajo y uso especial [3]. Un ejemplo de los primeros ROVs fue el CURV de la naval de U.S., que logró extraer una bomba atómica perdida frente a la costa de Palomares, España en 1966, con una profundidad de 2850 pies (869 metros)[4].

### 1.1.4 Aplicaciones Nucleares

Es una industria donde podrían suponerse los inicios de la teleoperación. La utilidad de la teleoperación se presenta en el movimiento de materiales y desechos radioactivos, combustibles, mantenimiento de instalaciones, experimentación con sustancias tóxicas, movimiento de reactores, desmantelamiento de instalaciones, etc. El uso de esta tecnología salvaguarda la vida del humano, que de otra forma tendría que utilizar trajes incómodos para maniobrar o, de representar un gran riesgo, le sería imposible actuar en estos ambientes.

### 1.1.5 Aplicaciones Espaciales

La inquietud del ser humano por responder si se encuentra solo en el universo, ha labrado un campo magnífico para la teleoperación.

Desde que el hombre puso un pie en la luna ha tratado de facilitar cada vez más las tareas y reducir el riesgo de los astronautas dentro de ambientes hostiles, como pueden ser el espacio o la atmósfera de algún planeta que se quiera explorar. Un ejemplo de ello se dio en la NASA que, con el fin de reducir costos, mejorar la seguridad y el tiempo de las misiones, en 1991 invirtió alrededor de 160 millones de dólares en el desarrollo del programa

de servicios de telerobótica por sus siglas en inglés (FTS), para la estación espacial “Freedom” [5].

Otro de los problemas que se tienen que enfrentar, además de la hostilidad del ambiente, son los problemas de la teleoperación continua de robots en órbita y los teleoperadores en tierra, los cuales son provocados por el retraso en la transmisión de la señal impuesta por los límites del procesamiento de las computadoras en la estación de transmisión y en la estación de transmisión satelital. Un ejemplo de ello es el robot ETS-7, en donde el tiempo de retraso es normalmente entre 5-7 segundos [6].

Dentro las aplicaciones de la teleoperación espacial se encuentran el mantenimiento a estaciones, mantenimiento y operación de satélites, exploración y experimentación.

### 1.1.6 Otras Aplicaciones

Dentro de los servicios industriales, la teleoperación también ha tomado un papel importante, sobre todo donde se requiere seguridad de los operadores, como en la construcción, minería, intervención en desastres naturales [7], industria química y rescate. También se han considerado aplicaciones en cortadoras de vegetación, mayal, excavadoras, detectores de área local[8], etc. En la industria metal-mecánica también se hace presente la teleoperación, en el manejo de objetos pesados, de ácidos y sustancias corrosivas que puedan poner en peligro al operador.

Por otro lado, en la industria de servicios, la teleoperación ha tomado un papel importante debido a que el mantenimiento y cableado de líneas de alta tensión pone en riesgo a los trabajadores por la naturaleza del ambiente; por ello se han desarrollado sistemas que permitan hacer estas tareas desde cabinas en tierra, ya que las primeras generaciones de estos sistemas de mantenimiento se hacían desde el aire[11][12].

En la microfabricación ha llegado también el interés por usar teledispositivos, ya que es difícil medir la precisión y tolerancia, y un robot teleoperado es fácil que logre el objetivo. Derivado de esto, los productos finales se llegan a usar en telemicrocirugía donde remotamente se hace una operación usando un microscopio estéreo y herramientas de cirugía microscópicas.

Otro tipo de manufactura avanzada que está haciendo uso de esta tecnología es la nanofabricación; en ella se usan robots nanomanipuladores teleoperados continuamente. Los robots nanomanipuladores son robots

con dimensiones de algunas pulgadas cúbicas, los cuales pueden manipular diferentes microobjetos con una precisión de algunos nanómetros. Es conocido que la teleoperación continua tiene ciertas desventajas como el retraso de tiempo, por ello se han desarrollado nuevos métodos de teleprogramación y nuevos modelos de control, basados en supervisión para aplicarlos en la teleoperación de nanodispositivos[9].

### 1.2 Teleoperación

Un sistema de teleoperación generalmente se compone de un operador, un dispositivo teleoperado, sensores, canal de comunicación e interfaz. También se compone de una estación de teleoperación, la cual permite controlar al esclavo por medio de un canal de comunicación (ver figura 1.1). La estación de teleoperación puede estar compuesta por computadora, dispositivos de entrada y salida que permiten controlar a distancia. Los dispositivos de entrada pueden ser teclados, mecanismos gobernados por el operador (enlace maestro), joystick, etc. Los dispositivos de salida pueden ser monitores, bocinas, etc. El esclavo es el dispositivo que es operado a distancia, puede ser un robot móvil, vehículo, manipulador, etc. La interfaz para la teleoperación maneja información en tiempo real; esta información se procesa, con ciertas restricciones de tiempo, para poder tomar acciones de control. Normalmente existe un lazo de retroalimentación que permite el desempeño de los robots de manera lineal y que, empleando algoritmos de control, realice las tareas con un grado alto de telepresencia, que permita al operador hacer las tareas con tal destreza como si él las manipulara directamente en el entorno. La información es recolectada por sensores que se encuentran localizados en los dispositivos móviles. Estos sensores se encargan de detectar magnitudes físicas, las cuales pueden ser de proximidad, inclinación o posición [13]. Esta interfaz debe estar diseñada de tal forma que sea presentada de manera sencilla, para que al operador se le facilite la propiocepción del esclavo.

#### 1.2.1 Esquema de Teleoperación Unilateral

El sistema de teleoperación consiste en un robot esclavo conectado de tal forma que, por medio de un robot maestro, es controlado en un entorno remoto. Se dice que, cuando la información que fluye desde el robot maestro hacia el robot esclavo es principalmente posición y velocidad, se describe

## 1.2. TELEOPERACIÓN

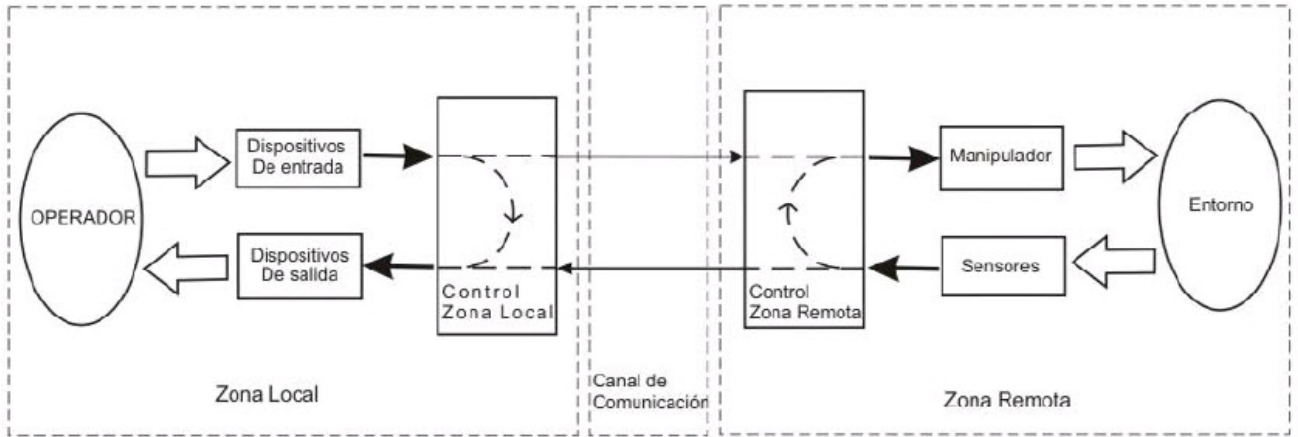


Figura 1.1: Componentes de un sistema de teleoperación

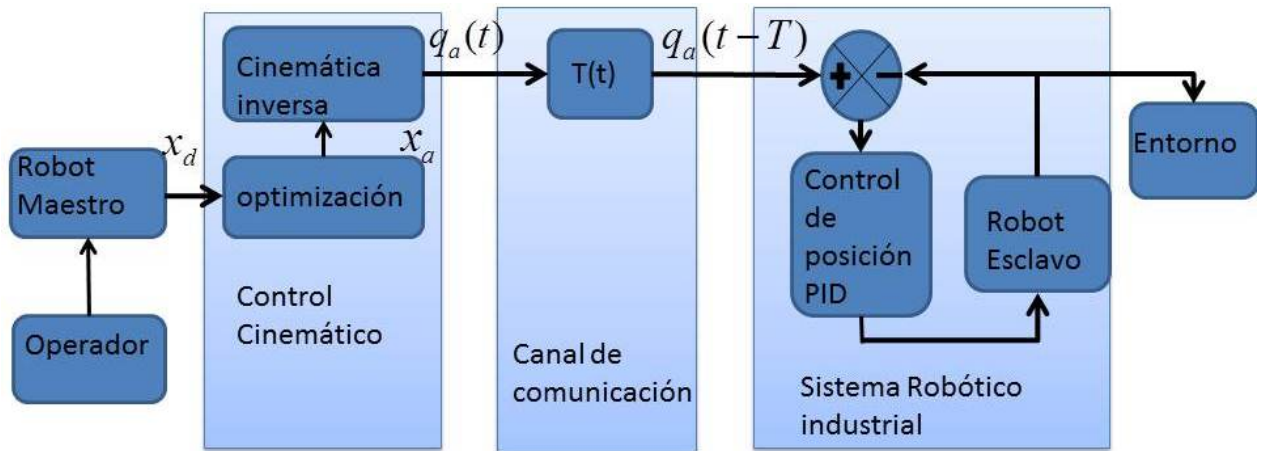


Figura 1.2: Esquema de teleoperación unilateral

a un sistema unilateral [14]. La figura 1.2 muestra el esquema unilateral usado en este proyecto, basado en un control cinemático. Los componentes del esquema unilateral son: operador (humano), robot maestro, canal de comunicación, control cinemático, robot esclavo y entorno. Este esquema de teleoperación unilateral no incluye retroalimentación de fuerza, aunque cabe destacar que en un esquema unilateral es posible tener retroalimentación directa de fuerzas de contacto mediante un sensor de fuerza, y el esquema continua permaneciendo unilateral.

El propósito es implementar este esquema en un robot industrial, debido a que el control del robot esclavo es de arquitectura cerrada<sup>1</sup>; es decir, solo se tiene acceso a velocidades y posición y no a las señales de accionamiento de los actuadores. Para dar solución a este sistema se plantea el uso del control cinemático basado en posición, con la finalidad de no alterar el control del sistema robótico, debido a que es muy costoso implementar adaptaciones a estos sistemas de control de arquitectura cerrada.

### 1.3 Índices de Desempeño Cinemático

El propósito de un manipulador es orientar y posicionar a una herramienta ubicada en el extremo, dentro de un espacio de trabajo, con movimientos controlados que le permitan realizar eficientemente la tarea deseada. Para evaluar cuantitativamente esta habilidad de los manipuladores, varios investigadores han desarrollado medidas adecuadas que permitan identificar configuraciones singulares, planificación de sus movimientos y diseño de estaciones de trabajo.

Existen configuraciones que no son favorables y originan un desempeño pobre del robot. Estas configuraciones se clasifican como configuraciones degeneradas, y producen baja precisión, imposibilidad para realizar localmente algunos movimientos, desgaste excesivo, etc.; es por eso que es necesario contar con un índice o un indicador adecuado que permita identificar estas configuraciones degeneradas para un buen desempeño cinemático.

Si se clasifica como degeneradas a las configuraciones que están cerca de la singularidad, Paul y Stevenson [15] usan el determinante de la matriz Jacobiana como índice para identificar la degeneración.

$$\psi = \det [J(\theta)] \quad (1.1)$$

Así, una configuración es degenerada si se verifica que:

$$\psi \leq 0.5 \quad (1.2)$$

Donde se puede notar que, cuando un robot trabaja cerca de la singularidad, trabajará con menos eficiencia y viceversa. Sin embargo, este estudio realizado no se generalizó, y se particularizó solo en la muñeca.

---

<sup>1</sup>Se entiende por arquitectura los parámetros que determinan la estructura del sistema

### 1.3. ÍNDICES DE DESEMPEÑO CINEMÁTICO

---

En [16],[17],[18] Yoshikawa se propone una medida cuantitativa que represente la habilidad de manipular un brazo robótico para posicionar y orientar la herramienta sostenida por el robot, obteniendo un buen diseño y control de robots manipuladores, así como una buena planificación de tareas. Esta medida de manipulabilidad es un concepto generalizado de la matriz Jacobiana. Si se considera un manipulador de  $n$  grados de libertad y sus valores articulares denotados por  $\theta_i$ , con  $i = 1, 2, \dots, n$ , además su posición y orientación del efector final esta dado por  $m$  variables denotado por  $r_j$  con  $j = 1, 2, \dots, m$  y ( $m < n$ ). La relación de  $\theta_i$  y  $r_j$  esta dada por  $r = f(\theta)$ .

Donde  $\theta$  es el vector de valores articulares,  $r$  es el vector de posición y orientación. Además, la velocidad del efector final  $v$  correspondiente a  $r$ , esta relacionada con la velocidad articular  $\dot{\theta}$  por:

$$v = J(\theta)\dot{\theta} \quad (1.3)$$

Donde  $v \in \mathbb{R}^m$  ( $m$  es la dimensión del espacio Euclidiano) y  $\dot{\theta} \in \mathbb{R}^n$  ( $n$  es la dimensión del espacio Euclidiano) y  $J(\theta) \in \mathbb{R}^{m \times n}$ . Donde  $J$  es la matriz Jacobiana.

Sea la descomposición singular de la matriz Jacobiana como:

$$J = U\Sigma V^T \quad (1.4)$$

Donde  $U \in \mathbb{R}^{m \times m}$  y  $V \in \mathbb{R}^{n \times n}$  son matrices ortogonales y

$$\Sigma = \left[ \begin{array}{cccc|c} \sigma_1 & \cdot & \cdot & 0 & 0 \\ \cdot & \sigma_2 & \cdot & \cdot & 0 \\ \cdot & \cdot & \cdot & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \sigma_m & 0 \end{array} \right] \in \mathbb{R}^{m \times n} \quad (1.5)$$

con

$$\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \dots \geq \sigma_m \geq 0 \quad (1.6)$$

Entonces la medida  $w$  puede expresarse como el producto de los valores singulares

$$w = \sigma_1 \sigma_2 \dots \geq \sigma_m \quad (1.7)$$

## CAPÍTULO 1. FUNDAMENTOS DE LA TELEOPERACIÓN

---

Donde  $\sigma_1, \dots, \sigma_m$  son los valores singulares de  $\Sigma$ .

Y si se restringen las velocidades articulares como  $\|\dot{\mathbf{q}}\| \leq 1$  y se considera a todas las velocidades articulares realizables tal que satisfagan la norma Euclidiana de  $\dot{\mathbf{q}}$ ,  $\|\dot{\mathbf{q}}\| = \sqrt{\dot{q}_1^2 + \dot{q}_2^2 + \dots + \dot{q}_n^2}$  es un elipsoide en el espacio euclidiano, llamado elipsoide de manipulabilidad, con ejes principales  $\sigma_1 u_1, \sigma_2 u_2, \dots, \sigma_m u_m$ , en donde, a lo largo de la dirección del eje mayor del elipsoide, la herramienta puede moverse a velocidades grandes, de otra manera, en la dirección del eje menor la misma puede moverse con velocidades bajas. Si el elipsoide es casi una esfera, es decir isotrópico, la herramienta puede moverse en todas direcciones uniformemente. La figura 1.3 muestra el elipsoide de manipulabilidad de forma isotrópica y se puede ver cómo los ejes son de la misma medida, por lo tanto su desplazamiento es uniforme.

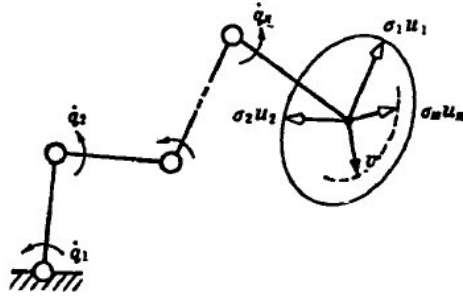


Figura 1.3: Elipsoide de manipulabilidad

El elipsoide de manipulabilidad puede ser expresado por:

$$\dot{\mathbf{x}}(JJ^T)^{-1}\dot{\mathbf{x}} \leq 1 \quad (1.8)$$

Esta medida también puede ser considerada como una distancia hacia la singularidad, es decir, cuando toma el mínimo valor de cero, por lo tanto este volumen es una medida de la eficacia de la transformación de velocidades articulares ( $\dot{\mathbf{q}}$ ) en velocidad del efector final ( $\dot{\mathbf{x}}$ ); y por consiguiente, para optimizar la eficacia de la transformación, se tiene que maximizar el volumen del elipsoide. Una de las medidas representativas, que se deriva del elipsoide de manipulabilidad, es el volumen del elipsoide y está dado por:

$$v_e = dw \quad (1.9)$$

### 1.3. ÍNDICES DE DESEMPEÑO CINEMÁTICO

---

donde  $w$  viene dado por 1.7 y  $d$  viene dado por la ecuación 1.10<sup>2</sup>

$$d = \left[ \begin{array}{c} \frac{(2\pi)^{\frac{m}{2}}}{[(2)(4)(6)\dots(m-2)(m)]^*} \\ \frac{(2\pi)^{\frac{m-1}{2}}}{[(1)(3)(5)\dots(m-2)(m)]^{**}} \end{array} \right] \quad (1.10)$$

Pero como  $d$  es constante, se puede considerar al volumen directamente proporcional a  $w$ . Entonces,  $w$  es una medida de manipulabilidad para una configuración ( $q$ ) de un manipulador y, en consecuencia,  $w$  puede usarse directamente como un índice de desempeño. Por otra parte, esta medida  $w$ , denominada índice de manipulabilidad, se define con las siguientes propiedades:

1. Un valor escalar  $w$  viene dado por:

$$w = \sqrt{\det [J(\theta)J^T(\theta)]} \quad (1.11)$$

Denominado como “índice de manipulabilidad” del estado  $\theta$  con respecto al vector de posición  $r$ .

2. Cuando  $m = n$  el índice de manipulabilidad se reduce a

$$w = |\det J(\theta)| \quad (1.12)$$

Bajo el mismo criterio de la ecuación 1.8, se puede definir un elipsoide para la fuerza dado por:

$$F^T J J^T F \leq 1 \quad (1.13)$$

Siendo sus ejes principales:

$$\left(\frac{1}{\sigma_1}\right)u_1, \left(\frac{1}{\sigma_2}\right)u_2, \dots, \left(\frac{1}{\sigma_m}\right)u_m \quad (1.14)$$

Y su volumen esta dado por [19]:

$$\frac{d}{w} \quad (1.15)$$

---

<sup>2\*</sup> Si  $m$  es par y <sup>\*\*</sup> si  $m$  es impar



Se puede notar que el volumen del elipsoide de fuerza es inversamente proporcional al volumen del elipsoide de manipulabilidad. En términos generales, la manipulabilidad se puede definir como la eficacia en la cual el robot transmite fuerza o velocidad al efector terminal.

Salisbury y Craig en [20] definen el número de condicionamiento como la relación del valor singular mayor de  $J$  con el valor singular menor. Es decir:

$$k(J) = \frac{\sigma_1}{\sigma_k} \quad (1.16)$$

$$\sigma_1 = \sqrt{\lambda_1} \quad (1.17)$$

$$\sigma_k = \sqrt{\lambda_k} \quad (1.18)$$

De donde  $\sigma_1, \sigma_k$  son los valores singulares máximo y mínimo del  $J$ , y  $\lambda_1, \lambda_k$  son los eigenvalores máximo y mínimo de  $JJ^T$ . La figura 1.4 esquematiza los valores máximo y mínimo de los valores singulares de  $JJ^T$  que muestra los valores singulares del elipsoide de manipulabilidad.

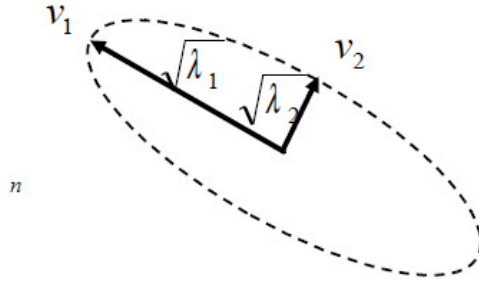


Figura 1.4: Valores singulares de  $JJ^T$

Se puede notar que  $k(J)$  en la ecuación 1.16 puede lograr valores de 1 a infinito, es decir, cuando los valores singulares son iguales el mínimo valor que puede tomar es 1, y esto logra que la matriz mapea un círculo unitario en otro círculo unitario, pero de diferente medida. Cuando sucede se denomina isotrópico.

Por otro lado, puede decirse que cuando el valor singular mínimo está cerca de cero, tal que éste desaparezca, el número de condicionamiento es infinito. Por lo tanto, el número de condición de  $J$  puede ser un indicador de la distorsión del círculo unitario en el espacio de variables articulares [21].

### 1.3. ÍNDICES DE DESEMPEÑO CINEMÁTICO

---

Angeles [21] define el número de condicionamiento cinemático de un manipulador como:

$$KCI = \frac{1}{k_m}(100\%) \quad (1.19)$$

De donde  $k_m$  es el mínimo valor considerado para el número de condición sobre todo el espacio de trabajo. Nótese que  $KCI$  está limitado tanto por el numerador como por el denominador. Los manipuladores con un  $KCI$  del 100% son identificados como isotrópicos, porque  $J$  tiene un número de condición mínimo y todos los valores singulares son idénticos y diferentes de cero. Si el  $KCI$  está acotado

$$0\% \leq KCI \leq 100\% \quad (1.20)$$

este índice de condicionamiento cinemático puede evaluar y comparar el desempeño cinemático con diferentes arquitecturas.

Bayle [22] propone una medida  $W_5$  que es extendida de la noción de excentricidad del elipse y viene dada por:

$$W_5 = \sqrt{1 - \frac{\sigma_{am}}{\sigma_{al}}} \quad (1.21)$$

Angeles y Gossellin, para obtener un comportamiento global, proponen un índice de condicionamiento global[23] derivado de 1.19, y viene dado como:

$$n = \frac{A}{B} \quad (1.22)$$

De donde:

$$\begin{aligned} A &= \int_w \frac{1}{k} dw \\ B &= \int_w dw \end{aligned} \quad (1.23)$$

Donde  $k$  es el número de condicionamiento de un punto particular de  $w$  del espacio de trabajo del manipulador. El denominador  $B$  es el volumen del espacio de trabajo y el recíproco de  $k$ , proporciona un comportamiento global

en sí mismo en todo el espacio de trabajo. Se puede notar que el concepto de un índice global definido en las ecuaciones 1.22 y 1.23 podría usarse con otros argumentos y no solo con el número de condicionamiento; es por eso que se puede optimizar globalmente desde un punto de vista cinemático o dinámico, ya que sería posible remplazar  $\frac{1}{k}$  por un índice local en la ecuación 1.23, en donde el objetivo es obtener propiedades globales del manipulador.

La mayoría de los índices mencionados anteriormente no toman en cuenta las tareas del manipulador en cuanto a la precisión. No incluyen información acerca de la dirección en que la herramienta del robot debe moverse. Nait-Chabane[22] propone una nueva medida que incluye tal información. Si la descomposición de valor singular dado en la ecuación 1.4 de la matriz Jacobiana y la relación geométrica de sus ejes principales, como se indica en la ecuación 1.6, se relacionan con la manipulabilidad, entonces se puede incluir la información de la dirección deseada precisamente conociendo la capacidad de manipulación de la ejecución de la tarea.

Sea la velocidad deseada  $\dot{X}_d$ , y se define un vector unitario

$$d = \frac{\dot{X}_d}{\|\dot{X}_d\|} \quad (1.24)$$

El cual establece la dirección impuesta para la tarea. Usando las propiedades del producto escalar y la representación de los radios del elipsoide, se define la nueva medida de manipulabilidad como la suma de los valores absolutos de los productos escalares en la dirección del vector de la tarea, por los vectores singulares correspondientes a sus valores singulares.

$$w_d = \sum_{i=1}^m |(d^T \cdot u_{ai}) \sigma_{ai}| \quad (1.25)$$

Por lo tanto, la medida es maximizada cuando la capacidad de manipulación en la dirección de la tarea impuesta es máxima o igual a cero, si no, no hay posibilidad de moverse a lo largo de esta dirección.

## 1.4 Sensores Tridimensionales

La plataforma experimental usada en este proyecto, como parte del enlace maestro (figura 1.5), es un sistema comercial denominado trakStar, fabricado por la compañía Ascension Technology Corporation. El sistema consiste de

cuatro sensores electromagnéticos, un transmisor y una unidad electrónica. Este sistema es un dispositivo electromagnético de alta precisión, diseñado para aplicaciones de corto alcance en el seguimiento de movimiento, usando tecnología de pulso, de donde se puede obtener la posición y orientación (seis grados de libertad) de múltiples sensores. Las características principales de este sistema electromagnético se muestran en el apéndice [A.1](#)



Figura 1.5: Sistema trakStar

### 1.4.1 Adquisición de datos

El equipo trakSTAR cuenta con una unidad electrónica, 4 sensores tridimensionales magnéticos y un transmisor de medio rango. Para obtener la adquisición de datos de la unidad electromagnética se desarrolló una interface simple, hecha en C++, la cual permite adquirir tres posiciones y tres ángulos de orientación  $W, P, R$  para una manipulación posterior, es decir, que estos datos serán enviados al robot esclavo como la posición y orientación deseada.

La figura [1.6](#) muestra la captura de una trayectoria de un sensor, la cual se hizo en el aire sin referencia alguna, tratando de simular un plano. Con el fin de validar lo que se está reproduciendo, se grafican los puntos capturados que generan la trayectoria deseada usando Matlab y se puede notar que la trayectoria se sigue sin distorsiones y aparentemente en un plano.

En la figura [1.7](#) se muestra la reproducción de la profundidad, por lo tanto se está capturando las tres posiciones y orientaciones tomando en cuenta las variaciones, por muy pequeñas que éstas sean. También puede notarse que se está capturando la orientación del sensor, esto a través de los ángulos de orientación  $W, P, R$  referentes al marco de referencia del transmisor.

Dentro de la adquisición de datos se ha podido realizar la captura de datos de dos sensores, la cual se muestra en [1.8](#) en la que se puede notar que

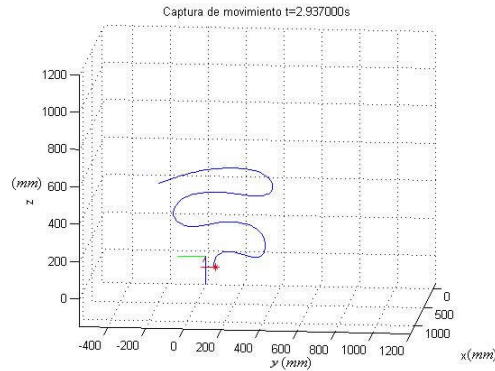


Figura 1.6: Trayectoria de un sensor en el plano YZ

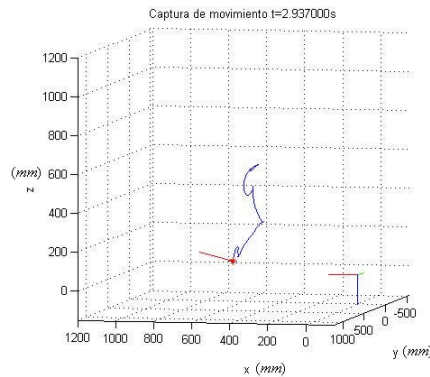


Figura 1.7: Orientación

las trayectorias de los sensores son reproducidas fielmente en el espacio y de manera independiente en cada sensor. También se muestra que para cada sensor, de manera independiente, se puede obtener la orientación al momento de generar cierta trayectoria.

### 1.4.2 Caracterización de los sensores

Como ya se ha descrito anteriormente, el sistema comercial trakStar es un sistema de alta precisión, pero puede estar sujeto a interferencia de cualquier equipo eléctrico que esté situado cerca del entorno de trabajo, en donde está instalado el sistema trakStar. Es decir, este equipo se ve afectado en su precisión cuando hay dispositivos magnéticos o eléctricos cerca del volumen

## 1.4. SENSORES TRIDIMENSIONALES

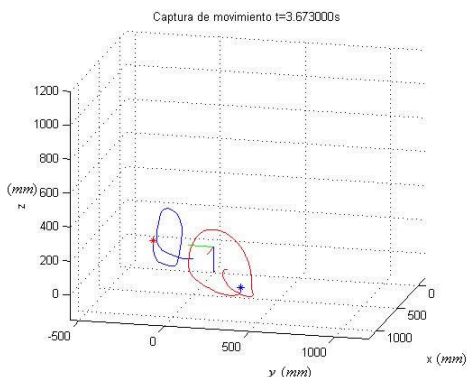


Figura 1.8: Trayectorias de dos sensores

(ver apéndice [A.1](#)) efectivo de captura de datos, de manera específica, del transmisor.

Hay dos factores muy importantes en que se afecta la precisión del equipo:

1. Excesivo ruido eléctrico
2. Distorsión magnética

Las fuentes causantes de ruido puede ser originadas por fuentes externas, como monitores de video, motores eléctricos, lámparas fluorescentes, transformadores, dispositivos que almacenen grandes cantidades de corriente que varíen con el tiempo, etc. Estas fuentes pueden alterar el campo magnético generado por el sistema trakStar y generar resultados inestables. A pesar de contar con filtros que proporcionan precisión, el dispositivo trakStar no debe trabajar cerca de estas fuentes o, de lo contrario, reducir el volumen de captura de trayectorias, es decir, trabajar más cerca del transmisor.

Otra causa que afecta el sistema trakStar es la distorsión magnética; este efecto está dado por trabajar cerca o sobre metales ferrosos, debido a sus propiedades magnéticas, conductividad eléctrica, etc., ya que afectan directamente el campo magnético generado por el sistema y aumentan el nivel de distorsión al momento de capturar trayectorias. A diferencia del ruido, esto repercute en la captura de los datos, dado que la distorsión es una desviación constante en los valores, por lo tanto, el tener una distorsión en los datos, representa que todos sus valores sean incorrectos.

Tabla 1.1: Ruido y distorsión del equipo trakStar

No. Datos	526		
<b>Sensor 1</b>	x ( <i>mm</i> )	y ( <i>mm</i> )	z ( <i>mm</i> )
promedio	246.4593750	286.2389699	-56.2570312
Media	246.4593750	286.1964844	-56.2570312
Desviación estándar	0.0000000	0.0877850	0.0000000
Máximo	246.4593750	286.4197266	-56.2570312
Mínimo	246.4593750	286.1964844	-56.2570312
No. Datos	526		
<b>Sensor 2</b>	x ( <i>mm</i> )	y ( <i>mm</i> )	z ( <i>mm</i> )
promedio	242.4410156	264.8670940	-55.8007854
Media	242.4410156	264.7652344	-55.8105469
Desviación estándar	0.0000000	0.1112993	0.0456932
Máximo	242.4410156	264.9884766	-55.5873047
Mínimo	242.4410156	264.7652344	-55.8105469

La tabla 1.1 muestra la caracterización de un par de sensores. Puede notarse que, mientras se trabaje con las mejores condiciones que eliminen la distorsión y el ruido, la precisión de los valores es suficientemente aceptable. Sin embargo, estos datos muestran una variación máxima de 100 milésimas en la coordenada  $y$  y 45 milésimas en la coordenada  $z$ . Lo que indica que en las condiciones en que se encuentra el ambiente en el que se va a estar trabajando, es imposible eliminar totalmente el ruido o la distorsión. Otro factor es que el laboratorio en el que se efectúan las pruebas está cerca de motores eléctricos, el cual hace difícil mantener una captura estable.

## 1.5 Conclusiones preliminares

En este capítulo se describió el esquema unilateral a lazo abierto que va a ser usado en este proyecto, así como la condición de control hacia el esclavo, debido a las condiciones de diseño del mismo. Por otro lado, dentro de los índices aquí revisados, se aprecia que todos tienen la misma finalidad, que es

la de optimizar el control o el diseño del robot.

El objetivo de revisar algunos índices es para poder seleccionar un indicador adecuado que ayude a optimizar la manipulabilidad del esclavo al momento de generar una trayectoria, permitiendo identificar las posiciones degeneradas, es decir, la singularidad.

Dentro de los índices se puede favorecer al índice de manipulabilidad propuesto por Yoshikawa, debido a que este indicador evalúa este parámetro desde un punto de vista global. Esta característica es importante debido a que, en el caso de tareas en direcciones arbitrarias en el que la posición y orientación están definidas aleatoriamente, se puede estar evaluando de manera global y no pensar en indicadores que proporcionen una dirección o una fuerza específica.

Además, se ha desarrollado una interfaz simple para la adquisición de datos de la unidad. Ésta se estará modificando de acuerdo a las necesidades posteriores para el esquema de teleoperación.

Asimismo, se describió la forma en que se adquieren los datos, obteniendo la información sobre posición y orientación necesaria para enviar como datos deseados al robot esclavo.

También, se describieron las posibles causas del ambiente que afectarán la captura de los datos, así como la importancia de evitar el ruido y la distorsión.

De la misma forma, se mostró un análisis de ruido para el sistema de adquisición de datos en un ambiente en el que constantemente se va a estar trabajando, y en el que se muestra la variación que existe en la captura de datos y aunque éstos, hasta este momento, son aceptables, se puede pensar que este factor puede afectar el esquema de teleoperación.

Otro análisis bajo circunstancias de ausencia de ruido provocado por fuentes externas se hace en el capítulo 2.



## Capítulo 2

# Asimetría Cinemática en la Teleoperación

El pasar de los años y las necesidades sociales han desencadenado avances tecnológicos que superan a la imaginación humana. En el campo de la robótica, la teleoperación de robots no se ha quedado atrás. La necesidad del humano de trabajar en ambientes hostiles o en su defecto, la necesidad de trabajar a distancia, han propiciado el desarrollo de investigaciones en este campo.

En un esquema de teleoperación se involucra un enlace entre un operador humano y un robot. El enlace del operador se denomina enlace maestro, el cual permite enviar señales necesarias al robot esclavo. En este trabajo se pretende hacer del enlace maestro uno que sea intuitivo, y así eliminar mecanismos con configuraciones difíciles de manipular. Para cumplir el objetivo, se propone el desarrollo de una interfaz con un enlace unilateral entre un equipo de detectores de posición tridimensionales llamado trakStar y un robot industrial de 6 grados de libertad.

Por otro lado, en el presente trabajo se trata de resolver la asimetría cinemática existente entre el enlace maestro y el robot esclavo. También se desarrolló una herramienta en la cual se puedan montar múltiples sensores, de tal manera que le sea fácil de manipular al teleoperador.

## 2.1 Enlace maestro

En la actualidad se han realizado diversas investigaciones en el campo de la teleoperación, debido a su utilidad en ambientes no aptos para el humano y la necesidad de lograr la realización de tareas a distancia. Como ya se mencionó, se encuentran ejemplos en la medicina, milicia, en el área aeroespacial e industrial; es por eso que las investigaciones se orientan hacia mejorar o desarrollar los sistemas de teleoperación. En un esquema de teleoperación se involucra un enlace entre un operador humano y un robot. El enlace del operador se denomina enlace maestro, el cual permite enviar las señales necesarias al robot esclavo. Este enlace maestro puede llegar a ser muy complicado en su operación, por lo tanto, diversas investigaciones tratan de hacer este enlace de una manera intuitiva y de esta forma eliminar los mecanismos dependientes de una configuración. En la literatura especializada se han desarrollado trabajos afines con diversos robots, incluyendo robots industriales. Dentro de los trabajos podemos encontrar los siguientes: Bertram Unger y Ralph Hollis [24] proponen la teleoperación bilateral de un robot industrial PUMA 560 usando un dispositivo de levitación magnética como enlace maestro. Hongo y Yoshida [25] proponen el control bilateral de un robot usando un músculo-esqueleto como se muestra en la figura 2.1.

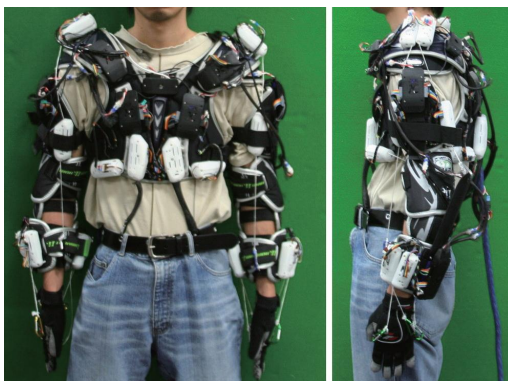


Figura 2.1: Musculo-esqueleto

Escolano, Antelis y Minguez [26] proponen la teleoperación de un robot vía internet; la figura 2.2 muestra cómo es accionado el sistema, usando señales del cerebro humano obtenidos por medio de un electroencefalograma. En este trabajo se reporta el uso de un sistema comercial “gTec EEG”

## CAPÍTULO 2. ASIMETRÍA CINEMÁTICA EN LA TELEOPERACIÓN

que consiste de una unidad EEG cap, 16 electrodos y un amplificador “gUSBamp”.

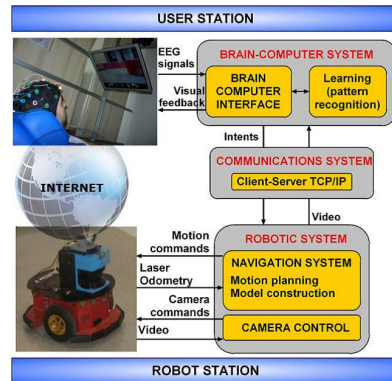


Figura 2.2: Estación de teleoperación

En [27] Batlle, Ridao y Salvi proponen la integración de un brazo robótico teleoperado de 3DoF, con sistemas de visión usando software compatible “CORBA”. El propósito del método propuesto, mostrado en la figura 2.3, es que usando un sistema de visión se procese la posición y orientación del brazo y el antebrazo del teleoperador, quien lo mueve libremente en un espacio de trabajo que dispone de dos cámaras fijas. La posición angular obtenida  $(\theta_1, \theta_2, \theta_3)$ , es usada para determinar la posición del manipulador remoto.

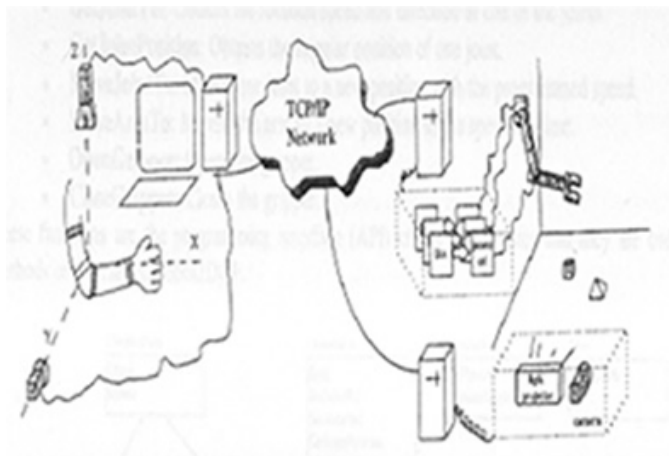


Figura 2.3: Esquema de teleoperación controlado por visión

Gupta, Mukhopadhyay, Messom y Demidenko [28] desarrollaron un control rígido para manipular intuitivamente un brazo robótico mediante un esquema bilateral maestro- esclavo. La figura 2.4 muestra el control rígido que se coloca en el brazo del operador, y así siente las fuerzas de retroalimentación del manipulador.



Figura 2.4: Enlace maestro rígido

En [29] Lee, Park, Kim y Chong-Won Lee diseñaron un exo-esqueleto simple, mostrado en la figura 2.5, de tipo brazo. Éste está basado en la cinemática del brazo humano. A su vez, proponen el mismo sistema para la mano. En este sistema bilateral se usan actuadores neumáticos para la retroalimentación de fuerzas. La posición y orientación se determinan a través de sensores tridimensionales para el enlace del brazo y para el enlace de la mano miden la posición con potenciómetros ubicados en cada junta.

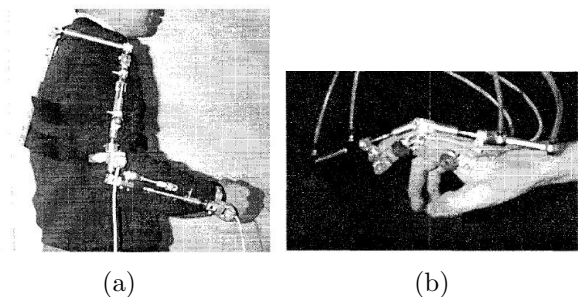


Figura 2.5: Exo-esqueleto en brazo y dedo

Sawasaki, Nakajima, Shiraishi,[30] proponen el desarrollo de aplicaciones para la construcción y el servicio de administración del hogar mostrado en

## CAPÍTULO 2. ASIMETRÍA CINEMÁTICA EN LA TELEOPERACIÓN

la figura 2.6. El objetivo de su investigación es el control de un robot por internet sustituyendo el enlace maestro por un PDA o un teléfono móvil. El desarrollo de cada sistema se enfoca en la autonomía basada en sensores para lograr la teleoperación a nivel de tareas

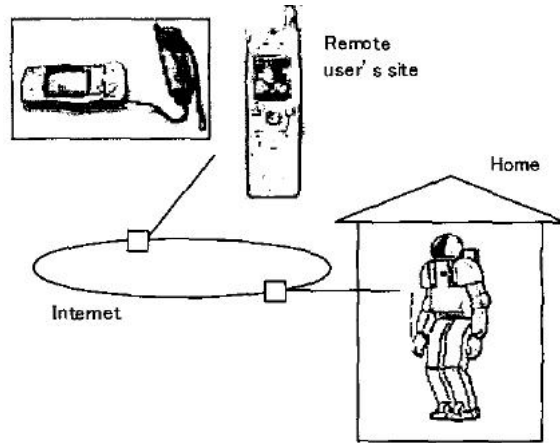


Figura 2.6: PDA o teléfono móvil como enlace maestro

### 2.1.1 Enlace maestro

Debido a la necesidad de completar el enlace maestro y a las características que éste demanda, se diseñó una herramienta de tal forma que cumpliera con los requisitos en el procedimiento de calibración y manipulabilidad de la misma. El requisito más importante para poder llevar a cabo el procedimiento de calibración es que la herramienta siempre debe permanecer normal a un plano de referencia. Por otro lado, la herramienta debe ser ergonómica, para lo cual se hizo un diseño en forma de pluma, que a su vez permite simular el efector final del robot utilizado en los experimentos y al mismo tiempo, permite tener la redundancia en el robot al suponer que se elimina un grado de libertad con este diseño. Es decir, debido a su forma, no importa el ángulo de giro referido al eje de simetría con el que toca algún punto del plano de referencia.

Para cumplir con lo indicado anteriormente, la herramienta está diseñada en dos partes, una para la parte de calibración y la restante para la teleoperación. La figura 2.7 muestra la pieza que sirve como base para montar los sensores y las dos puntas intercambiables que cumplen con las

tareas para las que fueron diseñadas. El diseño cuadrado permite tener la perpendicularidad entre el sensor y el plano a calibrar tanto horizontal como vertical. A su vez, la punta en forma de pluma, permite seguir trayectorias con mayor precisión.



Figura 2.7: Partes que complementan el enlace maestro

La tabla 2.1 muestra los requisitos de diseño considerados en el diseño de la herramienta.

Tabla 2.1: Requisitos de diseño

1	Contar con alojamiento para los sensores
2	Facilidad en la sujeción de sensores
3	El sensor no debe contener rotación con respecto a la herramienta
4	La sujeción del sensor debe mantener perpendicularidad entre las caras del sensor
5	La punta de la herramienta debe mantener perpendicularidad con respecto al plano calibrado
6	La herramienta debe permitir la facilidad de seguir trayectorias planeadas.
7	Mantener siempre las mismas dimensiones
8	El material no debe ser metal

Las dimensiones necesarias de la herramienta, para cumplir con los

## CAPÍTULO 2. ASIMETRÍA CINEMÁTICA EN LA TELEOPERACIÓN

critérios de calibración del plano, son mostradas en la figura 2.8. Puede notarse que, cumpliendo con el requisito 7 mostrado en la tabla 2.1, se hace independiente las piezas intercambiables en cuanto a las dimensiones totales necesarias.

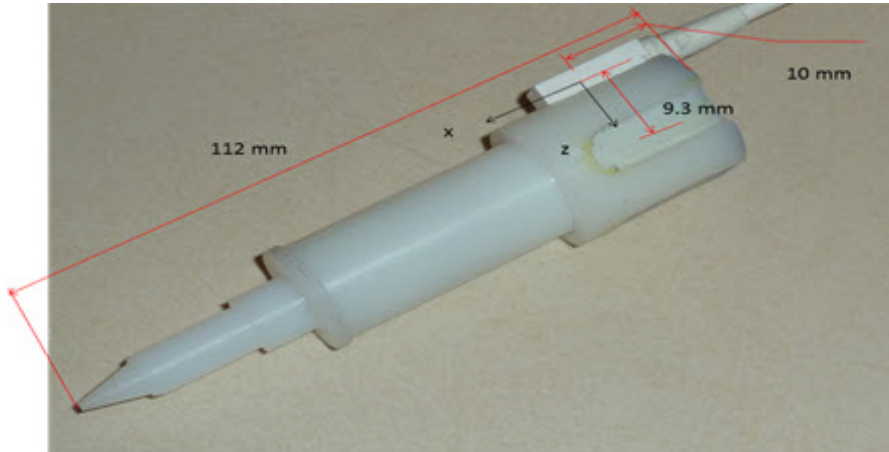


Figura 2.8: Dimensiones principales de la herramienta

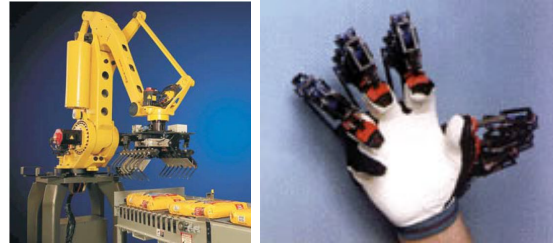
## 2.2 Asimetría entre enlaces maestro-esclavo

Uno de los principales problemas encontrados en un esquema de teleoperación, es la asimetría que se presenta entre los dispositivos usados como manipulador maestro y el robot esclavo. Dado que hay gran variedad de robots enfocados a diferentes tareas, es posible que tengan diversas configuraciones para proporcionar la solución a tareas específicas.

Es decir, a pesar de que hay robots multitareas, esto no quiere decir que sean universales y, aunado a otras configuraciones que se presentan en los manipuladores maestros, se hace complicado tener un esquema de teleoperación sencillo. La figura 2.9 muestra un ejemplo de un enlace maestro el cual, por su diseño, la configuración de movimiento es muy alejada a la configuración articular de movimiento del robot esclavo.

## 2.2. ASIMETRÍA ENTRE ENLACES MAESTRO-ESCLAVO

---



(a) Robot esclavo      (b) Robot maestro

Figura 2.9: Asimetría entre robots

### 2.2.1 Asimetría cinemática existente

La figura 2.10 muestra fotografías del robot esclavo y el maestro, en los que resulta evidente la asimetría cinemática indicada anteriormente. Inclusive, a pesar de contar con 6 DOF en el maestro y esclavo, la forma en que los dos dispositivos llegan a una posición y orientación dada son totalmente diferentes.



(a) Robot fanuc M16iB      (b) Enlace maestro

Figura 2.10: Asimetría existente

Mientras que el sensor depende de la herramienta en que es montado, el esclavo depende del tipo de juntas cinemáticas con la que fue diseñado. Por lo tanto, para mejorar la teleoperación, se propone calibrar un plano de trabajo, de tal manera que corresponda a un área de trabajo del robot industrial usado, como se ve en la figura 2.11. Es decir, tener un plano en el cual todos los puntos existentes en el mismo, detectados por los sensores magnéticos, correspondan a un plano en el cual el robot pueda



## CAPÍTULO 2. ASIMETRÍA CINEMÁTICA EN LA TELEOPERACIÓN

trabajar. Este último se puede obtener por medio de la cinemática directa caracterizada para el robot en uso. En la figura 2.11 (a) se muestra la hoja que representa al plano que contiene todas las coordenadas que los sensores registran y son correspondientes al plano imaginario en la figura 2.11 (b), que es perpendicular a la herramienta del robot.

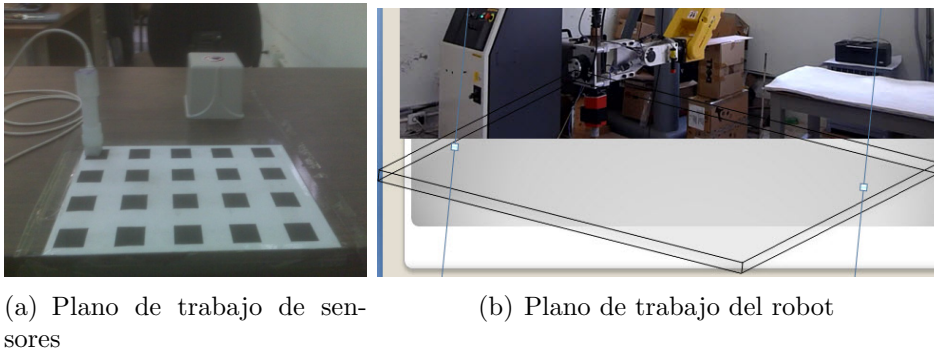


Figura 2.11: Planos de trabajo comunes

Una de las principales asimetrías es debida a las características técnicas del dispositivo de posición tridimensional llamado trakStar, usado en el presente trabajo. Es decir, las posiciones capturadas están referidas a un sistema  $[x_0, y_0, z_0]$  que se encuentra en el centro del transmisor. Esta situación no es muy conveniente para realizar la teleoperación, debido a que la coordenada  $z_0$  varía dependiendo de la ubicación de este transmisor, el cual no es un dispositivo fijo. En la figura 2.12 (b) se esquematiza el sistema de referencia del transmisor, o su origen, con coordenadas  $(0, 0, 0)$ . En la figura 2.12 (a) puede notarse que el sistema adjunto al transmisor obtiene una altura máxima,  $z_0$ , cuando se mide del centro del transmisor a la mesa. Esto implica que la escala usada para llevar esta coordenada al robot esclavo no es muy conveniente, ya que sus variaciones representan distancias grandes en el esclavo y, además, esta altura  $z_0$  es variable debido a que el transmisor no es un dispositivo fijo. La figura 2.12 (c) representa una variación de altura mayor referente a la anterior, y se observa que de igual manera se incrementa el espacio de trabajo referido al eje  $z$ , y de nuevo se vuelve inconveniente usar esta escala y llevarla al robot esclavo, debido a que la programación quedaría sujeta a una altura fija. Por lo tanto, es necesario buscar una solución que permita usar un factor de escala conveniente para usar en el espacio de trabajo del robot esclavo.

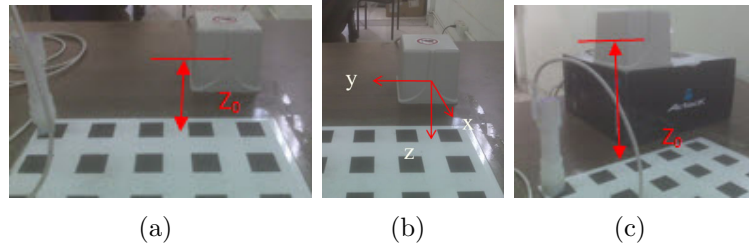


Figura 2.12: Variación del sistema coordenado adjunto al transmisor

## 2.3 Plano de trabajo

Para resolver lo anterior, se ha procedido a definir y calibrar un plano de trabajo que sirva como referencia para el movimiento del operador y que permita establecer las coordenadas que serán enviadas al manipulador, sin importar la posición u orientación en la que este plano se encuentre con respecto al transmisor. Por otro lado, se puede encontrar el área de trabajo del robot y definir un plano de trabajo por medio de la cinemática directa, y así se tendrá la correspondencia de la posición para ambos planos, como se muestra en la figura 2.13. La ventaja que proporciona la calibración de un plano es el efecto que se presenta en la escala de las coordenadas, ya que es directa y sin posibilidad de encontrarse con puntos inalcanzables para el robot. Además, este plano puede tener cualquier orientación y el robot trabajará en el plano determinado por la cinemática directa, siempre normal al plano calibrado.

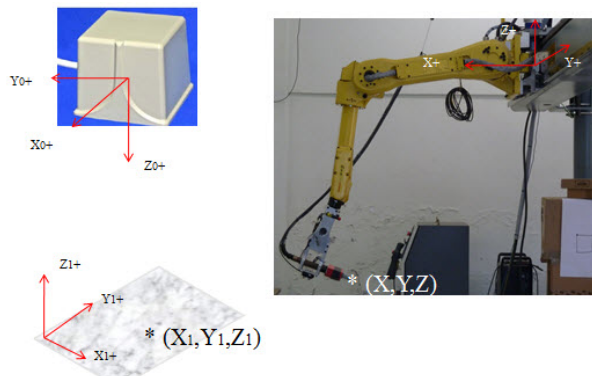


Figura 2.13: Correspondencia de coordenadas

Esto proporciona una teleoperación eficiente, debido a que cada punto correspondiente al plano calibrado para el maestro, es un punto alcanzable para el robot esclavo, aunque siempre existe la posibilidad de que se presente alguna singularidad o un punto inalcanzable en la reproducción de una trayectoria, debido a la configuración articular del esclavo. Por lo tanto, es necesario proponer un algoritmo de calibración moviendo el sistema coordinado del transmisor al nuevo plano.

### 2.3.1 Matrices de calibración

La ecuación del plano en su forma implícita viene dada por:

$$ax + by + cz + 1 = 0 \quad (2.1)$$

Donde a,b,c son las componentes del vector normal al plano.

Es sabido que, para encontrar la ecuación del plano, se puede efectuar mediante tres puntos, que estén contenidos en el plano a buscar. Para mejorar la estimación de los coeficientes de la ecuación 2.1, es necesario encontrar la ecuación del plano con un número finito de puntos, tantos como sea posible, como se muestra en la figura 2.14, y realizar la estimación por medio de mínimos cuadrados. Aunque con tres puntos es suficiente efectuar el cálculo de los parámetros de la ecuación de un plano, este mejora si la cantidad de puntos contenidos en ese plano se incrementa.

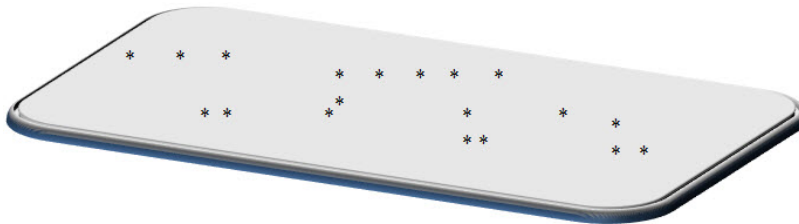


Figura 2.14: Puntos contenidos en el plano

Haciendo uso de la ecuación 2.1 y utilizando mínimos cuadrados se genera un sistema de ecuaciones 2.2, dando solución de la forma general de un sistema de  $m$  ecuaciones y  $n$  denotado por  $Ax = b$ .

$$\begin{bmatrix} \sum x_i^2 & \sum x_i y_i & \sum x_i z_i \\ \sum x_i y_i & \sum y_i^2 & \sum y_i z_i \\ \sum x_i z_i & \sum y_i z_i & \sum z_i^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a \\ b \\ c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum x_i \\ \sum y_i \\ \sum z_i \end{bmatrix} \quad (2.2)$$

Donde  $A$  es una matriz de dimensión  $m \times n$ ,  $x$  es el vector de incógnitas de dimensión  $n$  y  $b$  es un vector de dimensión  $m$ .

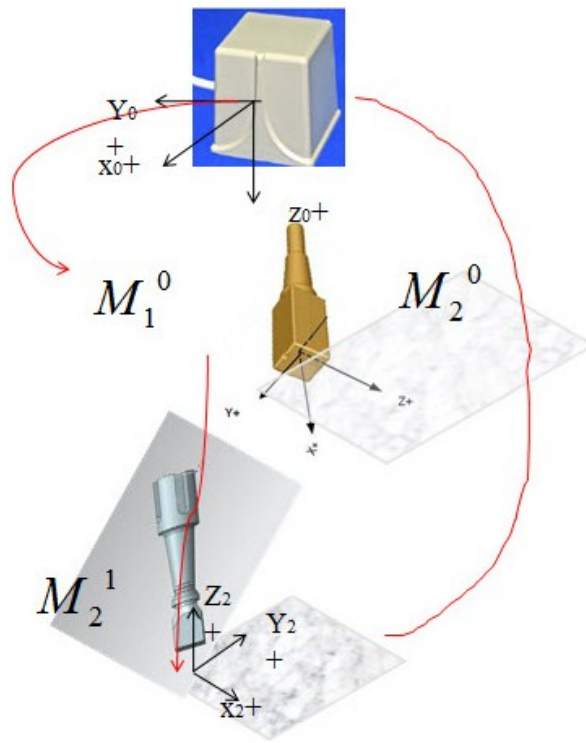


Figura 2.15: Transformaciones que relacionan los sistemas coordenados

Para obtener el nuevo origen y calibrar el sistema, es necesario encontrar la matriz de rotación que relaciona los sistemas coordenados y así, localizar al nuevo origen en el lugar deseado. La figura 2.15 muestra la relación de las matrices homogéneas para lograr la transformación deseada, donde  $M_1^0$ ,  $M_2^0$  y  $M_2^1$  son matrices conocidas que representan las matrices de transformación homogéneas que relacionan los sistemas coordenados en el proceso de la nueva ubicación.

## CAPÍTULO 2. ASIMETRÍA CINEMÁTICA EN LA TELEOPERACIÓN

---

Parte del algoritmo de calibración incluye el cálculo de posiciones que representan el nuevo origen en el plano calibrado, ya que estos proporcionan la matriz de rotación necesaria para llevar el sistema  $[x_0, y_0, z_0]$  a su nueva posición, que es representada por el sistema  $[x_2, y_2, z_2]$ .

Con las ecuaciones 2.3 se obtienen los vectores que forman el nuevo sistema  $[x_2, y_2, z_2]$  que da origen al plano calibrado.  $P_0$  representa el punto inicial y  $P_y$  el punto final; con estos puntos se forma el vector en la dirección del eje  $y_2$ . A su vez, el vector  $\vec{z}_2$  toma las coordenadas del vector  $\vec{N}$  donde este es la forma normal del plano, dado por la ecuación 2.4. Por último, el producto cruz de los vectores ortogonales obtenidos forman el vector  $\vec{x}_2$ .

$$\begin{aligned}
 \vec{y}_0 &= \frac{P_y - P_0}{\|P_y - P_0\|} \\
 &= y_1 \hat{i}_2 + y_2 \hat{j}_2 + y_3 \hat{k}_2 \\
 \vec{z}_0 &= \vec{N} \\
 &= z_1 \hat{i}_2 + z_2 \hat{j}_2 + z_3 \hat{k}_2 \\
 \vec{x}_0 &= \vec{y}_0 \times \vec{z}_0 \\
 &= x_1 \hat{i}_2 + x_2 \hat{j}_2 + x_3 \hat{k}_2
 \end{aligned} \tag{2.3}$$

$$\vec{N} = \frac{A\hat{i} + B\hat{j} + C\hat{k}}{\sqrt{A^2 + B^2 + C^2}} \tag{2.4}$$

Una vez obtenido el nuevo sistema coordenado  $[x_2, y_2, z_2]$ , se puede obtener la transformación total que proporciona la calibración al plano deseado, para la manipulación del robot maestro y tiene la forma:

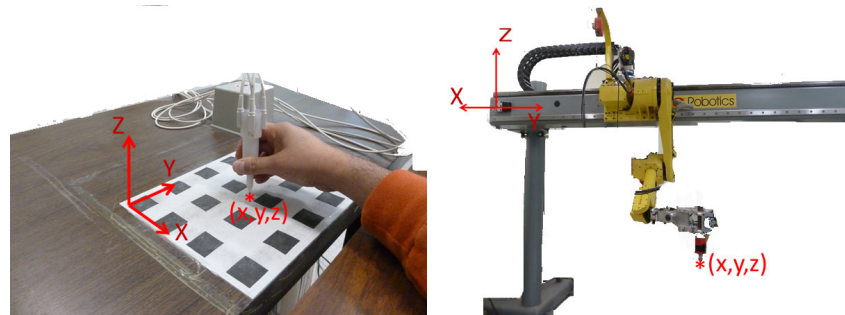
$$\begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \\ z_0 \\ 1 \end{bmatrix} = T_1 T_2 \begin{bmatrix} x_2 \\ y_2 \\ z_2 \\ 1 \end{bmatrix} \tag{2.5}$$

Donde  $M_2^0 = T_1 T_2$

La transformación homogénea  $T_1$  representa la matriz formada por la ecuaciones contenidas en la ecuación 2.3 y la transformación homogénea  $T_2$

es la traslación del plano a lo largo de la herramienta del enlace maestro, ya que la transformación homogénea  $T_1$  ubica el plano calibrado en el centro de los sensores, tal como se muestra en la figura 2.15.

De este modo, la matriz  $M_2^0$  proporciona la calibración necesaria para relacionar las coordenadas del plano de trabajo del sistema maestro, con las del sistema esclavo. La figura 2.16 (a) muestra la coordenada  $(x, y, z)$  en el plano calibrado para el sistema maestro, con su respectivo origen. Puede notarse que en un inicio el plano de trabajo es el  $x-y$ , dado que la coordenada en  $z$  es cero, debido a a calibración. Este origen, ahora, es correspondiente al origen del sistema esclavo, por lo tanto, toda coordenada en el plano  $x-y$  del sistema maestro, es correspondiente al plano  $x-y$  del sistema esclavo. La figura 2.16 (b) muestra el origen del sistema esclavo, así como la coordenada  $(x, y, z)$  en el plano  $x-y$  correspondiente al plano del sistema maestro.



(a) Sistema coordenado del maestro (b) Sistema coordenado del esclavo

Figura 2.16: Relación de sistemas coordenados

### 2.3.2 Algoritmo de calibración

Conocida la transformación total que relaciona los sistemas coordenados descritos anteriormente, se puede proponer una metodología que proporcione un algoritmo de calibración para cada sensor usado en el enlace maestro. Esta metodología debe cumplir los requisitos exigidos por las ecuaciones descritas en la sección 2.3.1 y, del mismo modo, debe realizarse de manera secuencial para facilitar la programación del algoritmo en el lenguaje de programación usado en este proyecto.

El algoritmo de calibración basado en la ecuación del plano se establece de la siguiente manera:

1. Tomar una sucesión de puntos pertenecientes al plano a calibrar;
2. Resolviendo la ecuación 2.2, obtener los coeficientes pertenecientes a la ecuación del plano;
3. Formar los vectores unitarios  $\vec{x}, \vec{y}, \vec{z}$  que formarán el sistema coordenado que da el origen al sistema  $[x_0, y_0, z_0]$  del plano deseado;
4. Formar la matriz de transformación homogénea  $T_1$  con las ecuaciones 2.3;
5. Encontrar la matriz homogénea  $M_2^0$  mostrada en la ecuación 2.5.

## 2.4 Pruebas preliminares

Con la finalidad de comprobar la parte teórica del algoritmo de calibración para resolver la asimetría existente descrita en este capítulo, se realizan pruebas de captura de datos del enlace maestro sin calibrar, así como del enlace calibrado, además se hace necesario el uso de simulación del robot esclavo para ver el comportamiento de la solución propuesta.

### 2.4.1 Plataforma experimental

Como ya se ha mencionado en la sección 1.4.1, la plataforma experimental es un equipo electromagnético comercial trakStar, una interfaz de comunicación con la unidad hecha en visual C, una computadora pentium IV a 2.0 Ghz y el software MatLab para las simulaciones.

La caracterización de los sensores se muestra en las tablas 2.2 y 2.3, las cuales muestran resultados de dos posiciones del enlace maestro, para las que se hizo la captura de datos cuando el enlace no está calibrado y cuando sí lo está. La tabla 2.2 muestra las medidas estadísticas más importantes para dos posiciones incluyendo la orientación; en estas posiciones el enlace maestro no está calibrado y los datos están con referencia al sistema coordenado del transmisor para ambas posiciones. Es notable que las coordenadas de posición muestren una desviación estándar cercana a 0 mm., pero es necesario mencionar que el sistema usado en este proyecto, como parte del enlace maestro, es de alta precisión, el cual repercute en que el ruido generado

sea del orden de milésima de mm, es por eso que no se detecta con mayor facilidad cuando está estático.

<b>Muestra:</b>	1287	<b>Posición 1 (mm)</b>	
	<b>X</b>	<b>Y</b>	<b>Z</b>
<b>Promedio:</b>	164.5855	265.60225	-57.708
<b>Desviación</b>			
<b>Estandar:</b>	0	0	0
		<b>Orientación 1 (grados)</b>	
	<b>W</b>	<b>P</b>	<b>R</b>
<b>Promedio:</b>	-58.5343075	-88.3311957	67.929972
<b>Desviación</b>			
<b>Estandar:</b>	0.1085364	0.00235	0.1111586
<b>Muestra:</b>	1792	<b>Posición 2 (mm)</b>	
	<b>X</b>	<b>Y</b>	<b>Z</b>
<b>Promedio:</b>	201.47625	167.37575	-57.87575
<b>Desviación</b>			
<b>Estandar:</b>	0	0	0
		<b>Orientación 2 (grados)</b>	
	<b>W</b>	<b>P</b>	<b>R</b>
<b>Promedio:</b>	-41.5379152	-87.8633348	44.9230692
<b>Desviación</b>			
<b>Estandar:</b>	0.0607968	0.0037986	0.0654915

Tabla 2.2: Datos cuando el maestro no está calibrado

La tabla 2.3 también muestra los datos estadísticos más importantes, los cuales denotan las mismas dos posiciones que los obtenidos para la tabla 2.2, sólo que en esta ocasión el enlace maestro se calibró con el algoritmo presentado en la sección 2.3.2.

Puede notarse que las coordenadas  $x, y, z$ , hacen referencia a un nuevo sistema coordenado. La diferencia más notable es en la coordenada  $z$  en ambas posiciones mostradas en las tablas, pues mientras que en la tabla 2.2 toma valores de -57 mm, en la tabla 2.3 es prácticamente cero.

Una vez que se ha obtenido con éxito la calibración de un plano correspondiente a un área de trabajo en el robot esclavo, se realizan



CAPÍTULO 2. ASIMETRÍA CINEMÁTICA EN LA TELEOPERACIÓN

---

<b>Muestra:</b>	1528	<b>Posición 1 en <i>mm</i></b>	
	<b>X</b>	<b>Y</b>	<b>Z</b>
<b>Promedio:</b>	53.49632	66.6308475	-0.9604162
<b>Desviación</b>			
<b>Estándar:</b>	0.0285112	0.0185319	0.0159794
		<b>orientación 1 en <i>grados</i></b>	
	<b>W</b>	<b>P</b>	<b>R</b>
<b>Promedio:</b>	149.702294	-86.653053	16.6462814
<b>Desviación</b>			
<b>Estándar:</b>	0.1429543	0.0154015	0.1028986
<b>Muestra:</b>	1552	<b>Posición 2 en <i>mm</i></b>	
	<b>X</b>	<b>Y</b>	<b>Z</b>
<b>Promedio:</b>	93.3958698	162.291141	-1.9802835
<b>Desviación</b>			
<b>Estándar:</b>	0.018847	0.0018628	0.0010027
<b>Muestra:</b>	1552	<b>Orientación 2 <i>grados</i></b>	
	<b>W</b>	<b>P</b>	<b>R</b>
<b>Promedio:</b>	151.295772	-87.6395921	17.5927629
<b>Desviación</b>			
<b>Estándar:</b>	0.1848363	0.0176539	0.1342701

Tabla 2.3: Datos cuando el maestro está calibrado

simulaciones para validar la parte teórica de los cálculos y la correspondencia de datos, de modo que sólo será necesario tener un factor de escala que dé correspondencia al área del plano  $x - y$  del robot esclavo, siendo el factor de escala determinado a través de la coordenada  $z$ , ya que esta coordenada determina el área de trabajo del robot esclavo para el plano  $x - y$ . La figura 2.17 muestra un área óptima de trabajo para el robot esclavo, donde las coordenadas obtenidas de los sensores  $x, y$  son escaladas por un factor propuesto de 10, y la coordenada  $z$  por un valor propuesto de  $-1400 \text{ mm}$ . Siendo este último seleccionado a través de las características de calibración del sistema maestro, es decir, que la herramienta del robot esclavo sea perpendicular al plano  $x - y$  del mismo.

Para validar las coordenadas se hace la simulación en MatLab del robot esclavo, tomando en cuenta las coordenadas obtenidas del enlace maestro.

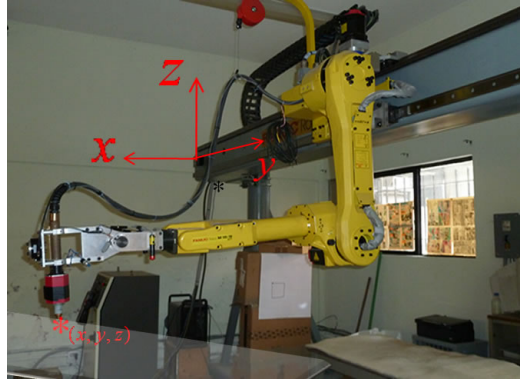


Figura 2.17: Área de trabajo correspondiente al plano calibrado

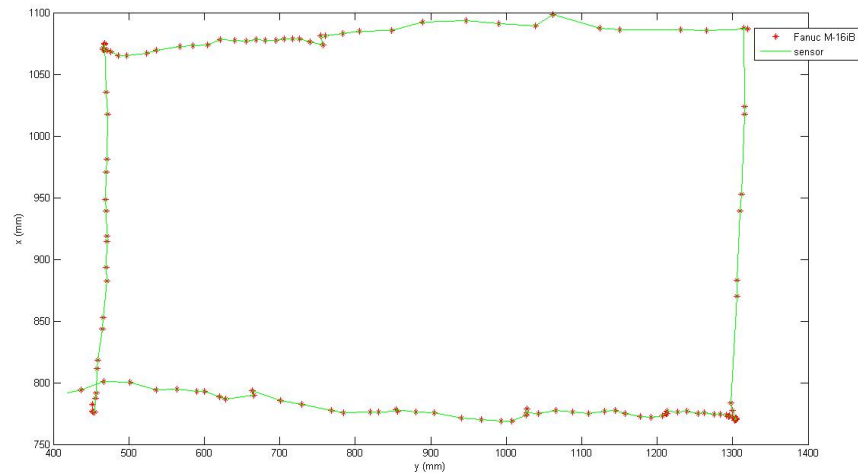


Figura 2.18: Comparación de trayectoria

La figura 2.18 muestra una trayectoria generada con los sensores y, para hacer la comparación con la respuesta del robot esclavo, por medio de la cinemática directa se trazan las posiciones deseadas. Puede notarse que, al hacer la comparación de trayectoria, ésta resulta de manera fiel, por lo tanto el comportamiento del esclavo hacia el maestro cumple el objetivo. Otra forma de validar los puntos alcanzados por el robot, es por medio de simulaciones de las articulaciones del robot a través del modelo directo del robot. Este tema se tratará con mayor detalle en el siguiente capítulo.

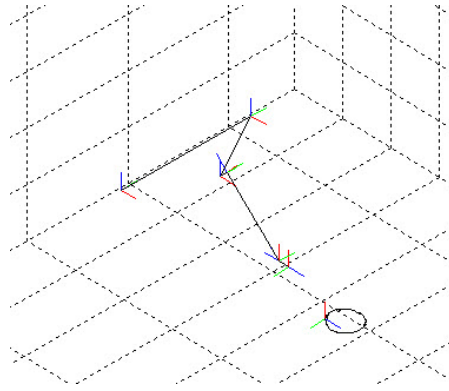


Figura 2.19: Simulación del robot Fanuc M16iB

La figura 2.19 muestra una simulación hecha en MatLab, en donde cada sistema coordinado representa las articulaciones del robot Fanuc M16iB. En esta figura puede notarse que teóricamente se logra el trazado de un círculo, es decir, se está alcanzado el punto deseado con gran eficacia.

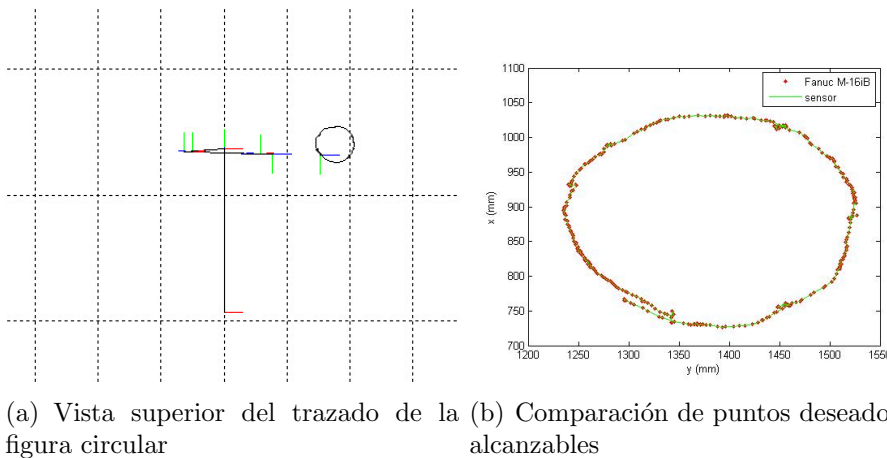


Figura 2.20: Comparativa de trayectorias entre sensores y simulación del esclavo

En la figura 2.20, se hace una comparativa entre la simulación y los datos obtenidos del enlace maestro, esto es, entre los puntos deseados y los puntos alcanzables. Puede notarse la similitud del círculo obtenido, a través de la simulación en la figura 2.20 (a), con respecto a los círculos obtenidos de los datos deseados de la captura en la interfaz desarrollada para la teleoperación en el presente trabajo y los puntos alcanzables por las

articulaciones simuladas del robot. Por otro lado, cabe destacar en la figura 2.20 (b), los trazos de las líneas están una sobre la otra, es decir, se están alcanzando la mayoría de los puntos deseados.

## 2.5 Conclusiones preliminares

La solución propuesta para resolver la asimetría cinemática existente entre el enlace maestro y el robot esclavo, mostró resultados satisfactorios; además permite trabajar con cualquier orientación o posición del plano, debido a que cada que se efectúe la teleoperación no es necesario contar con un plano totalmente horizontal. Es decir que se puede tener un plano inclinado, ya que, establecida la calibración, las coordenadas obtenidas son totalmente independientes para estas condiciones, debido a que el enlace maestro siempre es perpendicular al plano calibrado y de esta manera obtiene su propio sistema coordenado, eliminando así la orientación del plano que se desea calibrar.

La herramienta juega un papel importante, ya que su diseño favorece las condiciones necesarias tanto para la calibración, como para la teleoperación. Su diseño intercambiable y la unión por rosca aseguran la perpendicularidad necesaria para la calibración de la herramienta; además, permite al operador seguir trayectorias planeadas, gracias a la pieza en forma de punta, sin dificultad de visión hacia la trayectoria. También ésta permite establecer una semejanza con la herramienta instalada en el robot industrial FANUC M-16iB, la cual proporciona cierta ventaja para obtener la máxima manipulabilidad del esclavo. Este tema será tratado con mayor profundidad en el siguiente capítulo.

# Capítulo 3

## Manipulabilidad del Robot Industrial

La cinemática se refiere al movimiento de un cuerpo sin considerar las fuerzas o torques que generan el movimiento. Por lo tanto, la cinemática de un robot manipulador es el análisis del movimiento con respecto a un sistema de referencia o un marco fijo, y del mismo modo se interesa por la descripción analítica del espacio articular del robot, en particular las relaciones de posición y orientación del efector final a través de las posiciones articulares. Mientras la relación entre posición y orientación está dada por el espacio articular, del mismo modo existe la relación de velocidades, en donde la velocidad lineal y angular del efector final están relacionadas con las velocidades articulares a través del modelo diferencial, expresado mediante el Jacobiano del robot manipulador.

En la cinemática de un robot manipulador se generan dos problemas de gran interés a resolver: cinemática directa e inversa. Mientras que el primero se interesa por determinar la posición y orientación a través de valores articulares conocidos, el segundo tiene interés por resolver la configuración articular que el robot tiene que adoptar, una vez conocidas la posición y orientación.

### 3.1 Modelo directo del robot industrial

Como ya se ha descrito anteriormente, el problema del modelo directo de un robot, consiste en encontrar la localización espacial del efector final,

a partir de coordenadas articulares conocidas. Por lo tanto, el mapeo del modelo directo  $f : \mathbb{R}^n \mapsto \mathbb{R}^m$  que relaciona la posición articular ( $q$ ), de dicho espacio, de dimensión  $n$ , con el vector de posición  $x$  del espacio cartesiano y de dimensión  $m$  [31]. Así, para este proyecto, se ha escogido trabajar con coordenadas cartesianas y con ángulos  $W, P, R$  para la orientación, por lo tanto la cinemática directa se define como:

$$x = f(q) \tag{3.1}$$

en donde  $x$  es el vector que contiene la posición y orientación ( $x, y, z, W, P, R$ ) y representa los seis grados de libertad.

#### 3.1.1 Modelo directo mediante transformaciones homogéneas

Si se analiza a un robot manipulador como un conjunto de eslabones rígidos, conectados a través de varias juntas, en donde las juntas pueden ser simples, tales como prismática y de revoluta, y se supone que cada una de estas juntas son de un solo grado de libertad, entonces el robot se puede visualizar como una cadena cinemática abierta. Por tanto, el objetivo de la cinemática directa es el análisis del efecto acumulativo del conjunto de variables de las juntas pertenecientes a la cadena cinemática abierta [32].

Si se piensa la matriz de transformación homogénea no constante  $A_i$ <sup>1</sup>, la cual mapea las coordenadas de un punto de un marco de referencia  $i$  al marco de referencia  $i - 1$  y con la suposiciones ya mencionadas, esta matriz está en función de una sola variable ( $q_i$ ), es decir:

$$A_i = A_i(q_i) \tag{3.2}$$

Entonces, al suponer al robot como una cadena cinemática abierta, se puede pensar que las transformaciones homogéneas  $A_i$  para cada articulación, proporcionan una transformación total  ${}^jT_i$ , en donde esta matriz, denominada matriz de transformación [32], relaciona la coordenada del marco de referencia  $j$  al marco de referencia  $i$ , y viene dada por:

---

<sup>1</sup>La matriz  $A_i$  no es constante, ya que depende de los parámetros geométricos del robot y, por lo tanto, cambia con cada configuración adoptada, para el caso de este proyecto un robot Fanuc M16iB 20T.

$${}^jT_i = A_1 A_2 \dots A_j \quad (3.3)$$

### 3.1.2 Modelo directo del robot industrial Fanuc M16iB 20T

Las transformaciones necesarias para lograr expresar la posición y orientación de un marco de referencia colocado en la herramienta del robot, referenciado a un sistema global (referencia en la base del robot -ver figura 3.1), en términos de posiciones articulares que se incluyen en el modelo directo del robot FANUC M-16iB 20T, viene dado por:

$${}^0T_6 = A_1 A_2 A_3 A_4 A_5 A_6 A_7 E \quad (3.4)$$

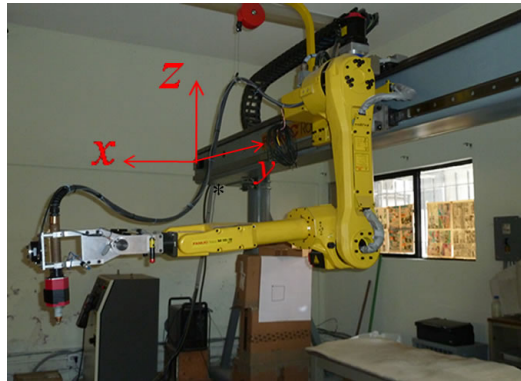


Figura 3.1: Sistema de referencia 0 situado en la base del Robot

En donde esta transformación total incluye la punta de la herramienta dada por el vector  $E$ . Un análisis más detallado del modelo directo se puede ver en el apéndice B.1, en donde cada transformación está definida como:

$$\begin{aligned} A_1 &= \text{Trasl}_{y,J_1} \\ A_2 &= \text{Trasl}_{x,a \cos J_2} \text{Trasl}_{z,-a \sin J_2} \\ A_3 &= \text{Rot}_{y,J_3} \text{Tras}_{x,b} \\ A_4 &= \text{Rot}_{z,J_4} \text{Trasl}_{0,0,-c} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 A_5 &= Rot_{y,-J_5} \\
 A_6 &= Rot_{z,J_6} \\
 A_7 &= Trasl_{0,0,-d}Rot_{x,\pi}
 \end{aligned} \tag{3.5}$$

Donde las matrices de transformación homogéneas, a partir de los ejes  $(x, y, z)$  y la traslación con coordenadas  $(a, b, c)$ , se definen como:

$$\begin{aligned}
 Rot_{x,\theta} &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\theta) & -\sin(\theta) & 0 \\ 0 & \sin(\theta) & \cos(\theta) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\
 Rot_{y,\theta} &= \begin{bmatrix} \cos(\theta) & 0 & \sin(\theta) & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin(\theta) & 0 & \cos(\theta) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\
 Rot_{z,\theta} &= \begin{bmatrix} \cos(\theta) & -\sin(\theta) & 0 & 0 \\ \sin(\theta) & \cos(\theta) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\
 Trasl_{a,b,c} &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & a \\ 0 & 1 & 0 & b \\ 0 & 0 & 1 & c \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}
 \end{aligned} \tag{3.6}$$

## 3.2 Modelo inverso del robot industrial

Como ya se mencionó en la sección 1.2.1, el sistema de control del robot Fanuc M-16iB 20T es de arquitectura cerrada y por lo tanto, para poder controlar cinemáticamente al robot, es necesario proporcionar los valores articulares para cada articulación, es decir,  $J_1$  a  $J_6$  y así poder generar la posición deseada; es por eso que es necesario obtener el modelo inverso del robot esclavo.

Una vez obtenidos del sistema maestro las posiciones  $x, y, z$  necesarias para ejecutar o reproducir una trayectoria, éstas se tienen que enviar al robot para que la ejecute. El problema radica en encontrar los valores de las articulaciones que den la posición y orientación al efector terminal y sean relativas a la base (sistema global), usando los valores geométricos del robot. Para lograr esto, es necesario hacer uso de la cinemática inversa



para obtener una transformación entre coordenadas cartesianas  $(x, y, z)$  y coordenadas articulares  $(q)$ . El objetivo de la cinemática inversa es obtener las especificaciones de posiciones articulares deseadas  $(q_d = q_i^T)$ , a partir de especificaciones de posición deseadas  $(x_i)$  del extremo final del efector final [33], es decir, la relación entre la posición cartesiana y la posición articular. De manera similar al modelo directo, el mapeo inverso que logra esta transformación es  $f^{-1} : \mathbb{R}^n \mapsto \mathbb{R}^m$ ; esta relación viene dada por:

$$q = f^{-1}(x) \quad (3.7)$$

en donde el vector  $q$  contiene los valores articulares, y el vector  $x$  contiene la posición y orientación cartesiana. La ecuación 3.7 es conocida como cinemática inversa y presenta una mayor dificultad que la cinemática directa. El problema radica en que con frecuencia las soluciones no son únicas, y se hace necesario encontrar soluciones cerradas, en donde se asegure que la solución obtenida sea la más adecuada. Por ejemplo, sea  $H$  una matriz de transformación homogénea dada por:

$$H = \begin{bmatrix} R & d \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Donde  $R$  es la matriz de rotación y  $d$  es el vector que contiene la posición. Y su matriz de transformación total está dada por:

$$\begin{aligned} {}^0T_n(q_1, \dots, q_n) &= H \\ &= A_1 \dots A_n \end{aligned} \quad (3.8)$$

La ecuación 3.8 da como resultado 12 ecuaciones no lineales con  $n$  variables desconocidas. La solución explícita se vuelve compleja, pero proporciona la ventaja de que la solución puede ser única, al desarrollar reglas de selección, en donde éstas dependen de la estructura particular de los manipuladores. Por otro lado, los robots manipuladores presentan cinemáticas relativamente simples, dando esto cierta ventaja en la solución a la cinemática inversa, es decir, que la mayoría de los robots presentan una configuración planar, esto es, que la posición articular para las primeras tres articulaciones queda contenida en un plano, lo cual proporciona cierta ventaja en su solución. Además, la mayoría de los robots hacen la orientación del

efector final con los últimos tres grados de libertad. Esto es posible debido a que en su diseño usan una muñeca de configuración esférica, la cual tiene la característica de intersectar sus ejes en un punto. Esta circunstancia, de nuevo, proporciona ventaja ante la solución al modelo inverso.

### 3.2.1 Cinemática inversa del robot industrial Fanuc M-16iB 20T

El robot industrial usado en este proyecto como robot esclavo, cuenta con las ventajas ya mencionadas, es decir, está contenido en un plano y tiene una muñeca de configuración esférica. Por lo tanto, se puede pensar en resolver el modelo inverso a través de desacoplamiento cinemático, [34],[35],[36]. Este método, de acuerdo a las circunstancias de diseño del robot usado en este proyecto, permite tratar en dos problemas al modelo inverso; un problema de cinemática inversa para la posición del centro de la muñeca y otro problema de cinemática inversa para la orientación de la muñeca. En este proyecto, usando el desacoplamiento cinemático, se localiza la posición del robot a través de métodos geométricos, mientras que la orientación se obtiene de manera analítica.

### 3.2.2 Desacoplamiento cinemático

Los métodos geométricos permiten la localización de la posición del centro de la muñeca, es decir, de las primeras tres variables articulares que posicionan el robot suprimiendo la orientación. Todo esto se logra a través del uso de relaciones geométricas y trigonométricas en los elementos que conforman el robot. Una vez que se obtienen las coordenadas del centro de la muñeca, dadas por  $X_m, Y_m, Z_m$ , la cinemática inversa del robot M-16iB 20T de seis grados de libertad, dados por  $(J_1, J_2, J_3, J_4, J_5, J_6)$ , y usando el método geométrico, se pueden obtener los valores de las primeras tres articulaciones, los cuales están dados por:

$$J_1 = Y_m \tag{3.9}$$

$$J_2 = \alpha + \beta \tag{3.10}$$

$$J_3 = \theta + \delta \tag{3.11}$$

Una vez establecidos los valores de las primeras tres juntas  $(J_1, J_2, J_3)$  se

pueden encontrar los valores de las tres articulaciones faltantes que orientan el extremo del robot. Usando la ecuación 3.12 en [38] se obtiene la matriz de orientación que proporciona el sistema de ecuaciones para obtener los tres últimos grados de libertad. En donde  ${}^iR_j$  representa la matriz de rotación referida del marco  $j$  con el marco  $i$ .

$$\begin{aligned} {}^3R_6 &= {}^0R_3{}^{T0}R_6 \\ &= {}^0R_3{}^T \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (3.12)$$

De este modo, usando el álgebra correspondiente, se obtienen los ángulos de orientación, dando como resultado:

$$J_4 = \arctan \left( \frac{r_{23}}{(\cos(J_3)r_{13} + \sin(J_3)r_{33})} \right) \quad (3.13)$$

$$J_5 = \arctan \left( \frac{\cos(J_3)r_{13} + \sin(J_3)r_{33}}{\cos(J_4)(\sin(J_3)r_{13} - \cos(J_3)r_{33})} \right) \quad (3.14)$$

$$J_6 = \arctan \left( \frac{r_{23} \cos(J_3) + r_{12} \sin(J_3)}{r_{31} \cos(J_3) + \sin(J_3)r_{11}} \right) \quad (3.15)$$

$$(3.16)$$

Una vez obtenidos los valores articulares pertenecientes a la orientación  $J_4, J_5, J_6$ , se tienen completos todos los valores necesarios para el control cinemático para mover al robot esclavo. Un análisis más detallado se muestra en el apéndice B.2.

### 3.3 Manipulabilidad

Es muy cierto que desde generaciones pasadas los robots manipuladores están diseñados para tareas específicas; determinan el tipo de mecanismos y longitudes desde el mismo diseño, y las configuraciones que adoptan en tareas a realizar en un espacio de trabajo determinado, se realizan desde el punto de vista de operación del robot, y muchas veces esto se hace desde la experiencia del fabricante o institución. Por otro lado, el interés de los

investigadores, como ya se mencionó en la sección 1.3, ha sido encontrar medidas que proporcionen a los robots manipuladores, configuraciones ideales para el diseño y control de los mismos y además para la planeación de tareas a realizar en su espacio de trabajo. Por otro lado, cuando se usan robots industriales como robots esclavos en esquemas de teleoperación, se tiene la desventaja en cuanto a la manipulabilidad del mismo, debido a que tienen un determinado espacio de trabajo de acuerdo a las maniobras que pueden ejecutar, dado que no están diseñados para estas tareas. En la teleoperación es muy importante contar con un esquema en el que el robot esclavo cuente con una máxima manipulabilidad para poder realizar las maniobras, lo cual es uno de los objetivos de este proyecto. De ahí que al usar el robot industrial Fanuc M-16iB 20T como esclavo, y de saber que tiene un espacio de trabajo limitado para las tareas para las que fue diseñado, se hace necesario determinar la manipulabilidad a través de índices de desempeño cinemático.

De los índices de desempeño cinemáticos revisados en la sección 1.3, el usado en este proyecto es el índice propuesto por Yoshikawa, el cual se nombrará como índice de manipulabilidad de aquí en adelante, debido a que este indicador es un escalar con un alcance global. Esta característica es importante ya que, en tareas arbitrarias la posición y orientación están definidas aleatoriamente. La teleoperación demanda este tipo de tareas, por lo cual se hace necesario evaluar de forma global y no pensar en indicadores que evalúan en una dirección.

Esta medida de manipulabilidad se puede entender como la habilidad de manipular un robot para posicionar y orientar el efector final o herramienta del robot, en un espacio de trabajo en una tarea dada. Además, es un concepto generalizado del determinante de la matriz Jacobiana el cual, al ser un escalar, permite encontrar la máxima manipulabilidad para las configuraciones adoptadas por el robot o, en su caso, determinar la configuración menos favorable; es decir, las configuraciones degeneradas o singularidades.

Esto se puede comprender si se considera el caso en que un humano usa una de sus articulaciones (brazo) como un robot de cadena abierta de dos grados de libertad. La mejor manipulabilidad se obtiene cuando el codo está cerca de los 90 grados, es decir, el humano no toma los objetos con el brazo estirado, ya que así obtiene menos manipulabilidad. Esto viene de la semejanza con un robot de cadena abierta de dos grados de libertad (ver figura 3.2), en el cual la mejor manipulabilidad es cuando el ángulo  $\theta_2$  toma los valores de  $\pm 90$  grados, tal como se puede notar en la ecuación 3.17, que

representa la manipulabilidad de dicho mecanismo.

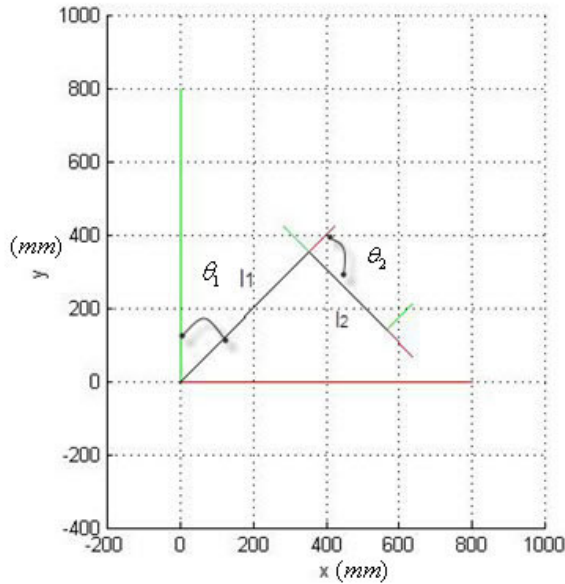


Figura 3.2: Mecanismo de dos grados de libertad

$$\begin{aligned}
 \begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \\ 1 \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} \cos(\theta_1 - \theta_2) & -\sin(\theta_1 + \theta_2) & l_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) + l_1 \cos(\theta_1) \\ \sin(\theta_1 - \theta_2) & \cos(\theta_1 + \theta_2) & l_2 \sin(\theta_1 + \theta_2) + l_1 \sin(\theta_1) \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ y_1 \\ 1 \end{bmatrix} \\
 J(\theta) &= \begin{bmatrix} l_1 \cos \theta_1 + l_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) & l_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) \\ -l_1 \sin \theta_1 - l_2 \sin(\theta_1 + \theta_2) & l_2 \sin(\theta_1 + \theta_2) \end{bmatrix} \\
 k &= l_1 l_2 |\sin \theta_2| \tag{3.17}
 \end{aligned}$$

### 3.3.1 Manipulabilidad del robot esclavo

Existen maniobras sobre las cuales se puede posicionar al robot, y no importa con qué ángulo de giro  $\alpha$ , visto desde un punto de vista de ángulos de orientación  $W, P, R$  (ver apéndice C para mejor entendimiento de este ángulo), la herramienta llegue a la posición deseada; por ejemplo, si se piensa en una maniobra en donde la operación de la herramienta es el taladrado (ver figura 3.3), no importa con qué ángulo  $\alpha$  se posicione, ejecutará la tarea, sabiendo que el eje de giro del sistema coordenado de la herramienta es

coincidente con el giro del herramental. Esto lo que ocasiona en el robot es la adopción de ciertas configuraciones que alcanzan el punto deseado, de acuerdo a cada movimiento del ángulo  $\alpha$ . Esto representa una ventaja debido a que si se mueve el sistema coordenado de la herramienta se obtienen diferentes configuraciones de las articulaciones que posicionan y orientan la herramienta para ejecutar la maniobra deseada.

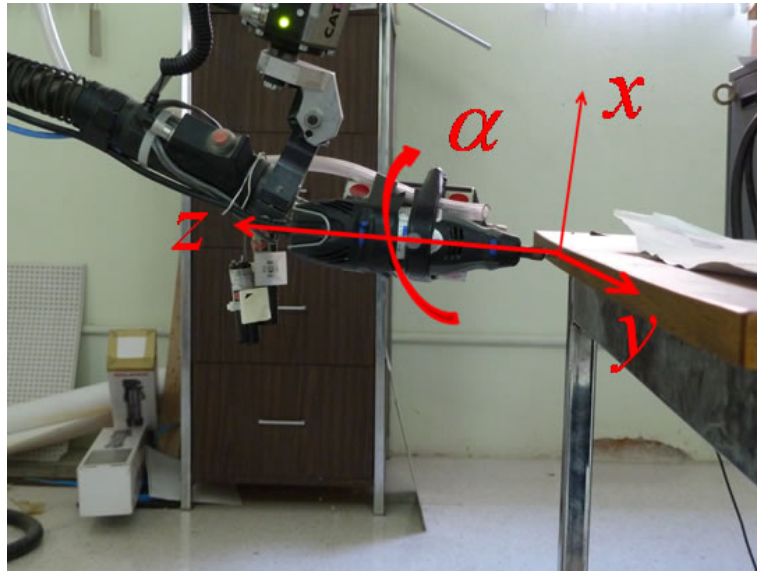


Figura 3.3: Ángulo de giro  $\alpha$  del sistema coordenado en la herramienta

Si se lleva esta idea al robot esclavo Fanuc M-16iB 20T (ver figura 3.4) y se mueve el sistema coordenado adjunto a la herramienta<sup>2</sup>, el resultado serían varias posturas en función de sus articulaciones. Además, si a cada una de estas configuraciones articulares se le puede medir la manipulabilidad, lo que resultaría es tener en operación al robot esclavo con la mejor postura para ejecutar la maniobra deseada, en términos del índice de manipulabilidad.

Las configuraciones que adopta el robot, como ya se mencionó, están en función de los valores articulares. Debido a que el Jacobiano es una función de  $(J_1 - J_6)$  y si se recuerda la ecuación 1.12 descrita en la sección 1.3, donde

<sup>2</sup> Nótese que el sistema coordenado adjunto a la herramienta no es paralelo al sistema coordenado adjunto a la muñeca. Esta condición permite nuevas configuraciones articulares.

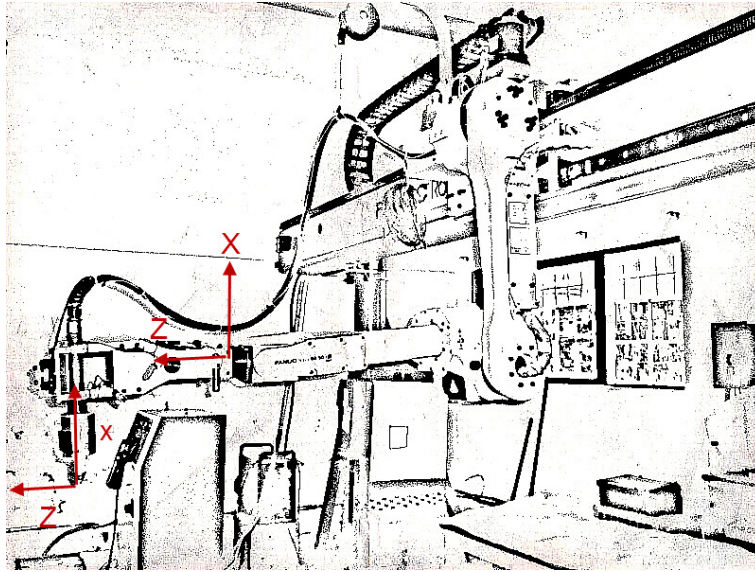


Figura 3.4: Sistema coordenado adjunto a la herramienta

$$w = |\det J(\theta)| \quad (3.18)$$

se puede determinar la máxima manipulabilidad que tiene el robot esclavo en uso.

### 3.3.2 Matriz Jacobiana

Así como la cinemática directa e inversa matemáticamente proporcionan ecuaciones que relacionan la posición y orientación del espacio cartesiano con la posición y orientación del espacio articular, del mismo modo la relación existente entre las velocidades lineal y angular del efector final con las velocidades articulares es a través del Jacobiano<sup>3</sup>. El Jacobiano es una matriz de  $6 \times n$  y, para el caso del manipulador usado en este proyecto, se tiene una matriz de  $6 \times 6$  y se puede calcular a través de

---

<sup>3</sup> Cabe mencionar que esta transformación es posible para cualquier punto del manipulador.

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \mathbf{v} \\ \omega \end{bmatrix} &= J(q)\dot{q} \\ &= \begin{bmatrix} J_p(q) \\ J_0(q) \end{bmatrix} \dot{q} \end{aligned} \quad (3.19)$$

en donde  $\mathbf{v}$  es el vector de velocidades lineales y  $\omega$  es el vector de velocidades angulares dados por:

$$\begin{aligned} \mathbf{v} &= J_p(q) \\ &= \sum_{i=1}^n \frac{\partial p}{\partial q_i} \dot{q}_i \end{aligned} \quad (3.20)$$

$$\begin{aligned} \omega &= J_0(q) \\ &= [\rho_1 z_0 \quad \rho_2 z_1 \quad \dots \quad \rho_n z_{n-1}] \end{aligned} \quad (3.21)$$

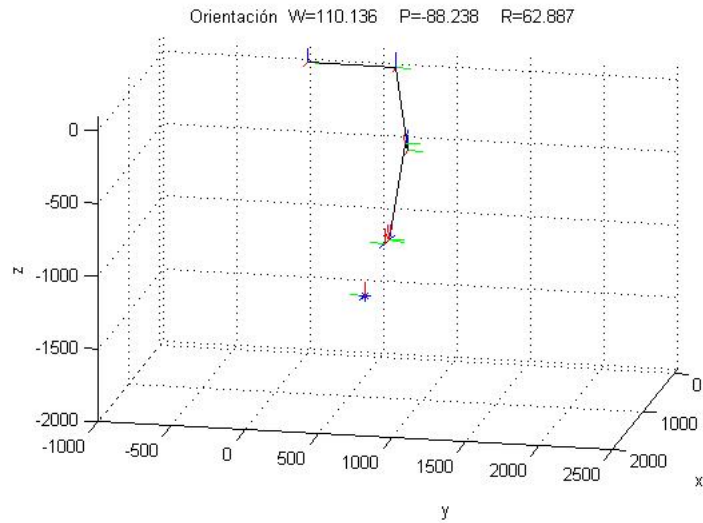
sabiendo que  $\rho$  toma el valor de uno cuando la junta actuada es de revolución y cero cuando la junta actuada es prismática, y además  $\hat{k}$  es el eje actuado, por consiguiente se tiene

$$z_{i-1} = R_0^{i-1} \hat{k} \quad (3.22)$$

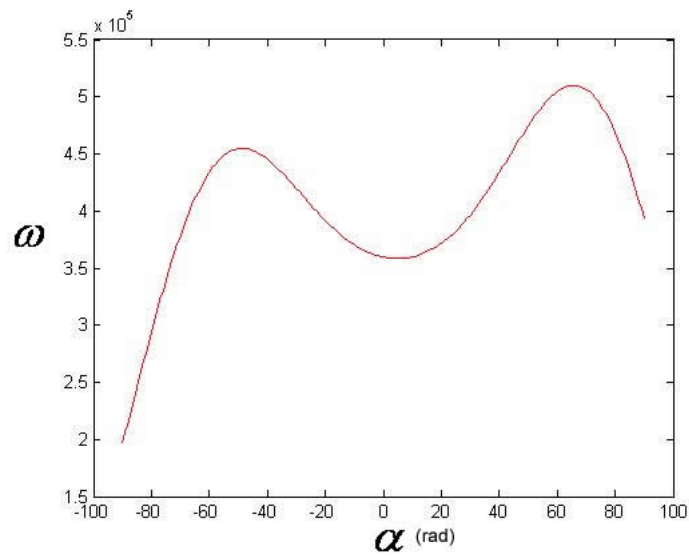
### 3.4 Pruebas preliminares

Una de las maneras para validar y fundamentar la parte teórica, estudiada en este capítulo, es por medio de simulación. La figura 3.5 (a) muestra la posición del robot con coordenadas  $[676.66, 537.43, -1400]mm$ , por lo tanto al girar el sistema coordenado de la herramienta a un ángulo  $\alpha$  y usando la ecuación 1.12 y rango de  $-90$  a  $90$  grados, se obtiene la gráfica de manipulabilidad mostrada en la figura 3.5 (b); en esta gráfica se puede notar que existen 2 máximos locales y es evidente que un punto es un máximo global y otro uno local. Esto se interpreta como las 2 posiciones con máxima manipulabilidad local que el robot puede adquirir.





(a) Posición del robot en (mm)

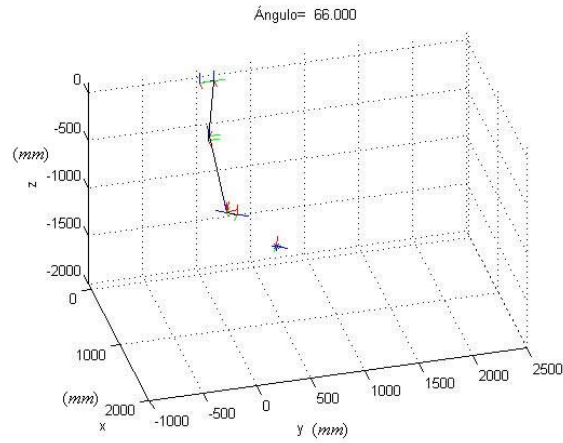


(b) Gráfica de Manipulabilidad

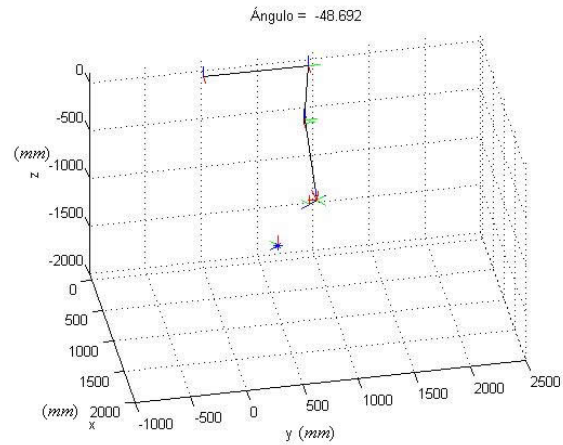
Figura 3.5: Manipulabilidad del robot industrial M16iB.

La posición de este punto en particular es mostrada en la figura 3.6, la cual advierte las dos posiciones con máxima manipulabilidad local. Cabe

mencionar que estas configuraciones no son simétricas, aunque sí muy cercanas a serlo.



(a) Posición óptima cuando  $\alpha = 66$  grados



(b) Posición óptima cuando  $\alpha = -48$  grados

Figura 3.6: Configuración articular de las dos posiciones óptimas del robot industrial M16iB.

### 3.4.1 Comunicación con el robot industrial

La comunicación con el sistema robótico Fanuc M-16iB 20T se realizó utilizando la red local del Laboratorio de Robótica de la Facultad de

## CAPÍTULO 3. MANIPULABILIDAD DEL ROBOT INDUSTRIAL

---

Ingeniería de la UASLP, mediante el protocolo TCP/IP, haciendo uso de la programación de sockets, en la cual se crea un sistema denominado cliente-servidor. La primera parte de este sistema es crear el servidor en el control del esclavo, haciendo uso del puerto 59002, la segunda parte es desarrollar la parte del cliente, la cual debe estar en la computadora que controla el maestro, indicando el puerto y la dirección IP del servidor.

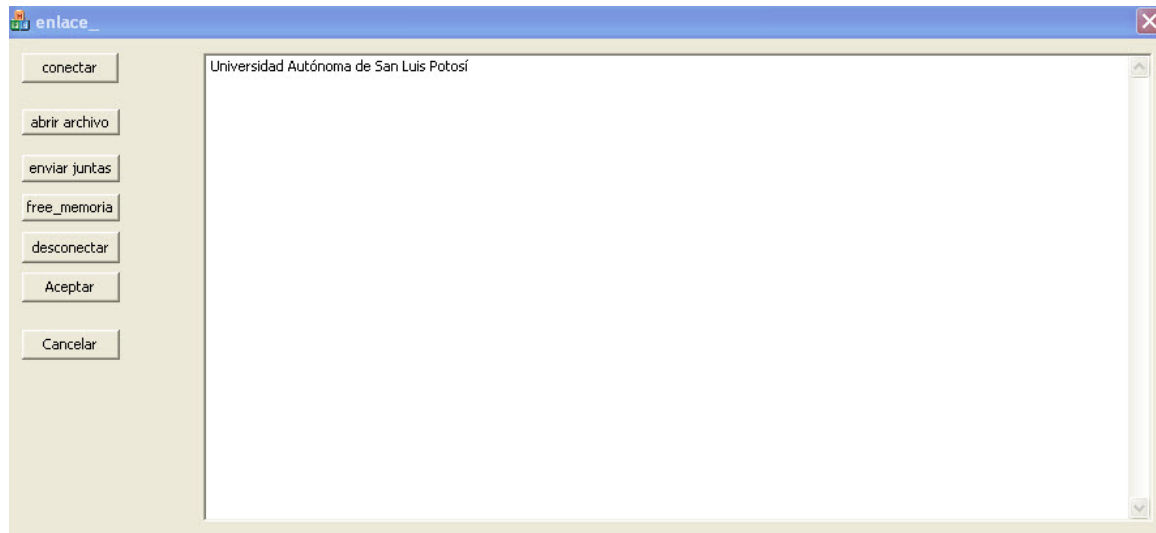


Figura 3.7: Interfaz gráfica que envía valores articulares

Para verificar la comunicación con el esclavo, se desarrolló una interfaz gráfica bajo la plataforma Windows, en Visual C 2008. Esta interfaz se muestra en la figura 3.7 y controla al esclavo en forma remota, de la siguiente manera:

1. Se establece la comunicación con el control del esclavo, creando el cliente en el maestro y el servidor en el esclavo;
2. Se lee el archivo que contiene los datos articulares  $(J_1, \dots, J_6)$ ;
3. El maestro envía a través de la red los datos articulares  $(J_1, \dots, J_6)$  al esclavo;
4. El esclavo recibe la posición y orientación proveniente de los datos recibidos;

5. El esclavo se desplaza a dicha posición;
6. El esclavo retroalimenta al maestro, vía red, la realización del movimiento;
7. El maestro recibe la retroalimentación y continua ejecutando el programa;
8. Si hay más valores, se vuelve al paso 3, de lo contrario finaliza el programa;
9. Finalizar comunicación con el sistema remoto;

Para comprobar la manipulabilidad descrita anteriormente, se toman los valores de posición  $[676.66, 537.43, -1400]mm$  y  $(101, 88.238, 62.887)$  para la orientación. Usando la interfaz gráfica descrita anteriormente y con los valores articulares mostrados en la tabla 3.1 pertenecientes a dicha posición, para cada punto de óptimo se tiene:

<b>Articulaciones</b>	<b>óptimo=-48</b>	<b>óptimo=66</b>
$J_1$	134.3150784	941.3339501
$J_2$	105.7366530	106.2530289
$J_3$	51.4754996	49.3325340
$J_4$	70.9181982	-65.3570104
$J_5$	65.0639665	65.2743976
$J_6$	-47.5873082	45.1380701

Tabla 3.1: Datos articulares que representan los dos óptimos

La figura 3.8 muestra las configuraciones de máxima manipulabilidad para la posición  $[676.66, 537.43, -1400]mm$ . Puede notarse que estas configuraciones se pueden contrastar con las ya analizadas en la figura 3.6, en la cual son correspondientes a las realizadas en simulación. Además toman las mismas posiciones articulares, tanto en simulación como en comunicación con el esclavo.

Una vez que se cuenta con la comunicación entre el maestro y el esclavo, se desarrolla una interfaz gráfica, que además de realizar la comunicación, permita el procesamiento de datos provenientes de los sensores y el envío de datos hacia el esclavo en procesos diferentes. Esto se realiza mediante



(a) Posición óptima cuando  $\alpha = 66$



(b) Posición óptima cuando  $\alpha = -48$

Figura 3.8: Posiciones de máxima manipulabilidad del robot industrial M16iB.

la programación de threads y semáforos; característica de algunos sistemas operativos, la cual permite trabajar subprocesos concurrentemente. Esta programación también se desarrolla bajo la plataforma Windows y en el software Visual C 2008. La secuencia de ejecución de manera general tiene la forma indicada en la tabla 3.2.

Tabla 3.2: Secuencia de comunicación

---

- 1 Se inicializan los sensores;
- 2 Se calibran los sensores bajo el esquema mencionado en [2.3.2](#);
- 3 Se establece la comunicación con el control del esclavo, creando el cliente en el maestro y el servidor en el esclavo;
- 4 Se activa la captura de los datos provenientes de los sensores y la creación de los subprocesos;
- 5 Se comienza la captura de la posición y orientación de los sensores  $(x, y, z, W, P, R)$ ;
- 6 Se procesan los datos capturados mediante la cinemática inversa;
- 7 El maestro envía por red los datos articulares  $(J_1, \dots, J_6)$  al esclavo;
- 8 El esclavo recibe la posición y orientación proveniente de los datos recibidos;
- 9 El esclavo se mueve a dicha posición;
- 10 El esclavo retroalimenta al maestro vía red, que realizó el movimiento, esto se hace mediante banderas;
- 11 El maestro recibe la retroalimentación y continua ejecutando el programa;
- 12 El maestro procesa los datos articulares por medio del modelo directo;
- 13 El maestro devuelve la posición  $(x, y, z)$  y la orientación  $(W, P, R)$  a la que el robot esclavo debe estar llegando;
- 14 Se vuelve al paso 5;
- 15 Finaliza la captura de datos de posición y orientación de los sensores;
- 16 Finalizan los threads;
- 17 Se guarda la información obtenida del modelo directo.

## 3.5 Conclusiones preliminares

En este capítulo se desarrolla el modelo directo e inverso del manipulador, dando énfasis a este último, ya que de él depende el control cinemático del esclavo. Además se presenta la manipulabilidad, particularmente del robot M-16iB 20T. Dicho robot presenta dos máximos locales, es decir, puede adoptar dos configuraciones de máxima manipulabilidad local, que deben tomarse en cuenta al seleccionar la configuración óptima o de máxima manipulabilidad. Dicho en otras palabras, al obtener su manipulabilidad se

### CAPÍTULO 3. MANIPULABILIDAD DEL ROBOT INDUSTRIAL

---

generan dos configuraciones articulares; una que es un máximo global y la otra que es un máximo local, por lo tanto, la selección de la configuración articular dependerá de ciertos factores que se discutirán a detalle en el siguiente capítulo. También se muestra la comunicación entre el maestro y el esclavo, y se realiza una comparativa entre los resultados obtenidos con el robot y los resultados que se obtienen con las simulaciones. Por lo tanto, se puede concluir que se tiene listo un esquema unilateral para controlar el esclavo a distancia. Cabe mencionar que no se han desarrollado trayectorias, sólo puntos específicos, y es de esperarse un retardo de tiempo en la comunicación entre dispositivos, lo que hasta el momento no repercute en las pruebas, debido al tipo de datos enviados con que se experimenta. Un análisis más detallado se presenta en el siguiente capítulo.

### 3.5. CONCLUSIONES PRELIMINARES

---



# Capítulo 4

## Resultados Experimentales

### 4.1 Retardo de comunicación

#### 4.1.1 Sincronización Maestro-Esclavo

Uno de los problemas principales en la comunicación entre el manipulador esclavo y el maestro es el retardo de tiempo. Este problema es causado por el tipo de enlace en que se realiza, debido a que no se tiene acceso a las señales de control del robot esclavo, lo que no hace posible la utilización de herramientas de estabilización de retrasos de tiempo en el canal de comunicación. Por lo tanto, la comunicación entre el manipulador esclavo y el maestro queda sujeta a la rapidez con la que el control del manipulador esclavo puede recibir y enviar la información.

Otro de los problemas que también repercute en la comunicación es el hecho de que la tasa de muestreo en la captura de datos sea más rápida con respecto a los datos que el robot puede ejecutar en la teleoperación. Es decir, el problema que se presenta es una saturación de datos y el robot esclavo suspende la comunicación al no responder adecuadamente. La tabla 4.1 muestra un análisis estadístico del tiempo promedio en que se obtiene la captura de datos por cada sensor de posición tridimensional trakStar.

Debido a que la programación es mediante threads, es decir, que mientras un subproceso se encarga de procesar los datos, otro subproceso envía datos al robot por medio de la red local, pero la captura de datos es mucho más rápida que el envío de datos. Es un promedio de 351 microsegundos por dato, lo que repercute en una saturación de envío de datos, por lo tanto no es posible lograr la comunicación. La solución a este problema es imponer un

Tabla 4.1: Tiempo de captura

---

Muestra	82620 datos
Promedio	0.000351 <i>s</i>
Mediana	0.000349 <i>s</i>
Desviación estándar	0.000145 <i>s</i>

filtrado de tiempo, es decir, que en cada lapso de tiempo se debe hacer una captura por parte del subproceso que atiende este proceso y así poder enviar al robot esclavo el dato que contiene la posición deseada. Un tiempo promedio mínimo al que el robot responde y pueda mantener la comunicación es de 100 milisegundos. Cabe mencionar que este tiempo fue obtenido a prueba y error, debido al interés de lograr el intercambio de datos, es decir, lograr la teleoperación.

### 4.1.2 Retraso de tiempo en la comunicación

Uno de los problemas presentes es el retraso de tiempo entre la comunicación de los sistemas maestro y esclavo (esto se puede notar en los pasos 8 al 10 mencionados en la tabla 3.2 de la sección 3.4.1 del capítulo anterior), debido a que el maestro no envía el nuevo dato hasta que el esclavo llega al punto recibido, y este factor también depende de la velocidad a la que ejecute las tareas el robot esclavo, repercutiendo directamente en la respuesta del robot esclavo con la generación de trayectorias por parte del maestro; por lo tanto, es de interés medir dicho retraso cuando se ejecuta la teleoperación.

La tabla 4.2 muestra los datos más relevantes de un análisis de tiempo en el que tarda en ejecutarse la comunicación, es decir, desde que el maestro envía el dato y el esclavo retroalimenta la finalización del punto alcanzado.

Estos datos fueron medidos de tal manera que la teleoperación fuera estática, es decir, el maestro queda estático en un solo punto y envía los datos de la posición deseada; durante este lapso se mide el tiempo de respuesta. Puede notarse que hay un retraso promedio de 566 milisegundos para la comunicación inalámbrica y 391 milisegundos para la comunicación por cable. Como resultado de este análisis se puede pensar que cada que el maestro genere un punto durante una trayectoria, el esclavo ejecutará la posición 500

## CAPÍTULO 4. RESULTADOS EXPERIMENTALES

Tabla 4.2: Retraso de comunicación para un solo punto

	Inalámbrica	Por Cable
Muestra	64 datos	81 datos
Promedio	0.566250 s	0.391296 s
Mediana	0.614000 s	0.367000 s
Desviación estándar	0.089214 s	0.164424 s

ó 400 milisegundos de diferencia con respecto al maestro.

Otra prueba importante es medir el tiempo de retraso cuando se generan trayectorias. La figura 4.1 muestra la simulación de los datos recolectados de la teleoperación, es decir, se guardan los valores articulares enviados al esclavo y se realiza la simulación con estos valores. Para la prueba se generan dos líneas como trayectorias y se mide el tiempo de ejecución de la serie de puntos que forman dicha trayectoria. En la tabla 4.3 se muestran, de manera similar a la anterior, los datos más importantes de la medición de tiempo de dicha trayectoria.

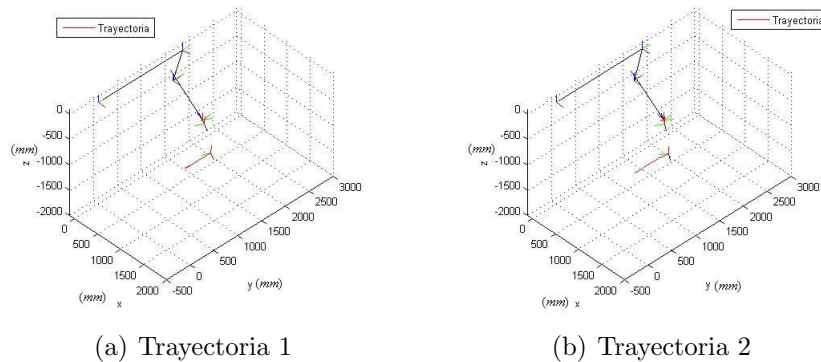


Figura 4.1: Simulación de trayectorias

Puede notarse que el retraso en promedio<sup>1</sup> es de 800 milisegundos para la

<sup>1</sup>Estas pruebas son bajo condiciones de comunicación inalámbrica; para pruebas con cable de red el promedio es de 600 y 800 milisegundos

Tabla 4.3: Retraso de comunicación de dos trayectorias

	<b>Trayectoria 1</b>	<b>Trayectoria 2</b>
Muestra	41 datos	35 datos
Promedio	0.796268 s	0.970200 s
Mediana	0.819000 s	1.024000 s
Desviación estándar	0.218544 s	0.324713 s

trayectoria 1 y 900 milisegundos para la trayectoria 2, y esto era de esperarse, debido a que la retroalimentación del esclavo es hasta que llega al punto deseado y, además, no se tiene control de la velocidad del enlace maestro. Dicho de otra manera, el humano no hace una réplica del movimiento ni la rapidez con la que lo ejecuta, cuando manipula al maestro y esto repercute en la variación de distancia que tiene que recorrer el esclavo. Por lo tanto, se puede decir que el retraso no es menor a los 600 milisegundos y es variante de acuerdo a la velocidad con que se manipule el maestro.

## 4.2 Optimización de la manipulabilidad

Uno de los objetivos de este proyecto es tener un esquema de teleoperación unilateral robusto y una de las formas de colaborar con este objetivo es a través del posicionamiento del robot de manera óptima en las maniobras por realizar. También se logra a través de los movimientos suaves y seguros hacia el robot esclavo, en este caso el robot Fanuc M16iB. Por otro lado, los retrasos de comunicación existentes son un problema importante en los sistemas de teleoperación, debido a que el sistema propuesto tiene muchas limitantes, por lo que se tiene que adaptar a la técnica de *move and wait*<sup>2</sup> [39] para no desestabilizar el sistema de teleoperación; de ahí que los algoritmos de programación en la selección de la configuración óptima deben ser eficientes en cuanto al tiempo de selección de la mejor postura.

Entonces, dado que el robot cuenta con dos posiciones de máxima manipulabilidad local en cada configuración, es necesario hacer la búsqueda

---

<sup>2</sup>En ésta técnica el operador genera una trayectoria realizando pequeños retrasos de tiempo durante la transición de la misma.

de dichas configuraciones articulares a través de algoritmos de optimización unidimensional. En el apéndice D.2 se describe la teoría de un algoritmo de optimización usado en este proyecto.

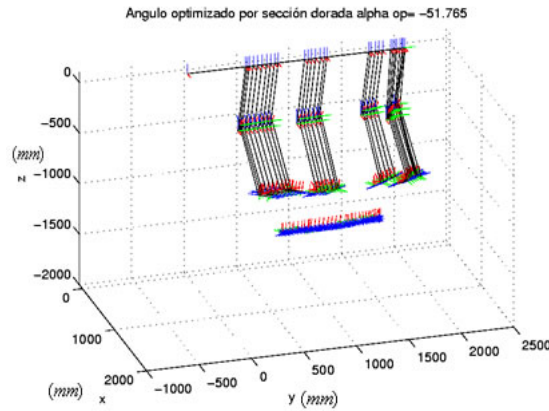
### 4.2.1 Implementación de algoritmo de optimización

Una vez implementado el algoritmo de optimización en el esquema de teleoperación, se pueden generar trayectorias y comprobar la funcionalidad del desarrollo teórico descrito anteriormente. Una forma de verificar esta funcionalidad es mediante la simulación, esto con la finalidad de ver cómo deberá responder el robot esclavo. Se genera una trayectoria simple con el enlace maestro (ya integrado el algoritmo de optimización) y no se envían los datos de posición articular al robot, sino que se guarda en un archivo, el cual se lleva a Matlab. La figura 4.2(a) muestra las configuraciones óptimas para ciertos puntos de una trayectoria y se puede notar que hay 3 posiciones del robot en las que se observa un cambio abrupto en la configuración del robot, lo cual indica que estas posibles configuraciones no son benéficas. Esto sucede porque de un punto anterior con el siguiente se presenta un cambio de signo cuando detecta un cambio en la configuración óptima (como se mostró en la sección 3.4), es decir, el cambio de ángulo es de positivo a negativo en un sólo movimiento, representado directamente en la primera articulación ( $J_1$ ). El cambio de posición en esta articulación no se realiza de manera suave, afectando el esquema de teleoperación.

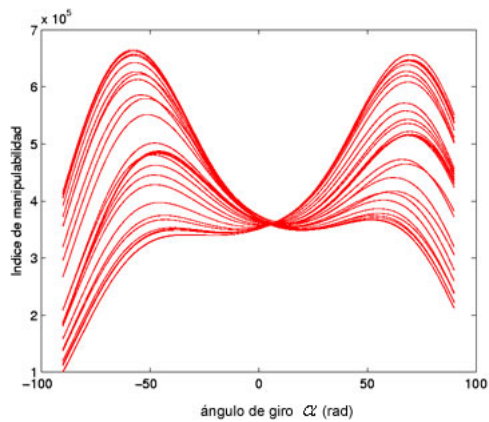
La figura 4.2 (b) muestra las gráficas de manipulabilidad que tiene cada punto en la trayectoria. Estas dos crestas representadas en cada gráfica también están íntimamente ligadas al ángulo de giro alrededor del eje  $z$  (no así a los ejes  $x, y$ ), unido al sistema coordenado de la herramienta sostenida por el usuario (ver figura 4.3), de modo que cada vez que el operador manipule el maestro sobre este ángulo, una de las crestas crecerá más rápido y esto depende del signo del ángulo con que se gire (positivo o negativo). Esto repercute directamente en la tarea del robot esclavo, dado que el algoritmo de la sección dorada presenta alta sensibilidad en la localización de los puntos intermedios.

El inconveniente de este algoritmo (que es un proceso iterativo) es que no siempre encuentra un máximo global, dado que la función a optimizar dada por la ecuación 3.18, que representa la manipulabilidad del robot esclavo, tiene un máximo global y otro local, lo que proporciona como resultado dos posibles configuraciones. La selección del índice máximo depende de

## 4.2. OPTIMIZACIÓN DE LA MANIPULABILIDAD



(a) Trayectoria del robot



(b) Gráficas de Manipulabilidad

Figura 4.2: Manipulabilidad y trayectoria del robot industrial M16iB.

los puntos intermedios localizados por el algoritmo, lo cual determina la configuración de máxima manipulabilidad. Esto afecta directamente en el movimiento suave del robot esclavo; es decir, cuando el robot esclavo se lleva a una sola posición, el algoritmo es muy eficiente, dado que interesa llevar al esclavo a ese punto y no importa cual configuración óptima se tiene. Sin embargo, cuando se lleva al robot esclavo a través de una trayectoria, el algoritmo tiene brincos entre los máximos locales para cada punto de la trayectoria. Esto representa movimientos no suaves en el robot esclavo y, debido al tipo de junta en la primera articulación, existe una repercusión de

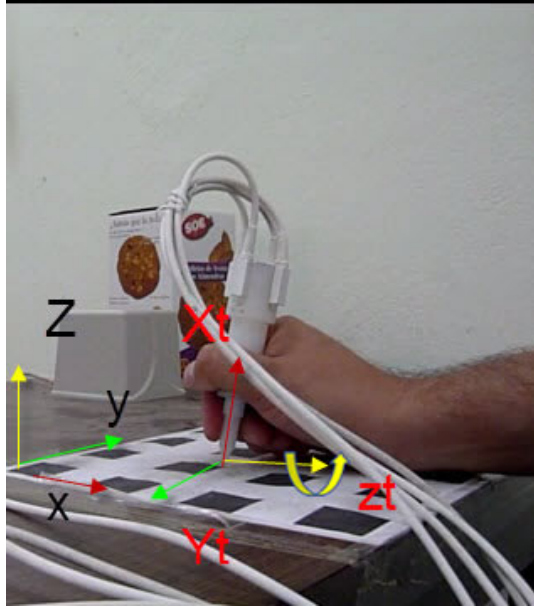


Figura 4.3: Sistema coordenado en la punta del maestro

manera perjudicial hacia el robot esclavo, por lo tanto, en estas condiciones no es favorable el seguimiento de trayectorias con el robot esclavo.

### 4.3 Ponderación de funciones

Dado el problema descrito anteriormente, al presentarse dos máximos locales en el índice de manipulabilidad y al hacer el barrido alrededor del ángulo  $\alpha$  de la figura 3.3, no es posible la implementación en el esquema de teleoperación. Se propone entonces usar una función estadística denominada “*Distribución Gaussiana*” [41], donde la función de densidad normal viene dada por:

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\sigma}} e^{\frac{-(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} \quad (4.1)$$

Donde  $\sigma$  es la desviación estándar de la función,  $\mu$  es el promedio de la función.

### 4.3. PONDERACIÓN DE FUNCIONES

Una vez especificados  $\sigma$  y  $\mu^3$  se puede tener la función que va a ponderar la función que representa la manipulabilidad en el robot. Dicha operación se realiza a través de una multiplicación de funciones dada por:

$$w_f = w(J(\theta)) * f(x) \quad (4.2)$$

Lo que se espera con esta ponderación es filtrar una de las crestas en función de la manipulabilidad y así obligar a tener un solo máximo. Al afectar de esta manera al índice de manipulabilidad, se sacrifica el trabajar con máximos globales, pero en pro de obtener una operación suave del robot dentro del esquema de teleoperación.

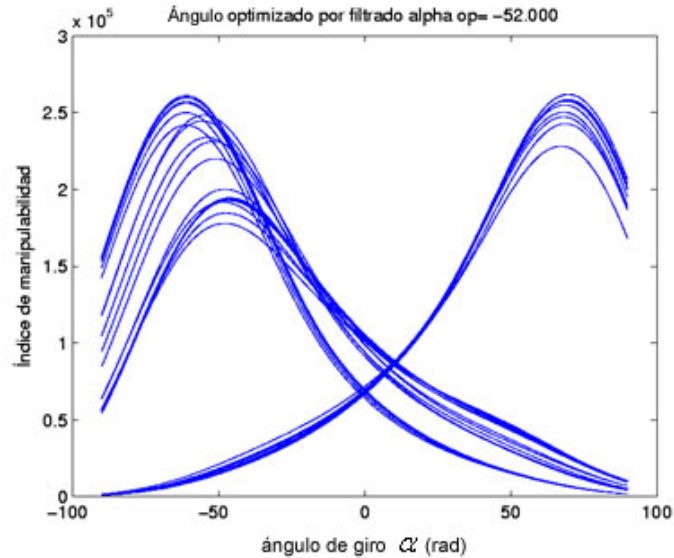


Figura 4.4: Funciones ponderadas

La figura 4.4 muestra la función de manipulabilidad ya ponderada; esta gráfica se obtuvo mediante todos los máximos globales de la trayectoria mostrada en la figura 4.2. Puede notarse que sólo hay dos crestas, una predominante sobre el lado positivo del ángulo  $\alpha$  y otra de la misma manera sobre el lado negativo de dicho ángulo; es decir, cada función representa una configuración óptima para cada punto de la trayectoria.

---

<sup>3</sup> $\mu$  es el promedio y un parámetro conocido, en este caso tomaría el valor del ángulo óptimo.



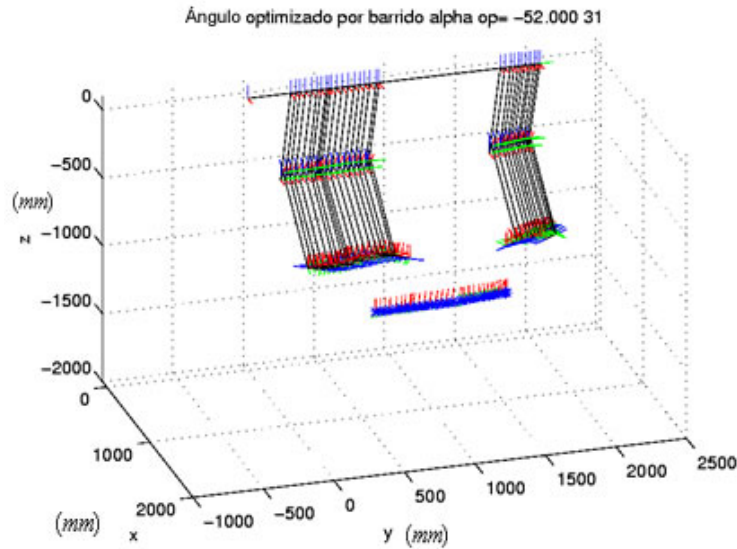


Figura 4.5: Configuración óptima

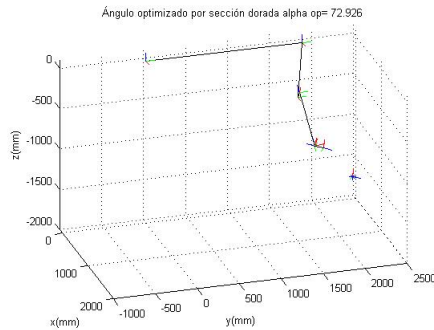
Si se usan los puntos máximos obtenidos por medio de la sección dorada de esta función -mostrada en la figura 4.4- y se grafican, se obtiene la secuencia de configuraciones mostrada en la figura 4.5, en la cual puede notarse que predominan sólo 2 familias de configuraciones óptimas que se deben al movimiento generado alrededor del eje  $z$  del sistema coordenado unido a la herramienta. Se observa que siguen existiendo movimientos abruptos al seguir la trayectoria. Una alternativa sería obligar a que el índice de manipulabilidad trabaje solo de un lado óptimo, es decir, ya sea cuando el ángulo  $\alpha$  tome solo el valor positivo o solo el negativo, sin embargo, se tendría mayor desventaja dado que no todas las maniobras se podrían ejecutar bajo la misma configuración.

La solución propuesta refleja una mejora en la manera que se pondera la nueva función y permite tener sólo un máximo en la función la cual, ante el algoritmo de optimización, presenta mayor rapidez en la búsqueda del máximo, así como ahorro en tiempo de ejecución lo cual, ante el esquema de teleoperación, es benéfico. El inconveniente es que se siguen teniendo dos crestas sujetas a los cambios del ángulo de orientación  $R$  referentes al eje  $z^4$  del maestro, es decir, el cambio de signo en la orientación repercute

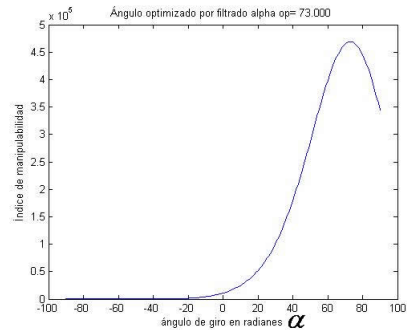
<sup>4</sup> Visto desde la perspectiva de los ángulos de orientación " $W, P, R$ " en el sistema

### 4.3. PONDERACIÓN DE FUNCIONES

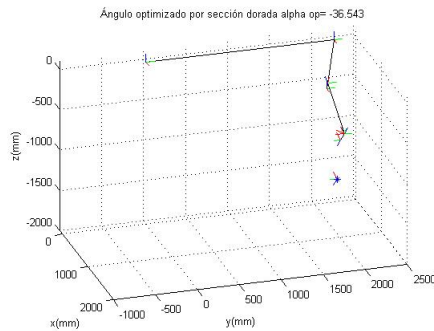
directamente en el incremento de un máximo ponderado, de ahí que este máximo ponderado corresponda a otra configuración óptima, por lo que se tienen de nuevo los cambios abruptos perjudiciales al sistema de teleoperación actual como se muestra en la figura 4.6.



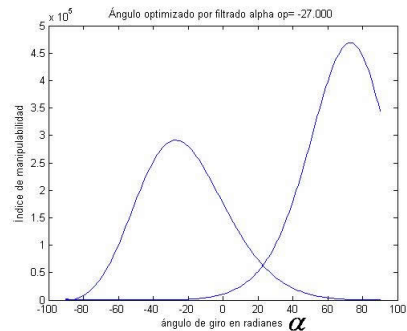
(a) Configuración 1



(b) Gráfica de Manipulabilidad ponderada



(c) Configuración 2



(d) Gráfica de Manipulabilidad ponderada

Figura 4.6: Posiciones óptimas obtenidas por un barrido.

coordenado unido a la herramienta del robot esclavo

## CAPÍTULO 4. RESULTADOS EXPERIMENTALES

La manera de lidiar con esta situación es mediante una transición suave entre los cambios de configuración articular. Una de las soluciones encontradas al problema de transiciones abruptas es integrar un filtrado Gaussiano directamente en la búsqueda del máximo, con esto se espera que el ángulo óptimo filtrado se recorra de manera suave, debido a la sensibilidad del algoritmo.

La figura 4.7 muestra la implementación, en el algoritmo, de la sección dorada y el filtro de Gauss. En ésta se utilizó la misma trayectoria que se mostró en la figura 4.6.

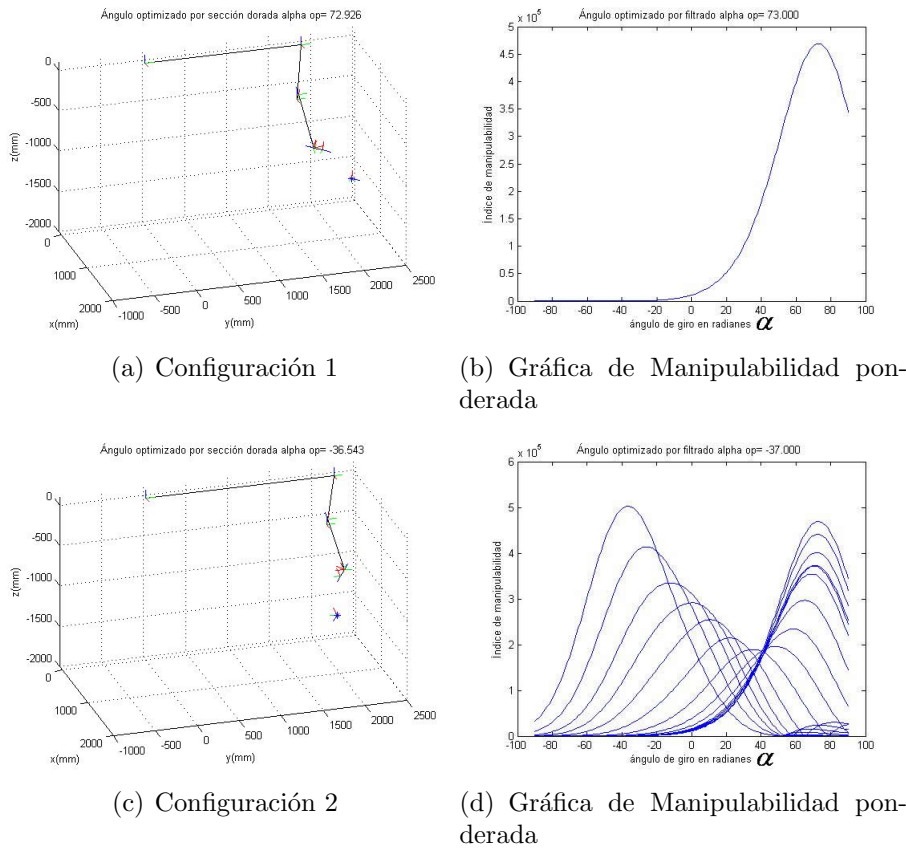


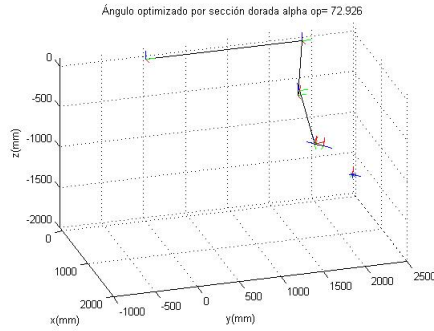
Figura 4.7: Posiciones óptimas con integración de función ponderada con  $\sigma=0.5$

La figura 4.7 (a) muestra la configuración óptima cuando el ángulo que reconfigura los valores articulares es positivo, mientras que en la figura 4.7 (b) se muestra la función ponderada a optimizar correspondiente a la

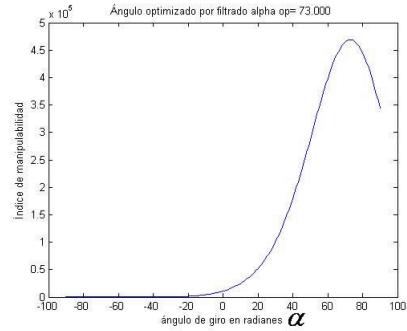
### 4.3. PONDERACIÓN DE FUNCIONES

configuración anterior.

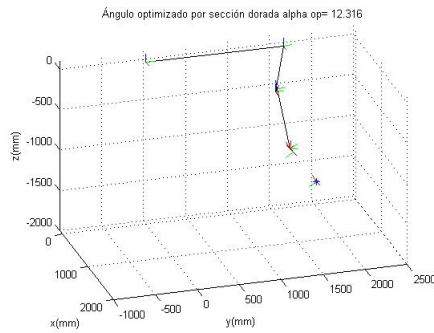
En la 4.7(c) se muestra el cambio de configuración articular. La correspondiente función ponderada a optimizar se muestra en la figura 4.7 (d). En esta misma figura, con un valor de  $\sigma = 0.5$  en el filtro gaussiano, se puede notar que tomó una serie de transiciones para pasar de una configuración a otra. Por lo tanto, se tiene un paso de un lado positivo de la función a uno negativo de manera suave y no abrupta. Es decir, el paso de cambio del ángulo positivo a negativo es transitorio, tomando varios valores intermedios. Además, el valor de  $\sigma$  de la ecuación 4.1 determina el ancho de la función y, variando este valor, es posible controlar la sucesión transitoria del cambio de posición de máxima manipulabilidad en el robot esclavo.



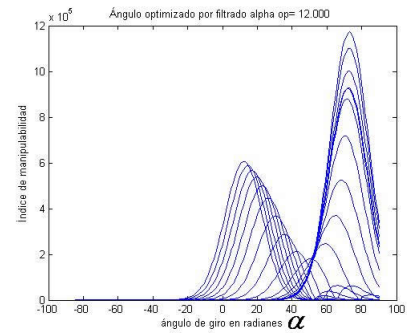
(a) Configuración 1



(b) Gráfica de Manipulabilidad ponderada



(c) Configuración 2



(d) Gráfica de Manipulabilidad ponderada

Figura 4.8: Posiciones óptimas con integración de función ponderada con  $\sigma=0.2$

Partiendo del mismo punto que las figuras anteriores, en la figura 4.8, usando un valor de  $\sigma = 0.2$ , se puede notar que la curva filtrada es más cerrada y el paso de un ángulo  $\alpha$  de positivo a negativo es a través de incrementos pequeños, lo cual hace que el movimiento se ejecute de manera suave; incluso en la figura 4.8 (c) se puede ver que el robot esclavo no adopta una configuración invertida como la vista en la figura 4.7 (c). De ahí, se puede decir que, variando el parámetro  $\sigma$ , se tiene el control de cambio de signo del ángulo  $\alpha$  permitiendo la teleoperación suave deseada. Por lo tanto, esta solución propuesta es factible para establecer la comunicación y realizar la teleoperación directamente con el esclavo.

### 4.4 Sistema de teleoperación

Los sistemas de teleoperación han sido diseñados como extensiones seguras para el humano. Además, las tareas a realizar no son repetitivas y se efectúan en ambientes hostiles o inaccesibles. El diseño de robots especializados son demasiado caros y de una sola aplicación; es donde tienen ventaja los robots industriales, dado que se puede cambiar el efector final y tener un sistema útil en varias aplicaciones. En el presente proyecto se pretende abordar un sistema unilateral a lazo abierto, en el que no existe retroalimentación alguna. Este sistema está basado en un control cinemático, del cual ya se ha hecho su descripción anteriormente. Este sistema propuesto tiene la finalidad de utilizar robots industriales en operaciones de teleoperación, haciendo uso de su máxima manipulanilidad para dichas operaciones; además el robot esclavo debe seguir al maestro de manera suave y segura. El sistema propuesto funciona bajo un método de manipulación directa [43], es decir, cuando el operador tiene visibilidad total del manipulador y del efector final. El ejemplo más sencillo es cuando hay una cabina con divisiones de cristales para proteger al operador. Para comprobar la operación óptima del sistema propuesto se adquieren las posiciones alcanzadas por el robot esclavo en tiempo real, con la finalidad de hacer gráficas y simulaciones del comportamiento del mismo con respecto al maestro.

#### 4.4.1 Variabilidad de altura

La validación de parte del sistema unilateral se realiza mediante la comprobación de la solución a la asimetría existente. Recordando la sección 2.3, cuando se calibra el sistema maestro, se le tiene que indicar la altura por medio del modelo directo a la que inicialmente va a estar trabajando el sistema, y es de esperar que haya variabilidad en la coordenada  $z$  debido a las características de los robots industriales, ya que estos cuentan con buena repetibilidad y no precisión. La tarea a realizar es la generación de un plano  $x - y$ , en donde la coordenada en  $z$  del robot esclavo debe estar a  $-1400\text{mm}$ .

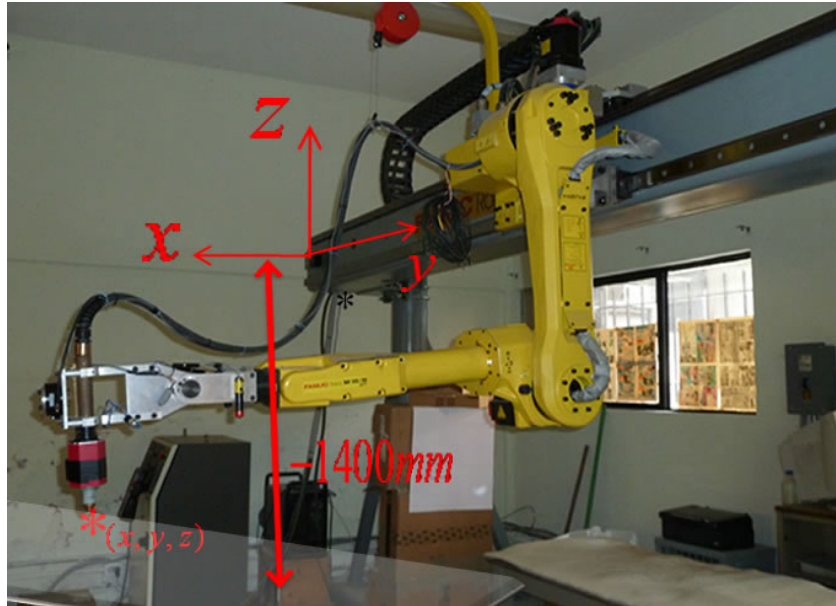
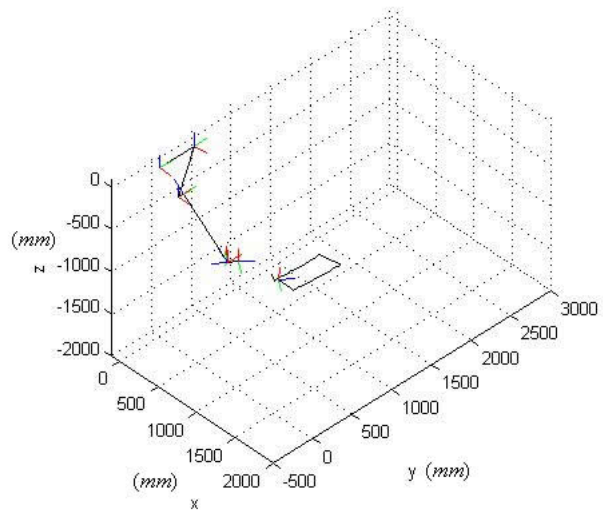
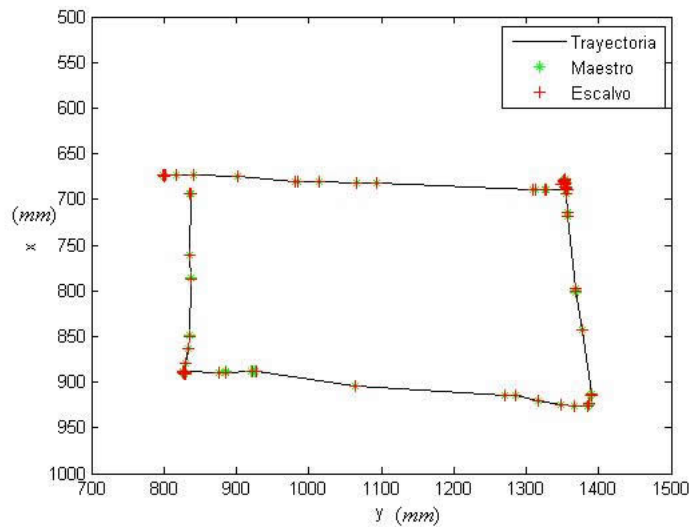


Figura 4.9: El espacio de trabajo en  $z = -1400$

La figura 4.9 muestra la localización del sistema coordinado en la base del robot. Durante la ejecución de la tarea, el sistema esclavo debe seguir al maestro manteniendo constante la coordenada en  $z$ , es decir a  $-1400$  milímetros.



(a) Simulación de la trayectoria



(b) Seguimiento del esclavo

Figura 4.10: Respuesta del esclavo

La figura 4.10 muestra la respuesta en simulación del esclavo ante el maestro. Para realizar la simulación se recolectaron los datos de la

teleoperación en tiempo real y estos datos se llevan a través del modelo directo para obtener la trayectoria que el esclavo realizó. En la figura 4.10 (b) se muestra una comparativa de las trayectorias generadas y se puede notar que los puntos alcanzados por el esclavo en el plano  $x - y$  son los mismos que el maestro, por lo tanto, el esclavo sigue fielmente al maestro. La tabla 4.4 muestra un análisis estadístico de la respuesta en la coordenada  $z$ , y se puede notar que es despreciable la variación. Se puede decir que el robot esclavo está trabajando a  $-1400$  milímetros, en donde se desea que trabaje, por lo tanto, se puede concluir que el esclavo responde adecuadamente.

Tabla 4.4: Variación del plano generado respecto al maestro con el esclavo

---

No. de Muestras	66
Promedio	-1399.9993939
Mediana	-1399.9995000
Desviación estándar	0.0062484
Máximo	-1399.9800000
Mínimo	-1400.0110000

#### 4.4.2 Variabilidad estática

Otra de las pruebas necesarias para evaluar la respuesta del sistema unilateral, es orientar al robot esclavo manteniendo fija la posición tridimensional del extremo de la herramienta, es decir, el maestro se orientará de diferentes maneras mientras mantiene fija la posición  $x, y, z$  de la punta de la antorcha en el área de trabajo. La figura 4.11 muestra algunas de las diferentes orientaciones que el robot esclavo adquirió, durante la teleoperación para dicha prueba. Cabe mencionar que estas orientaciones son en condiciones de máxima manipulabilidad filtrada, con  $\sigma = 0.5$ .

La tabla 4.5 muestra la variación de la posición referente a las orientaciones mostradas en la figura 4.11 tanto para el maestro como el esclavo. Puede notarse que la variabilidad en el maestro solo es percibida en el plano  $x - y$ , ya que su coordenada en  $z$  se mantiene constante, puesto que la coordenada  $z$  del maestro es cero, debido a la calibración del plano,

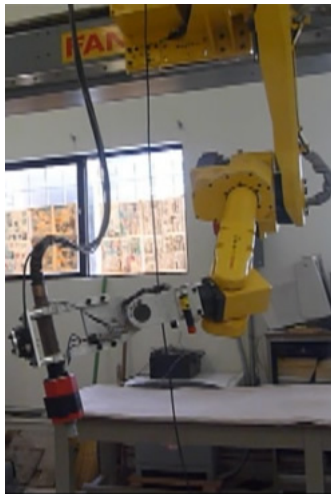




(a) Orientación 1



(b) Orientación 2



(c) Orientación 3



(d) Orientación 4

Figura 4.11: Diferentes orientaciones de la punta de la herramienta para la misma posición tridimensional

como se vio en la sección 2.4.1. En cuanto la variabilidad del esclavo ésta es incrementada debido al factor de escalamiento usado.

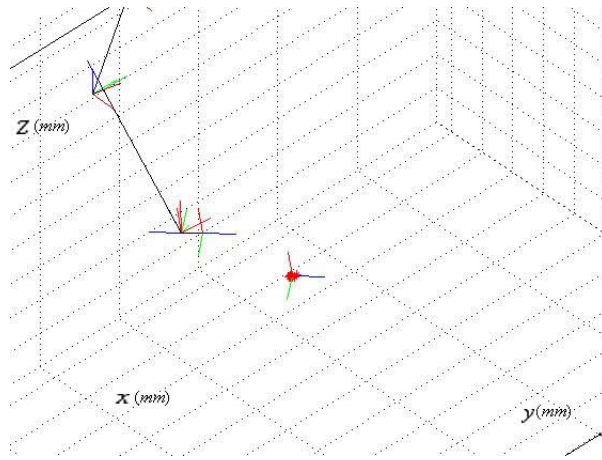
La figura 4.12 muestra la simulación de los datos obtenidos del esclavo correspondientes a la tabla anterior. La figura 4.12 (a) muestra el punto fijo

Tabla 4.5: Variabilidad para un solo punto

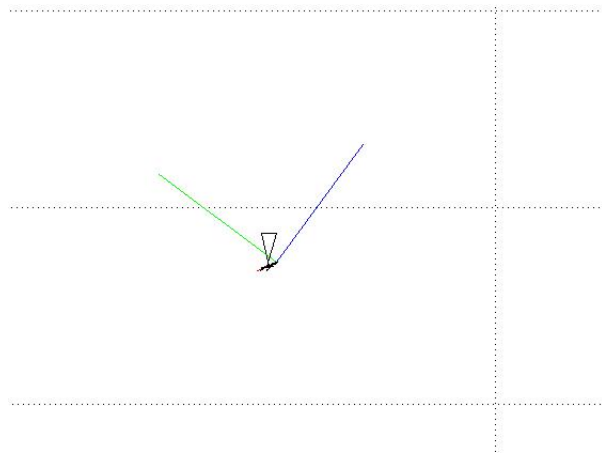
<b>Maestro</b>	x ( <i>mm</i> )	y ( <i>mm</i> )	z ( <i>mm</i> )
Promedio	73.3563854	126.9254375	0
Mediana	73.3485	127.07	0
Desviación estándar	0.2707277	0.4323206	0
<b>Esclavo (<i>mm</i>)</b>	x ( <i>mm</i> )	y ( <i>mm</i> )	z( <i>mm</i> )
Promedio	737.2360212	1269.5482751	-1399.7096243
Mediana	737.166	1269.996	-1399.997
Desviación estándar	5.5297195	4.5533393	0.3695823

sobre el cual se realiza la tarea de orientación del robot, en la cual se puede notar que el punto rojo es estático. La figura 4.12 (b) muestra una ampliación del sistema coordinado adjunto a la herramienta visto desde abajo. Se puede notar que no es un sólo punto y hay movimiento. Recordando los datos de la tabla 4.5, el esclavo tiene mayor variabilidad representativa en el plano  $x - y$ . Y esto es debido a que internamente el control del robot realiza una interpolación articular para posicionarse en el punto deseado, así que cada movimiento que ejecuta el robot esclavo tiene un ligero movimiento antes de posicionarse en el mismo punto. Esto no repercute cuando se realizan trayectorias, por lo tanto es aceptable. Esto se aborda en la siguiente sección.

Por otro lado, no hay que perder de vista que el sistema unilateral usado es a lazo abierto, por lo que no se tiene retroalimentación de la posición, así que es normal que exista un poco de sesgo en la precisión, como se muestra en la figura 4.12 (b).



(a) Simulación de la posición



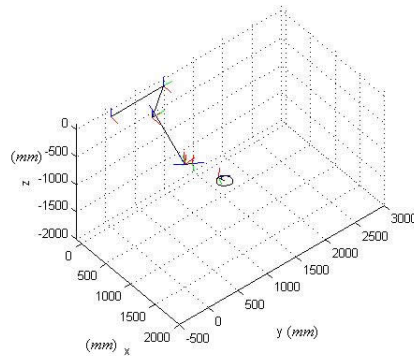
(b) Posición vista desde abajo, plano  $x - y$

Figura 4.12: Respuesta del esclavo para un punto fijo

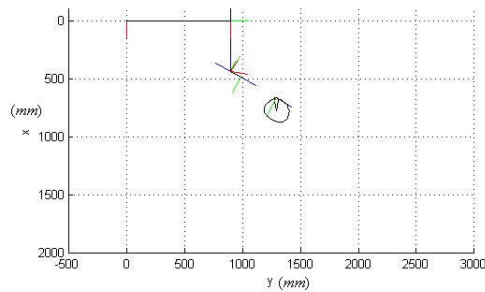
### 4.4.3 Eficacia del dispositivo maestro

Para medir la eficacia del maestro, se realiza la tarea de generar una trayectoria que represente una figura geométrica conocida y que sea sencillo medir su variabilidad por medio de un parámetro conocido. La tarea propuesta es la generación de un círculo de 10 milímetros de radio para el maestro, lo que se traducirá en un círculo de 100 milímetros de radio para el robot esclavo. Una vez adquiridos los datos de la retroalimentación del

robot esclavo, se llevan a la simulación, y lo que se estaría graficando son los puntos alcanzables reales del esclavo. La figura 4.13 muestra la reproducción del esclavo en el plano  $x - y$  iniciando la tarea desde el centro del círculo.



(a) Simulación del círculo

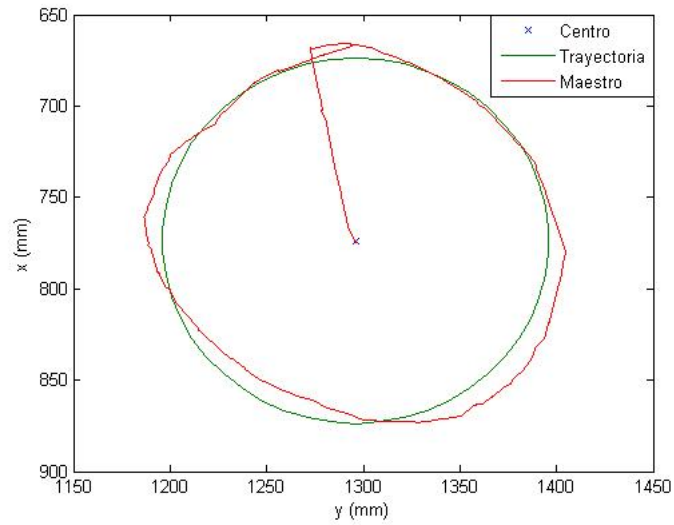


(b) Vista superior

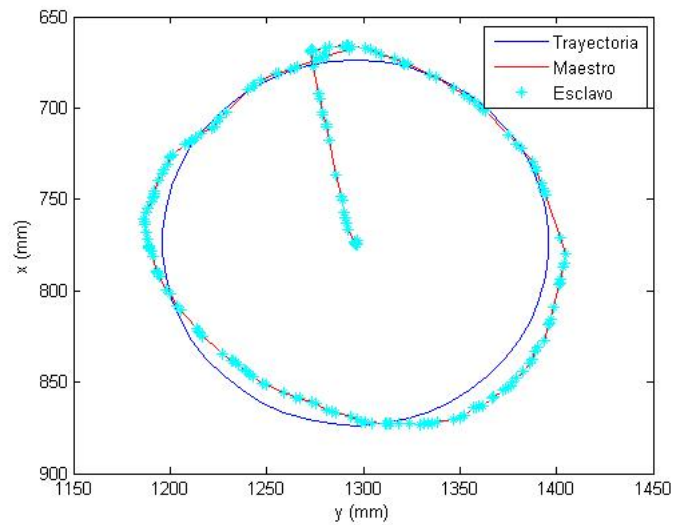
Figura 4.13: Simulación de trayectoria circular

La figura 4.14 (a) muestra la comparación del seguimiento del maestro a la tarea puesta. Puede notarse que la reproducción no es fiel, siendo un factor muy importante la variación impuesta por el operador al no tener la habilidad suficiente para manipular la herramienta del enlace maestro. Sin embargo, el seguimiento puede mejorar con el desarrollo de práctica.

Escalando las coordenadas de posición del maestro, la figura 4.14 (b) muestra el seguimiento del robot esclavo ante éste y puede notarse que, a pesar de la variabilidad mencionada en secciones anteriores, el esclavo



(a) Seguimiento del maestro



(b) Seguimiento del esclavo

Figura 4.14: Seguimiento de trayectoria: círculo

reproduce de manera fiel la trayectoria generada por el maestro. La tabla 4.6 muestra la desviación estándar del radio, tanto para el maestro como para

el esclavo, con respecto al parámetro conocido, para este caso el radio del círculo. Los datos de esta tabla se obtuvieron a partir del centro conocido, es decir, la tarea la inicia el maestro partiendo del centro del círculo propuesto.

Tabla 4.6: Variabilidad del radio en el seguimiento de trayectoria

	Variabilidad Maestro	Variabilidad Esclavo
Media	10 <i>mm</i>	100 <i>mm</i>
Desviación estándar	0.6789 <i>mm</i>	6.8084 <i>mm</i>

De modo que, al finalizar el seguimiento, se cuenta con los datos de posición y orientación del maestro y, del mismo modo, se obtienen los mismos datos del esclavo durante la ejecución de la tarea. De ahí, los parámetros necesarios para las figuras irregulares como el centro y el radio pertenecientes a cada punto de la figura trazada se pueden conocer. Además, tomando como media el radio de la figura propuesta con un valor de 10 mm para el maestro y 100 mm para el esclavo, se puede conocer la variabilidad de las figuras irregulares.

Se puede notar que la variabilidad en el esclavo es prácticamente la misma que del maestro, sólo que afectada por el factor de escalamiento propuesto para el espacio de trabajo del mismo, con un valor de 10 para este caso. Además, hay que recordar que la variabilidad que se muestra del esclavo son datos obtenidos directamente del control del mismo, por lo tanto, los 6.8084 mm es la variabilidad real que tiene el esclavo con respecto a la trayectoria impuesta por el maestro. Se puede decir que el esclavo obedece al maestro de forma deseada.

Otra prueba para medir la eficacia del esclavo es mostrada en la figura 4.15, la cual muestra el seguimiento del esclavo ante la trayectoria impuesta por el maestro. Cabe mencionar que las coordenadas del maestro están escaladas un factor de 10. Puede notarse que la trayectoria del esclavo es prácticamente la misma que la trayectoria del maestro. La tabla 4.7 muestra la variación promedio de cada punto en el seguimiento de la trayectoria. Este análisis se centra en el plano  $x - y$ , ya que la variación para la coordenada  $z$  se hizo en la sección 4.4.1.

## CAPÍTULO 4. RESULTADOS EXPERIMENTALES

---

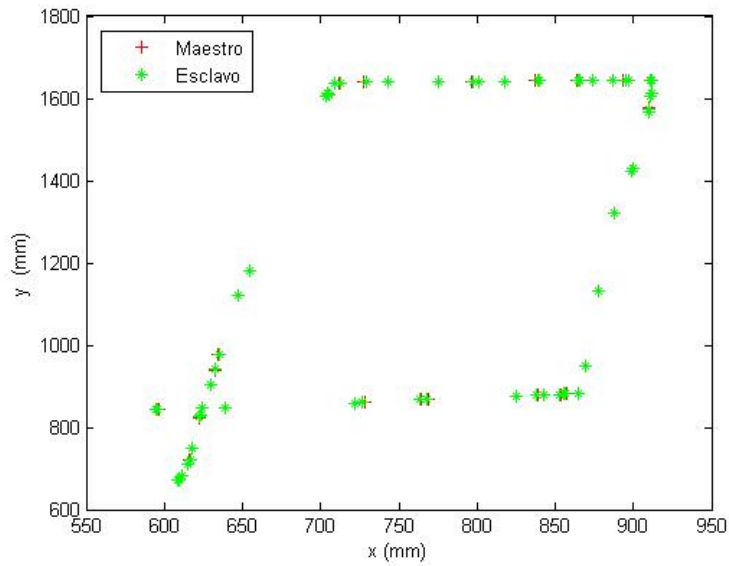
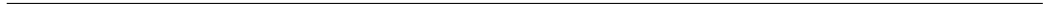


Figura 4.15: Seguimiento del esclavo ante el maestro

Tabla 4.7: Variación promedio del seguimiento de trayectoria

---

	<b>Eje x</b>	<b>Eje y</b>
Variabilidad Promedio	0.2533 mm	0.2500 mm





# Conclusiones y Recomendaciones

En este capítulo se abordan las conclusiones generales del presente trabajo, las cuales se pueden sintetizar de la siguiente forma:

1. Esquema de teleoperación unilateral propuesto;
2. Sistema maestro;
3. Implementación del sistema unilateral.

La primera parte identifica el tipo de arquitectura del robot industrial usado como esclavo en este proyecto, el cual es de arquitectura cerrada, y sólo permite la admisión de datos como velocidad y posición. Esta problemática, y cumpliendo con los objetivos de este proyecto, lleva a proponer un sistema de teleoperación unilateral basado en un control cinemático. Dicho de otra manera, el esclavo se controla con la posición en lazo abierto, en donde no existe ninguna reflexión de fuerzas o de posición hacia el operador. Además, el objetivo de revisar algunos índices de desempeño cinemático es para poder seleccionar un indicador adecuado que ayude a optimizar la trayectoria, permitiendo identificar la configuración con mayor viabilidad para el esclavo, alejándose así de las trayectorias degeneradas, esto es, singulares. Dentro de los índices de desempeño cinemático, se prefirió al índice de manipulabilidad propuesto por Yoshikawa [16], debido a que este indicador evalúa la propiedad de manipulabilidad desde un punto de vista global. Se resalta también que sus características permiten implementarse en tareas arbitrarias, y en un esquema de teleoperación los movimientos que se realizan tienen esta particularidad y no en una sola dirección; por lo tanto, se puede pensar que son tareas complejas. Dadas estas circunstancias,

la mejor opción es el análisis de manera global, para obtener la máxima manipulabilidad del esclavo en cada tarea dada. Otra ventaja de usar este índice de desempeño cinemático es que la manipulabilidad está relacionada a través del determinante del Jacobiano. Por lo tanto, este escalar proporciona una medida cuantitativa siendo cero en una posición singular; dicho de otra manera, entre más alejado de cero sea este número, más alejado de las configuraciones singulares se posiciona el esclavo.

La segunda parte aborda el desarrollo de un sistema maestro, siendo primero la caracterización del equipo que permite la ubicación tridimensional de un conjunto de sensores. Este equipo comercial se caracterizó de tal forma que las condiciones de trabajo sean las óptimas y, de la misma manera, lo más cercano al ambiente expuesto de un sistema de teleoperación, en donde posiblemente se encuentre rodeado de equipo electrónico o eléctrico, debido a la naturaleza del entorno de trabajo. Además, a pesar del ruido provocado por el entorno, la caracterización es satisfactoria, dado que los datos obtenidos contienen variaciones aceptables del orden de décimas de milímetro, las cuales pueden ser ignoradas, ya que este número mejora con la solución propuesta para la solución de la asimetría.

Por otro lado, se implementó un algoritmo que permite dar solución a la asimetría existente entre los sensores tridimensionales y el robot industrial usado como esclavo. Sin embargo, aunque ambos cuentan con seis grados de libertad, no tienen ninguna semejanza que pueda facilitar la implementación del sistema de teleoperación. También, este algoritmo permite ejecutar la teleoperación del esclavo en un espacio de trabajo adecuado para el robot, permitiendo así la facilidad de la implementación del esquema propuesto. Además, como parte del sistema maestro, se ha desarrollado una herramienta para alojar los sensores tridimensionales que permite la simulación del efector final del robot, haciendo más intuitivo para el operador la ejecución de la teleoperación, dado que es un sistema de teleoperación directo. De igual manera, se realiza una interfaz sencilla de manipular y que, además, permite ingresar la velocidad deseada del robot, que es un parámetro variante en un esquema de teleoperación; es decir, que no todas las tareas se pueden hacer a la misma velocidad, y así asegurar el movimiento suave para las diferentes tareas.

Asimismo, la implementación del esquema propuesto para tareas de teleoperación tiene una configuración unilateral, bajo un control cinemático y con la particularidad de que este sistema es a lazo abierto, y no existe ninguna reflexión de fuerzas hacia el operador. Los resultados experimentales

permitieron identificar un retraso de tiempo en la comunicación de los dos dispositivos, así como el retardo de tiempo inherente a este tipo de comunicación. A pesar de estas desventajas, el esquema de teleoperación propuesto es útil ante estos retardos ya que, frente estas circunstancias, la única manera de eliminar el retraso existente es modificando la arquitectura del robot esclavo, bajo el diseño de algoritmos que estabilicen el sistema. Sin embargo, como también ya se ha mencionado, el modificar la arquitectura del robot esclavo involucra el uso de implementos que serían demasiado costosos.

Por último, la implementación unilateral se realizó en la plataforma experimental, comprobando su desempeño de tareas con una configuración de máxima manipulabilidad. La manera de medir el desempeño fue a través de variaciones que se midieron estadísticamente y comprobando las trayectorias generadas a través de simulaciones. Estas mediciones mostraron resultados satisfactorios, dado que las variaciones medidas son del orden de 250 milésimas durante las tareas de teleoperación. Puesto que el sistema unilateral propuesto es a lazo abierto, es normal que exista un sesgo en la precisión.

De manera general se puede concluir que las aportaciones de este proyecto son: La implementación de un esquema unilateral en un robot industrial de arquitectura cerrada, con un control basado en posición. Además, las tareas a ejecutar bajo este esquema se hacen obteniendo la máxima manipulabilidad del robot esclavo. Por otro lado, se tiene un manejo suave y seguro del robot esclavo en cada tarea desarrollada, permitiendo con ello la implementación de robots industriales en sistemas de teleoperación, aunque no se tenga control de los pares transmitidos a cada junta.

Durante el desarrollo de este trabajo surgieron algunas áreas de oportunidad para este proyecto, las cuales han sido dejadas como trabajo futuro para el enriquecimiento del mismo. Tales áreas se pueden mencionar como:

- El esquema unilateral propuesto llega a los puntos deseados y con la precisión deseada, aunque esto no indica que represente exactitud en los puntos alcanzados. Es decir, debido al entorno de trabajo, es difícil eliminar el ruido de fuentes externas, por lo que se está propenso a tenerlo presente en el esquema de teleoperación; sin embargo, los números son aceptables, ya que este oscila entre 0 a 250 milésimas de milímetro. Este problema se puede mejorar si se cierra el lazo, en donde exista retroalimentación, al menos de la posición, y así implementar

un control con este enfoque. Otra manera sería implementar un filtro digital, aunque hay que estar conscientes que la característica de funcionamiento del equipo comercial trakStar percibe ruido debido a fuentes externas como motores, transformadores, etc. A pesar de ello, el ruido presente es aceptable, dado que no se tiene que lidiar con la distorsión magnética, la cual produce medidas erróneas.

- Los retrasos de tiempo en la comunicación existentes se presentaron de manera constante. Así, el sistema de teleoperación unilateral propuesto presentó un comportamiento satisfactorio ante estos retrasos, sin embargo, su desempeño no es el mejor. Aunque esta situación permite considerar que se encuentra ante un escenario real, no se tiene que perder de vista que el retraso de tiempo siempre es variable y más cuando el flujo de información es lento o son grandes distancias entre los sistemas maestro-esclavo y, por lo tanto, son problemas reales con los que el operador tiene que lidiar, ya que estos retrasos pueden hacer inestable el sistema. Existen metodologías que abordan y aportan soluciones a este tema, en las cuales hay necesidad de la reflexión de fuerzas, convirtiéndolo así en un sistema bilateral.
- El filtrado gaussiano, usado para ponderar la manipulabilidad del esclavo, mostró resultados satisfactorios ya que éste depende de un parámetro que permite modular el filtrado, y así tener el control de la manipulabilidad. Es decir, se puede controlar el paso transitorio entre los máximos existentes de la manipulabilidad. Esta función gaussiana no es la única, existen algunas otras funciones que se pueden considerar y obtener mejores respuestas en la ponderación de la función de manipulabilidad, como el filtro de Bessel que pudiera dar mejor respuesta ponderada, ya que este tiene una parte plana en su respuesta.
- Los robots industriales, de arquitectura cerrada, muestran la dificultad de no tener el control de los pares de los motores. Esto representa que la operación suave del esclavo no sea al cien por ciento. Aunque los resultados muestran operaciones del esclavo satisfactorias, hay que considerar que estos robots no están diseñados para tareas de teleoperación, por lo cual, el uso de estos robots todavía se ve limitado a generalizarlos en sistemas de teleoperación.

# Apéndice



# Apéndice A

## Sistema comercial trakStar

### A.1 Especificaciones del sistema trakStar

Especificaciones técnicas del sistema trakStar

Grados de libertad	Seis (posición y orientación)
Rango de traslación	Transmisor de medio rango $\pm 76$ cm en cualquier dirección
Precisión Estática	Para posición 1.4 mm RMS. Y en orientación 0.5 grados RMS
Taza de muestreo	Transmisor de corto y medio rango 375 muestras/segundo
Salidas	Coordenadas de posición X,Y,Z, matriz de orientación
Interface	USB
Medidas físicas:	

## A.1. ESPECIFICACIONES DEL SISTEMA TRAKSTAR

---

Transmisor            Un cubo de 9.6 cm con 3.05 m de cable

Sensor                Sensor OD 8 mm Cable OD 8 mm

Unidad Electrónica            Dimensiones ( $L \times W \times H$ )  
18.4cm  $\times$  29cm  $\times$  6.4cm, peso 1.28 kg

Donde  $L, W, H$  de sus siglas en ingles largo, ancho y alto respectivamente.



## Apéndice B

# Modelado cinématico del robot industrial Fanuc M-16iB 20T

El robot industrial Fanuc M-16iB 20T es un robot de la familia M-16iB/T -ver figura B.1-, con seis grados de libertad, montado sobre un riel. Esta familia es de alta precisión, con una interfaz amigable y de máxima confiabilidad, logrando con ello operaciones con altas velocidades. Por lo tanto, este robot usado como robot esclavo, tiene como su primera articulación un desplazamiento lineal; es decir, una junta del tipo prismática ( $J_1$ ) y cinco rotacionales o de revolución ( $J_2 - J_6$ ). Sus características principales se muestran en la tabla B.1



(a) Serie M-16iB/T



(b) Robot Fanuc M-16iB 20T

Figura B.1: Plataforma experimental, usada como robot esclavo

Característica		Cantidad	Unidades
Ejes		6	-
Capacidad de carga		20	<i>kg</i>
Alcance		1517	<i>mm</i>
Repetibilidad		$\pm 10$	<i>mm</i>
Rango de movimiento	$J_1$	3600	<i>mm</i>
	$J_2$	300	<i>grados</i>
	$J_3$	460	<i>grados</i>
	$J_4$	400	<i>grados</i>
	$J_5$	280	<i>grados</i>
	$J_6$	900	<i>grados</i>
Velocidad de movimiento	$J_1$	2750	<i>mm/s</i>
	$J_2$	165	<i>grados/s</i>
	$J_3$	175	<i>grados/s</i>
	$J_4$	350	<i>grados/s</i>
	$J_5$	340	<i>grados/s</i>
	$J_6$	520	<i>grados/s</i>
Freno mecánico		Todos los ejes	
Vibración		$\leq 4.9$	<i>N/m<sup>2</sup></i>

Tabla B.1: Especificaciones técnicas del robot Fanuc M-16B 20T

## B.1 Modelo Directo

Para poder obtener el modelo directo del robot Fanuc M-16iB, se ha puesto el robot con valores articulares en cero, como se muestra en la figura B.2, esto con la finalidad de colocar sistemas coordinados en cada articulación y con ello especificar el eje de giro. De esta manera se facilita obtener las matrices de transformación homogéneas que relaciona cada articulación.

El modelo directo del robot FANUC M-16iB 20T se esquematiza en la figura B.3, en la cual se pueden ver las transformaciones necesarias para lograr expresar la posición y orientación, en términos de posiciones articulares. Las transformaciones que representan la transformación total de la  $i$ -ésima

## APÉNDICE B. MODELADO CINÉMÁTICO DEL ROBOT INDUSTRIAL FANUC M-16IB 20T

---

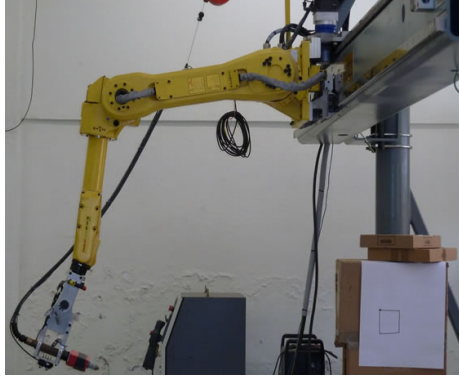


Figura B.2: Configuración del robot, cuando los valores articulares son cerca de cero

junta del robot industrial FANUC M-16iB 20T de 6 ejes con dimensiones  $a = 770mm$ ,  $b = 100mm$ ,  $c = 740$ ,  $d = 100$  son:

$${}^0T_6 = A_1 A_2 A_3 A_4 A_5 A_6 A_7 = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & x \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & y \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (B.1)$$

en donde las transformaciones homogéneas  $A_i$  están dadas por:

$$\begin{aligned} A_1 &= \text{Trasl}_{y, J_1} \\ &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & J_1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} A_2 &= \text{Trasl}_{x, a \cos J_2} \text{Trasl}_{z, -a \sin J_2} \\ &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & a \cos J_2 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -a \sin J_2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \end{aligned}$$

$$A_3 = \text{Rot}_{y, J_3} \text{Tras}_{x, b}$$

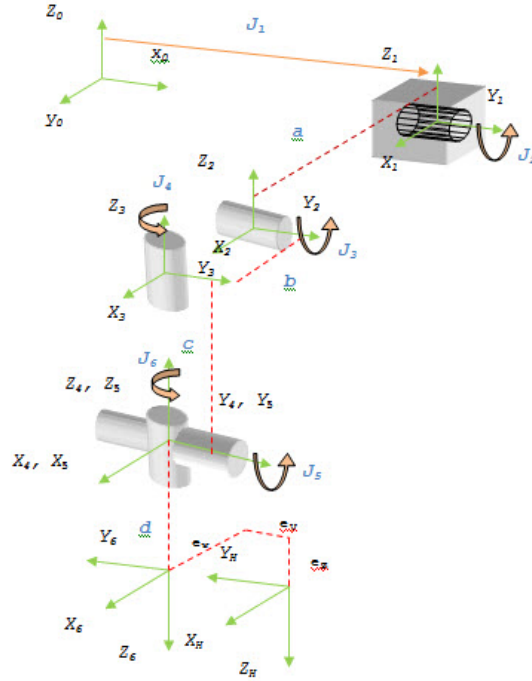


Figura B.3: Sistemas de referencia en cada articulación

$$\begin{aligned}
 &= \begin{bmatrix} \cos(-J_3) & 0 & \sin(-J_3) & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin(-J_3) & 0 & \cos(-J_3) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & b \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\
 &= \begin{bmatrix} \cos J_3 & 0 & -\sin J_3 & b \cos J_3 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ \sin J_3 & 0 & \cos J_3 & b \sin J_3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 A_4 &= Rot_{z, J_4} Trasl_{0,0,-c} \\
 &= \begin{bmatrix} \cos(J_4) & -\sin(J_4) & 0 & 0 \\ \sin(J_4) & \cos(J_4) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -c \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}
 \end{aligned}$$

APÉNDICE B. MODELADO CINÉMÁTICO DEL ROBOT  
INDUSTRIAL FANUC M-16IB 20T

---

$$= \begin{bmatrix} \cos(J_4) & -\sin(J_4) & 0 & 0 \\ \sin(J_4) & \cos(J_4) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -c \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$\begin{aligned} A_5 &= Rot_{y,-J_5} \\ &= \begin{bmatrix} \cos(-J_5) & 0 & \sin(-J_5) & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin(-J_5) & 0 & \cos(-J_5) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} \cos(J_5) & 0 & -\sin(J_5) & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ \sin(J_5) & 0 & \cos(J_5) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} A_6 &= Rot_{z,J_6} \\ &= \begin{bmatrix} \cos(J_6) & -\sin(J_6) & 0 & 0 \\ \sin(J_6) & \cos(J_6) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} \cos(J_6) & -\sin(J_6) & 0 & 0 \\ \sin(J_6) & \cos(J_6) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} A_7 &= Trasl_{0,0,-d}Rot_{x,\pi} \\ &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -d \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos(J_6) & -\sin(J_6) & 0 & 0 \\ \sin(J_6) & \cos(J_6) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & -d \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \end{aligned}$$

Donde las matrices de transformación homogéneas, a partir de los ejes  $(x, y, z)$  y la traslación en  $(x, y, z)$ , se definen como:

$$\begin{aligned}
 Rot_{x,\theta} &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\theta) & -\sin(\theta) & 0 \\ 0 & \sin(\theta) & \cos(\theta) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\
 Rot_{y,\theta} &= \begin{bmatrix} \cos(\theta) & 0 & \sin(\theta) & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin(\theta) & 0 & \cos(\theta) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\
 Rot_{z,\theta} &= \begin{bmatrix} \cos(\theta) & -\sin(\theta) & 0 & 0 \\ \sin(\theta) & \cos(\theta) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\
 Trasl_{x,y,z} &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & x \\ 0 & 1 & 0 & y \\ 0 & 0 & 1 & z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{B.2}
 \end{aligned}$$

Cabe mencionar que esta transformación mencionada en la ecuación B.1, es hasta la muñeca del robot, si se desea hasta la punta de la herramienta, es necesario aplicar una última transformación por una traslación dada por el vector  $E$ , en donde:

$$\begin{aligned}
 E &= Trasl_{e_x, e_y, e_z} \\
 &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & e_x \\ 0 & 1 & 0 & e_y \\ 0 & 0 & 1 & e_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{B.3}
 \end{aligned}$$

con  $e_x, e_y, e_z$  en  $mm$  y de este modo el modelo directo del robot está referenciado desde la punta de la herramienta con la base del robot.

$$\begin{aligned}
 e_x &= -266.05 \\
 e_y &= 1.036
 \end{aligned}$$

$$e_z = 378.023 \quad (\text{B.4})$$

## B.2 Modelo Inverso

Para aplicar el método geométrico descrito en la sección 3.2.2 es necesario llevar las coordenadas de posición ubicadas en el centro de la muñeca. La figura B.4 muestra la ubicación del centro de la muñeca; para lograr esto es necesario quitar la distancia  $d$  que posiciona en el extremo del plato. Esto se logra a través de la relación:

$$\begin{bmatrix} X_m \\ Y_m \\ Z_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} dr_{13} \\ dr_{23} \\ dr_{33} \end{bmatrix} \quad (\text{B.5})$$

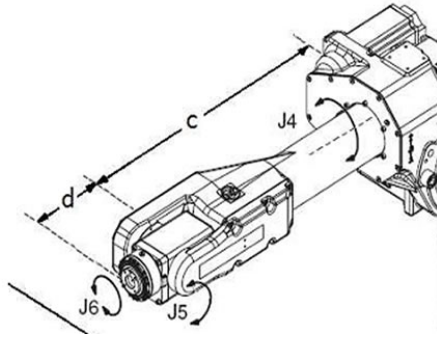


Figura B.4: Centro de la muñeca, localizado al quitar la distancia del plato  $d$

Usando el esquema mostrado en la figura B.5, y haciendo relaciones geométricas entre los parámetros geométricos del robot, se pueden determinar los valores de  $(J_2, J_3)$ , además hay que recordar que la traslación de la primera articulación toma directamente el valor de  $Y_m$ , debido a que esta articulación es del tipo prismática, por lo tanto los primeros valores articulares toman la forma de las siguientes expresiones:

$$J_1 = Y_m \quad (\text{B.6})$$

$$J_2 = \alpha + \beta \quad (\text{B.7})$$

$$J_3 = \theta + \delta \quad (\text{B.8})$$

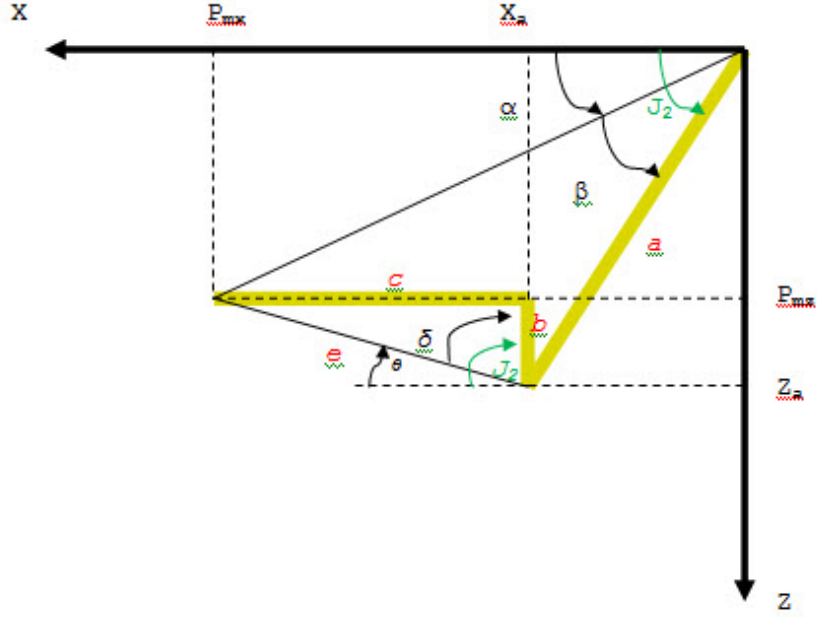


Figura B.5: Esquema de la ubicación de la muñeca del robot Fanuc M-16iB 20T en donde

$$\beta = \arccos\left(\frac{a^2 + r^2 - e^2}{2ar}\right)$$

$$\alpha = \arctan\left(\frac{P_{mz}}{P_{mx}}\right)$$

y considerando que

$$\begin{aligned} e &= \sqrt{b^2 + c^2} \\ r &= \sqrt{P_{mx}^2 + P_{mz}^2} \end{aligned} \quad (\text{B.9})$$



APÉNDICE B. MODELADO CINÉMÁTICO DEL ROBOT  
INDUSTRIAL FANUC M-16IB 20T

---

y de igual manera se tiene que

$$\begin{aligned}\theta &= \arctan\left(\frac{Z_a - P_{mz}}{P_{mx} - X_a}\right) \\ \delta &= \arctan\left(\frac{c}{b}\right)\end{aligned}$$

siendo que

$$\begin{aligned}X_a &= a \cos(J_2) \\ Z_a &= -a \sin(J_2)\end{aligned}$$

Una vez establecidos los valores de las primeras tres juntas ( $J_1, J_2, J_3$ ) se pueden encontrar los valores de las tres articulaciones faltantes que orientan el extremo del robot, utilizando el método de desacoplamiento cinemático el cual plantea, conocida la matriz de transformación  ${}^0T_6$  y ahora conocida la matriz de rotación  ${}^0R_3$ , que depende de las variables de posición del centro de la muñeca, se puede obtener la orientación relativa al marco de referencia  $[x_3, y_3, z_3]$ , por consiguiente

$$\begin{aligned}{}^0T_6 &= {}^0T_3^3 T_6 \\ &= \begin{bmatrix} {}^0R_3 & {}^0d_6 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} {}^3R_6 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}\end{aligned}\quad (\text{B.10})$$

donde la matriz de orientación de la muñeca es

$$\begin{aligned}{}^3R_6 &= {}^0R_3^T {}^0R_6 \\ &= {}^0R_3^T \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix}\end{aligned}\quad (\text{B.11})$$

Igualando término a término se genera un sistema de ecuaciones, que permiten tener la solución a la orientación de la muñeca, la cual está dada por

$$J_4 = \arctan\left(\frac{r_{23}}{(\cos(J_3)r_{13} + \sin(J_3)r_{33})}\right)\quad (\text{B.12})$$

$$J_5 = \arctan \left( \frac{\cos(J_3)r_{13} + \sin(J_3)r_{33}}{\cos(J_4)(\sin(J_3)r_{13} - \cos(J_3)r_{33})} \right) \quad (\text{B.13})$$

$$J_6 = \arctan \left( \frac{r_{23} \cos(J_3) + r_{12} \sin(J_3)}{r_{31} \cos(J_3) + \sin(J_3)r_{11}} \right) \quad (\text{B.14})$$

$$(\text{B.15})$$

# Apéndice C

## Rotaciones sobre un eje fijo

En ocasiones no es muy conveniente describir la orientación en función de los componentes  $(r_x, r_y, r_z)$  de un vector, sin embargo, es apropiado usar la descripción de la orientación en términos de 3 ángulos, referidos a un marco inercial fijo y no a un marco actual [42]. Es decir, son transformaciones sucesivas, cada una alrededor de un eje fijo dado; por ejemplo, considere un marco inercial fijo  $[x_0, y_0, z_0]$ , y se inicia con una rotación en el eje  $x_0$  seguida de una rotación en el eje  $z_0$  y no sobre el eje  $z_1$ , cabe mencionar que el orden de giro no es conmutativo. De este modo, existen varias representaciones que tienen la orientación con 3 ángulos. Dentro de las más usuales están los llamados ángulos de Euler o la representación denominada “Roll, Pitch y Yaw”; esta última es conocida por sus siglas en inglés W,P,R.

### C.1 Ángulos W,P,R

Éste método es una representación secuencial fija referida a un marco de referencia fijo o comúnmente denominado sistema mundial. Se trata de una representación generalmente usada en aeronáutica, con una secuencia fija que especifica una orientación en  $X - Y - Z$ . Referida al marco mundial, esta convención es referida como “*Roll, Pitch y Yaw*” y, por sus siglas en inglés, *W,P,R*.

La figura C.1 muestra los sistemas  $[x_0, y_0, z_0]$  y  $[x_1, y_1, z_1]$ , en los cuales, siguiendo la convención de giro en  $X - Y - Z$ , puede expresarse como sigue:

1. Una rotación un ángulo  $\psi$  respecto al eje  $x_0$ ;

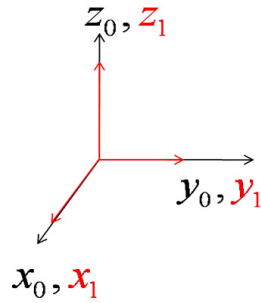


Figura C.1: Sistema inercial

2. Una rotación de un ángulo  $\theta$  respecto al eje  $y_0$
3. Una rotación de un ángulo  $\phi$  respecto al eje  $z_0$

Para mejor entendimiento, la figura C.2 muestra esta secuencia, en donde el sistema de referencia mundial  $[x_0, y_0, z_0]$  es representado por  $x, y, z$  y cada orientación en el eje fijo  $x', y', z', x'', y'', z'', x''', y''', z'''$  descrito anteriormente, representa el sistema  $[x_1, y_1, z_1]$  que se desea orientar.

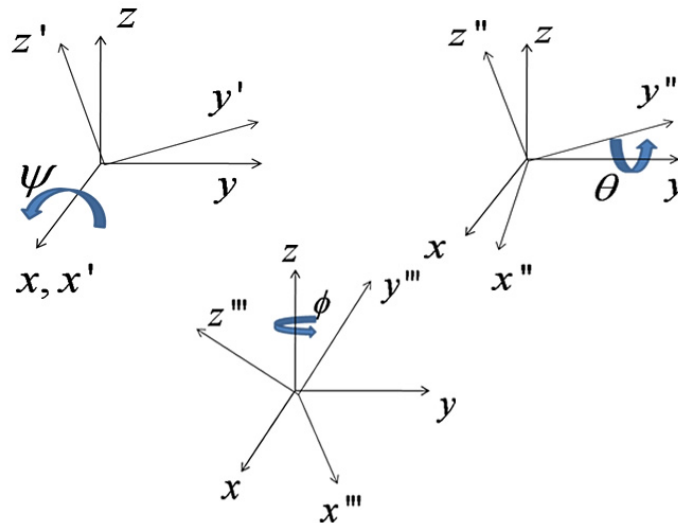


Figura C.2: Ángulos de orientación: roll, pitch y yaw

Considerando  $s_\gamma = \sin \gamma$  y  $c_\gamma = \cos \gamma$ , la transformación resultante es:

## APÉNDICE C. ROTACIONES SOBRE UN EJE FIJO

---

$$R = R_{z,\phi}R_{y,\theta}R_{x,\psi} \quad (\text{C.1})$$

$$= \begin{bmatrix} c_\phi c_\theta & -s_\phi c_\psi + c_\phi s_\theta s_\psi & s_\phi s_\psi + c_\phi s_\theta c_\psi \\ s_\phi c_\theta & c_\phi c_\psi + s_\phi s_\theta s_\psi & -c_\phi s_\psi + s_\phi s_\theta c_\psi \\ -s_\theta & c_\theta s_\psi & c_\theta c_\psi \end{bmatrix} \quad (\text{C.2})$$



# Apéndice D

## Sección dorada

La *sección dorada* es un algoritmo de optimización unidimensional no restringida, es decir, que la optimización de una sola variable tiene como meta encontrar un valor ( $x$ ) de un extremo, ya sea un máximo o mínimo de  $f(x)$ , el cual es una técnica simple de búsqueda de una sola variable de propósito general [40]. Para optimizar la función se necesitan 4 valores: 3 para detectar un máximo y el cuarto para localizar el punto máximo de la función, satisfaciendo las siguientes condiciones (figura D.1):

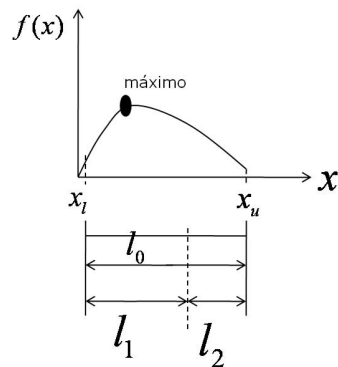


Figura D.1: Relación de longitudes

$$l_0 = l_1 + l_2 \quad (\text{D.1})$$

$$\frac{l_1}{l_0} = \frac{l_2}{l_1} \quad (\text{D.2})$$

y si se toma:

$$R = \frac{l_2}{l_1} \quad (\text{D.3})$$

En donde  $l_0$  es la longitud entre los extremos y  $l_1, l_2$  son la longitud existente entre un punto intermedio, con las siguientes premisas:

- La primera condición establecida por la ecuación D.1, especifica que la suma de las condiciones  $l_1$  y  $l_2$  debe ser igual al intervalo  $l_0$ .
- La segunda condición dada por la ecuación D.2, dice que la relación de las longitudes debe ser igual.

Haciendo manipulación algebraica entre las ecuaciones D.1 y D.2 se obtiene la ya mencionada sección dorada. Este valor es conocido desde la antigüedad como razón dorada.<sup>1</sup>

$$R = \frac{\sqrt{5}-1}{2} \quad (\text{D.4})$$

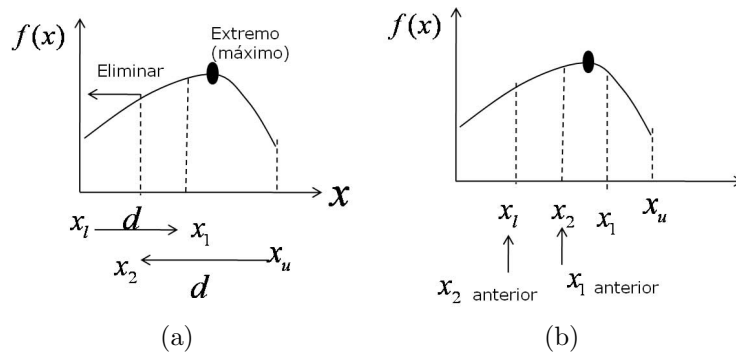


Figura D.2: Condiciones de sección dorada

La ecuación D.4 es usada en forma de algoritmo para encontrar los puntos necesarios y así adquirir el máximo o mínimo de la función, satisfaciendo (Figura D.2):

<sup>1</sup> Los griegos llamaron a este número  $\frac{\sqrt{5}-1}{2} = 0.61803\dots$  "razón dorada" y fue usada para diferentes propósitos, incluyendo el famoso desarrollo del rectángulo. Chapra op.cit



$$\begin{aligned}
 d &= R(x_u - x_l) \\
 x_1 &= x_l + d \\
 x_2 &= x_u - d
 \end{aligned}
 \tag{D.5}$$

Estos puntos intermedios se evalúan en la función, que viene dada por la ecuación 3.18, con criterios de selección dados por:

$$f(x_1) > f(x_2) \tag{D.6}$$

$$f(x_2) > f(x_1) \tag{D.7}$$

En donde, para la ecuación D.6, el dominio de  $x$  a la izquierda de  $x_2$ , de  $x_l$  a  $x_2$ , se puede eliminar, pues ya no contiene el máximo. Para este caso, pasa a ser el nuevo  $x_l$ .

Si ha ocurrido el caso representado por la ecuación D.7, entonces el dominio de  $x$  a la derecha de  $x_1$ , de  $x_1$  a  $x_u$ , podría ser eliminado. En este caso  $x_1$  pasa a ser el nuevo  $x_u$  para la siguiente iteración.



# Bibliografía

- [1] MB. Cabral, P. Galván, V. Cane, “Telemedicina: metas y aplicaciones”, Departamento de Ingeniería Biomédica e Imágenes. Instituto de Investigaciones en Ciencias de la Salud. Universidad Nacional de Asunción-Paraguay. *Memorias I.I.C.S.*, vol. 6, no.1, pp.40-44, Junio 2008.
- [2] K. Yeongho, Ch. Jeong-Ho, L. Jongki, K. Myeng Ki, K. Nam Kuk, Y. Jin Sup, K. Yong Oock, “Collaborative surgical simulation over the Internet”, *IEEE Internet Computing*, vol.5,no.3,pp.65-73. June 2001.
- [3] R. D Chris, R. Wernli, *The ROV manual: a user guide to observation-class remotely operated vehicles*. Oxford, U.K: Butterworth-Heinemann, 2007.
- [4] A. Molland. *Maritime Engineering Reference Book-A Guide to Ship Design, Construction and Operation*, Hungary: Elsevier, 2008, pp: 728-783.
- [5] U.S. Congress, Office of Technology Assessment, “Exploring the Moon and Mars: Choices for the Nation”, OTA, Washington, DC: U.S, Rep OTA-ISC-502, 1991.
- [6] F. Peñin, K. Matsumoto, and S. Wakabayashi, “ETS-7 Space Robot Teleoperation Through Virtual Force Reflection”, in *Proceedings of the Fifth International Symposium, ISAIRAS '99* Noordwijk, Netherlands, pp.389-396, June 1999.
- [7] E. Nuño, L. Basañez, “Teleoperación: técnicas, aplicaciones, entorno sensorial y teleoperación inteligente”, Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona, España, Reporte de investigación Reg. 169003, 2004.

- 
- [8] R. Chesney, “Augmented teleoperation”, in *Proceedings of the IARP Workshop on Robots for Humanitarian Demining*, 2002, pp. 81-86.
- [9] A. Shirinov., F. Kamenik, S. Fatikow, “Haptic Interface for a Nanohandling Robot”, *Assembly Automation*, vol. 24, no.1, pp. 78-87, January 2004.
- [10] T. Fong, C. Thorpe, *Vehicle Teleoperation Interfaces*, Autonomous Robots 11, 2001 Kluwer Academic Publishers.
- [11] A. Santamaria, R. Aracil, A. Tuduri, P. Martinez, F. Val, L. Penin, M. Ferre, E. Pinto, A. Barrientos, ”Teleoperated robots for live power lines maintenance (ROBTET),” *Electricity Distribution. Part 1: Contributions. CIRED. in 14th International Conference and Exhibition on (IEE Conf. Publ. No. 438)*, Iberdrola, Spain , pp.31/1-31/5, June 1997.
- [12] D. Foucher, et.al., *Ground operated teleoperation system for live power line maintenance. in Proceeding of IEEE*. Québec, Canada, 1996, pp. 792-798.
- [13] A. Cerón, “Sistemas robóticos teleoperados”, *Ciencia e Ingeniería Neogranadina*, no. 15, Noviembre 2005.
- [14] M. Mendoza, “Control de un sistema de teleoperación para su aplicación en terapias robóticas de rehabilitación”. Tesis Doctoral, Universidad Autónoma de San Luis Potosí, San Luis Potosí, México, 2011.
- [15] E. Cuan, “Contribution al’etude du placement optimal de taches de robots redondants” , Tesis doctoral, Université de Poitiers France, 2008.
- [16] T. Yoshikawa, “Manipulability and redundancy control of robotic mechanism,” in *Proceedings of IEEE international conference on Robotics and automation*, 1985, pp.1004-1009.
- [17] T Yoshikawa, “Traslational and rotational control of robotics mechanism,” *Proceedings of American control conference*, 1990, pp.228-233.
- [18] T. Yoshikawa, “Dynamic manipulability of robot manipulators,” in *Proceedings of IEEE international conference on Robotics and automation*, 1985, pp.1033-1038.

## BIBLIOGRAFÍA

---

- [19] F. Rodriguez, J. Botero, H. Quintero., “Aplicacion de la teoría de robots manipuladores a la biomecánica del brazo humano,” *RIAI*, vol 4 pp.51-57, Octubre 2007.
- [20] C. Tang, “ Manipulability-based analysis of cooperative payload transport by robot collectives,” M.S, thesis, State University of New York at Buffalo, Buffalo, New York, 2004.
- [21] J. Angeles, *Fundamentals of robotics mechanical systems: Theory, methods and algorithms*. 2nd ed., New York: Springer-Verlag New York, 2002.
- [22] K. Nait-Chabane, S. Delarue, P. Hoppenot, E. Colle, “ Strategy of approach for seizure of an assistive mobil manipulator”, *robotics and autonomus systems*, vol. 57 pp. 222-235, Julio 2009.
- [23] C. Gossellin, J. Angeles, “A Global performance index for a kinematic optimization of robotic manipulators”, *ASME Transactions on Design Mechanical*, vol. 113, pp. 220-226, September 1991.
- [24] B. Unger, R. Hollis, “Design and operation of a force-reflecting magnetic levitation coarse-fine teleoperation sytem”, in *Proceedings of IEEE international conference on robotics and automation*, New Orleans, LA, vol 4 pp.4147-4152, April 2004.
- [25] K. Hongo, M. Yoshida, Y. Nakanishi, I. Mizuuchi, M. Inaba, “Developed of a bilateral wearable device “Kento” for control robots using muscle actuador modules”, in *Proceedings of 18th IEEE international symposium on robot and human interactive communication*, Toyama, Japan, pp.897-902, October 2009.
- [26] C. Escolano, J. Minguez, J. Antelis, “Human braintelegated robot between remote places”, in *Proceedings of IEEE international conference on Robotics and Automation*, 2009, pp.4430-4437.
- [27] J. Batlle, P. Ridao, and J. Salvi., “Integration of a teleoperated robotic arm with vision systems using CORBA compatible software”, in *Proceedings of 30th Int.Symp.Automot.Technol. and Autom.*, 1997, pp. 371-378.

- 
- [28] G. Gupta, S. Mukhopadhyay, C.H. Messom, S. Demidenko, “Master-slave control of a teleoperated anthropomorphic robotic arm with gripping force sensing”, *Instrumentation and Measurement Transactions*, vol. 55, pp.2136-2145, 2006.
- [29] S. Lee, S. Park, M. Kim, C. Lee, “Design of a force reflecting master arm and master hand using pneumatic actuators”, *Proceedings of IEEE Intenational Conference on Robotics and Automation*, Leuven, Belgium, pp.2574-2579, May 1998.
- [30] N. Sawasaki, T. Nakajima, A. Shiraishi, S. Nakamura, K. Wakabayashi, Y. Sugawara, “Application of humanoid robots to building and home management services”, *Procedings of IEEE Intenational Conference on Robotics and Automation*, Tajpel, Taiwan, pp.2992-2997, September 2003.
- [31] I. Bonilla. “Control de interacción de robots manipuladores en tareas industriales y de rehabilitación”. Tesis Doctoral, Universidad Autónoma de San Luis Potosí, San Luis Potosí, México, 2011.
- [32] M. Spong and M. Vidyasagar, *Robots Dynamics and Control*. John Wiley & Sons, New York (1989).
- [33] R. Kelly, V. Santibáñez. *Control de Movimiento de Robots manipuladores*, Prentice Hall, Madrid, 2003.
- [34] B. Siciliano. *Robotics: Modeling, Planning and Control*, London, Springer 2009.
- [35] B. Siciliano. *Springer Handbook of Robotics*, Stürtz GmbH, Würzburg, Springer 2008.
- [36] A. Barrientos. *Fundamentos de Robótica*, España, McGraw-Hill, 1997.
- [37] J. Craig. *Introduction to Robotics: Mechanics and Control*, Third edition, USA, Prentice Hall, 2005.
- [38] J. Reza. *Theory Applied Robotics. Kinematics, Dynamics, and Control* Springer, New York, 2007.

## BIBLIOGRAFÍA

---

- [39] C. García, F. Postigo, A. Castro, R. Carelli, and B. Kuchen, “On-line estimation of communication time delay in a robotic teleoperation system”, *Latin American Applied Research Journal*, vol. 33, no.4, pp. 371-378, 2003.
- [40] S. Chapra, R. Canale. *Numerical Methods for Engineers*. USA: Mc Graw Hill, 2006.
- [41] “*Notas sobre Teoría de Estimación aplicada a la Robótica*” notas de clases de robótica, Departamento de Posgrado en Universidad de San Luis Potosí, otoño 2011.
- [42] “*Apuntes para la asignatura de robótica*”, notas de robótica para el modulo óptativo de ingeniería electrónica, Universitat de valencia, febrero 2001.
- [43] J. Bukchin, R. Luquer, and A. Shtub, “Learning in tele-operations”, *IIE Transactions on* , vol.34, pp.245-252, Noviembre 2000.

## Bibliografía complementaria

- [44] I. Stanley, *Álgebra Lineal*. México: Mc Graw Hill, 2008.
- [45] W. Press, et.al. *Numerical Recipes in C, the art of Scientific Computing*, USA: Press Syndicate of University of Cambridge, 1992.
- [46] F. Ceballos. *Enciclopedia del Lenguaje C*. México: Alfaomega, 1997.
- [47] L. Leithold *Leithold, El cálculo*. México: Oxford University Press-Harla México S.A de C.V, 1998.
- [48] E. Swokowski *Cálculo con geometría analítica*. México: Iberoamericana, 1989.
- [49] Unamuno & Asociados “Ecuación del plano, todas sus formas”, s/f. [Online]. Available: [www.unamuno.com.ar](http://www.unamuno.com.ar)