



**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA
DEL ESTADO DE HIDALGO**



INSTITUTO DE CIENCIAS BÁSICAS E INGENIERÍA

CENTRO DE INVESTIGACIÓN EN TECNOLOGÍAS DE INFORMACIÓN Y SISTEMAS

MAESTRÍA EN AUTOMATIZACIÓN Y CONTROL

**CONTROL DE FUERZA Y POSICIÓN BASADO EN MODO DESLIZANTE
CON PERSPECTIVAS DE GUIADO HÁPTICO EXPLORATORIO**

T E S I S

**QUE PARA OBTENER EL GRADO DE MAESTRO EN
CIENCIAS EN AUTOMATIZACIÓN Y CONTROL**

PRESENTA:

ING. ITZEL TREJO MOTA

DIRECTORES:

DR. OMAR A. DOMÍNGUEZ RAMÍREZ

PACHUCA HGO., MÉXICO 23 DE NOVIEMBRE DE 2011



Ing. Itzel Trejo Mota

**Control de fuerza y posición
basado en modo deslizante
con perspectivas de guiado
háptico exploratorio**

*El presente trabajo, fruto del esfuerzo de dos años,
está dedicado a mis padres, a mi hermano y a mi esposo
quienes me han brindado su apoyo incondicional,
me han dado su cariño y comprensión,
me han exhortado para concluir
de manera exitosa todos mis proyectos.*

LOS AMO.

Gracias a

CONACYT por la beca de maestría otorgada durante el periodo Agosto 2009 - Julio 2011, con número de registro 331676. De la misma manera gracias al Dr. Omar A. Domínguez Ramírez por la disponibilidad de compartir sus conocimientos para realizar este trabajo de investigación y quienes revisaron este trabajo y realizaron importantes acotaciones, observaciones y comentarios para mejorar esta tesis.

Resumen

Control de fuerza y posición basado en modo deslizante con perspectivas de guiado háptico exploratorio

En este trabajo de investigación se presenta un algoritmo de control de fuerza y movimiento simultáneo con propósitos de guiado háptico exploratorio, se emplean las estrategias de pasividad y teoría de modos deslizantes para lograr estabilidad de un dispositivo con el operador humano en el lazo. Para lograr esta meta se estudió la arquitectura abierta del dispositivo a emplear, particularmente PHANToM 1.0, de ella se presentan las clases para entrada (lectura de codificadores ópticos) y salida (envío de la señal de control). Para la evaluación de las estrategias de control en movimiento libre, considerando las mismas herramientas para lograr estabilidad en el sistema, se validó el modelo cinemático de posición y diferencial, así como el modelo dinámico provisto de la dinámica inercial, de Coriolis, de fuerzas centrípetas y gravitacionales; así como la tribología articular. Para este propósito se diseñaron y evaluaron dos técnicas de control de movimiento, una libre del modelo dinámico y la otra dependiente parcialmente de él. En ambos casos se emplea la cinemática para la planificación de movimiento. Por todo ello se validó el modelo matemático del dispositivo háptico a partir de sus propiedades. La interacción háptica activa, ideada para lograr estímulo kinestético en el operador humano inmerso en un ambiente virtual estuvo basada en el método de penalización, y este último con disipación de energía a través de inyección de fricción dinámica (*amortiguamiento*) para inducir estabilidad en el punto de contacto. La contribución relevante de este trabajo de investigación corresponde al diseño e implementación de una estrategia de control híbrida (movimiento y fuerza) basada en modos deslizantes de segundo orden. Los beneficios de aplicación de esta estrategia corresponden a robots con tareas de contacto, en el que la superficie de la tarea es conocida y modelada, sin embargo se emplea un dispositivo háptico tipo mayordomo para la validación con perspectivas de exploración háptica activa con alto desempeño.

Abstract

In this research work presents a control algorithm for simultaneous force and motion guidance purposes haptic exploratory strategies used of passivity and sliding mode theory for stability of a device with the human operator in the loop. To achieve this goal will study the open architecture of the device to be used, particularly PHANTOM 1.0, it shows the classes for input (reading optical encoders) and output (send signal control). For the evaluation of control strategies in free motion, given the same tools to achieve stability in the system validated the kinematic model and differential position and provided the dynamic model of the dynamic inertial, Coriolis, centripetal force and gravitational as well as joint tribology. For this purpose we designed and evaluated two techniques of motion control, a free dynamic model dependent. In both cases the kinematics is used for motion planning. Therefore validated the mathematical model of the haptic device from their properties. Active haptic interaction designed to reach kinesthetic stimulation on the human operator engaged in a virtual environment was based on the penalty method, and the latter with energy dissipation by injection of dynamic friction (damping) to induce stability in the point contact. The relevant contribution of this research paper corresponds to the design and implementation of a hybrid control strategy (motion and strength) based on second order sliding modes. The benefits of implementing this strategy correspond to robots to contact tasks in which the surface of the task is known and modeled, but employs a butler type haptic device validation with active haptic exploration prospects with high performance.

Índice general

Dedicatoria	III
Resumen	VII
Abstract	IX
Índice general	X
Índice de figuras	XI
Índice de tablas	XII
Acrónimos	XIII
Notación	XIV
1. Introducción	2
1.1. Antecedentes	2
1.1.1. Interfaz háptica	2
1.1.2. Interfaz háptica PHANToM 1.0	4
1.2. Breve descripción de estado del arte	5
1.2.1. Guiado háptico	5
1.2.2. Control de fuerza	7
1.3. Justificación	7
1.4. Planteamiento del problema	8
1.4.1. Solución propuesta	8
1.4.2. Objetivo general	9
1.4.3. Objetivos específicos	9
1.4.4. Contribuciones de la tesis	9
1.4.5. Organización de la tesis	9
2. Modelo matemático del dispositivo háptico PHANToM Premium	
1.0	11
2.1. Introducción	11
2.2. Modelo matemático de PHANToM 1.0	12
2.3. Modelo cinemático	13

2.3.1.	Modelo cinemático de posición	13
2.3.2.	Modelo cinemático de velocidad	15
2.3.3.	Modelo cinemático de aceleración	16
2.4.	Descripción de la tarea de la aplicación de la cinemática	17
2.5.	Modelo dinámico	18
2.5.1.	Propiedades dinámicas	20
2.6.	Validación experimental de los modelos cinemáticos y dinámicos	21
2.6.1.	Validación del modelo cinemático	22
2.6.2.	Validación experimental del modelo dinámico	22
2.7.	Interfaz háptica PHANToM 1.0	23
2.7.1.	La interfaz de aplicación programable GHOST SDK 3.1	25
2.8.	Integración en arquitectura abierta de la interfaz háptica PHANToM 1.0	26
2.8.1.	Arquitectura abierta PHANToM 1.0	26
2.9.	Hardware	27
2.10.	Software	27
2.11.	Conclusiones	27
3.	Técnicas de planificación de movimiento	29
3.1.	Introducción	29
3.1.1.	Movimientos de un robot en una tarea	31
3.2.	PHANToM 1.0 como dispositivo electromecánico controlable	32
3.2.1.	Control de fuerza para retroalimentación háptica	32
3.2.2.	Control para retroalimentación de posición y velocidad	34
3.3.	Técnicas de planificación de movimiento	35
3.3.1.	Regulación a una coordenada operacional	35
3.3.2.	Regulación basada en seguimiento (RBS)	36
3.3.3.	Seguimiento de una trayectoria cerrada	38
3.3.4.	Seguimiento de una trayectoria compuesta	40
3.4.	Conclusiones	43
4.	Técnicas de control clásico	44
4.1.	Introducción	44
4.2.	Control PD	45
4.2.1.	Implementación del control PD	45
4.3.	Control PID	47
4.3.1.	Diseño de control PID no lineal	48
4.3.2.	Prueba de estabilidad	49
4.3.3.	Implementación experimental del control PID	50
4.4.	Conclusiones	53

5. Técnicas de control basadas en pasividad	54
5.1. Preliminares matemáticos	54
5.1.1. Conceptos generales	54
5.1.2. Descripción matemática de la teoría de pasividad	54
5.2. Control por retroalimentación de estados	56
5.2.1. Control PD+G (Regulación)	56
5.2.2. Seguimiento de trayectorias	59
5.3. Implementación experimental del controlador PD+G	61
5.3.1. Regulación a una coordenada operacional	61
5.3.2. Regulación basada en seguimiento (RBS)	62
5.3.3. Seguimiento estructurado	62
5.3.4. Tarea 1: Regulación - Seguimiento estructurado	63
5.3.5. Tarea 2: RBS - Seguimiento estructurado	63
5.4. Control modos deslizantes primer orden	66
5.4.1. Propiedades de las funciones hiperbólicas	68
5.5. Conclusiones	75
6. Tipos de interfaces hápticas para exploración	76
6.1. Introducción	76
6.1.1. Generación de fuerza de reacción	76
6.2. Interfaces hápticas pasiva y activa	77
6.2.1. Interfaz háptica pasiva	77
6.2.2. Interfaz háptica quasipasiva	81
6.2.3. Interfaz háptica activa	82
6.3. Breve introducción de una interfaz háptica para exploración	83
6.4. Generalidades de una interfaz háptica para exploración	83
6.4.0.1. Movimiento libre	84
6.4.0.2. Movimiento restringido	87
6.5. Asignación de propiedades en la superficie de contacto	89
6.5.1. Forma	90
6.5.2. Textura	92
6.5.3. Rugosidad	93
6.5.4. Algoritmo de detección	95
6.6. Conclusiones	98
7. Control de fuerza y posición	100
7.1. Introducción	100
7.2. Control para robots geoméricamente restringidos	101
7.2.1. Dinámica de robots bajo geometría restringida	101
7.2.2. Espacio articulado "Ortogonalización"	102

7.3. Dinámica del robot	103
7.4. Control modos deslizantes de segundo orden	105
7.4.1. Estructura del control	105
7.4.2. Análisis de estabilidad	105
7.5. Resultados en simulación	107
7.6. Resultados experimentales	109
7.7. Conclusiones	112
8. Conclusiones y trabajos a futuro	114
8.1. Conclusiones	114
8.2. Trabajos a futuro	116
Glosario	117
A. Caracterización de sensor de fuerza	121
A.1. Introducción	121
B. Disipatividad y pasividad	125
B.1. Espacios de funciones	125
B.2. Pasividad y estabilidad de ganancia finita	126
B.3. Pasividad en sistemas Euler-Lagrange	127
C. Contenido del CD	131
Bibliografía	133
Bibliografía	133

Índice de figuras

2.1. Interfaz háptica PHANToM 1.0 [94]	12
2.2. Cadena cinemática PHANToM 1.0 [51].	12
2.3. Gráfica auxiliar para determinar la cinemática inversa de PHANToM 1.0	14
2.4. Gráfica auxiliar para observar el modelo cinemático de PHANToM 1.0	18
2.5. Rosa de tres pétalos.	21
2.6. Plataforma experimental.	21
2.7. Posición cartesiana.	22
2.8. Velocidad cartesiana.	22
2.9. Propiedad: definida positiva.	23
2.10. Propiedad: Antisimetría.	23
2.11. Diagrama a bloques de la interface háptica PHANToM 1.0 [94]	24
2.12. Árbol de clases de GHOST SDK	26
3.1. Robot manipulador [141].	29
3.2. Robot móvil [143].	29
3.3. Ejemplo de una tarea [51].	32
3.4. PHANToM 1.0 - operador humano en el punto de contacto virtual. .	33
3.5. Diagrama de retroalimentación de posición y velocidad.	34
3.6. Regulación a una coordenada operacional [75].	35
3.7. Trayectoria a una coordenada operacional	36
3.8. Ley de control	36
3.9. Trayectoria de ξ y $\dot{\xi}$ con $t_b = 1$ segundo.	37
3.10. Trayectoria a una coordenada operacional (RBS)	38
3.11. Ley de control (RBS)	38
3.12. Trayectoria de una circunferencia.	39
3.13. Trayectoria de una rosa con $f = 0.01Hz$, $n = 3$, $h = 0.03m$, $k = 0.04m$ y $r = 0.02m$	40
3.14. Trayectoria compuesta sin obstáculos [75].	41
3.15. Trayectoria compuesta (Triángulo).	41
3.16. Posición de X , Y , Z del triángulo.	42

4.1. Diagrama a bloques del control PD.	45
4.2. Coordenadas operacionales reales y deseadas de PHANToM 1.0	46
4.3. Señal de error articular.	46
4.4. Desempeño en el espacio de trabajo.	46
4.5. Señal de control PD.	47
4.6. Diagrama a bloques del control PID.	48
4.7. Coordenadas operacionales reales y deseadas de PHANToM 1.0. . . .	51
4.8. Señal de error articular.	51
4.9. Desempeño en el espacio de trabajo.	52
4.10. Señal de control PID.	52
5.1. Controlador PD de posición.	57
5.2. Controlador PD con compensación dinámica de la gravedad.	57
5.3. Diagrama del control PD+G para seguimiento.	61
5.4. Regulación operacional cartesiana.	62
5.5. Regulación - Seguimiento estructurado.	63
5.6. RBS - Seguimiento estructurado.	64
5.7. Señal de control.	64
5.8. Posición articular deseada q_d y simulada q_s	65
5.9. Error de posición articular ΔP	65
5.10. Función de Lyapunov.	66
5.11. Derivada función de Lyapunov.	66
5.12. Función $\tanh(x)$ y función $\text{sign}(x)$	67
5.13. Funciones hiperbólicas.	69
5.14. Trayectoria en el espacio de trabajo.	71
5.15. Error de posición articular para un modos desliznates de primer orden simple.	72
5.16. Ley de control para un modos desliznates de primer orden simple. . .	72
5.17. Posición articular para un modos desliznates de primer orden simple. .	73
5.18. Trayectoria en el espacio de trabajo.	73
5.19. Ley de Control para un modo desliznate de primer orden compuesto. .	74
5.20. Posición articular para un modos desliznates de primer orden compuesto. .	74
5.21. Error de posición articular para un modos desliznates de primer orden compuesto.	75
6.1. Modelo de un objeto virtual con rigidez y amortiguamiento.	78
6.2. Interacción dinámica con respuesta ideal [94].	79
6.3. Interacción con dinamica intervenida [94].	79
6.4. Sistema cooperativo humano-robot con retroalimentación visual. . . .	80
6.5. Sistema cooperativo humano-robot con interacción directa.	81

6.6. Diagrama a bloques de una interfaz háptica activa [51].	82
6.7. Dinámica intervenida sin interacción con ambiente virtual [94].	84
6.8. Control con compensación parcial de dinámica.	86
6.9. Control con compensación de fricción y gravedad.	86
6.10. Dinámica intervenida con interacción con ambiente virtual [94].	88
6.11. Dinámica del ambiente virtual [94].	88
6.12. Diagrama de bloques de ley de control con dinámica intervenida y del ambiente virtual.	89
6.13. Descripción del modelo de un plano virtual para la detección de forma [94].	90
6.14. Descripción del modelo de una esfera virtual para la detección de forma [94].	91
6.15. Determinación de los puntos de un plano de la malla de un objeto virtual compuesto [94].	92
6.16. Modelo sinusoidal de textura [94].	93
6.17. Modelo sinusoidal de textura con achatamiento [94].	93
6.18. Plano tangente en el punto de contacto.	95
6.19. Algoritmo de detección de objetos virtuales.	95
6.20. Plano virtual en el espacio de trabajo.	96
6.21. Restricción geométrica φ para el plano.	97
6.22. Esfera virtual en el espacio de trabajo.	98
6.23. Restricción geométrica φ para la esfera.	98
7.1. Control Híbrido (fuerza, posición y velocidad).	101
7.2. Trayectoria del efector final en el espacio de trabajo.	108
7.3. Seguimiento de la fuerza de contacto y el momentum.	108
7.4. Comportamiento del control en simulación.	109
7.5. Error de articular en simulación.	109
7.6. Comportamiento del control, ref=cte..	110
7.7. Comportamiento de la fuerza, ref=cte.	110
7.8. Comportamiento del control.	111
7.9. Comportamiento de la fuerza.	111
7.10. Comportamiento del control ref=senoidal.	112
7.11. Comportamiento de la fuerza ref=senoidal.	112
A.1. Dispositivos y diagrama del amplificador no inversor.	124

Índice de tablas

2.1. Parámetros Denavit-Hartenberg de PHANToM 1.0.	13
2.2. Parámetros PHANToM 1.0.	20
A.1. Sensor de fuerza y masas para experimentos.	121

Acrónimos

Siglas	Descripción
API	Aplication Programming Interface.
EF	Efector End.
EL	Euler Lagrange.
GHOST	General Haptic Open Software Toolkit.
HMD	Head Mounted Display.
INEGI	Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática
MatLab	Matrix Laboratory.
MC	Modelos Cinemáticos.
MCDP	Modelo Cinemático Directo de Posición.
MCDV	Modelo Cinemático Directo de Velocidad.
MD	Modelo Dinámico.
MIT	Massachussets Institute of Tecnology
NASA	National Aeronautics and Space Administration.
OpenGL	Open Graphics Library.
PHANToM	Personal HAptic iNterface Mechanism.
RAM	Random Access Memory.
SDK	Software Development Kit.
VRML	Virtual Reality Modeling Language.

Notación

Símbolo	Descripción
\mathbb{R}	Espacio de los reales.
\subseteq	Subconjunto.
\forall	Para todo.
\exists	Existe.
\Rightarrow	Implica.
\mapsto	Mapeo de dos elementos sobre la imagen.
\in	Perteneciente a.
\Leftrightarrow	Equivalente a, o sí y solo sí.
\subset	Conjunto.
C^∞	Espacio de las funciones suaves con la norma infinito.
$\mathbb{R}^{n \times m}$	Matriz con n filas y m columnas con elementos de \mathbb{R} .
\mathbb{R}^n	Espacio lineal de vectores de dimensión n .
\mathbb{R}^+	Campo de los reales positivos.
q	Vector de posiciones generalizadas.
$\mathcal{L}(\dot{q}, q)$	Lagrangiano.
$D(q)$	Matriz de fuerzas de inercia.
$C(q, \dot{q})$	Matriz de fuerzas de Coriolis y de fuerzas centrífugas.
$G(q)$	Vector de fuerzas gravitacionales.
τ	Vector de pares.
$\mathcal{E}(\dot{q}, q)$	Energía total o Hamiltoniano de un sistema.
$V(x)$	Función de Lyapunov.
$\dot{V}(x)$	Derivada de la función de Lyapunov, $\left(\frac{dV(x)}{dt}\right)$.
$f(x)$	Campo vectorial que indica las dinámicas de un sistema.
$g(x)$	Matriz de dinámica de las fuerzas de entrada.
\dot{q}	Vector de velocidades generalizadas.

Símbolo	Descripción
x	Campo vectorial que representa los estados de un sistema.
$h(x)$	Campo vector de salidas del sistema.
t	Tiempo, $t \in \mathbb{R} \geq 0$.
$D - \{0\}$	Dominio sin incluir el cero.
$\frac{d}{dt}(\cdot) = (\dot{\cdot})$	Derivada temporal.
$(\cdot)^T$	Transpuesta de una matriz.
J	Jacobiano de una función.
$\lambda_M K$	Máximo valor propio de la matriz K , $K \in \mathbb{R}^{n \times n}$.
$\lambda_m K$	Mínimo valor propio de la matriz K , $K \in \mathbb{R}^{n \times n}$.
\ddot{q}	Vector de aceleraciones generalizadas.
\tilde{q}	Vector de error de posición articular, donde $\tilde{q} = q - q_d$, con q_d como posición articular deseada.
$\dot{\tilde{q}}$	Vector de error de velocidad articular, donde $\dot{\tilde{q}} = \dot{q} - \dot{q}_d$, con \dot{q}_d como velocidad articular deseada..
S	Error extendido, con $S = \dot{\tilde{q}} + \alpha \tilde{q}$, y $\alpha \in \mathbb{R}^{n \times n}$ una matriz de ganancias simétrica y definida positiva.
u	Vector de entradas de control generalizadas.
$(\cdot)^{-1}$	Operador de función inversa.
$\mathcal{K}(\dot{q}, q)$	Energía cinética.
$\mathcal{U}(q)$	Energía potencial.

Capítulo 1

Introducción

Son múltiples las contribuciones en el control de una interfaz háptica [24][95][43], cuyas aplicaciones son relativas a la interacción con mundos virtuales modelados a partir de ambientes reales [134]. Una de las aplicaciones más destacadas de este tipo de dispositivos, es la teleoperación de sistemas robóticos remotos, y tener percepción de las características del ambiente a partir de una renderización de fuerzas en la estación maestra definida por la interfaz háptica. El propósito de este trabajo es diseñar e implementar, de manera experimental, una estrategia de control híbrido que permita lograr convergencia de regulación y seguimiento de posición, velocidad y fuerza de manera simultánea, que permita lograr estabilidad en la región de convergencia con condiciones de robustez sin necesidad de emplear la dinámica del sistema robótico (interfaz háptica). Para ello se recurre a referencias de trabajos destacados en otros trabajos de investigación como [104][43]. Para corroborar el desempeño experimental se emplea una interfaz háptica PHANToM 1.0 [144] en arquitectura abierta, con cinemática y dinámica conocida, así como un sensor de fuerza [127].

1.1. Antecedentes

1.1.1. Interfaz háptica

Dispositivos especializados para proveer de retroalimentación háptica, son el resultado de décadas de investigación activa en la industria y en laboratorios de universidades. En las décadas de los 50's y 60's, cuando la realidad virtual no existía, la investigación se orientó al desarrollo y mejoramiento de sistemas telerobóticos. En dicho sistema, el operador humano controla un brazo maestro que transmite sus comandos de movimiento a un esclavo remoto. El esclavo sigue a la entrada del maestro, interactuando con ambientes peligrosos tales como: nuclear, espacio exterior o sitios submarinos. El primer sistema de teleoperación estaba constituido única-

mente de transmisiones mecánicas para que el esclavo estuviera muy aproximado a los movimientos del maestro. Un primer servomecanismo eléctrico fue desarrollado en 1954 por Goertz y Thompson en el Laboratorio Nacional de Argonne [38]. Los servoactuadores reciben señales de retroalimentación de los sensores del esclavo, y aplican fuerzas a la mano del operador humano, quien sujeta al maestro. En este sentido, el operador humano siente como si él estuviera manipulando directamente al sistema remoto.

Para el año de 1965, el pionero de la computación gráfica, Ivan Sutherland propone una interfaz de despliegue visual para mundos virtuales que incluye retroalimentación háptica [122]. En 1976 éste equipo de investigación, utilizó accesorios y dispositivos sobrantes del proyecto de Goertz, para simular fuerzas de colisión en tres dimensiones [65]. El equipo de investigación de Brooks perseveró en lograr su objetivo original y 20 años más tarde, con equipo computacional de alto desempeño, logró culminar su trabajo.

De 1993 a 1995 surgieron de manera comercial, dispositivos con retroalimentación háptica, visual y auditiva. La tendencia del costo fué disminuyendo y con ello logrando que la comunidad de interfaces hápticas diversificara las aplicaciones, propusiera algoritmos nuevos y más rápidos, logrará la integración con otros dispositivos especializados, etc. Los dispositivos que lograron propósitos son el Touch Master y el SAFIRE Master en 1995 [80], el PHANToM Arm en 1994 [48] utilizado experimentalmente en este trabajo de investigación, y el Impulse Engine en 1995 [44].

Paralelamente surge, en Japón y en países europeos, una gran diversidad de dispositivos hápticos portables y no portables o de escritorio. Los dispositivos hápticos no portables han tenido un impacto relevante por su bajo costo, por el tipo de aplicaciones y por las especificaciones técnicas que presentan, tal es el caso del PHANToM Arm [80]. Otros dispositivos de alto desempeño fueron desarrollados paralelamente en Japón, como el SPIDAR I y II [48] del Instituto de Tecnología de Tokyo, el Sensing Glove de Hashimoto [44] desarrollado en la Universidad de Tokyo en 1994, el Joystick de seis grados de libertad Haptic Master de Nissho Electronics Co en 1995 [89], la interfaz háptica Pen-Based de la universidad de Tsukuba en 1993 [49], la interfaz háptica SPICE de Suzuki Motor Co. en 1994 y 1995 [2], y manipuladores cartesianos como el joystick cartesiano SICE [133] del Instituto Nacional de Biociencia y Tecnología Humana en 1994.

En los años recientes una interfaz háptica en tiempo real es desarrollado a través de modelos de control en Lahview (entorno virtual), que es una combinación de una interfaz táctil háptica fuerza de medición y un vibro-táctil CyberGlove, interfaz háptica de serie. La interfaz háptica es un prototipo para la retroalimentación en tiempo real, el control sobre la integración de robótica de sensores inteligentes [140]. Existen diferentes interfaces hápticas dependiendo el campo de aplicación al que esté predestinado, el algoritmo es dirigido a proporcionar la manipulación transparente de los

modelos rígidos con un alto número de polígonos [81]. Una interfaz háptica permite al usuario explorar en modelos 3D de una forma natural utilizando un dispositivo de pantalla táctil. Un algoritmo de procesamiento háptico debe generar un campo de fuerza para simular la presencia de estos objetos virtuales y sus propiedades de superficie (como la fricción y textura), o para guiar al usuario a lo largo de una trayectoria específica [68].

1.1.2. Interfaz háptica PHANToM 1.0

La interfaz háptica PHANToM [80], adicionalmente a las excelentes especificaciones técnicas [112] para evaluar algoritmos novedosos, y desarrollar aplicaciones en ingeniería y medicina con importante impacto social, es una interfaz que se ha convertido en un estándar por los beneficios y relativa fácil adquisición debido a su bajo costo. La compañía Sensable Technologies comercializa a PHANToM y oferta diversas versiones. La interfaz háptica PHANToM 1.0 es la utilizada en este trabajo de investigación con propósitos de guiado háptico local.

El primer dispositivo PHANToM fue diseñado y construido en el año de 1993 por Thomas E. Massie y el Dr. Kenneth Salisbury, Massie era un estudiante en el MIT y el Dr. Kenneth era científico principal del laboratorio de inteligencia artificial, trabajaron juntos para combinar las tecnologías de la robótica y la háptica, PHANToM consiste en un brazo robótico articulado con retroalimentación de fuerza. El PHANToM proporciona un medio natural y muy realista para tocar un objeto en 3D virtual. Lo que comenzó como un proyecto de tesis fue validado cuando la demanda de PHANToM lo comenzó a difundir a través de la investigación del MIT.

En 1995 Sensable lanza 100 prototipos PHANToM 1.0, sin embargo no fue hasta 1998 cuando se introduce al mercado. Hoy en día el PHANToM es un producto comercial de gran prestigio en la comunidad científica y técnica que está reduciendo considerablemente su precio y que se postula como la interfaz háptica del futuro.

Actualmente la empresa Sensable cuenta con cuatro dispositivos hápticos PHANToM, los cuales son mencionados a continuación[144]

PHANTOM Omni Device El Phantom Omni modelo es el dispositivo háptico más rentable disponible hoy en día Sensable es consciente de los clientes que han tenido dificultades con el dispositivo PHANTOM Omni con ciertos chipsets IEEE 1394a, PHANTOM dispositivos de Omni, que requieren varias E/S para el circuito de retroalimentación háptica para mantenerse, se comportan bien con los fabricantes de marca que utilizan chips de VIA.

PHANTOM Desktop Device El premiado dispositivo háptico Phantom Desktop proporciona una solución de escritorio asequible y es ideal para clientes que re-

alizan ciertos tipos de investigación háptica. El escritorio PHANTOM proporciona información de posicionamiento de precisión y de alta fidelidad de salida de retroalimentación de fuerza. Diseño portátil y compacto, y simple interfaz de puerto paralelo garantizar una rápida instalación y facilidad de uso.

PHANTOM Premium Device Los dispositivos de PHANTOM táctil ofrecen una amplia gama de retroalimentación de fuerza del espacio de trabajo, el rango de movimiento, la rigidez y la fuerza del motor para adaptarse a las necesidades específicas de diferentes proyectos de investigación. Los modelos Premium 1.0, 1.5 y 3.0 proporcionan tres grados de libertad de posición y sensores de 3 grados de libertad de información vigente. Los codificadores ópticos se pueden comprar por separado para el 1.0, 1.5, 3.0.

PHANTOM Premium 6DOF Device Este dispositivo permite a los usuarios explorar áreas de aplicación que requieren de la fuerza de respuesta de seis grados de libertad (6DOF). Los ejemplos incluyen el montaje virtual, creación de prototipos virtuales, planificación de ruta de mantenimiento, teleoperación, y el modelado molecular. Retroalimentación simulando fuerza de torsión que permite sentir las fuerzas de choque y la reacción y los pares de una parte en una ruta de montaje virtual, o el par de giro con el apoyo de un mando a distancia "esclavo" del robot en un entorno de teleoperación. Estos dispositivos proporcionan retroalimentación de fuerza en tres grados de libertad.

1.2. Breve descripción de estado del arte

1.2.1. Guiado háptico

El guiado háptico desde sus comienzos ha sido empleado para el desarrollo de sistemas de simulación y entretenimiento, en dicha clase de sistemas la información táctil y visual es de gran importancia, con lo cual se plantea otro propósito de sumo valor para los sistemas de guiado háptico, que es el apoyo en la rehabilitación a personas con discapacidades motrices. Una aplicación de guiado háptico en el área de entrenamiento surge recientemente en el cuidado de la salud, especialmente en el ámbito de cirugía, en el cual la interfaz háptica es utilizada para guiar físicamente a un usuario a través de un movimiento deseado, es decir efectuar un adiestramiento para la formación de habilidades complejas bajo entornos virtuales, y lograr así la adquisición de nuevas habilidades por medio de la comprensión cognitiva de ciertas tareas[70][27].

Trabajos de guiado háptico han sido reportados en los últimos años, muchos científicos utilizan la palabra guiado mecánico para referirse a guiado háptico, la cual

se considera una técnica común para enseñar a los pacientes durante las pautas de movimiento deseado durante una rehabilitación motriz. Los seres humanos y los robots tienen diferentes capacidades. Una de las principales ideas de la interacción hombre máquina, es utilizar a un robot como un asistente inteligente. En esta aplicación el ser humano tiene a su cargo la toma de decisiones, mientras que un robot se encarga de generar la fuerza [21][30][9].

El guiado háptico tiene múltiples aplicaciones en diferentes sectores tales como entrenamiento, entretenimiento, cirugías médicas, exploración espacial, rehabilitación y diagnóstico médico, etc. Otra aplicación que se le ha dado al guiado háptico es la de aprender a soldar correctamente, este trabajo fue realizado por Yizhong wang [136] y colaboradores sugieren que obtener la mejora y habilidad de soldar es importante, ya que la soldadura es la única manera de unir dos o más piezas de metal para hacerlos actuar como una sola pieza y es considerada una de las técnicas de apoyo más importantes en la industria de transporte, construcción, fabricación de maquinaria, industrias especiales, entre otras. Sin embargo el número de soldadores manuales disminuye rápidamente, principalmente en países avanzados, es por eso la importancia de adiestrar a nuevas personas por medio del guiado háptico.

El problema de guiado háptico es demostrar que el progresivo guiado háptico pueda acelerar y mejorar los resultados de entrenamiento motriz de una tarea visual. Para ello el diseño visual y táctil de los programas de guiado háptico basados en análisis de detalles de las diferencias de rendimiento entre expertos y aprendices al realizar movimientos dinámicos que influyen en el control de los actuadores en una ambiente virtual táctil. Para evitar esta dependencia un guiado háptico progresivo puede ser controlado de manera gradual como lo propone Joel C. Huegel y de esta manera eliminar la asistencia en el desempeño para mejoras de las prácticas. Implementan medidas similares y la trayectoria del error y la frecuencia de entrada para identificar y clasificar los niveles de rendimiento, ofreciendo así robustez, el cual es generado por la señal de control, Joel C. Huegel utiliza un Joystick force feedback para efectos de experimentos [53].

Existen varias propuestas para aumentar la percepción y la capacidad de un cirujano para realizar movimientos precisos. Mientras estos métodos comparten objetivos comunes. Tres enfoques se utilizan comúnmente: robots que realizan automáticamente los movimientos previstos por el usuario, herramientas de navegación especializadas que proveen retroalimentación visual al usuario, estas herramientas no mejoran la precisión ni la estabilidad del movimiento, desde una perspectiva mecánica y el tercer método son sistemas de teleoperación, aumentan la precisión y estabilidad del movimiento. La herramienta utilizada se encuentra montado sobre un brazo mecánico que se encarga de dos tareas, (1)proporciona una medición en tiempo real de la posición de la punta con respecto al órgano o tejido del paciente y (2) proporciona retroalimentación táctil por medio del guiado háptico quirúrgico, para la validación

de este concepto lo realizaron basados en el procedimiento de una biopsia [30].

1.2.2. Control de fuerza

La ejecución de tareas de contacto tales como, pulido, ensamble automatizado de parte y manipulación con manos de robots diestras, incluyen el proceso de fabricación y ruptura de contacto entre el efector final del robot y el ambiente u objeto. Durante la transmisión de movimiento libre a movimiento restringido, las fuerzas de contacto y la no-colocación del sensor y actuador resultan inestables en cuanto se utilizan ganancias grandes. Las tareas de contacto estan caracterizadas por tres fases: 1) Fase no restringida (fase de movimiento libre), 2) Fase de transición durante la cual la fabricación y ruptura de contacto resultan en cambios decisivos en la dinámica del sistema y 3) Fase de movimiento restringido (fase de contacto). Arimoto y colaboradores [5] proponen un controlador para un manipulador rígido de n -grados de libertad, con estabilidad asintótica (basada en el método de Lyapunov), que ejecuta todas las fases de las tareas de contacto, con ecuaciones no lineales de movimiento incluyendo parámetros desconocidos introducidos linealmente dentro de las dinámicas. Esta aproximación desarrolla ideas de sistemas dinámicos generalizados, un principio de ortogonalización para la proyección de posición y fuerza.

Las ultimas dos décadas se han estudiado los manipuladores en movimiento libre [99], sin embargo se han llevado a cabo pocos estudios para manipuladores restringidos. Parra y Navarro [100] proponen un controlador por modos deslizantes de segundo orden libre de modelo, basado en pasividad, para manipuladores bajo restricciones holonomas. Este esquema garantiza convergencia exponencial a trayectorias deseadas en la posición del efector final, la fuerza de contacto y la velocidad articular.

1.3. Justificación

Un robot manipulador, como otros sistemas que operan tanto en la industria como en otros sectores de aplicación relevantes, están sometidos a esfuerzos indescriptibles que merman la vida útil de sus mecanismos y demás componentes, pese a que un operador humano verifica su excelente desempeño a través de la tarea ejecutada. Las señales que permiten el funcionamiento de los mecanismos son de un factor de forma (amplitud y frecuencia) indeseable y que no son verificables por simple inspección por el operador del sistema ya que la tarea industrial está siendo desarrollada con resultados aceptables. En estas condiciones, la energía demandada por el sistema robótico, representa excesos innecesarios. Por lo que esta situación representa una importante razón tecnológica a tratar a partir de la planificación de la tarea y de la ley de control involucrada.

Para el caso de robots manipuladores empleados en tareas que representan fuerzas interactivas (restricciones de movimiento en el efector final), las estrategias de control son del tipo híbrido, en el que las consignas no solo corresponden a tareas de posición y velocidad (como ocurre en movimiento libre) también son de fuerza de interacción con el ambiente.

1.4. Planteamiento del problema

Un robot manipulador es diseñado para realizar tareas de movimiento restringido, como barrenado, atornillado, montaje, pintura, soldadura, entre otras aplicaciones que no solo reclaman la precisión de los movimientos (posición y velocidad de la herramienta en el espacio de trabajo), también reclaman estabilidad en la interacción, misma que es descrita por fuerzas entre el órgano terminal, la herramienta de corte y el ambiente de interacción. A estas condiciones de operación se les denomina manipulación robótica restringida, y las características relevantes son:

- Dinámica no lineal para movimiento y fuerza.
- Incertidumbre paramétrica en la dinámica del robot en ambientes no controlados.
- Condiciones de restricción de movimiento no conocidas.
- Dinámica de carga y herramientas en el órgano terminal no conocidas.

Por todo ello, se describe el problema a resolver a partir de las siguientes preguntas:

1. Es posible, con una sola ley de control, estabilizar posición, velocidad y fuerza de interacción?
2. Existe la posibilidad de modelar matemáticamente la superficie de contacto para identificar las fases de control en movimiento libre y restringido?
3. De qué depende el lograr una eficaz respuesta de control híbrido (fuerza-movimiento) para robots restringidos?

1.4.1. Solución propuesta

- Aplicación de técnicas de planificación de la tarea háptica para mejorar desempeño de la interacción.
- Diseño y evaluación experimental de técnicas de control no lineal para movimiento libre con el operador humano.

- Emplear un método con guiado háptico con estrategias de control simultáneo de fuerza y posición basadas en Lyapunov y Pasividad para mejorar las condiciones de operación.

1.4.2. Objetivo general

Diseñar e integrar estrategias de control en movimiento libre y restringido, para robots manipuladores, empleando teoría de pasividad y Lyapunov para definir condiciones de estabilidad en regulación y seguimiento de posición, velocidad y fuerza de interacción con ambientes dinámicos estructurados reales o virtuales.

1.4.3. Objetivos específicos

- Evaluar al dispositivo háptico PHANToM 1.0 como un sistema robótico con tareas de contacto en donde la superficie de trabajo sea real.
- Diseñar e integrar, en un dispositivo háptico de alto desempeño, una estrategia de control simultáneo de fuerza y posición con propósitos de establecer un procedimiento de guiado kinestético con retroalimentación háptica.

1.4.4. Contribuciones de la tesis

Las contribuciones de este trabajo de tesis son las siguientes:

- Abrir arquitectura de PHANToM 1.0 y obtener las lecturas de los codificadores ópticos (posición y velocidad articular).
- Validación experimental de los modelos matemáticos de la interfaz háptica PHANToM 1.0.
- Implementación de una técnica para convergencia en tiempo finito en robots manipuladores y su evaluación experimental.
- Diseño e implementación de un control no lineal para compensación dinámica del operador humano en el lazo de control, basada en modos deslizantes y de la retroalimentación de fuerza y movimiento.

1.4.5. Organización de la tesis

Este trabajo consta de ocho capítulos, un glosario y las referencias bibliográficas. Cada capítulo cuenta con una introducción y conclusiones al inicio y al final respectivamente, en seguida se da un resumen del contenido.

Capítulo 1 Se presenta una introducción sobre el estado del arte de las interfaces hápticas y sus derivados así como el planteamiento del problema y sus posibles soluciones. Por último se plantean los objetivos particulares y generales de este trabajo de investigación.

Capítulo 2 De manera particular se presentan las especificaciones técnicas de la interfaz háptica PHANToM premium 1.0 al igual que sus modelos matemáticos, así como la validación correspondiente a los modelos con la finalidad de realizar el diseño de controles basados en teoría de Lyapunov y pasividad.

Capítulo 3 Se presenta cómo son los movimientos de un robot en una tarea, cómo es la regulación a una coordenada operacional, también cómo es la regulación basada en seguimiento y el seguimiento de una trayectoria compuesta.

Capítulo 4 Se hace una descripción de las tareas experimentales con un control PID y un control PD con regulación y regulación basada en seguimiento.

Capítulo 5 Se presenta el control de movimiento PD con compensador de gravedad con fines de movimientos de un robot, también se realiza el diseño de una ley de control basado en conceptos de teoría de Lyapunov, pasividad y modos deslizantes, así como la implementación del control en experimentos de regulación, regulación basada en seguimiento y seguimiento de trayectorias cerradas.

Capítulo 6 En este capítulo estudiaremos los tipos de movimiento que existen tanto en tareas de un robot manipulador como en las tareas de guiado háptico. Al igual que el estudio de la generación de un objeto háptico virtual y sus resultados experimentales.

Capítulo 7 En este último capítulo se presenta el diseño e implementación experimental con PHANToM 1.0 un control híbrido (posición y fuerza), la retroalimentación de fuerza es por medio de un sensor cuadrado resistivo.

Capítulo 8 Se presentan las conclusiones generales de los resultados obtenidos.

Capítulo 2

Modelo matemático del dispositivo háptico PHANToM Premium 1.0

2.1. Introducción

En este capítulo se presentan las características de la interfaz háptica PHANToM y la interfaz de aplicaciones programable GHOST SDK, sus alcances y compatibilidad con otros lenguajes de modelado de realidad virtual. Se evalúa el desempeño de esta interfaz háptica y se describen sus límites de operación. Se presenta la obtención del modelo cinemático directo e inverso de posición, velocidad y aceleración, así como el modelo dinámico basado en la formulación de E-L del dispositivo háptico PHANToM 1.0.

El modelo matemático es de vital importancia para integrar a la interfaz háptica activa y aplicarlas en el diseño e implementación de estrategias de control de movimiento con propósitos de guiado háptico (exploración háptica pasiva), su validación experimental, así como las consideraciones para establecer a PHANToM en arquitectura abierta.

La función principal de PHANToM 1.0 es permitir al operador humano interactuar con un ambiente virtual, percibiendo fuerzas de retroalimentación para estímulo kinestético. Es un mecanismo de eslabones articulados cuyo extremo final es un dedal con que el operador humano interactúa. El estímulo visual se presenta mediante un ambiente OpenGL basado en GHOST SDK, tal y como se representa en la figura 2.11.

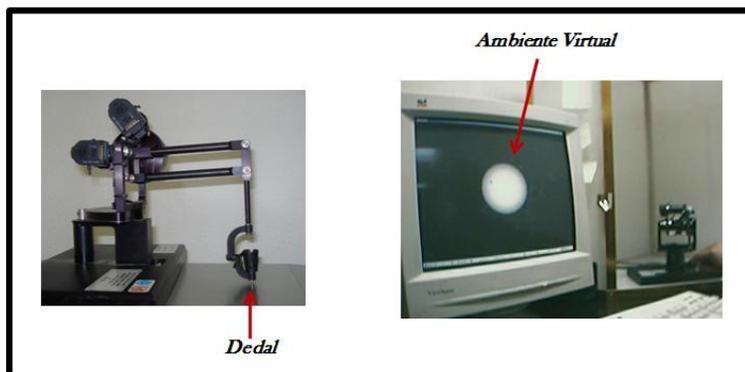


Figura 2.1: Interfaz háptica PHANToM 1.0 [94]

2.2. Modelo matemático de PHANToM 1.0

El modelo cinemático del dispositivo háptico corresponde al conjunto de ecuaciones que relacionan posición, velocidad y aceleración de las variables articulares con las coordenadas operacionales o variables de posición y orientación representadas en el espacio cartesiano. El modelo cinemático directo consiste en determinar las coordenadas operacionales y sus derivadas en términos de las variables articulares y derivadas. Estas ecuaciones permiten conocer la posición, velocidad y aceleración instantáneos que el efector final del dispositivo háptico tiene durante la ejecución de un experimento. El modelo cinemático inverso consiste en conocer la posición articular y derivadas en función de las coordenadas operacionales y derivadas [26].

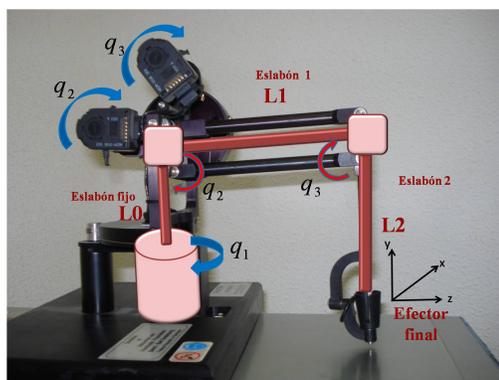


Figura 2.2: Cadena cinemática PHANToM 1.0 [51].

2.3. Modelo cinemático

En esta sección se describe la obtención del modelo cinemático de posición y de velocidad del dispositivo háptico PHANToM 1.0. La cadena cinemática de PHANToM esta constituida por $L0$, $L1$ y $L2$ que corresponden a las longitudes de los eslabones 1, 2 y 3. La cadena cinemática, están definidos en la (Tabla 1). El producto de las tres matrices elementales derivadas de los parámetros Denavit- Hartenberg constituyen una matriz de transformación homogénea (T) que permite definir la posición y orientación del órgano terminal respecto al marco ortonormal de referencia en la base del robot, y haciendo la transformación correspondiente al dedal [26][98]. Para el caso de estudio, el vector de orientación es nulo.

i	α	a	d	q
1	$-\pi/2$	0	0	q_1
2	0	L1	0	q_2
3	0	L2	0	q_3

Tabla 2.1: Parámetros Denavit-Hartenberg de PHANToM 1.0.

La matriz de transformación homogénea de PHANToM 1.0 esta definida a continuación.

$$T \begin{bmatrix} C_1 & -S_1S_3 & C_3S_3 & S_1(L1C_2 + L2S_3) \\ 0 & C_1 & S_3 & L2 - L2C_3 + L1S_2 \\ -S_1 & -C_1S_3 & C_1C_3 & -L1 + C_1(L1C_2 + L2S_3) \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.1)$$

donde $C_i = \cos(q_i)$ y $S_i = \sin(q_i)$. La columna 4 de la matriz de la ecuación (2.1) define al modelo cinemático directo de posición y que constituyen al conjunto de ecuaciones que permiten identificar las coordenadas operacionales del extremo final de PHANToM 1.0, respecto al marco de referencia base (dedal en la condición inicial de PHANToM 1.0), en función de las variables articulares o coordenadas generalizadas q_i , para $i = 1, 2, 3$.

2.3.1. Modelo cinemático de posición.

El **modelo cinemático directo de posición** $x = f(q)$ determina las coordenadas operacionales en términos de las variables articulares del robot, dada la matriz

de transformación homogénea de la ecuación (2.1), se tiene que:

$$\begin{aligned} X &= S_1(L1C_2 + L2S_3) \\ Y &= L2 - L2C_3 + L1S_2 \\ Z &= -L1 + C_1(L1C_2 + L2S_3) \end{aligned} \quad (2.2)$$

El modelo cinemático inverso de posición representa al conjunto de ecuaciones que permiten conocer las coordenadas generalizadas, con respecto a las coordenadas operacionales del extremo final de PHANToM 1.0. Para esto, es necesario considerar que la posición de inicio de PHANToM que define el marco de referencia base, donde $q_1 = 0rad$, $q_2 = 0rad$ y $q_3 = 0rad$ esta definido en la figura 2.3). Para ello se hace una transformación del marco de referencia del eslabón fijo al extremo final, auxiliandose de la vista superior del dispositivo háptico, figura 2.2, empleada para definir la coordenada generalizada q_1 .

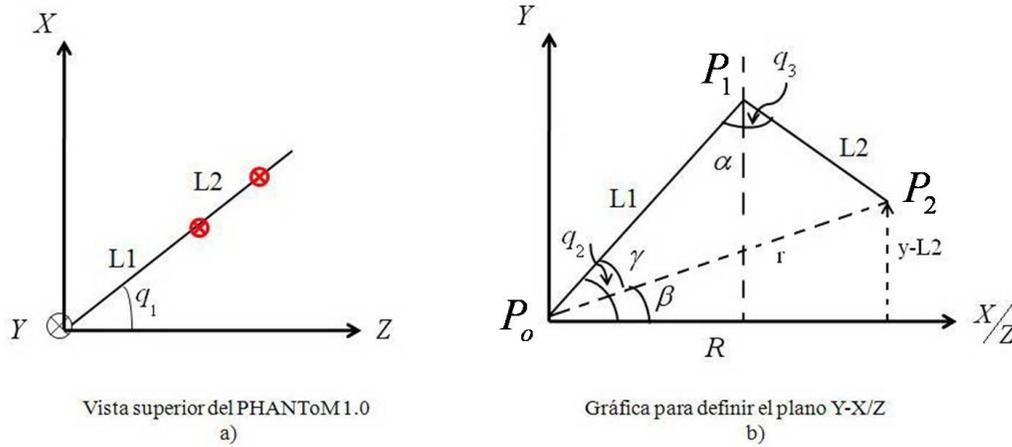


Figura 2.3: Gráfica auxiliar para determinar la cinemática inversa de PHANToM 1.0

El modelo cinemático inverso de posición consiste en la expresión de los ángulos q_i de cada articulación en función de la posición del efector final, en coordenadas cartesianas [85]. Para q_1 puede ser calculada por inspección y queda de la siguiente manera:

$$q_1 = -atan2(x, y + L1) \quad (2.3)$$

Para q_2 y q_3 se considera la figura 2.3 donde:

$$\begin{aligned} R &= \sqrt{x^2 + (z + L1)^2} \\ r &= \sqrt{x^2 + (z + L1)^2 + (y - L2)^2} \\ \beta &= atan2(y - L2, R) \end{aligned} \quad (2.4)$$

Sí se aplica la ley de cosenos en el triángulo P_0, P_1, P_2 , se tiene lo siguiente.

$$\begin{aligned} L1^2 + r^2 - 2L1 \cos(\gamma) &= L2^2 \\ \gamma &= \cos^{-1} \left(\frac{L1^2 + r^2 - L2^2}{2L1r} \right) \end{aligned} \quad (2.5)$$

Físicamente el dispositivo PHANToM 1.0 implica que $\gamma > 0$. Entonces:

$$q_2 = \alpha + \beta \quad (2.6)$$

Para calcular q_3 , se utiliza la ley de cosenos para el mismo triángulo P_0, P_1, P_2 , pero para el ángulo α .

$$\begin{aligned} L1^2 + L2^2 - 2L1 * L2 \cos(\alpha) &= r^2 \\ \alpha &= \cos^{-1} \left(\frac{L1^2 + L2^2 - r^2}{2L1 * L2} \right) \end{aligned} \quad (2.7)$$

Este ángulo es positivo de acuerdo con el área de trabajo real de PHANToM 1.0. Entonces:

$$q_3 = q_2 + \alpha - \frac{\pi}{2} \quad (2.8)$$

2.3.2. Modelo cinemático de velocidad

El modelo cinemático de velocidad relaciona a la velocidad articular en términos de la velocidad operacional y viceversa, y corresponde a la derivada temporal del modelo cinemático de posición y que de esta manera se genera la matriz Jacobiana J , útil en estrategias de control y decisión de robots.

La matriz jacobiana ayuda en el análisis y control del movimiento de un robot manipulador en cuanto a la determinación de configuraciones singulares. En las cercanías de un punto singular, para un pequeño cambio de posición sería necesaria una energía muy elevada, también existen configuraciones desde las cuales algunas direcciones son inalcanzables, por lo tanto el Jacobiano indica zonas singulares del dispositivo háptico PHANToM 1.0 [20][72].

El modelo cinemático directo de velocidad se describe como [49, 65]:

$$\dot{x} = J\dot{q} \quad (2.9)$$

donde $\dot{x} \in \mathbb{R}^{3 \times 1}$ corresponde al vector de velocidades operacionales, $J \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$ denota la matriz Jacobiana, y finalmente $\dot{q} \in \mathbb{R}^{3 \times 1}$ representa el vector de velocidades articulares.

Derivando la ecuación 2.2 con respecto al tiempo se obtiene:

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{z} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L1C_1C_2 + L2S_3C_1 & -L1S_1S_2 & L2S_1C_3 \\ 0 & L1C_2 & L2S_3 \\ -(L1S_1C_2 + L2S_1S_3) & -L1S_2C_1 & L2C_1C_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{q}_1 \\ \dot{q}_2 \\ \dot{q}_3 \end{bmatrix} \quad (2.10)$$

Por lo tanto la matriz jacobiana se expresa de la manera siguiente:

$$J = \begin{bmatrix} L1C_1C_2 + L2S_3C_1 & -L1S_1S_2 & L2S_1C_3 \\ 0 & L1C_2 & L2S_3 \\ -(L1S_1C_2 + L2S_1S_3) & -L1S_2C_1 & L2C_1C_3 \end{bmatrix} \quad (2.11)$$

El modelo cinemático inverso de velocidad de PHANToM 1.0 esta definido por $\dot{q} = J^{-1}\dot{x}$, donde J^{-1} es la matriz inversa del Jacobiano y esta definida por la siguiente ecuación:

$$J^{-1} = \frac{adj(J)}{\det(J)} \quad (2.12)$$

donde $adj(J)$ corresponde a la adjunta de la matriz Jacobiana y esta determinada por la ecuación 2.11, y $\det(J)$ denota su determinante y corresponde a la siguiente ecuación.

$$\det(J) = L1L2L1S_2S_3C_2 + L1C_2^2C_3 + L2S_2 - L2S_2C_3^2 + L2S_3C_2C_3 \quad (2.13)$$

Con la condición de que $q_3 \neq q_2 + \pi/2$ para evitar que la matriz J sea singular;

$$adj(J) = \begin{bmatrix} L1L2C_1C_{2-3} & 0 & -L1L2S_1C_{2-3} \\ -L2S_1S_3L1C_2 + L2S_3 & L2C_3L1C_2 + L2S_3 & -L2S_3C_1L1C_2 + L2S_3 \\ L1S_1C_2L1C_2 + L2S_3 & L1S_2L1C_2 + L2S_3 & L1C_1C_2L1C_2 + L2S_3 \end{bmatrix} \quad (2.14)$$

2.3.3. Modelo cinemático de aceleración

Este modelo permite el mapeo de las aceleraciones articulares a las operacionales, y es definido a partir de la derivada temporal del modelo cinamático directo de velocidad ecuación 2.9.

$$\ddot{x} = J\ddot{q} + \dot{J}\dot{q}$$

donde J corresponde a la derivada con respecto al tiempo de la matriz Jacobiana empleada en planificación de movimiento.

Por lo tanto:

$$\dot{J} = \begin{bmatrix} \dot{J}_{11} & \dot{J}_{12} & \dot{J}_{13} \\ \dot{J}_{21} & \dot{J}_{22} & \dot{J}_{23} \\ \dot{J}_{31} & \dot{J}_{32} & \dot{J}_{33} \end{bmatrix} \quad (2.15)$$

donde:

$$\begin{aligned}
 \dot{J}_{11} &= -\{L1S_1C_2 + L2S_1S_3\}\dot{q}_1 - L1S_2C_1\dot{q}_2 + L2C_1C_3\dot{q}_3 \\
 \dot{J}_{12} &= -L1S_2C_1\dot{q}_1 - L1S_1C_2\dot{q}_2 \\
 \dot{J}_{13} &= L2C_1C_3\dot{q}_1 - L2S_1S_3\dot{q}_3 \\
 \dot{J}_{21} &= 0 \\
 \dot{J}_{22} &= -L1S_2\dot{q}_2 \\
 \dot{J}_{23} &= L2C_3\dot{q}_3 \\
 \dot{J}_{31} &= -\{L1C_1C_2 + L2S_3C_1\}\dot{q}_1 + L1S_1S_2\dot{q}_2 - L2C_1C_3\dot{q}_3 \\
 \dot{J}_{32} &= L1S_1S_2\dot{q}_1 - L1C_1C_2\dot{q}_2 \\
 \dot{J}_{33} &= -L2S_1C_3\dot{q}_1 - L2S_3C_1\dot{q}_3
 \end{aligned} \tag{2.16}$$

El modelo cinemático inverso de aceleración, es el conjunto de ecuaciones que permite conocer la aceleración articular en términos de la aceleración operacional y de la velocidad articular, definida como $\ddot{q} = J^{-1}(\ddot{x} - \dot{J}\dot{q})$ donde $q \in \mathbb{R}^{3 \times 1}$ corresponde al vector de aceleraciones articulares y $\ddot{x} \in \mathbb{R}^{3 \times 1}$ define el vector de aceleraciones operacionales.

2.4. Descripción de la tarea de la aplicación de la cinemática

$$\begin{aligned}
 x_d &= \begin{bmatrix} x_d \\ y_d \\ z_d \end{bmatrix}; \dot{x}_d = \begin{bmatrix} \dot{x}_d \\ \dot{y}_d \\ \dot{z}_d \end{bmatrix}; \ddot{x}_d = \begin{bmatrix} \ddot{x}_d \\ \ddot{y}_d \\ \ddot{z}_d \end{bmatrix} \\
 x &= \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}; \dot{x} = \begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{z} \end{bmatrix}; \ddot{x} = \begin{bmatrix} \ddot{x} \\ \ddot{y} \\ \ddot{z} \end{bmatrix} \\
 q_d &= \begin{bmatrix} q_{d1} \\ q_{d2} \\ q_{d3} \end{bmatrix}; \dot{q}_d = \begin{bmatrix} \dot{q}_{d1} \\ \dot{q}_{d2} \\ \dot{q}_{d3} \end{bmatrix}; \ddot{q}_d = \begin{bmatrix} \ddot{q}_{d1} \\ \ddot{q}_{d2} \\ \ddot{q}_{d3} \end{bmatrix} \\
 q &= \begin{bmatrix} q_1 \\ q_2 \\ q_3 \end{bmatrix}; \dot{q} = \begin{bmatrix} \dot{q}_1 \\ \dot{q}_2 \\ \dot{q}_3 \end{bmatrix}; \ddot{q} = \begin{bmatrix} \ddot{q}_1 \\ \ddot{q}_2 \\ \ddot{q}_3 \end{bmatrix}
 \end{aligned}$$

donde $x_d, \dot{x}_d, \ddot{x}_d \in \mathbb{R}^{3 \times 1}$ representan a las coordenadas operacionales deseadas y derivadas (Tarea deseada del dispositivo háptico en el espacio de trabajo).

$x, \dot{x}, \ddot{x} \in \mathbb{R}^{3 \times 1}$ corresponden a los vectores columna de las coordenadas operacionales, ejecutadas en tiempo real, por el dispositivo háptico (Tarea real en el espacio de trabajo).

$q_d, \dot{q}_d, \ddot{q}_d \in \mathbb{R}^{2 \times 3}$ representan los vectores de variables articulares deseadas y derivadas como variables independientes de las leyes de control articular (Tarea deseada en el espacio articular).

$q, \dot{q}, \ddot{q} \in \mathbb{R}^{3 \times 1}$ corresponden a los vectores de variables articulares ejecutadas en tiempo real, por el dispositivo háptico (Tarea real en el espacio articular).

En la Figura 2.20 se observa el diagrama de flujo donde se ilustra el procedimiento para la validación experimental del modelo cinemático del dispositivo háptico PHANToM 1.0.

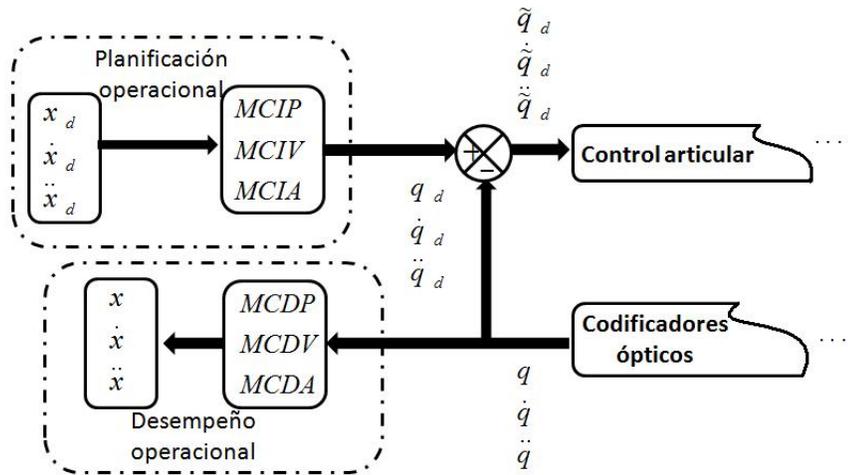


Figura 2.4: Gráfica auxiliar para observar el modelo cinemático de PHANToM 1.0

$\tilde{q}, \dot{\tilde{q}}, \ddot{\tilde{q}} \in \mathbb{R}^{3 \times 1}$, representan a los errores articulares útiles en la definición de las ecuaciones de control de movimiento.

2.5. Modelo dinámico

Las ecuaciones de movimiento de un robot manipulador, así como de una interfaz háptica son definidas de manera simple y sistemática a través de la formulación E-L,

definida a continuación:

$$\begin{aligned}
 \frac{d}{dt} \left[\frac{\partial L(q, \dot{q})}{\partial \dot{q}_i} \right] - \frac{\partial L(q, \dot{q})}{\partial q_i} &= \tau_i \\
 L &= \sum_{i=1}^n (K_i - U_i) \\
 K &= \sum_{i=1}^n \frac{1}{2} m_i v_i^2 = \frac{1}{2} \dot{q}^T D(q) \dot{q} \\
 U &= \sum_{i=1}^n m_i g h_i
 \end{aligned} \tag{2.17}$$

donde τ_i corresponde al par del i -ésimo actuador, L denota el Lagrangiano (sumatoria de energías totales del robot), K determina la energía cinemática total del robot, m_i define la masa del i -ésimo eslabón, v_i corresponde a la velocidad del i -ésimo eslabón, U define la energía potencial total del sistema, g es la constante de gravedad, h_i corresponde a la altura del centro de gravedad del i -ésimo eslabón.

Originando las ecuaciones de movimiento de un sistema completamente actuado definido de la siguiente manera

$$\begin{bmatrix} d_{11} & 0 & 0 \\ 0 & d_{22} & d_{23} \\ 0 & d_{32} & d_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{q}_1 \\ \ddot{q}_2 \\ \ddot{q}_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & c_{13} \\ c_{21} & 0 & c_{23} \\ c_{31} & c_{32} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{q}_1 \\ \dot{q}_2 \\ \dot{q}_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ g_2 \\ g_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \tau_1 \\ \tau_2 \\ \tau_3 \end{bmatrix} \tag{2.18}$$

y de manera sintética es descrita por la siguiente ecuación:

$$D(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} + G(q) = \tau$$

Los elementos de las matrices y vectores descritos previamente, para el dispositivo háptico son:

$$\begin{aligned}
 d_{11} &= \{(0.5L1^2 + 0.125L2^2)ma + (0.125L1^2 + 0.5L3^2)mc\} + 0.125L1^2(4ma + mc)\cos(2q_2) + d'_{11} \\
 d'_{11} &= -0.125(L2^2ma + 4L3^2mc)\cos(2q_3) + 0.125L1(L2ma + L3mc)\cos(q_2)\sen(q_3) \\
 d_{22} &= L1^2(ma + 0.25mc) \\
 d_{23} &= -0.5L1(L2ma + L3mc)\sen(q_2 - q_3) \\
 d_{32} &= d_{23} \\
 d_{33} &= 0.25L2^2ma + L3^2mc
 \end{aligned}$$

Los elementos de la matriz de fuerzas de Coriolis son:

$$\begin{aligned}
 c_{11} &= 0.25\{-2\text{sen}(q_2)[L1^2(4ma + mc)\text{cos}(q_2) + 2L1(L2ma + L3mc)\text{sen}(q_3)]\dot{q}_2\} + c'_{11} \\
 c'_{11} &= 0.25\text{cos}(q_3)\{2L1(L2ma + L3mc)\text{cos}(q_2) + (L2^2ma + 4L3^2mc)\text{sen}(q_3)\dot{q}_3\} \\
 c_{12} &= -0.25\{L1^2(4ma + mc)\text{sen}(2q_2) + 4L1(L2ma + L3mc)\text{sen}(q_2)\text{sen}(q_3)\dot{q}_1\} \\
 c_{13} &= -0.125\{-4L1(L2ma + L3mc)\text{cos}(q_2)\text{cos}(q_3) - (L2^2ma + 4L3^2mc)\text{sen}(2q_3)\dot{q}_1\} \\
 c_{21} &= -c_{12} \\
 c_{23} &= 0.5L1(L2ma + L3mc)\text{cos}(q_2 - q_3)\dot{q}_3 \\
 c_{31} &= -c_{13} \\
 c_{33} &= 0.5L1(L2ma + L3mc)\text{cos}(q_2 - q_3)\dot{q}_2
 \end{aligned}$$

Los elementos del vector de fuerzas gravitacionales son:

$$\begin{aligned}
 g_1 &= 0 \\
 g_2 &= g\{L1(ma + 0.5mc) + L_5m_{be}\}\text{cos}(q_2) \\
 g_3 &= g\{0.5L2ma + L3mc - L6m_{df}\}\text{sen}(q_3)
 \end{aligned}$$

2.5.1. Propiedades dinámicas

Los parametros del dispositivo háptico PHANToM 1.0 son:

Parámetro	Valor	Unidad
ma	17.5×10^{-3}	Kg
mc	10.4×10^{-3}	Kg
m_{be}	0.2214	Kg
m_{df}	0.1106	Kg
$L1$	13.97	cm
$L2$	13.97	cm
$L3$	0.325	cm
$L4$	0.368	cm
$L5$	0.527	cm
g	9.81	m/s^2

Tabla 2.2: Parámetros PHANToM 1.0.

Donde $F(\dot{q})$ representa el vector de fuerzas de fricción y que asocian viscosidad y fricción seca. Particularmente el diseño de PHANToM 1.0 representa un sistema de baja fricción articular y que para efectos de diseño de estrategias de control de movimiento no influye por considerarse una propiedad de pasividad.

Propiedad 1: La matriz de inercia $D(q)$ es una matriz simétrica, definida positiva, cuyos elementos son funciones de q .

$$\begin{aligned} D(q) &= D(q)^T \\ x^T D(q) x &> 0; \forall x \in R^{n \times 1} \end{aligned} \quad (2.19)$$

Propiedad 2: Matriz antisimétrica: la matriz de Coriolis $C(q, \dot{q})$ se encuentra relacionada con la matriz de inercias $D(q)$ por la expresión

$$x^T \{ \dot{D}(q) - 2C(q, \dot{q}) \} x \equiv 0; \forall x \in R^{n \times 1} \quad (2.20)$$

Propiedad 3: Linealidad en términos de los parámetros dinámicos.

$$D(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} + G(q) = Y(q, \dot{q}, \ddot{q})P \quad (2.21)$$

con $Y(q, \dot{q}, \ddot{q}) \in \mathbb{R}^{n \times n}$ que contiene elementos no lineales y $P \in \mathbb{R}^{m \times 1}$ contiene las m constantes dependientes de los parámetros dinámicos.

2.6. Validación experimental de los modelos cinemáticos y dinámicos

La validación experimental de los modelos cinemático y dinámico del dispositivo PHANToM 1.0, con la finalidad de diseñar e implementar leyes de control y evaluarlas a nivel simulación para posteriormente evaluar la ley de control experimentalmente y de esta manera proteger la vida útil del mismo.

Para realizar la validación de los modelos cinemático y dinámico se realizó una rosa como trayectoria 2.5 sobre el espacio de trabajo de PHANToM 1.0 de esta manera los codificadores ópticos proporcionan la información necesaria para realizar la validación.

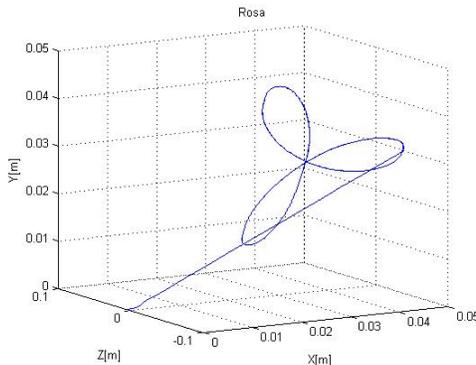


Figura 2.5: Rosa de tres pétalos.



Figura 2.6: Plataforma experimental.

2.6.1. Validación del modelo cinemático

En la figura 2.7 se observa la validación del modelo cinemático del dispositivo PHANToM 1.0 de sus tres coordenadas operacionales, de tal manera que el decremento inducido se presenta de manera continua en todo el experimento en sus tres coordenadas. Por otro lado en la figura 2.8 se ilustra la comprobación experimental del modelo cinemático de velocidad de las tres velocidades operacionales presentando de igual manera un decremento continuo.

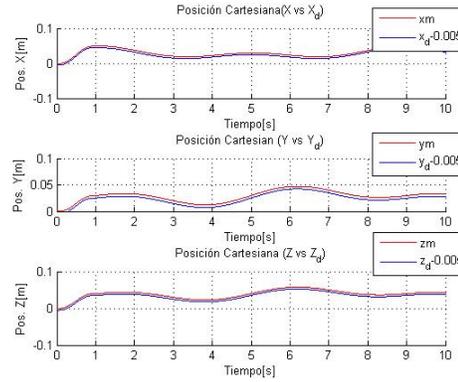


Figura 2.7: Posición cartesiana.

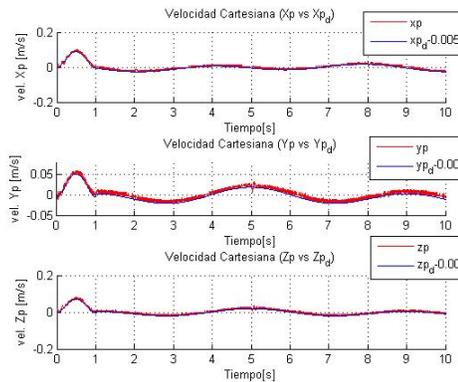


Figura 2.8: Velocidad cartesiana.

2.6.2. Validación experimental del modelo dinámico

Para realizar la validación del modelo dinámico se hace uso de la propiedad 1 $x^T D(q)x > 0$ y la propiedad 2 $x^T \dot{D}(q) - 2C(q, \dot{q})x$ respectivamente.

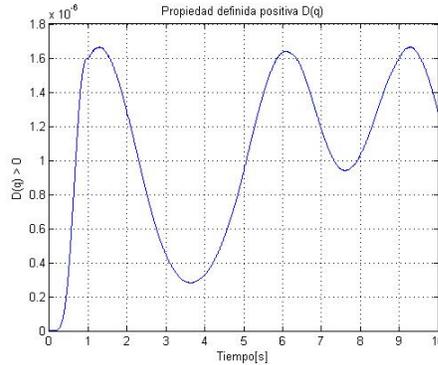


Figura 2.9: Propiedad: definida positiva.

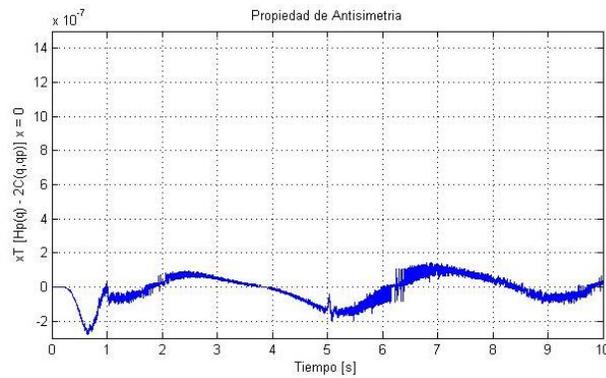


Figura 2.10: Propiedad: Antisimetría.

En la 2.9 y la 2.10 se observa la validación del modelo dinámico mediante las propiedades de definida positiva la matriz de inercias y antisimetría, como se puede observar la propiedad 1 siempre es definida positiva y aumenta su amplitud conforme el Efactor Final del dispositivo háptico se acerca a zonas singulares, de igual manera la segunda propiedad siempre alrededor de cero.

2.7. Interfaz háptica PHANToM 1.0

El diagrama de bloques de la figura 2.11, es representativo de la interfaz háptica PHANToM.

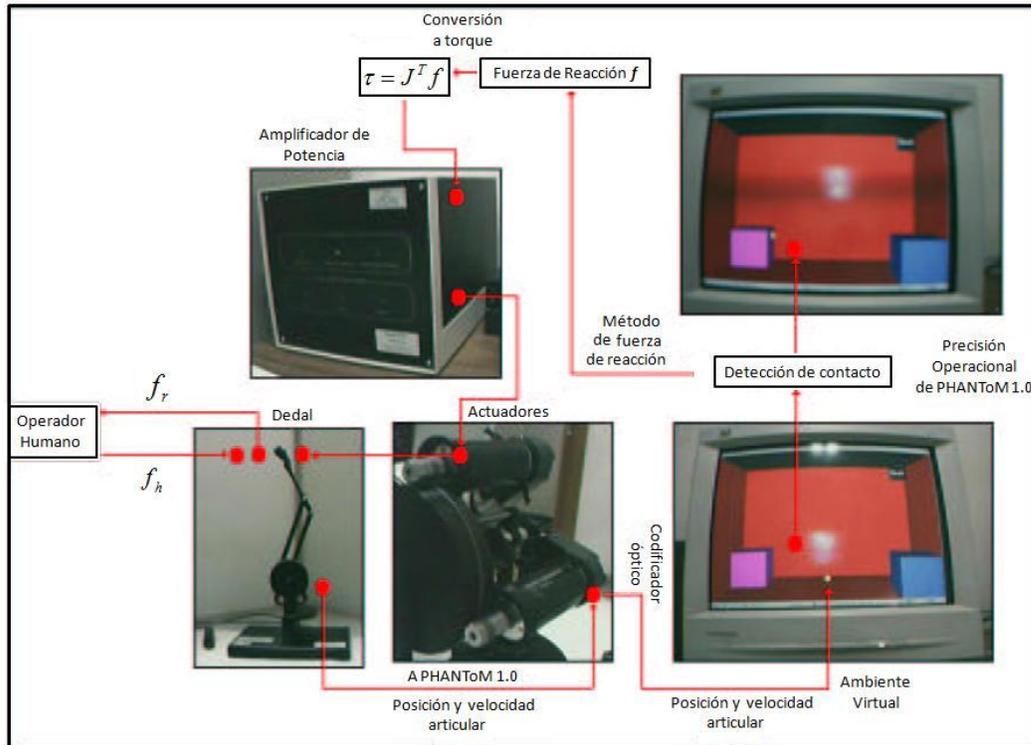


Figura 2.11: Diagrama a bloques de la interface háptica PHANToM 1.0 [94]

El operador humano aplica una fuerza f_h al dedal de PHANToM, modificando sus variables articulares, estas señales son registradas mediante los sensores o codificadores ópticos. Con el uso del modelo cinemático directo de posición de PHANToM, se obtienen las coordenadas operacionales que definen la posición cartesiana del operador humano en el ambiente virtual. La intersección del operador y el objeto virtual definen la fuerza de reacción (método de penalización). A través de esta fuerza de reacción f_r , se efectúa una transformación a pares, que aplicado a los actuadores, se recrea el estímulo kinestético en el dedal de PHANToM.

PHANToM es un dispositivo háptico de última generación que ha revolucionado la interacción hombre-máquina, permite aproximarse al realismo en la interacción debido a las características electromecánicas siguientes:

- Masa y fricción pequeñas.
- Bajo backlash.
- Resolución de 0.03 mm .
- Espacio de trabajo de $19.5 \times 27 \times 37.5 \text{ cm}^3$.

- Fuerza de fricción de 0.04 N .
- Máxima fuerza de 8.5 N .

2.7.1. La interfaz de aplicación programable GHOST SDK 3.1

GHOST (General Haptics Open Software Toolkit) es la interfaz de aplicación programable del dispositivo háptico PHANToM 1.0, ambos de la compañía SensAble Technologies. GHOST SDK es un conjunto de clases y librerías programadas en C++, permite la representación de un ambiente háptico a partir de una colección de objetos geométricos y efectos espaciales con propiedades cinemáticas y dinámicas. La escena gráfica corresponde a un árbol de jerarquía de nodos. Los nodos internos del árbol proporcionan los medios para la agrupación de objetos, orientando y escalando al subárbol relativo del nodo pariente, y adicionando propiedades dinámicas a sus subárboles. Los nodos terminales u hojas del árbol, representan la geometría actual o interfaces. Las hojas también contienen orientación y escalamiento relativo a sus nodos parientes. El dispositivo háptico en interacción es representado como un punto dentro de la escena gráfica. GHOST SDK automáticamente calcula la fuerza de interacción entre el punto que representa al dispositivo háptico y el objeto o efectos dentro de la escena, y envía pares al dispositivo háptico en interacción para recrear la fuerza de interacción. GHOST SDK no genera representaciones visuales de objetos dentro de la escena háptica, sin embargo es compatible con paquetes desarrolladores de gráficos como OpenGL y Open Inventor. Algunos otros aspectos importantes de GHOST SDK son:

- Modela ambientes hápticos usando un escenario gráfico con jerarquía háptica.
- Manejo de modelos geométricos compuestos o complejos durante la interacción háptica.
- Ayuda general para la generación de interfaces hombre-computadora con manipuladores hápticos con objetos en la escena utilizando retroalimentación de fuerza y efectos espaciales como resortes, impulsos, y vibraciones.
- Posibilidad de extender, modificar o reemplazar todas las clases objeto.
- Posibilidad de utilizar geométricas estáticas de VRML 2.0 para generar escenarios gráficos hápticos.

La interfaz de aplicación programable GHOST consiste en un conjunto de clases en C++, las cuales son expandibles a través de subclases. Estas están distribuidas en un árbol de jerarquía, como el siguiente

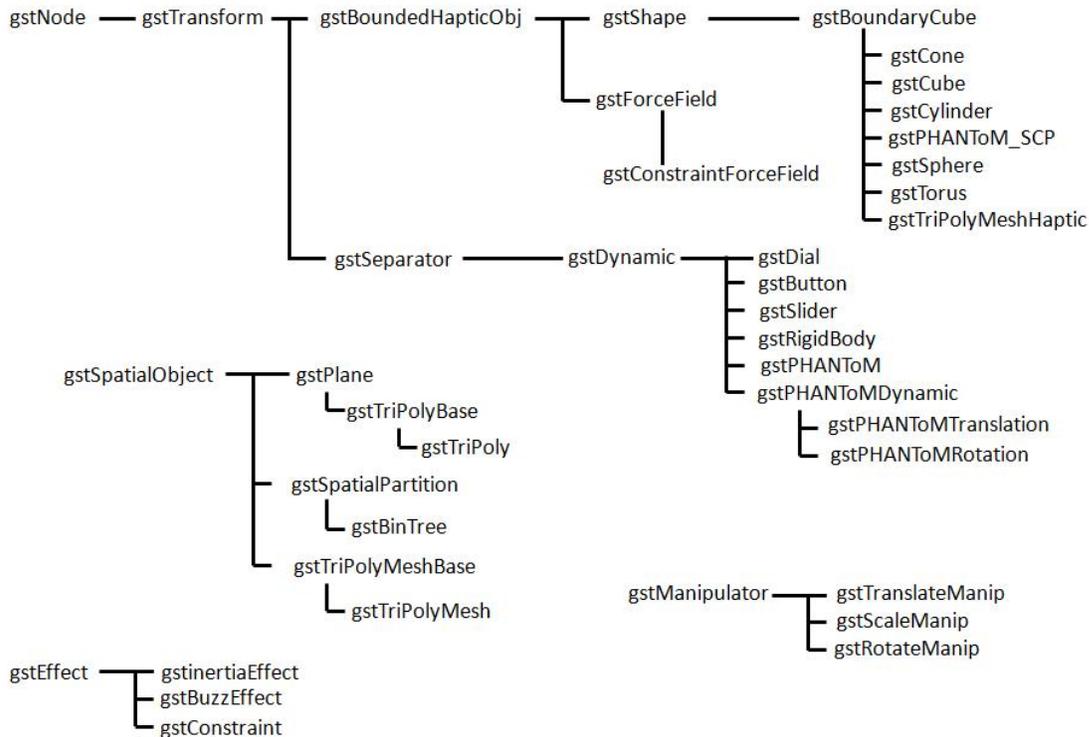


Figura 2.12: Árbol de clases de GHOST SDK

2.8. Integración en arquitectura abierta de la interfaz háptica PHANToM 1.0

En esta sección se dan a conocer los aspectos más reelevantes que se consideraron y desarrollaron para definir a la interfaz háptica PHANToM 1.0 en arquitectura abierta.

2.8.1. Arquitectura abierta PHANToM 1.0

Para poder evaluar técnicas de control en la interfaz háptica PHANToM 1.0, que permitan mejorar el desempeño en tareas de exploración, entrenamiento y telepresencia, se superaron aspectos que consideran la arquitectura abierta del sistema, tales como:

- Interfaz de aplicación programable (GHOST SDK 3.1).
- Desarrollar una clase con los manejadores de entrada y salida del sistema para adquisición de datos y control.

- Tener control en los tiempos de ejecución del ambiente de visualización virtual y del dispositivo háptico.
- Desarrollar código el modelo cinemático y dinámico del PHANToM..
- Desarrollar código en Visual C++ para protección de PHANToM.
- Desarrollar código en Visual C++ para adicionar par de contacto y par de fuerza.

2.9. Hardware

Los experimentos para la validación del método del Lagrangiano Restringido y aplicaciones adicionales en guiado háptico y asignación de propiedades superficiales fueron desarrollador con el equipo hardware siguiente:

- Computadora pentium 4 a 1.4 *GHz* y 1 *GB* de memoria RAM.
- Tarjeta de video GForce 3.
- Equipo PHANToM 1.0 (Sensable Technologies).

2.10. Software

Las características del software, en el que fueron desarrollados los experimentos son:

- Windows 2000 con XP.
- Visual C++ 6.0.
- Matlab 7.1.
- API de GHOST 3.1.

2.11. Conclusiones

En este capítulo se presentó el sistema humano-dispositivo háptico-visualizador virtual, constituye la conformación de una interfaz háptica y la aplicación define las características requeridas en la integración computacional. Se presentan los modelos matemáticos así como las propiedades matemáticas que rigen a los sistemas electromecánicos Euler-Lagrange del dispositivo háptico PHANToM 1.0, además de su

comprobación experimental a partir de las propiedades cinemáticas y dinámicas para poder aplicar nuevas estrategias de control de fuerza, haciendo la correspondiente comprobación experimental.

También se presentó la base de conocimiento de la tecnología de las interfaces hápticas, las características y principios de funcionamiento, así como la importancia de considerar las características anatómicas y fisiológicas de la interacción háptica para diseño y operación, situación que permite un acoplamiento estable con el operador humano, así como la apertura de la arquitectura y caracterización del dispositivo háptico, que comprende su sistema electromecánico y la interfaz de aplicación programable GHOST SDK 3.1.

Capítulo 3

Técnicas de planificación de movimiento

3.1. Introducción

La gran parte de los robots utilizados en la industria y en otras aplicaciones son esencialmente brazos articulados. Según el Instituto Americano del Robot (RIA: Robot Institute of America), la definición de un robot es un manipulador programable, multifuncional diseñado para mover materiales, piezas, herramientas o dispositivos especiales, mediante movimientos variados, programados para la ejecución de distintas tareas [135].



Figura 3.1: Robot manipulador [141].



Figura 3.2: Robot móvil [143].

Una clasificación de los robots en función de sus características mecánicas como se muestran en las figura 3.1 y 3.2 son:

- Fijos o manipuladores: en los que la base del robot está fija en un punto del espacio en el que se encuentra (Figura 3.1).

- Móviles: en éstos la base no está fija y se puede mover con una cierta libertad por el espacio (aunque puede existir algún tipo de restricción) figura 3.2 [85].

La planificación de caminos libres de obstáculos suele formularse como el siguiente algoritmo: dada la posición inicial (P_I) y una posición deseada (P_D) del robot, se trata de generar un camino desde P_I a P_D libre de obstáculos, eventualmente, óptimo respecto a ciertos criterios de funcionamiento [135].

El mínimo requerimiento para un robot manipulador es la capacidad de moverse de P_I a P_D asignada, para esto es necesaria la planeación de algoritmos que generen adecuadamente una trayectoria suave.

En la planeación de trayectorias se requiere la descripción de la trayectoria deseada, las restricciones de la misma y las impuestas por la dinámica del sistema. Con base en esta información, el algoritmo de planeación de trayectorias genera un tiempo de secuencia de las variables que describe la posición y orientación del efector final con respeto al tiempo de la limitación dada.

Subsecuentemente de la acción de mando, en el manipulador se lleva a cabo la trayectoria en el espacio articular por medio del modelo cinemático inverso, usado para obtener la correspondiente secuencia del espacio operacional al articular. La planeación de trayectorias en el espacio operacional permite conocer de manera más explícita las limitantes de las trayectorias, como la existencia de obstáculos, debido a que se tiene una mejor descripción del espacio de trabajo, el cual es difícil de calcular en el espacio articular [23].

La planificación de movimientos en un robot, no solo representa alcanzar una posición operacional en su espacio sino que implica averiguar la existencia de obstáculos susceptibles de colisión que representan, de ser así, un daño en el mecanismo de eslabones articulados. El conocer la presencia de obstáculos y lograr evadirlos representa la replanificación de movimiento, en la literatura existen abundantes trabajos teórico-experimentales con resultados innovadores y exitosos [58] [67] [88]. Sin embargo, poco se ha explorado sobre la fatiga y daño en sus componentes (transmisiones mecánicas, eslabones, articulaciones, actuadores, interfaz electrónica de potencia, acondicionamiento de señales, percepción, fuentes de potencia y respaldo, etc.) por la existencia de esfuerzos cortantes simples y dobles; esfuerzos de torsión, esfuerzos de compresión y tensión, vibraciones mecánicas y esfuerzos eléctricos que implican una reducción relevante en su vida útil e influyen en un bajo desempeño, operativo y riesgo inminente de fallo recurriendo así a mantenimiento correctivo o en el mejor de los casos incremento en mantenimiento preventivo. Esta situación operativa tiene su

posible causa en lo siguiente:

1. Planificación de tareas cerca de regiones singulares o de baja manipulabilidad.
2. Excesivo uso de regulación operacional sin seguimiento.
3. Técnicas de control lineal de fácil programación y bajo desempeño.
4. Alta frecuencia en la retroalimentación de velocidad articular por el no uso de filtros y su estimación a partir de posición.

En este trabajo de tesis se pretende explorar y dar a conocer, a través de resultados experimentales, los beneficios que representa emplear una adecuada planificación de movimientos. Para ello, en este capítulo se abordan las diferentes formas de planificación teórica y experimentalmente corresponde a:

- Regulación a una coordenada operacional.
- Regulación basada en seguimiento.
- Seguimiento de una trayectoria cerrada.
- Seguimiento de una trayectoria compuesta.

3.1.1. Movimientos de un robot en una tarea

La planificación de tareas se puede ver como un bloque lógico con una entrada y una salida. La entrada sería una descripción de la tarea que el usuario desea que ejecute el robot y la salida sería el conjunto de operaciones necesarias para su realización. Por ejemplo, supóngase que un robot manipulador se encuentra en una planta de fabricación de circuitos electrónicos, la entrada en la planificación de tareas corresponde a "montar el circuito X", la salida dividiría la tarea en las siguientes operaciones:

1. Coger la tarjeta vacía y colocarla en un soporte.
2. Recoger cada uno de los componentes necesarios y colocarlos en las posiciones debidas.
3. Transportar la tarjeta a la línea de embalado.

El paso 2 se subdivide a su vez en otros pasos más sencillos para cada uno de los componentes (recoger el componente, colocarlo en su posición y soldarlo). A pesar de la sencillez del ejemplo, en general, la planificación de tareas puede ser sumamente compleja, porque la tarea en sí misma lo sea o porque se deseen introducir mejoras

adicionales, como pueden ser la tolerancia a fallos, la optimización del tiempo de ejecución, la integración con el resto de los componentes de la línea de fabricación, etc.

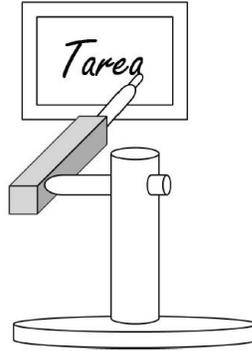


Figura 3.3: Ejemplo de una tarea [51].

La planificación de movimientos se encarga de encontrar un camino que conecte P_I y P_D sin que ocurran colisiones con los obstáculos que ocupan parcialmente su entorno de trabajo, o devolver un fallo si este camino no existe. Por ejemplo, para la primera operación del montaje de la tarjeta electrónica, las entradas en la planificación de movimientos sería P_I donde se encuentra la tarjeta vacía y P_D del soporte donde debe ser colocada. Su salida sería la secuencia de movimientos que le permiten desplazarse desde P_I hasta P_D , sin que choque con los objetos que se encuentran en su entorno de trabajo o viole alguna de las restricciones que el robot mismo impone sobre su movimiento. Un punto de vista incorrecto y muy extendido es el que considera que la planificación de movimientos consiste esencialmente en detectar colisiones, pero además se ocupa de calcular caminos libres de colisiones entre obstáculos móviles, de coordinar el movimiento de varios robots, de planificar movimientos para empujar y deslizar objetos con el fin de lograr relaciones exactas entre estos, de planificar la manera de coger los objetos de forma estable, etc. [85].

3.2. PHANToM 1.0 como dispositivo electromecánico controlable

3.2.1. Control de fuerza para retroalimentación háptica

PHANToM premium 1.0, es un dispositivo háptico de baja fricción articular equivalente a $0.04 N$, de esta manera la formulación Euler Lagrange aplicada a este dispositivo no considera de manera adicional el vector de fuerzas de fricción viscosa debido a la magnitud del coeficiente especificado, propiedad indispensable para la operación

de un dispositivo háptico con alto desempeño. La fuerza máxima equivalente en el efector final (dedal) corresponde a $8.5 N$, de forma tal que se considera una protección de desconexión cuando $f = J^T^{-1}$ excede el valor de esta fuerza, misma que podría dañar físicamente al operador humano en el lazo de control (perturbación inducida durante tareas de guiado háptico, donde $J \in \mathbb{R}^{n \times n}$ representa la matriz Jacobiana de PHANToM 1.0. De la misma manera los efectos inerciales inherentes al dispositivo son relativamente pequeños, haciendo de este sistema un dispositivo háptico con alto desempeño. Los codificadores ópticos que retroalimentar posición y velocidad articular permiten garantizar variaciones en el espacio operacional (espacio de trabajo) de $0.03 mm$ en cualquiera de los ejes X, Y y Z .

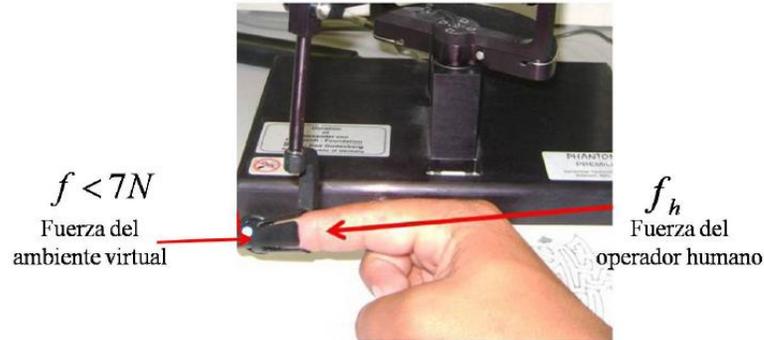


Figura 3.4: PHANToM 1.0 - operador humano en el punto de contacto virtual.

La participación del operador humano sujetando un dedal e introduciendo una fuerza f_h (perturbación externa que no excede los $7 N$) como se muestra en la Figura 3.4, y cuya dimensión obliga a modificaciones de la configuración del dispositivo, cuyos cambios representan movimiento articulares sensados mediante los codificadores ópticos mecánicamente acoplados a los servomotores, estas señales corresponden a las variables articulares de posición y velocidad y que originalmente son empleadas para modificar el ambiente de realidad virtual que estimula visualmente al operador, instantáneamente se evalúa un algoritmo de detección de contacto de forma tal que cuando este evento ocurre se calcula una fuerza de reacción f_r , misma que permite determinar al vector de pares generalizados necesarios de aplicar en los actuadores a través de la interfaz electrónica de potencia, este mapeo de fuerza-par es descrito a partir de la ecuación siguiente:

$$\tau = J^T f \quad (3.1)$$

Donde $f = f_r$ que estimula al operador humano en el dedal representa el contacto que tuvo de manera equivalente en el ambiente virtual [26].

3.2.2. Control para retroalimentación de posición y velocidad

PHANToM 1.0 al corresponder a un mecanismo de eslabones articulados cuya estructura permite un modelado matemático es posible aplicar leyes de control de movimiento para garantizar estabilidad del dispositivo con el operador humano en el lazo y durante la ejecución de tareas de movimiento (regulación, regulación basada en seguimiento, seguimiento aleatorio y seguimiento estructurado) que permitan desarrollar aplicaciones de entrenamamiento asistido o exploración guiada.

El diagrama a bloques siguiente permite visualizar como PHANToM 1.0 puede ser controlado como un dispositivo robótico en movimiento libre con y sin perturbación en el efector final (operador humano en el lazo).

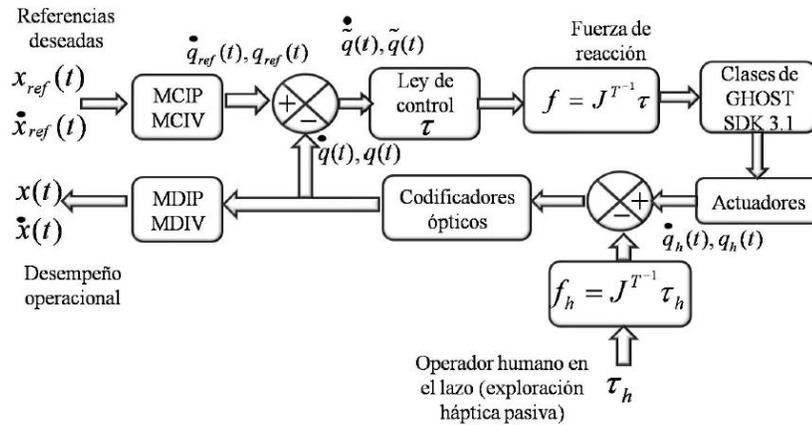


Figura 3.5: Diagrama de retroalimentación de posición y velocidad.

En el diagrama de la figura 3.5 se presenta un esquema de exploración háptica pasiva, basada en el control de movimiento de PHANToM 1.0 con el propósito de guiar un operador humano que se asume formalmente como una perturbación τ_h , y que altera la trayectoria x_{ref} ; \dot{x}_{ref} en tiempo real definida como consigna de movimiento para la ley de control propuesta τ propicie que los errores inducidos por la dinámica de PHANToM y τ_h estén cercanos a cero \tilde{q} , $\dot{\tilde{q}}$.

Dado que las clases de GHOST SDK 3.1 envían una señal de control de fuerza τ a partir de la f calculada y con el afán de emplear este recurso, la señal τ de control es mapeada a fuerza $f = J^{T-1}\tau$. En estas condiciones solo resta diseñar de manera conveniente y considerando la dinámica no lineal de interacción: PHANToM-Operador humano a la ley de control que permita mejorar el desempeño de la tarea.

3.3. Técnicas de planificación de movimiento

3.3.1. Regulación a una coordenada operacional

La aplicación general que tiene un robot manipulador, es moverse o deslizarse de P_I a P_D dentro de su espacio de trabajo, P_I representa una triada de coordenadas operacionales cartesianas en $P_I(X_I, Y_I, Z_I)$ de origen o condición inicial. P_D corresponde a la triada de coordenadas operacionales cartesianas en $P_D(X_D, Y_D, Z_D)$ del destino final del órgano terminal del robot. Cuando un robot manipulador traslada su efector final de una coordenada operacional a otra desconociendo la trayectoria que describe su movimiento y el tiempo de convergencia a P_D se le conoce como **Regulación a una coordenada operacional**. En la Figura 5.4 se observa un robot de tres grados de libertad el cual se desplaza de P_I a P_D en diferentes trayectorias (T_1, \dots, T_N , para el caso gráfico $N = 6$) y diferentes tiempos de convergencia, todos ellos desconocidos.

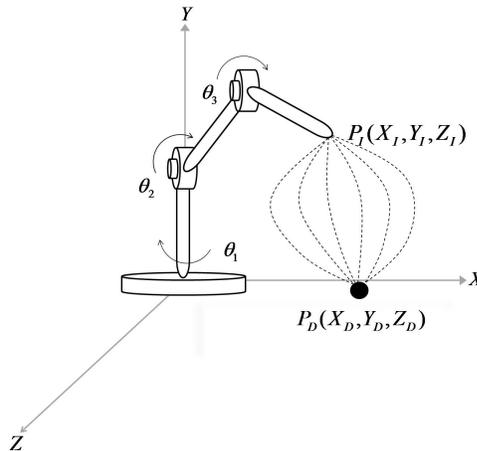


Figura 3.6: Regulación a una coordenada operacional [75].

La tarea del robot manipulador 5.4 corresponde a trasladarse a una coordenada operacional deseada P_D a partir de una condición inicial P_I . Es claro que la trayectoria T puede ser distinta, y el propósito de la tarea es el mismo, dado que T es diferente en todos los casos y los tiempos de ejecución t_b (tiempo de convergencia) también lo son. El hecho de no conocer T y t_b representa incertidumbre en la operación y en la dinámica interna en el manipulador.

Esto implica altos riesgos en la industria dado que el operador del robot desconoce la trayectoria que efectuaría el robot poniendo en riesgo la integridad física de las personas que se encuentre alrededor, también afectando al mismo robot dado que puede sufrir daños en los actuadores y transmisiones mecánicas, debido a la demanda

excesiva de fuerza a estos.

Una elección adecuada de la ley de control para regulación puede atenuar la problemática presentada sin embargo no libera en su totalidad al robot de esfuerzos y dinámicas indeseables a las que está sometido.

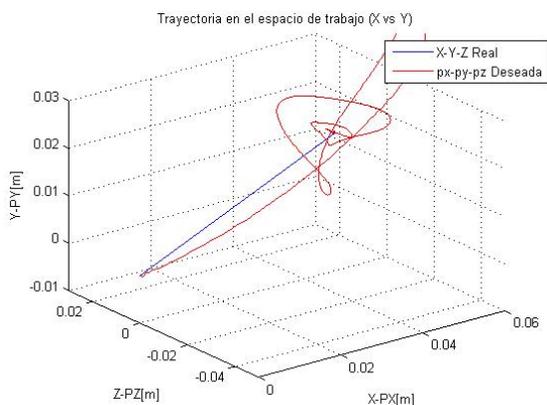


Figura 3.7: Trayectoria a una coordenada operacional

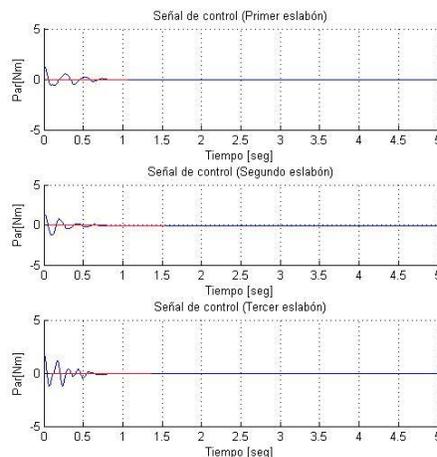


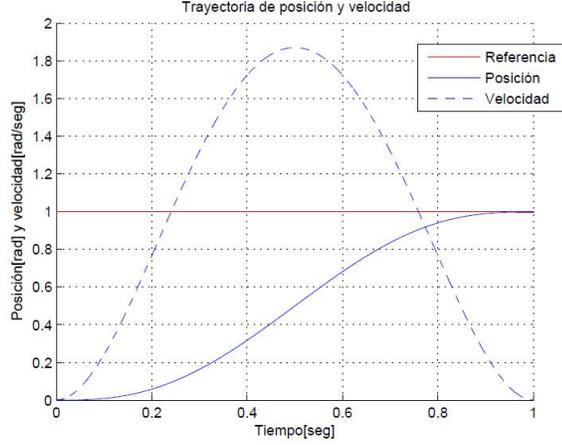
Figura 3.8: Ley de control

Un ejemplo de esto se aprecia en las figura 3.7 y 3.8 en la cual la ley de control utilizada permite alcanzar la referencia, sin importar el esfuerzo ocasionado al sistema por intentar alcanzar rápidamente la referencia, sin conocer en que tiempo alcanzará a la referencia o si alcanzara.

3.3.2. Regulación basada en seguimiento (RBS)

Dado que la regulación a una coordenada operacional representa incertidumbre en la trayectoria T , en el tiempo de convergencia, en la calidad de la energía suministrada en actuadores y en el bajo desempeño dinámico en P_I (intentar vencer efectos inerciales debido al estado de reposo) y P_D (intentar vencer con los efectos inerciales debido al estado de movimiento), se propone mejorar este desempeño a través de la regulación a una coordenada operacional planificando el movimiento de P_I a P_D y garantizando la convergencia en P_D durante un tiempo conocido o finito t_b atenuando la dinámica inercial antes descrita.

La regulación basada en seguimiento se realiza por medio de una función $\xi(t) \in \mathbb{C}$, que se diseña de forma tal que tenga un desempeño suave tal que $\xi(0) = 0$ y $\xi(t_b) = 1$ durante un tiempo finito arbitrario $t = t_b > 0$, con t_b como el tiempo de convergencia elegido arbitrariamente por el usuario y que la dinámica del manipulador permita considerar que $\dot{\xi}(t)$ sea una campana tal que $\ddot{\xi} = \dot{\xi} \equiv 0$.


 Figura 3.9: Trayectoria de ξ y $\dot{\xi}$ con $t_b = 1$ segundo.

La trayectoria $\xi(t)$, su primera derivada $\dot{\xi}$ y segunda derivada son definidas por los siguientes polinomios

con posición

$$\xi(t) = a_3 \frac{(t - t_0)^3}{(t_b - t_0)^3} - a_4 \frac{(t - t_0)^4}{(t_b - t_0)^4} + a_5 \frac{(t - t_0)^5}{(t_b - t_0)^5} \quad (3.2)$$

con velocidad

$$\dot{\xi}(t) = 3a_3 \frac{(t - t_0)^2}{(t_b - t_0)^3} - 4a_4 \frac{(t - t_0)^3}{(t_b - t_0)^4} + 5a_5 \frac{(t - t_0)^4}{(t_b - t_0)^5} \quad (3.3)$$

con aceleración

$$\ddot{\xi}(t) = 6a_3 \frac{(t - t_0)}{(t_b - t_0)^3} - 12a_4 \frac{(t - t_0)^2}{(t_b - t_0)^4} + 20a_5 \frac{(t - t_0)^3}{(t_b - t_0)^5} \quad (3.4)$$

teniendo como condiciones que $\xi(t_0) = 0$, $\xi(t_b) = 1$, $\dot{\xi}(t_0) = 0$, $\dot{\xi}(t_b) = 0$ y $\ddot{\xi}(\frac{1}{2}t_b) = 0$, con el propósito de que el valor máximo de $\dot{\xi}$ ocurra en $\frac{1}{2}t_b$. Los coeficientes se definen mediante la solución del sistema

$$\begin{aligned} a_3 - a_4 + a_5 &= 1 \\ 3a_3 - 4a_4 + 5a_5 &= 0 \\ 6a_3 - 12a_4 + 20a_5 &= 0 \end{aligned} \quad (3.5)$$

en donde la solución es $a_3 = 10$, $a_4 = 15$ y $a_5 = 6$ [23].

El uso de las trayectorias $\xi(t)$ y $\dot{\xi}(t)$ permite definir como referencia de seguimiento para el efector final del robot o bien de cada articulación, un movimiento idóneo para la regulación, en donde:

$$\begin{aligned} X_D(t) &= X_D \xi(t) \\ Y_D(t) &= Y_D \xi(t) \\ Z_D(t) &= Z_D \xi(t) \end{aligned} \quad (3.6)$$

$$\begin{aligned} \dot{X}_D(t) &= X_D \dot{\xi}(t) \\ \dot{Y}_D(t) &= Y_D \dot{\xi}(t) \\ \dot{Z}_D(t) &= Z_D \dot{\xi}(t) \end{aligned} \quad (3.7)$$

Situación que obliga a la siguiente respuesta:

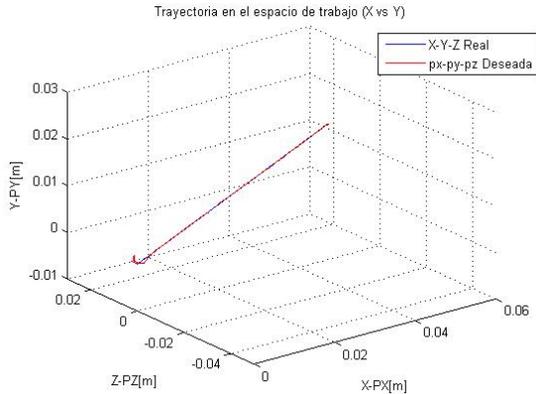


Figura 3.10: Trayectoria a una coordenada operacional (RBS)

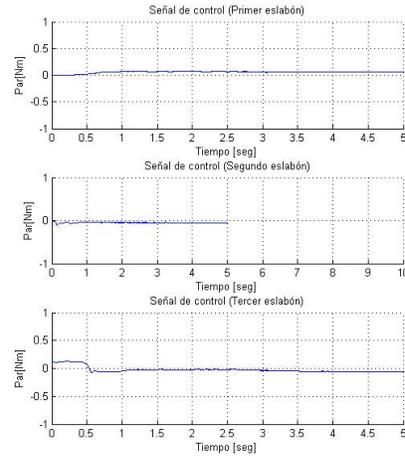


Figura 3.11: Ley de control (RBS)

En las Figuras 3.10 y 3.11 se puede apreciar que la evolución del órgano terminal del robot es suave incluyendo a las coordenadas en P_D que implicaba problemática de control por la existencia de la dinámica inercial. De la misma manera es posible garantizar el conocimiento del tiempo de convergencia t_b y la simetría en los perfiles de velocidad por las condiciones de sistema de ecuaciones 3.2 y 3.3. El seguimiento representado en las figuras 3.6 y 3.7 comprende un seguimiento operacional y que garantiza un comportamiento similar en las articulaciones del robot.

3.3.3. Seguimiento de una trayectoria cerrada

Se le llama trayectoria cerrada a una sucesión de puntos definidos por una ecuación (generalmente paramétrica), que inicia en una coordenada operacional inicial P_I y termina en P_D con $P_I = P_D$. Una de las más utilizadas, con propósitos de validación

experimental de técnicas de control en el campo de la robótica, es la circunferencia la cual esta definida por las siguientes ecuaciones paramétricas:

$$\begin{aligned} x(t) &= h + r \cos(\omega t) \\ y(t) &= k + r \sin(\omega t) \\ z(t) &= h + r \sin(\omega t) \end{aligned} \quad (3.8)$$

Donde h y k representan su centro, r el radio, $\omega = 2$ (rad/seg.) corresponde a la velocidad angular, f es la frecuencia y finalmente $T = \frac{1}{f}$ corresponde al tiempo de duración de la circunferencia (periodo de las señales) como se muestra en la figura 3.12.

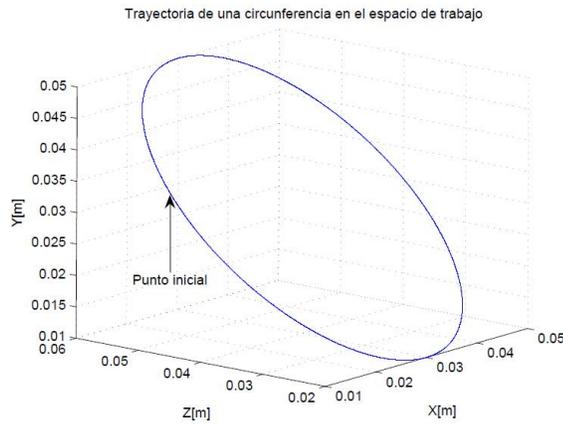


Figura 3.12: Trayectoria de una circunferencia.

Otro ejemplo de una trayectoria cerrada es el de una rosa de tres pétalos definida por las siguientes ecuaciones:

$$\begin{aligned} x(t) &= \rho(t) \cos(\varphi(t)) + h \\ y(t) &= \rho(t) \sin(\varphi(t)) + k \\ z(t) &= \rho(t) \sin(\varphi(t)) + h \end{aligned} \quad (3.9)$$

y

$$\lambda = \omega f \quad (3.10)$$

$$\varphi(t) = \lambda t \quad (3.11)$$

$$\rho(t) = r \cos(n\varphi(t)) \quad (3.12)$$

Donde h y k representan su centro, $n = nmero$ de pétalos, $\lambda = 1$, r el radio, $\omega = 2$ ($rad/seg.$) corresponde a la velocidad angular, f es la frecuencia y finalmente $T = \frac{1}{f}$ corresponde al tiempo de duración de la circunferencia (periodo de las señales) como se muestra en la Figura 3.12.

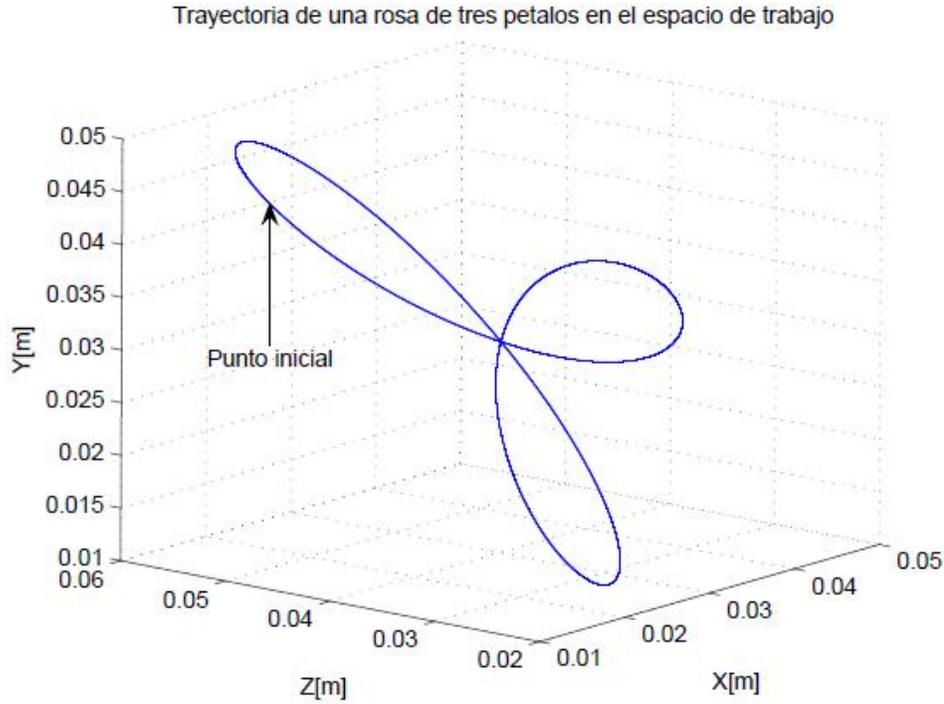


Figura 3.13: Trayectoria de una rosa con $f = 0.01Hz$, $n = 3$, $h = 0.03m$, $k = 0.04m$ y $r = 0.02m$.

3.3.4. Seguimiento de una trayectoria compuesta

En diferentes aplicaciones una trayectoria puede ser descrita en una sucesión de puntos. Por ejemplo, para un simple movimiento punto a punto de una tarea de recoger y colocar un objeto, podría funcionar la asignación de dos puntos intermedios entre P_I y P_D . Las posiciones adecuadas pueden ser establecidas para el levantamiento y colocación del objeto, esto reduce la velocidad obtenida en comparación con la transferencia directa del objeto.

Un ejemplo de una trayectoria compuesta es la que se presenta en la Figura 3.14 en la cual se presenta una tarea sin evasión de obstáculos.

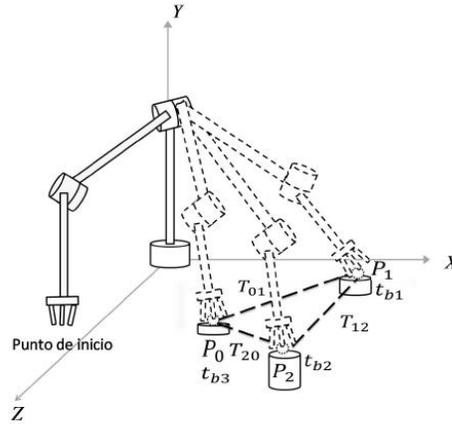


Figura 3.14: Trayectoria compuesta sin obstáculos [75].

Tarea: $T_{01} - T_{12} - T_{20}$.
 Trayectorias: T_{01}, T_{12}, T_{20} .
 Tiempos de convergencia: t_{b1}, t_{b2}, t_{b3} .
 Duración de la tarea: t_{b3} .

Un ejemplo de una trayectoria compuesta es la de un triángulo formado por tres coordenadas operacionales como se muestra en la Figura 3.15.

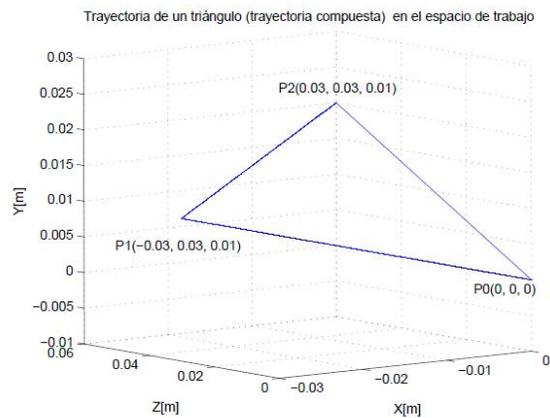


Figura 3.15: Trayectoria compuesta (Triángulo).

La posición operacional de X, Y, Z del triángulo es expuesta en la Figura 3.16, en la cual se observa que existen tres referencias para cada eje, por lo cual también existen tres t_b diferentes señalados en la Figura 3.16.

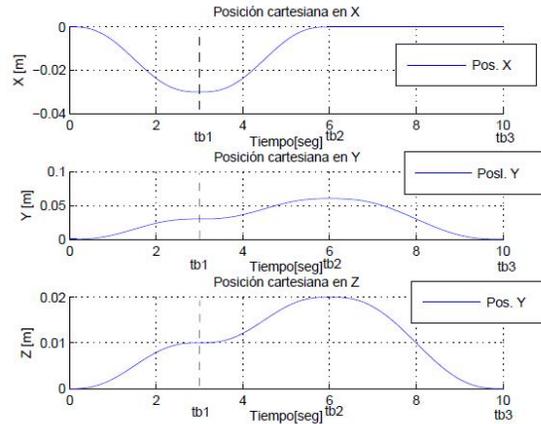


Figura 3.16: Posición de X , Y , Z del triángulo.

El pseudocódigo para MATLAB y Visual C++ necesario para poder realizar la trayectoria descrita por las Figuras 3.15 y 3.16 es el siguiente:

```
a3=10; a4=15; a5=6;
```

```
\\Declaración de variables de los polinomios.
```

```
t1=t; tb=1; t2=t-1; tb1=1; t12=t-2; tb2=1;
```

```
\\Declaración de variables de tiempo de los polinomios.
```

```
x1=.03; y1=.03; z1=.01; x2=-.03; y2=.03; z2=.01;
```

```
x3=.0; y3=-.06; z3=-0.02;
```

```
\\Declaración de las posiciones cartesianas deseadas.
```

```
if(t<=1) \\Primer condición de tiempo.
```

```
px=x1*((a3*t1.^3/(tb^3)-(a4*t1.^4/tb^4)+(a5*(t1.^5)/(tb^5)));
```

```
py=y1*((a3*t1.^3/(tb^3)-(a4*t1.^4/tb^4)+(a5*(t1.^5)/(tb^5)));
```

```
pz=z1*((a3*t1.^3/(tb^3)-(a4*t1.^4/tb^4)+(a5*(t1.^5)/(tb^5)));
```

```
\\Polinomios para la primer coordenada.
```

```
elseif(t<=2) \\Segunda condición de tiempo.
```

```
px=(x2*((a3*t2.^3/tb1^3)-(a4*t2.^4/tb1^4)+(a5*t2.^5/tb1^5))+x1;
```

```
py=(y2*((a3*t2.^3/tb1^3)-(a4*t2.^4/tb1^4)+(a5*t2.^5/tb1^5))+y1;
```

```
pz=(z2*((a3*t2.^3/tb1^3)-(a4*t2.^4/tb1^4)+(a5*t2.^5/tb1^5))+z1;
```

```
\\Polinomios para la segunda coordenada.  
elseif(t<=3) \\Tercer condición de tiempo.  
px=(x3*((a3*t12.^3/tb2^3)-(a4*t12.^4/tb2^4)+(a5*t12.^5/tb2^5)))+(x1+x2);  
py=(y3*((a3*t12.^3/tb2^3)-(a4*t12.^4/tb2^4)+(a5*t12.^5/tb2^5)))+(y1+y2);  
pz=(z3*((a3*t12.^3/tb2^3)-(a4*t12.^4/tb2^4)+(a5*t12.^5/tb2^5)))+(z1+z2);  
  
\\Polinomios para la tercer coordenada.  
end;
```

3.4. Conclusiones

En este capítulo se abordan las distintas maneras de planificar el movimiento de un sistema dinámico, aplicado a una ley de control clásica tipo PD logrando visualizar el desempeño de regulación basada en seguimiento sobre regulación operacional y la planificación de una tarea a partir de movimientos secuenciales controlados, situación que es útil en el control de procesos industriales, propiciación consecuencias benéficas en rendimiento, vida útil, ahorro de energía, precisión entre otros.

Capítulo 4

Técnicas de control clásico

4.1. Introducción

Diversos robots manipuladores son controlados por técnicas relativamente sencillas o controladores lineales (PD: proporcional derivativo y PID: proporcional-integral-derivativo), estas técnicas son desarrolladas para sistemas lineales no compensan de forma eficiente las dinámicas no lineales, por mencionar a sistemas electromecánicos y sistemas de potencia que presentan influencias de fuerzas de inercia, energía potencial, fuerzas centrípetas y de Coriolis, fuerzas de fricción, entre otras.

Hablando de otro control como lo puede ser con compensación de gravedad (PD+G) que es no lineal el cual trataremos en el capítulo siguiente, el control clásico por su sencillez facilita su utilización pero presenta ciertas restricciones que pueden limitar su uso. Un control clásico garantiza el cumplimiento del objetivo de control de posición en forma global para robots cuyos modelos dinámicos no poseen el vector de pares gravitacionales $G(q)$ como ejemplo lo puede ser un robot planar con energía potencial constante. Un control clásico no garantiza el cumplimiento del objetivo de control en posición pura de manipuladores cuyos modelos dinámicos contienen el término de pares gravitacionales $G(q)$, aunque el control PID permite trabajar con manipuladores cuyos modelos dinámicos contengan $G(q)$ (para mayor entendimiento de la dinámica de un robot se cuentan con las referencias clásicas: [115] [86] [78], pero la sintonización es complicada ya que el PID no contiene una parte gravitacional lo que hace difícil la igualación con el modelo del manipulador, a menos que la posición deseada q_d sea tal que $G(q_d) = 0$. A diferencia del PD+G que si contiene $G(q)$ lo que facilita la igualación con el modelo del manipulador [86].

4.2. Control PD

El control de posición de robots manipuladores puede realizarse mediante la técnica de control PD descrito por la siguiente ecuación:

$$\tau = -K_p \tilde{q} - K_d \dot{q} \quad (4.1)$$

La aplicación de esta estrategia simplemente es diseñada para el control de posición, sin embargo, dicho control mediante esta técnica presenta ciertas restricciones que limitan el uso. Ya que en el diseño de este controlador se omite la interacción de fuerzas conservativas (el caso de energía potencial) dando así una limitación en el desempeño de regulación.

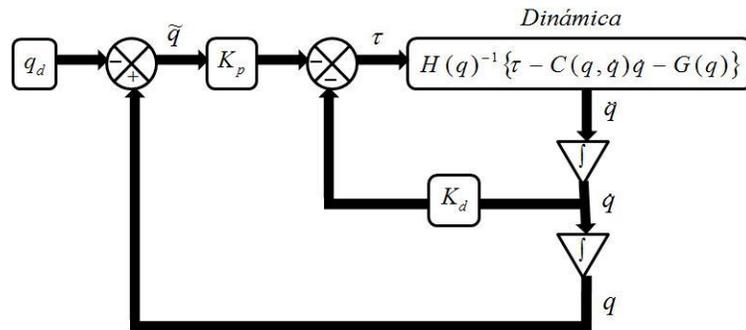


Figura 4.1: Diagrama a bloques del control PD.

4.2.1. Implementación del control PD

En la figura 4.2 se presentan las posiciones operacionales reales de PHANToM y deseadas, como se puede apreciar el tiempo en que las posiciones reales siempre convergen a la referencia, aunque también puede suceder que en regulación se desconoce el tiempo de convergencia a la referencia. En la Figura 4.3 se observa la señal de error de las tres coordenadas, podemos apreciar que el error siempre tiende a cero, por lo cual el error disminuye gradualmente conforme PHANToM 1.0 tiende hacia la referencia.

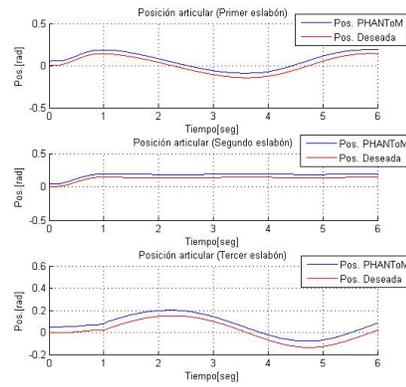


Figura 4.2: Coordenadas operacionales reales y deseadas de PHANTOM 1.0

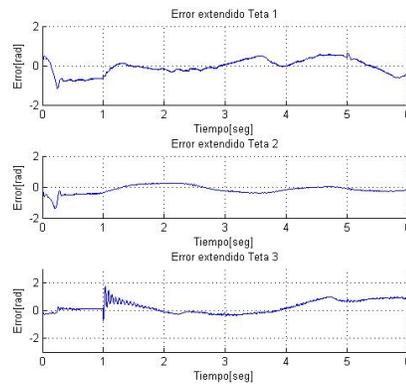


Figura 4.3: Señal de error articular.

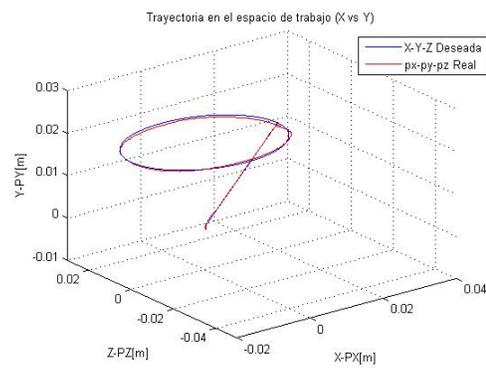


Figura 4.4: Desempeño en el espacio de trabajo.

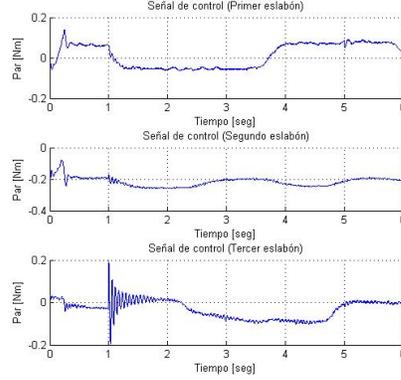


Figura 4.5: Señal de control PD.

La señal de control de los tres actuadores se observan en la Figura 4.5, como se puede apreciar el control siempre desarrolla su tarea, por consecuencia el par en los actuadores se mantienen y disminuye conforme el error tiende a ser 0. Finalmente en la Figura 4.4 se observa la trayectoria en el espacio de trabajo de PHANToM 1.0 y la trayectoria deseada, como se puede observar la trayectoria de PHANToM 1.0 sigue la referencia deseada a través de seguimiento estructurado.

4.3. Control PID

Una opción al control PD y sus variantes, es agregar un componente integral al PD para intentar llevar a cero error de posición en estado estacionario o estable, de esta forma surge el control PID para robots manipuladores [17]. La ley de control PID se presenta en la ecuación 4.2.

$$\tau = K_p \tilde{q} + K_d \dot{\tilde{q}} + K_i \int_0^t \tilde{q} dt \quad (4.2)$$

Donde $\Delta q \in \mathbb{R}^{n \times 1}$ representa el vector de error de posición articular ($\Delta q = q_d - q$), $q_d \in \mathbb{R}^{n \times 1}$ representando el vector de posición articular deseada ($\Delta \dot{q} = \dot{q}_d - \dot{q}$), $q \in \mathbb{R}^{n \times 1}$ representando el vector de posición articular real, $\Delta \dot{q}$ representa el error de velocidad articular, donde $\dot{q}_d \in \mathbb{R}^{n \times 1}$ representando el vector de velocidad articular deseada, $\dot{q} \in \mathbb{R}^{n \times 1}$ representando el vector de velocidad articular real, $K_p, K_d, K_i \in \mathbb{R}^{n \times n}$ son ganancias, proporcional, derivativa e integral respectivamente, por último $\tau \in \mathbb{R}^{n \times n}$ representa la señal de control.

La mayoría de los robots manipuladores actuales son controlados por medio de controles PID, en la Figura 4.6 se presenta el diagrama de bloques de un control PID.

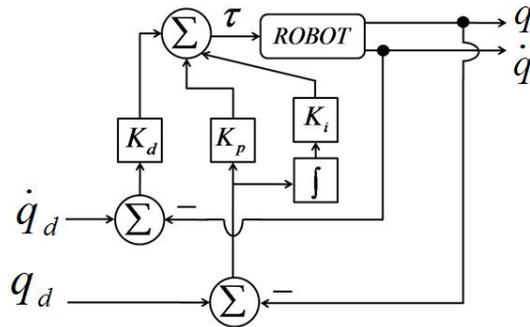


Figura 4.6: Diagrama a bloques del control PID.

Se puede obtener un modelo matemático de una planta, para esto es posible aplicar diversas técnicas de diseño con el fin de determinar los parámetros del controlador que cumpla las especificaciones en estado transitorio y en estado estable del sistema en lazo cerrado. Sin embargo si la planta es tan complicada que no es fácil obtener su modelo matemático, tampoco es posible un enfoque analítico para el diseño de un controlador PID. En este caso, debemos recurrir a los enfoques experimentales para la sintonización de los controladores PID. El proceso de seleccionar los parámetros del controlador que cumplan con las especificaciones de comportamiento requeridas, se conoce como sintonización del controlador. Existen en la literatura diferentes maneras de sintonizar un controlador PID tal es el caso de Ziegler y Nichols quienes sugirieron reglas para sintonizar los controladores PID (asignar valores a K_p , K_i , K_d) basándose en las respuestas escalón experimentales o en el valor de K_p que produce estabilidad marginal cuando solo se usa la acción proporcional.

En la actualidad la sintonía de los controladores PID se facilita cuando el movimiento transmitido desde los actuadores hacia los eslabones del robot de n grados de libertad (*gdl*), se realiza mediante reducciones mecánicas, ya sea por engranes o por bandas [86].

4.3.1. Diseño de control PID no lineal

El control propuesto con eficiente desempeño en tareas de seguimiento, sin conocimiento de los parámetros dinámicos del robot, es el control PID no lineal. Para el diseño del control, es necesario diseñar una referencia nominal q_r tal que en lazo cerrado, el

robot tenga un comportamiento estable, se propone la siguiente:

$$\begin{aligned}\dot{q}_r &= \dot{q}_d - \alpha \Delta q + S_d - K_i \sigma \\ \dot{\sigma} &= \text{sgn}(S_q)\end{aligned}\quad (4.3)$$

donde:

$$\begin{aligned}S_q &= S - S_d \\ S_d &= S(t_0)e^{-kt}\end{aligned}\quad (4.4)$$

$\alpha = \alpha_T \in \mathfrak{R}^{n \times n}$ es una matriz diagonal definida positiva, $K_i = K_i^T \in \mathfrak{R}^{n \times n}$ es una matriz diagonal definida positiva, $k > 0$, $\text{sgn}(\ast)$ denota la función signo de (\ast) . Notese que $\ddot{q}_r = \ddot{q}_d - \alpha \dot{\Delta q} + \dot{S}_d - K_i \text{sgn}(S_q)$ es discontinua, y que $S_q(t_0) = 0$ para cualquier condición inicial, la coordenada del error extendido S_r ,

$$S_r = S_q + K_i \sigma \quad (4.5)$$

El control PID no lineal propuesto es el siguiente,

$$\tau = -K_d S_r \quad (4.6)$$

en términos de las anteriores definiciones,

$$\begin{aligned}\tau &= -K_p \Delta q - K_v \dot{\Delta q} + K_d S_d - K_I I \\ I &= \sigma = \int_t^t \text{sgn}(S_q(\varsigma)) d\varsigma\end{aligned}\quad (4.7)$$

donde $K_d = K_d^T \in \mathfrak{R}^{n \times n}$ es una matriz diagonal definida positiva, $K_p = K_d \alpha$, $K_v = K_d$ y $K_I = K_d K_i$ son matrices diagonales que representan las ganancias de control.

4.3.2. Prueba de estabilidad

La teoría de estabilidad de Lyapunov tiene como objetivo el estudiar el comportamiento de sistemas dinámicos descritos por ecuaciones diferenciales de la forma:

$$\begin{aligned}x(t) &= f(t, x(t)), \\ x(0) &\in \mathfrak{R}^n \forall t \geq 0\end{aligned}\quad (4.8)$$

donde el vector $x(t) \in \mathfrak{R}^n$ es referido como el estado del sistema dinámico representado por 4.8 y $x(0) \in \mathfrak{R}^n$ es definida como la condición inicial. $f : \mathfrak{R}_+ \times \mathfrak{R}^n \rightarrow \mathfrak{R}^n$ es una función continua en t y $x(t)$ con las siguientes propiedades:

- La ecuación 4.8 tiene una solución única en el intervalo $[0, 1)$ correspondiente a cada condición inicial de $x(0)$.

- Si $x(t)$ es la solución de 4.8 correspondiente a la condición inicial $x(0)$, entonces $x(t)$ depende de una manera continua de la condición inicial $x(0)$.

Si la función f no depende explícitamente del tiempo, ésto es, $f(t, x(t)) = f(x(t))$ la ecuación 4.8 es denominada autónoma.

Para el análisis de estabilidad, se consideran las siguientes propiedades,

$$\begin{aligned}\|\dot{q}_r\| &\leq \alpha \|\Delta q\| + \beta_4 + K_i \|\sigma\| \\ \|\ddot{q}_r\| &\leq \alpha \|\dot{\Delta q}\| + \beta_5\end{aligned}\tag{4.9}$$

donde β_4 y β_5 son escalares positivos. La norma $Y_r\theta$ es acotada superiormente de acuerdo a lo siguiente,

$$\begin{aligned}\|Y_r\theta\| &\leq \|H(q)\| \|\ddot{q}_r\| + \|C(q, \dot{q}) + B\| \|\dot{q}_r\| + G(q) \\ &\leq \lambda_M(H(q))\{\alpha \|\dot{\Delta q}\| + \beta_5\} + \{\beta_2 \|\dot{q}\| + \lambda_M B\}[\alpha \|\Delta q\| + \beta_4 + K_i \|\sigma\|] + \beta_3 \\ &\leq \eta(\Delta q, \dot{\Delta q}, \sigma, \beta_i)\end{aligned}\tag{4.10}$$

donde $(\Delta q, \dot{\Delta q}, \sigma, \beta_i)$ es un escalar no negativo. Sustituyendo 4.7 en 4.10, se obtiene la ecuación dinámica del error en lazo cerrado,

$$H(q)\dot{S}_r = -\{C(q, \dot{q}) + K\}S_r - Y_r\theta\tag{4.11}$$

donde $K = K_d + B$. Proponiendo la siguiente función de Lyapunov,

$$V(S_r) = \frac{1}{2}S_r^T H(q)S_r\tag{4.12}$$

cuya derivada temporal a lo largo del sistema 4.11 es

$$\dot{V}(S_r) = -S_r^T K S_r - S_r^T Y_r\theta\tag{4.13}$$

considerando 4.10, se tiene

$$\dot{V}(S_r) \leq \|K_l S_r\|^2 + \|S_r\| \eta\tag{4.14}$$

donde $K = K_i^T K_1$. K_d debe ser grande, para condiciones iniciales pequeñas, tal que S_r converga a una velocidad 0, de radio $r > 0$.

4.3.3. Implementación experimental del control PID

En la figura 4.7 se presentan las posiciones operacionales reales de PHANTOM y deseadas, como se puede apreciar el tiempo en que las posiciones reales siempre convergen a la referencia, aunque también puede suceder que en regulación se desconoce

el tiempo de convergencia a la referencia y la trayectoria que realice el efector final de PHANToM durante diferentes experimentos teniendo como consigna la misma referencia, inclusive puede suceder en algunos casos que PHANToM 1.0 no llegue a la referencia durante el experimento.

En la figura 4.8 se observa la señal de error de las tres coordenadas, podemos apreciar que el error siempre tiende a cero, por lo cual el error disminuye gradualmente conforme PHANToM 1.0 tiende hacia la referencia.

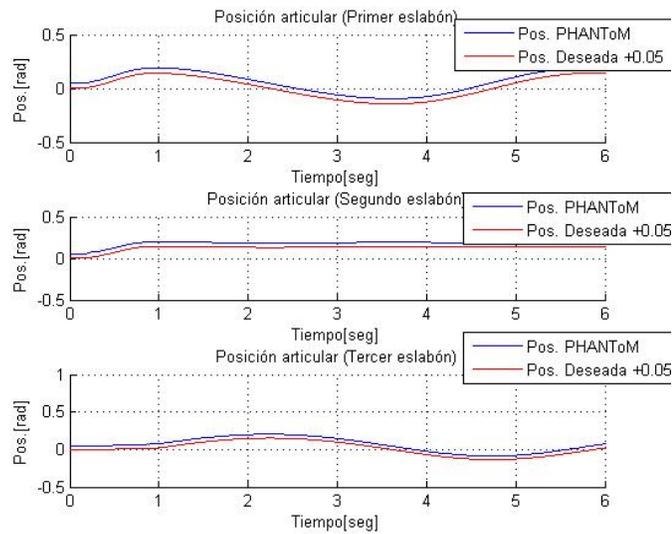


Figura 4.7: Coordenadas operacionales reales y deseadas de PHANToM 1.0.

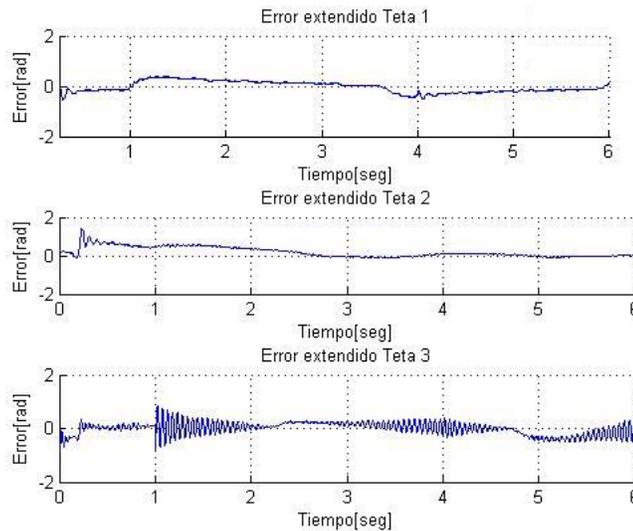


Figura 4.8: Señal de error articular.

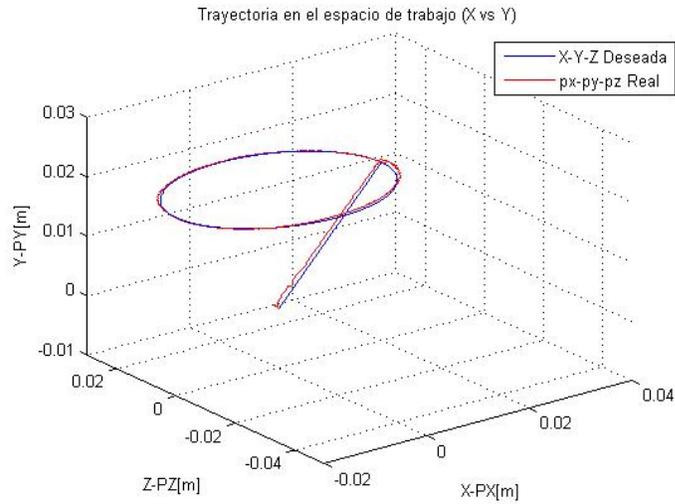


Figura 4.9: Desempeño en el espacio de trabajo.

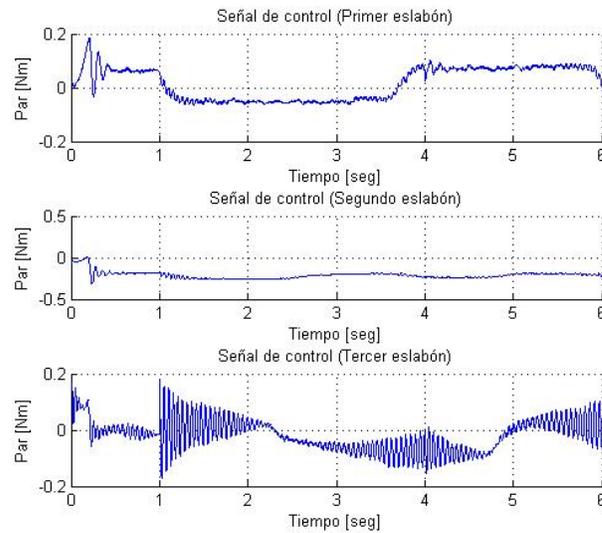


Figura 4.10: Señal de control PID.

La señal de control de los tres actuadores se observan en la Figura 4.10, como se puede apreciar el control siempre desarrolla su tarea, por consecuencia el par en los actuadores se mantiene y disminuye conforme el error tiende a ser 0.

Finalmente en la Figura 4.9 se observa la trayectoria en el espacio de trabajo de PHANToM 1.0 y la referencia o trayectoria deseada, como se puede observar la trayectoria de PHANToM 1.0 sigue la referencia deseada a través de seguimiento estructurado.

4.4. Conclusiones

Los experimentos realizados en este capítulo en PHANToM 1.0 permitieron obtener resultados satisfactorios ya que se logró resolver a través de una buena planificación de los movimientos utilizando la regulación basada en seguimiento y un algoritmo planteado en esta tesis, lo que permite concluir que se obtiene un mejor desempeño de las tareas planteadas en los experimentos, se exige menor esfuerzo a los actuadores, se asegura el bienestar del operador y subsistemas, lo que sin duda mejora y aumenta la calidad de vida de PHANToM 1.0 y de cualquier otro sistema electromecánico.

Uno de los problemas tecnológicos para el control global de robots es la retroalimentación de velocidad, permitiendo no solo el desempeño del control y la ejecución de la tarea, también procurando reducir los esfuerzos electromecánicos a los que regularmente es sometido un robot durante la ejecución de una trayectoria, por efectos de una señal de velocidad con frecuencias instantáneas de hasta $200Hz$.

Capítulo 5

Técnicas de control basadas en pasividad

5.1. Preliminares matemáticos

5.1.1. Conceptos generales

En esta sección se presenta la teoría matemática fundamental para el análisis de sistemas E-L, considerando la teoría de estabilidad de Lyapunov, la cual es una herramienta poderosa no sólo para el análisis de control de sistemas lineales, sino también para sistemas de naturaleza no lineal, los cuales son descritos de la forma:

$$\dot{x} = f(x) + g(x)u \quad (5.1)$$

donde $x \in \mathbb{R}^{n \times 1}$ define al vector de estado, $f(x) \in \mathbb{R}^{n \times 1}$ y $g(x) \in \mathbb{R}^{n \times 1}$ son funciones vectoriales, tal que $f(0) = 0$ y $h(0) = 0$, y u es un vector que representa a las entradas del sistema.

5.1.2. Descripción matemática de la teoría de pasividad

Un robot manipulador adquiere las propiedades de un sistema E-L, mismo al que se le pueden practicar técnicas basadas en pasividad y análisis de energía. El adecuado desempeño de un robot manipulador involucra considerar: precisión, estabilidad, evasión de colisión, rendimiento, ahorro energético, libertad de operación, así como de esfuerzos eléctricos y mecánicos que podrían repercutir en la vida útil y en la eficiencia operativa. Mucho de ello depende del bueno diseño de una estrategia de control.

Las ecuaciones Euler-Lagrange tienen algunas propiedades muy importantes que pueden ser explotadas al diseñar y analizar los algoritmos de control por retroalimentación. Entre estos límites explícitos están las propiedades de la matriz de inercia de

linealidad en los parámetros de inercia, y propiedades de pasividad, entre otras. Las etapas para el modelado dinámico de robots manipuladores con base en la formulación Euler-Lagrange consiste de los siguientes pasos:

1. Cálculo de la energía cinemática: $\mathcal{K}(q, \dot{q})$.
2. Cálculo de la energía potencial: $\mathcal{U}(q)$.
3. Cálculo del Lagrangiano: $\mathcal{L}(q, \dot{q})$.
4. Desarrollo de las ecuaciones de Euler-Lagrange que describen el movimiento.
Para obtener:

$$\mathcal{E}(q, \dot{q}) = \mathcal{K}(q, \dot{q}) - \mathcal{U}(q) \quad (5.2)$$

La energía cinética se obtiene de la siguiente manera:

$$\mathcal{K} = \sum_{i=1}^n \frac{1}{2} m_i v_i^2 = \frac{1}{2} \dot{q}^T D(q) \dot{q}$$

con i representa la i -ésima articulación, $i = 1 \dots n$, y n : *grados de libertad*, $m_i \in \mathbb{R}^n$ es la masa, $v_i \in \mathbb{R}^n$ es la velocidad del i -ésimo eslabón respectivamente, $D(q) \in \mathbb{R}^{n \times n}$ es una matriz simétrica definida positiva denominada matriz de inercia. La energía potencial $\mathcal{U}(q) \in \mathbb{R}^n$ no tiene una forma específica como en el caso de energía cinética, pero se sabe que depende del vector de posiciones articulares q , situación que describe la altura del centro de masas con relación al plano de trabajo.

La energía potencial $\mathcal{U}(q)$ se obtiene de la siguiente forma:

$$\mathcal{U} = g \sum_{i=1}^n m_i h_i$$

donde $h_i \in \mathbb{R}^n$ es la altura respecto al centro de gravedad del i -ésimo eslabón, y g es la constante de gravedad.

Propiedad 1 Al derivar la energía total definida en la ec. 5.2 y empleando la $D(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} + G(q) = \tau - \tau_h$ y la propiedad definida se obtiene:

$$\begin{aligned} \dot{\mathcal{E}}(q, \dot{q}) &= \dot{q}^T D(q) \ddot{q} + \frac{1}{2} \dot{q}^T \dot{D}(q) \dot{q} + \dot{q}^T G(q) \\ &= \dot{q}^T (-C(q, \dot{q})\dot{q} - G(q) + \tau) + \frac{1}{2} \dot{q}^T \dot{D}(q) \dot{q} + \dot{q}^T G(q) \\ &= \dot{q}^T \tau. \end{aligned} \quad (5.3)$$

Propiedad 2 De la propiedad de pasividad, se tiene que:

$$V(x) - V(x_0) \leq \int_0^t y^T(s) u(s) ds \quad (5.4)$$

donde $V(x)$ es una función de almacenamiento, $y(s)$ corresponde al comportamiento de la salida del sistema, y $u(s)$ la entrada, respectivamente, y s un cambio de variable. Para sistemas E-L, la función de energía $\mathcal{E}(q, \dot{q})$ como función de almacenamiento, y con la propiedad de pasividad se tiene que:

$$\mathcal{E}(t) - \mathcal{E}(0) \leq \int_0^t \dot{q}^T \tau dt \quad (5.5)$$

donde \dot{q}^T es el vector de estado a la salida y τ es el vector a la entrada del sistema.

5.2. Control por retroalimentación de estados

Del principio de estabilidad de Lyapunov ([86]), se observa que una función de Lyapunov de la forma:

$$V(x) = \frac{1}{2}x^2 \quad (5.6)$$

donde $x \in \mathbb{R}^n$ representa al estado del sistema (5.1), $V(x) \in \mathbb{R}$ la función de Lyapunov, por lo tanto su derivada temporal queda de la siguiente manera:

$$\dot{V}(x) = x \frac{dx}{dt} = x\dot{x} \quad (5.7)$$

entonces se puede cerrar el lazo de la derivada de Lyapunov con (5.1) y obtener lo siguiente:

$$\dot{V}(x) = x[f(x) + g(x)u] \quad (5.8)$$

con la ecuación (5.8) y las propiedades dinámicas del dispositivo háptico se puede diseñar una estrategia de control a partir de la función de (5.6), con el uso de la entrada u que induce estabilidad en lazo cerrado.

5.2.1. Control PD+G (Regulación)

El controlador proporcional (P) con retroalimentación de velocidad, también conocido como control PD de posición (ver Figura 5.1), es el controlador en lazo cerrado más sencillo que puede emplearse en el control de robots manipuladores para regulación global. La aplicación de esta estrategia es utilizada para el control de posición, sin embargo, presenta ciertas restricciones debido a que en su diseño se omite la interacción de fuerzas conservativas (como la energía potencial) dando como resultado limitaciones en el desempeño de una tarea de regulación. Por lo tanto, se propone una técnica de control que es capaz de satisfacer estas limitaciones y que, mediante

aproximaciones a funciones de Lyapunov, compensa otras no linealidades, para lo cual se requiere el conocimiento previo del modelo dinámico del dispositivo háptico.

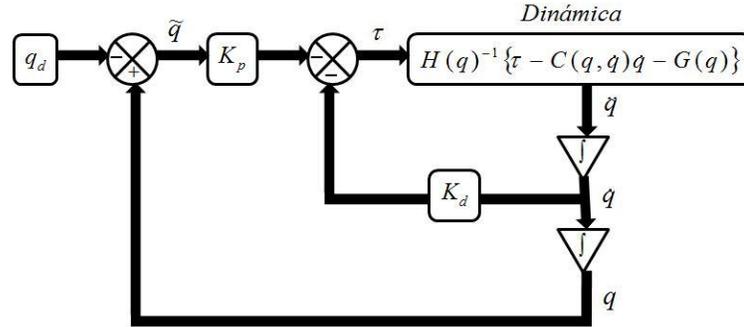


Figura 5.1: Controlador PD de posición.

Una técnica de control para regulación global con compensación dinámica de la gravedad queda descrita a partir del siguiente diagrama de bloques:

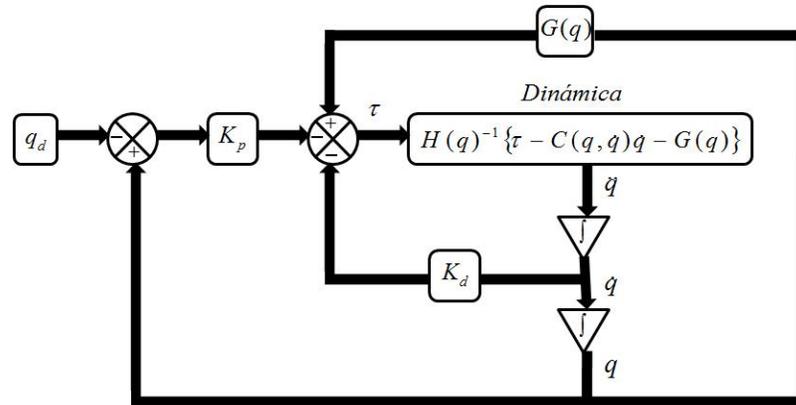


Figura 5.2: Controlador PD con compensación dinámica de la gravedad.

Como ya se mencionó en el capítulo 2, el modelo dinámico del dispositivo háptico es descrito con la siguiente ecuación:

$$D(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} + G(q) = \tau \quad (5.9)$$

El problema de control de posición se puede formular en el siguiente término:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \tilde{q}(t) = \lim_{t \rightarrow \infty} (q - q_d) \rightarrow 0 \quad (5.10)$$

donde $q \in \mathbb{R}^n$ representa a las posiciones articulares reales y $q_d \in \mathbb{R}^n$ define a las posiciones articulares deseadas, donde n corresponde al número de grados de libertad. Por lo que en términos de control se desea encontrar un par τ o entrada de control en lazo cerrado de tal manera que se cumpla con (5.10).

Ya que tanto los robots manipuladores como los dispositivos hápticos tienen la propiedad de pasividad (30), se puede diseñar una ley de control mediante un análisis que involucre esta propiedad. Para hacer dicho análisis es necesario involucrar la teoría de estabilidad de Lyapunov (segundo método o teorema principal de Lyapunov) con el análisis de pasividad dado por la dinámica del dispositivo háptico.

De esta manera, es necesario considerar los errores articulares directamente sobre las dinámicas del dispositivo háptico (5.9), i.e. hacer un cambio de variable sobre las dinámicas involucrando a \tilde{q} . Por lo tanto, para el diseño de controladores mediante la teoría de pasividad es importante darle un enfoque de estabilidad.

Para el diseño de controladores, primero se propone una función candidata a ser Lyapunov, i.e. una función que sea definida positiva. De las propiedades de los sistemas Euler-Lagrange se sabe que la energía cinética presenta ciertas características, y que por definición (14) $K(q, \dot{q})$ es definida positiva, por lo tanto ésta función puede formar parte de la función de Lyapunov de la siguiente manera:

$$V(x) = \frac{1}{2} \dot{q}^T D(q) \dot{q} + \frac{1}{2} \tilde{q}^T K_p \tilde{q} \quad (5.11)$$

donde $x = (\tilde{q}, \dot{q})$ representa al estado del sistema y K_p es una matriz definida positiva y simétrica. De la teoría de estabilidad de Lyapunov se sabe que para que un sistema sea estable en un punto de equilibrio, requiere cumplir con ciertas propiedades, como, que se encuentre una función de Lyapunov $V(x) > 0$, que sea continuamente diferenciable y que su primer derivada temporal cumpla con $\dot{V}(x) < 0$, entonces se propone que el estado en equilibrio, para el caso del dispositivo háptico, sea la posición deseada, i.e. $\tilde{x} = x - x_d$. Para el caso de regulación se propone al error $\tilde{x} = [\tilde{q}, \dot{q}]$, entonces se tiene que la derivada de la función candidata a ser Lyapunov queda de la siguiente forma:

$$\begin{aligned} \dot{V}(x) = & \frac{1}{2} \ddot{q}^T D(q) \dot{q} + \frac{1}{2} \dot{q}^T \dot{D}(q) \dot{q} + \frac{1}{2} \dot{q}^T D(q) \ddot{q} + \\ & + \frac{1}{2} \dot{q}^T K_p \tilde{q} + \frac{1}{2} \tilde{q}^T K_p \dot{q} \end{aligned} \quad (5.12)$$

que al reducir, aplicando propiedades matriciales, se obtiene:

$$\dot{V}(x) = \dot{q}^T D(q) \ddot{q} + \frac{1}{2} \dot{q}^T \dot{D}(q) \dot{q} + \tilde{q}^T K_p \dot{q} \quad (5.13)$$

no es claro que (5.13) sea una función de Lyapunov, pero tiene la ventaja de que contiene el segundo orden del sistema, i.e. contiene a $D(q) \ddot{q}$, la cual se puede obtener

de (5.9) de la forma:

$$D(q)\ddot{q} = [\tau - C(q, \dot{q})\dot{q} - G(q)] \quad (5.14)$$

entonces (5.14) se puede escribir de la siguiente manera:

$$\begin{aligned} \dot{V}(x) &= \dot{q}^T D(q)\ddot{q} + \frac{1}{2}\dot{q}^T \dot{D}(q)\dot{q} + \tilde{q}^T K_p \dot{\tilde{q}} \\ \dot{V}(x) &= \dot{q}^T [\tau - C(q, \dot{q})\dot{q} - G(q)] + \frac{1}{2}\dot{q}^T \dot{D}(q)\dot{q} + \tilde{q}^T K_p \dot{\tilde{q}} \\ \dot{V}(x) &= \dot{q}^T \tau - \dot{q}^T C(q, \dot{q})\dot{q} - \dot{q}^T G(q) + \frac{1}{2}\dot{q}^T \dot{D}(q)\dot{q} + \tilde{q}^T K_p \dot{\tilde{q}} \\ \dot{V}(x) &= \dot{q}^T \tau - \dot{q}^T G(q) + \dot{q}^T \left[\frac{1}{2}\dot{D}(q) - C(q, \dot{q}) \right] \dot{q} + \tilde{q}^T K_p \dot{\tilde{q}} \end{aligned} \quad (5.15)$$

aplicando la propiedad dinámica de antisimetría resulta:

$$\dot{V}(x) = \dot{q}^T \tau - \dot{q}^T G(q) + \tilde{q}^T K_p \dot{\tilde{q}} \quad (5.16)$$

en el caso de control de posición se tiene que $\dot{\tilde{q}} = \dot{q} - \dot{q}_d$ donde $\dot{q}_d = 0$ por ende $\dot{\tilde{q}} = \dot{q}$ y por la propiedad dinámica de las matrices definidas positivas, (5.16) se expresa de la siguiente forma:

$$\dot{V}(x) = \dot{q}^T \tau - \dot{q}^T G(q) + \dot{q}^T K_p \tilde{q} = \dot{q}^T [\tau - G(q) + K_p \tilde{q}] \quad (5.17)$$

ya que (5.17) no tiene la característica de ser una función definida positiva, se propone que la derivada $\dot{V}(x)$ tenga la estructura de una función de Lyapunov, i.e. que $\dot{V}(x) < 0$, entonces se propone lo siguiente:

$$\dot{V}(x) = -\dot{q}^T K_d \dot{q} \quad (5.18)$$

donde K_d es la matrix definida positiva y simétrica, por lo que la nueva estructura de $\dot{V}(x)$ será una función de Lyapunov, y por la propiedad que tiene (5.17) de involucrar las entradas de control τ entonces:

$$\dot{V}(x) = -\dot{q}^T K_d \dot{q} = \dot{q}^T [\tau - G(q) + K_p \tilde{q}]$$

obviamente la ley de control que hace que se cumpla con (5.18) es:

$$\tau = G(q) - K_p \tilde{q} - K_d \dot{q} \quad (5.19)$$

5.2.2. Seguimiento de trayectorias

Para resolver el problema de seguimiento de trayectorias es necesario involucrar nuevos aspectos dentro de la función de Lyapunov (5.11), como lo es que se introduzca un error de velocidad $\dot{\tilde{q}} = \dot{q} - \dot{q}_d$ donde \dot{q}_d sea una trayectoria bien definida y que el problema de control considere que se cumpla con:

$$\begin{aligned}\lim_{t \rightarrow \infty} \tilde{q}(t) &= \lim_{t \rightarrow \infty} (q - q_d) \rightarrow 0, \\ \lim_{t \rightarrow \infty} \dot{\tilde{q}}(t) &= \lim_{t \rightarrow \infty} (\dot{q} - \dot{q}_d) \rightarrow 0,\end{aligned}$$

por lo tanto, de la función de Lyapunov (5.11) se hace una simple modificación de la siguiente manera:

$$V(x) = \frac{1}{2} \dot{q}^T D(q) \dot{q} + \frac{1}{2} \tilde{q}^T K_p \tilde{q} \quad (5.20)$$

donde $x = (\tilde{q}, \dot{\tilde{q}})$ representa al estado del sistema siguiendo con el procedimiento de (5.16), como solamente se trata de un control de seguimiento de velocidad simplemente basta con involucrar la velocidad deseada, es decir, que para este caso la aceleración deseada propuesta será cero $\ddot{\tilde{q}} = \ddot{q} - \ddot{q}_d$ donde $\ddot{q}_d = 0$, y la derivada de ésta función es:

$$\begin{aligned}\dot{V}(x) &= \frac{1}{2} \dot{q}^T D(q) \ddot{q} + \frac{1}{2} \dot{q}^T \dot{D}(q) \dot{q} + \frac{1}{2} \dot{q}^T D(q) \ddot{q} + \\ &+ \frac{1}{2} \dot{q}^T K_p \dot{\tilde{q}} + \frac{1}{2} \tilde{q}^T K_p \dot{\tilde{q}}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\dot{V}(x) &= \dot{q}^T D(q) \ddot{q} + \frac{1}{2} \dot{q}^T \dot{D}(q) \dot{q} + \tilde{q}^T K_p \dot{\tilde{q}} \\ \dot{V}(x) &= \dot{q}^T [\tau - C(q, \dot{q}) \dot{\tilde{q}} - G(q)] + \frac{1}{2} \dot{q}^T \dot{D}(q) \dot{q} + \tilde{q}^T K_p \dot{\tilde{q}} \\ \dot{V}(x) &= \dot{q}^T \tau - \dot{q}^T C(q, \dot{q}) \dot{\tilde{q}} - \dot{q}^T G(q) + \frac{1}{2} \dot{q}^T \dot{D}(q) \dot{q} + \tilde{q}^T K_p \dot{\tilde{q}} \\ \dot{V}(x) &= \dot{q}^T \tau - \dot{q}^T G(q) + \dot{q}^T \left[\frac{1}{2} \dot{D}(q) - C(q, \dot{q}) \right] \dot{q} + \tilde{q}^T K_p \dot{\tilde{q}}\end{aligned}$$

y por la propiedad de antisimetría resulta:

$$\dot{V}(x) = \dot{q}^T [\tau - G(q) + K_p \dot{\tilde{q}}] \quad (5.21)$$

de la misma forma se propone una derivada que cumpla con cierta estructura en la función de Lyapunov, i.e. que $\dot{V}(x) = -\dot{q}^T K_d \dot{\tilde{q}}$, entonces (5.21) se reduce a:

$$\dot{V}(x) = -\dot{q}^T K_d \dot{\tilde{q}} = \dot{q}^T [\tau - G(q) + K_p \dot{\tilde{q}}]$$

por simplicidad el control τ da solución a ésta ecuación, y resulta:

$$\tau = G(q) - K_p \tilde{q} - K_d \dot{\tilde{q}} \quad (5.22)$$

Del control (5.19) se puede determinar que (5.11) y (5.18) son las funciones de Lyapunov del sistema (5.9), por simplicidad y dado que $V(x) > 0$ (excepto en el punto de equilibrio $q = q_d$) y $\dot{V}(x) < 0$, entonces se concluye que la ley de control (5.19) induce estabilidad asintótica global en el punto de equilibrio deseado q_d para el sistema (5.9). Por lo tanto mediante éste análisis se resuelve de una forma muy sencilla el problema de control de posición.

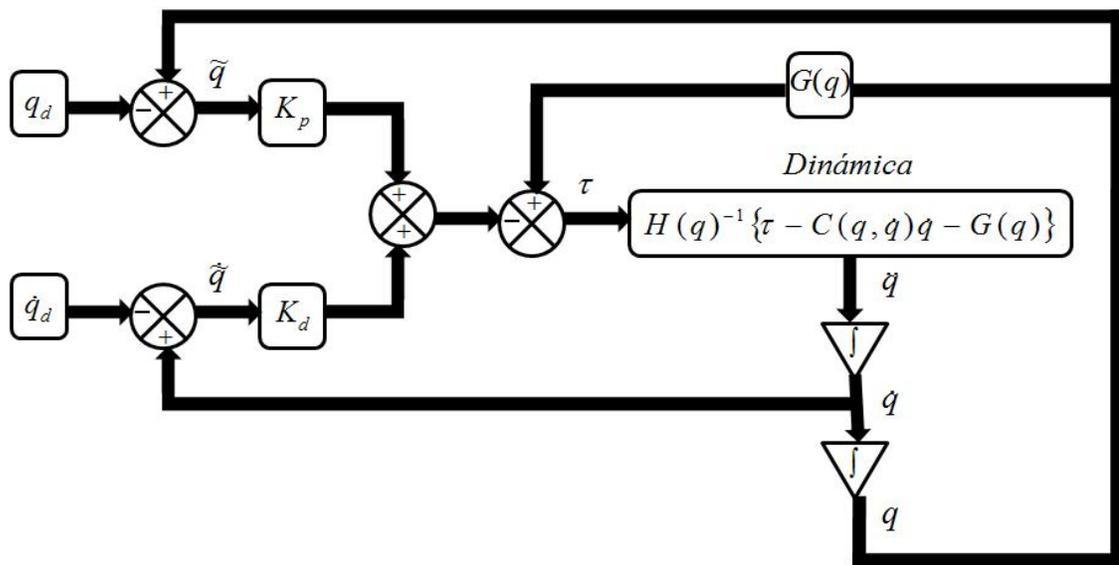


Figura 5.3: Diagrama del control PD+G para seguimiento.

5.3. Implementación experimental del controlador PD+G

5.3.1. Regulación a una coordenada operacional

El objetivo es moverse o deslizarse de un punto de origen o condición inicial (P_I) a un punto final (P_D) del organo terminal del dispositivo háptico dentro de su espacio de trabajo. Cuando un dispositivo háptico traslada su efector final de una coordenada operacional a otra desconociendo la trayectoria que describe su movimiento y el tiempo de convergencia a un punto final. En la Figura 2.3 se observa un robot de tres grados de libertad el cual se desplaza de P_I a P_D en diferentes trayectorias (T1,... TN, para el caso gráfico $N = 6$) y diferentes tiempos de convergencia, todos ellos desconocidos.

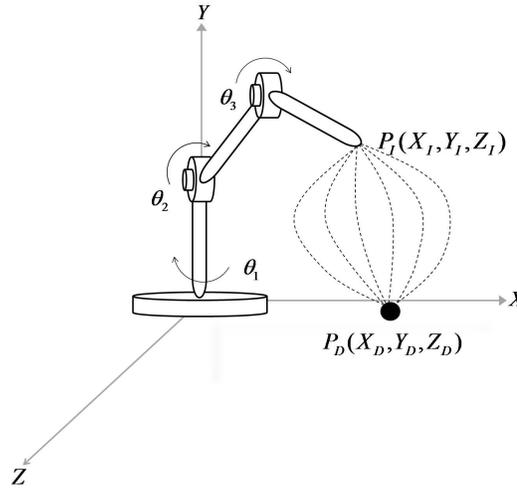


Figura 5.4: Regulación operacional cartesiana.

5.3.2. Regulación basada en seguimiento (RBS)

El objetivo de esta planificación de movimiento es dejar de representar incertidumbre en la trayectoria, en el tiempo de convergencia, en la calidad de la energía suministrada en actuadores y en el bajo desempeño dinámico en PI (intentar vencer efectos inerciales debido al estado de reposo) y PD (intentar vencer con los efectos inerciales debido al estado de movimiento), mejora este desempeño garantizando la convergencia en PD durante un tiempo conocido o finito atenuando la dinámica inercial antes descrita.

5.3.3. Seguimiento estructurado

Se le llama trayectoria cerrada a una sucesión de puntos definidos por una ecuación, que inicia en una coordenada operacional inicial PI y termina en PD con $PI = PD$. Una de las más utilizadas, con propósitos de validación experimental de técnicas de control, es la circunferencia, la cual está definida por las siguientes ecuaciones paramétricas:

$$\begin{aligned}x(t) &= h + r \cos(wt) \\y(t) &= k + r \sin(wt) \\z(t) &= h + r \sin(wt)\end{aligned}$$

Donde h y k representan su centro, r el radio, $w = 2\pi f$ ($rad/seg.$) corresponde a la velocidad angular, f es la frecuencia y finalmente $t = 1/f$ corresponde al periodo.

5.3.4. Tarea 1: Regulación - Seguimiento estructurado

Se realizó un experimento que consiste en mover el efector final, del dispositivo háptico PHANTOM 1.0, desde una coordenada operacional en $P_I = [0, 0, 0]$ en su espacio de trabajo hasta otra en $P_D = [0.02, 0.02, 0.02]$ utilizando la técnica de Regulación, implicando los tres ejes cartesianos en un tiempo conocido $t = 1\text{seg}$, posteriormente se realiza el seguimiento estructurado de una trayectoria cerrada (circunferencia) que inicia en la coordenada operacional P_D y termina en el mismo punto en un tiempo de $t = 5\text{seg}$.

5.3.5. Tarea 2: RBS - Seguimiento estructurado

También se realizó un experimento que consiste en mover el efector final, del dispositivo háptico PHANTOM 1.0, desde una coordenada operacional en $P_I = [0, 0, 0]$ en su espacio de trabajo hasta otra en $P_D = [0.02, 0.02, 0.02]$, implicando los tres ejes cartesianos en un tiempo conocido $t = 1\text{seg}$, utilizando la técnica de regulación basada en seguimiento (RBS). Después, se realiza el seguimiento estructurado de una trayectoria cerrada llamada circunferencia que inicia en la coordenada operacional P_D y termina en el mismo punto en un tiempo de $t = 5\text{seg}$.

Tarea 1

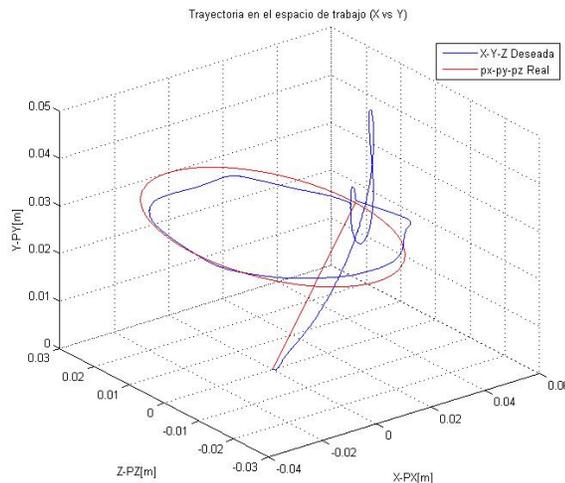


Figura 5.5: Regulación - Seguimiento estructurado.

Tarea 2

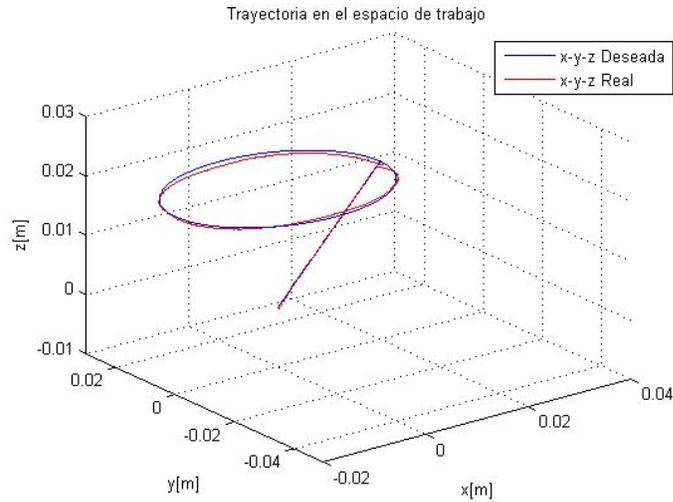


Figura 5.6: RBS - Seguimiento estructurado.

Al aplicar la ley de control (5.22) sobre el dispositivo háptico PHANToM 1.0 cuyas dinámicas son descritas por (5.9) con $K_p = 1.6$ y $K_d = 0.035$, se generan los siguientes resultados experimentales.

En las Figuras 5.5 y 5.6 se muestra el desempeño del efector final y de la señal deseada en el espacio de trabajo del dispositivo háptico. Como se puede observar el efector final sigue sin mayor dificultad la referencia alcanzando el valor final en un tiempo de 6seg..

En la Figura 5.7 se puede observar el comportamiento de la ley de control [80] aplicada a cada uno de los actuadores de PHANToM 1.0.

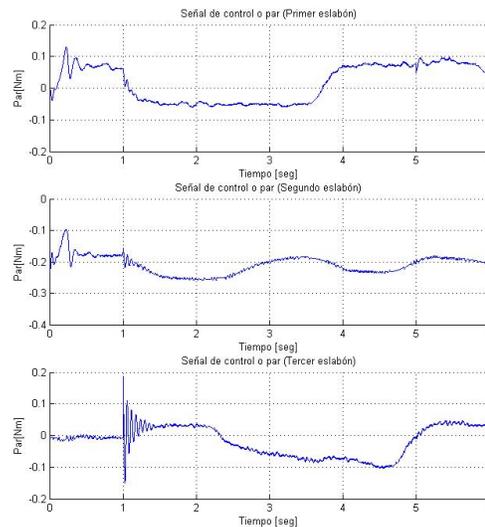


Figura 5.7: Señal de control.

En la Figura 5.8, se presenta la posición articular deseada θ_d y la posición articular simulada θ_s . Como se puede ver, la señal simulada (de PHANToM 1.0) sigue de manera eficiente a la señal deseada.

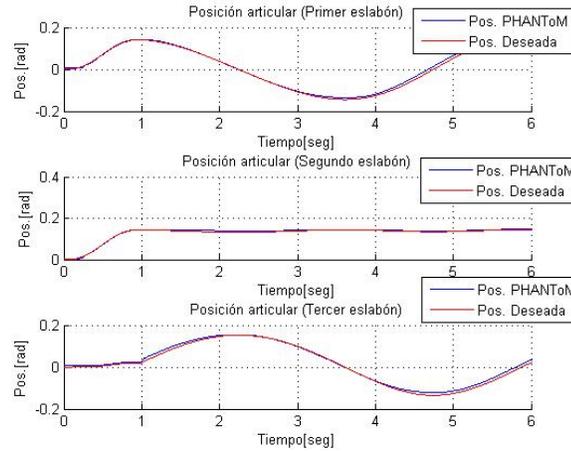


Figura 5.8: Posición articular deseada q_d y simulada q_s .

Por otro lado, en la Figura 5.9 se muestra el error de posición articular $\Delta\theta$ que se presenta durante el tiempo del experimento, el cual tiene un valor pequeño alrededor de cero.

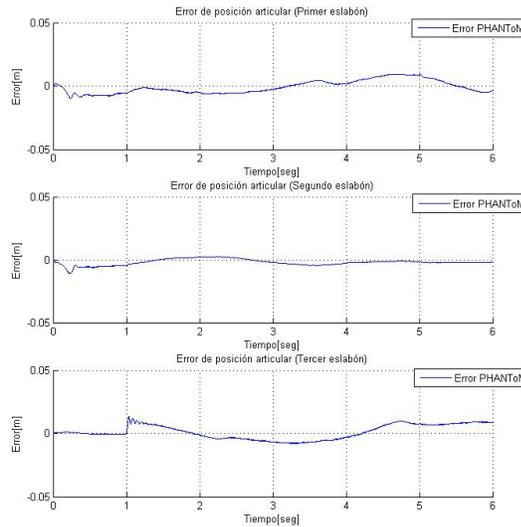


Figura 5.9: Error de posición articular ΔP .

En la Figura 5.10 se muestra el comportamiento de la energía cinética definida por la función de Lyapunov (5.11), la cual como se puede ver es definida positiva durante todo el tiempo del experimento.

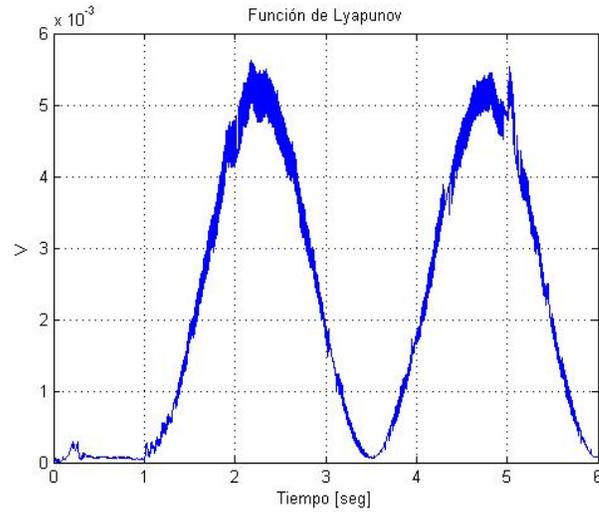


Figura 5.10: Función de Lyapunov.

De esta manera, en la Figura 5.11 se puede apreciar que la derivada de la función de Lyapunov propuesta es definida negativa en todo momento del experimento, garantizando así estabilidad asintótica global en el sistema.

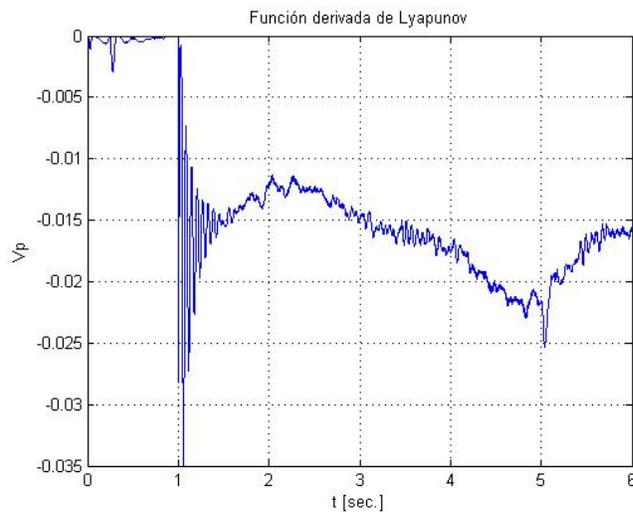


Figura 5.11: Derivada función de Lyapunov.

5.4. Control modos deslizantes primer orden

El control de robots móviles y brazos mecánicos han sido estudiados por la ingeniería del control durante décadas. Los robots son sistemas dinámicos complejos que

presentan dinámicas altamente no lineales, por lo tanto, operaciones de alto desempeño requieren diseño de controles no lineales para explotar el total de las capacidades de un robot manipulador.

La teoría de Control por Modo Deslizante es una componente de la teoría de sistemas no lineales y consiste en la utilización de acciones de control conmutadas o discontinuas a través de superficies de deslizamiento, o varias superficies de conmutación, en donde una vez alcanzada una superficie (dependiendo del esquema de conmutación empleado), el sistema entra en modo de deslizamiento y presenta características de invariabilidad en cuanto a incertidumbres y perturbaciones externas.

El modo deslizante es un fenómeno que aparece en un sistema dinámico que es regido por ecuaciones diferenciales ordinarias con presencia de discontinuidades. El término modo deslizante primeramente aparece en el contexto de sistemas relé y puede interpretarse como una señal de control que se encuentra en función de los estados del sistema, la cual cambia de manera instantánea con alta frecuencia (teóricamente infinito) dependiendo de la señal de x el cual puede representar el error del estado del sistema, este movimiento es llamado modo deslizante [?].

$$\tau = \tau_0 \text{sign}(x) = \begin{cases} \tau_0 & x > 0 \\ 0 & \text{indeterminacion} \\ -\tau_0 & x < 0 \end{cases} \quad (5.23)$$

Donde τ_0 es una constante, sin embargo numéricamente la función signo es aproximada por una función hiperbólica, de acuerdo al siguiente límite:

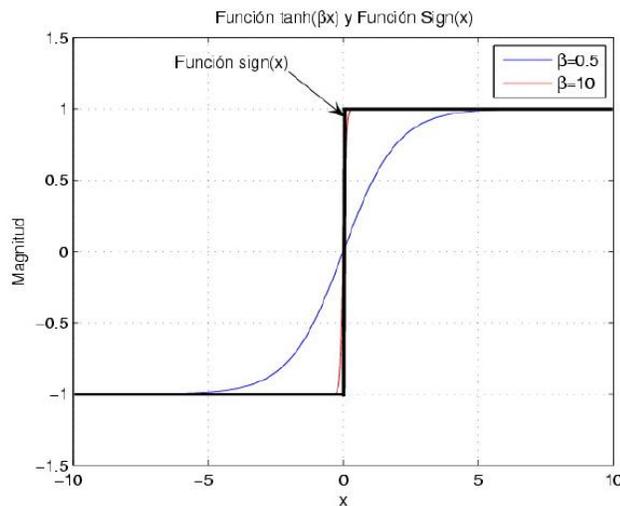


Figura 5.12: Función $\tanh(x)$ y función $\text{sign}(x)$.

$$\lim_{\beta \rightarrow \infty} \tanh(\beta x) \approx \operatorname{sgn}(x) \quad (5.24)$$

Lo que implica un gran problema con el uso de la función signo (desde el punto de vista de estabilidad en el sentido de Lyapunov) es que esta función es discontinua en el origen, sin embargo con el uso de funciones hiperbólicas se puede realizar el diseño de un control basado en el análisis de estabilidad de Lyapunov. Por tal razón, en la siguiente subsección se hace una breve descripción de algunas propiedades de las funciones hiperbólicas.

Las principales ventajas del uso de este tipo de controles son:

- Robustez contra una clase grande de perturbaciones o incertidumbres del modelo matemático del sistema.
- Se requiere de una cantidad reducida de información comparado con las técnicas de control clásicas.
- La posibilidad de estabilizar algunos sistemas no lineales quienes no son estabilizables por medio de leyes de retroalimentaciones de estados continuos.

5.4.1. Propiedades de las funciones hiperbólicas

Las funciones trigonométricas hiperbólicas son definidas en $x \in \mathbb{R}^{n \times n}$ por las siguientes ecuaciones:

$$\begin{aligned} \sinh(x) &\cong \frac{e^x - e^{-x}}{2} \\ \cosh(x) &\cong \frac{e^x + e^{-x}}{2} \\ \tanh(x) &\cong \frac{e^x - e^{-x}}{e^x + e^{-x}} \\ \operatorname{sech}(x) &\cong \frac{1}{\cosh(x)} \end{aligned} \quad (5.25)$$

Para dar una explicación más apropiada a estas funciones, las mismas están representadas por la Figura 5.13. Las funciones trigonométricas hiperbólicas tienen ciertas propiedades, las cuales son aprovechadas para el análisis de estabilidad, algunas de ellas son descritas a continuación:

Las funciones hiperbólicas tienen las siguientes propiedades:

- El seno hiperbólico es exponencialmente creciente, además cumple con la siguiente propiedad:

$$\begin{aligned} \sinh(x) &= 0 \Leftrightarrow x = 0 \\ |\sinh(x)| &> 0, \forall x \neq 0 \end{aligned}$$

- El coseno hiperbólico es no radialmente acotado y definido positivo, lo cual implica

$$\cosh(x) \geq 1, \forall x \in \mathbb{R}$$

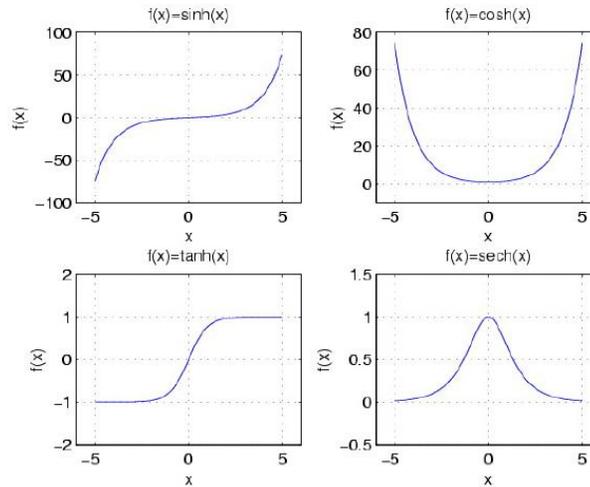


Figura 5.13: Funciones hiperbólicas.

- La tangente hiperbólica es radialmente acotada, además:

$$\tanh(x) = 0, \Leftrightarrow x = 0.$$

La combinación de funciones hiperbólicas con otras funciones es muy interesante, por ejemplo las siguientes combinaciones.

- $\ln(\cosh(x))$, $x \in \mathbb{R}$, es definida positiva, $\ln(\cosh(x)) = 0$ para $x = 0$.
- $x \tanh(x)$, $x \in \mathbb{R}$, es definida positiva, $\tanh(x) = 0$ para $x = 0$.

Además es bien conocido que las derivadas temporales de estas funciones son determinadas de la siguiente forma:

$$\begin{aligned} \frac{d \sinh(x)}{dt} &= \cosh(x) \\ \frac{d \cosh(x)}{dt} &= \sinh(x) \\ \frac{d \operatorname{sech}(x)}{dt} &= -\operatorname{sech}(x) \tanh(x) \\ \frac{d \tanh(x)}{dt} &= \operatorname{sech}^2(x) \\ \frac{d \ln[\cosh(x)]}{dt} &= \tanh(x) \end{aligned}$$

Por otra parte se tiene que:

$$\begin{aligned} \int \ln(\cosh(x))dx &= x(\cosh(x)) - \int x \tanh(x) \\ &= x(\cosh(x)) - \frac{x^3}{3} + \frac{x^5}{5} - \frac{2x^7}{105} \dots \end{aligned}$$

entonces $\int \ln(\cosh(x))dx$ es radialmente acotada.

$$\begin{aligned} \int \ln(\cosh(x))dx &= x^2 \ln(\cosh(x)) - \int \ln(\cosh(x))dx - \int x \tanh(x)dx \\ &= x^2 \ln(\cosh(x)) - x \ln(\cosh(x)) + \int x \tanh(x)dx - \int x \tanh(x)dx \\ &= x^2 \ln(\cosh(x)) - x \ln(\cosh(x)) = \ln(\cosh(x))[x^2 - x] \end{aligned}$$

donde $x^2 \ln(\cosh(x)) > 0$ y $[x^2 - x] \geq 0 \in (-\infty, 0] \cup [1, \infty)$, entonces $\ln(\cosh(x))[x^2 - x] + \epsilon \geq 0$ donde $\epsilon \leq 1$. Entonces $\int \ln(\cosh(x))dx$ es definido positivo y radialmente acotado.

La teoría de Control por Modo Deslizante es una componente de la teoría de sistemas no lineales y consiste en la utilización de acciones de control conmutadas o discontinuas a través de superficies de deslizamiento, o varias superficies de conmutación, en donde una vez alcanzada una superficie, el sistema entra en modo de deslizamiento y presenta características de invariabilidad en cuanto a incertidumbres y perturbaciones externas.

El primer paso se propone una función de error y una función candidata a ser Lyapunov como la que se propone anteriormente, por lo tanto el análisis sería el mismo, sin embargo la clave para encontrar un controlador de tipo deslizante es forzar el sistema a ser una función de Lyapunov, es decir, cuando $V(x)$ es implementado como función semi-definida negativa, y para el caso de estudio se propone una función con la siguiente forma:

$$\dot{V}(x) = -\dot{q}^T [K_d \dot{q} + K_L \tanh(\tilde{q})] \quad (5.26)$$

por lo tanto al igualar con 5.21 y $\dot{V}(x) = \dot{q}^T [\tau - D(q)\ddot{q}_d - C(q, \dot{q})\dot{q} - G(q) + K_p \tilde{q}]$ se tiene que:

$$-\dot{q}^T [K_d \dot{q} + K_L \tanh(\tilde{q})] = \dot{q}^T [\tau - G(q) + K_p \tilde{q}] \quad (5.27)$$

y

$$-\dot{q}^T [K_d \dot{q} + K_L \tanh(\tilde{q})] = \dot{q}^T [\tau - D(q)\ddot{q}_d - C(q, \dot{q})\dot{q} - G(q) + K_p \tilde{q}] \quad (5.28)$$

los controles que hacen que se cumplan las ecuaciones 5.27 y 5.28 anteriores son:

$$\tau = -K_p \tilde{q} - K_d \dot{q} - K_L \tanh(\tilde{q}) + G(q) \quad (5.29)$$

$$\tau = -K_p \tilde{q} - K_d \dot{\tilde{q}} - K_L \tanh(\tilde{q}) + D(q) \ddot{q}_d + C(q, \dot{q}) \dot{q}_d + G(q) \quad (5.30)$$

Por el tipo de dinámica que se presenta dentro de la ley de control 5.29 y 5.30, se dice que la aproximación de estos es relativa a la de controladores de estructura variable o mejor conocidos como "Modos Deslizantes" de primer orden.

Sin embargo los controladores desarrollados tienen la ventaja que no tienen indeterminación en el origen, dando así un desarrollo más suave sobre el efecto de chattering que se presenta dentro de este tipo de controladores, ya que en este caso $\beta = 1$ a diferencia de la aproximación de $\beta \rightarrow 1$ que se hace comúnmente para suplir la función signo. Para la realización experimental, el controlador que contiene la dinámica completa más la estructura variable ec.(5.30), y el controlador deslizante simple ec.(5.29) se obtiene lo siguiente.

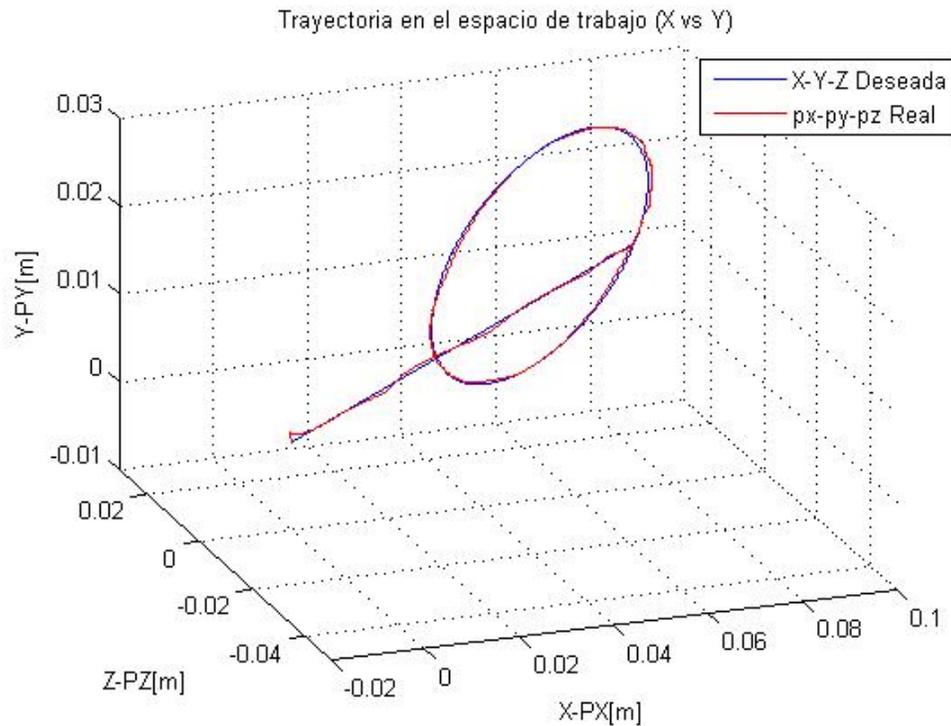


Figura 5.14: Trayectoria en el espacio de trabajo.

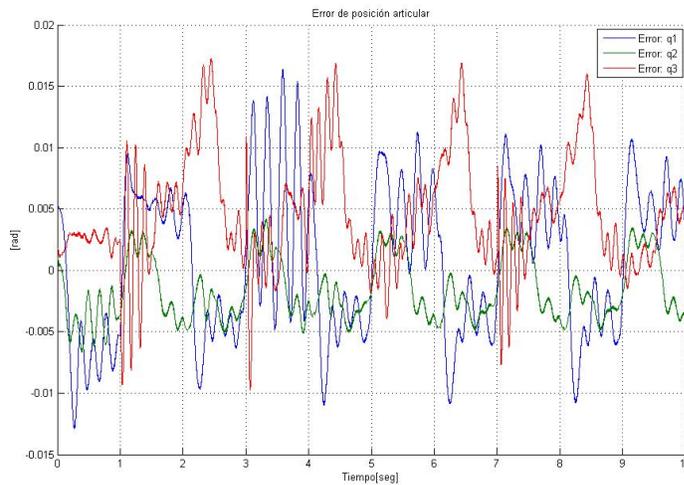


Figura 5.15: Error de posición articular para un modos deslizantes de primer orden simple.

En la Figura 5.15 y la figura 5.21 se puede ver como el error del controlador simple de estructura variable se aproxima en el rango de milésimas lo cual se puede decir que el error es cero, i.e. las dinámicas del controlador por tipo deslizante siguen la trayectoria propuesta de forma eficiente figura 5.14 y la figura 5.18.

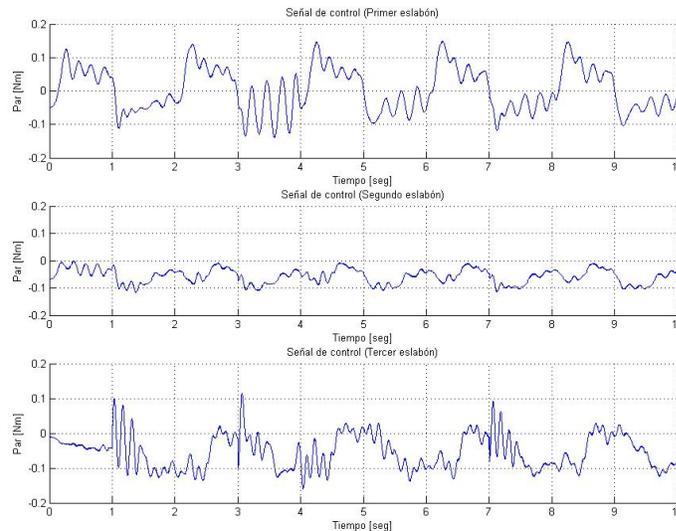


Figura 5.16: Ley de control para un modos deslizantes de primer orden simple.

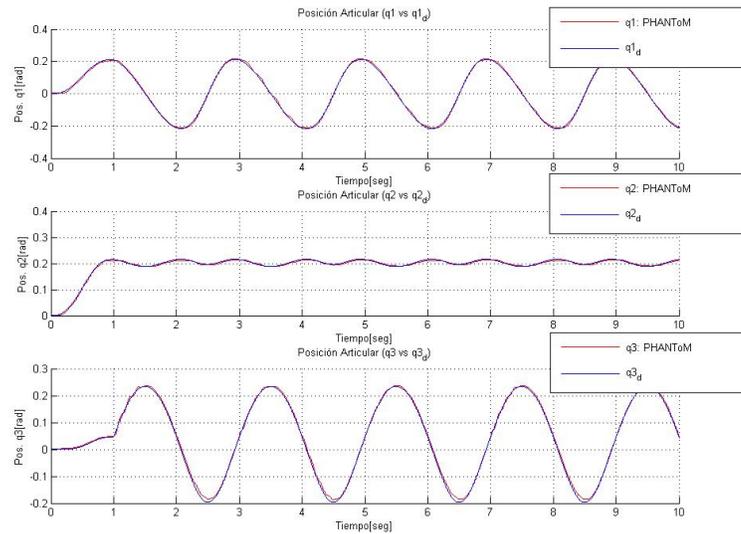


Figura 5.17: Posición articular para un modos deslizantes de primer orden simple.

En la figura 5.17 y figura 5.20, se presenta la posición articular deseada θ_d y la posición articular simulada θ_s . Como se puede ver, la señal simulada (de PHANTOM 1.0) sigue de manera eficiente a la señal deseada.

De igual manera observamos que se produce el efecto de chattering o cacheteo que es propio de los controladores de estructura variable, haciendo que el control oscile en cierto intervalo, este efecto puede ser visto en las figuras 5.16 y 5.19 sin embargo el comportamiento de 5.19 es mucho mejor que su antecesor.

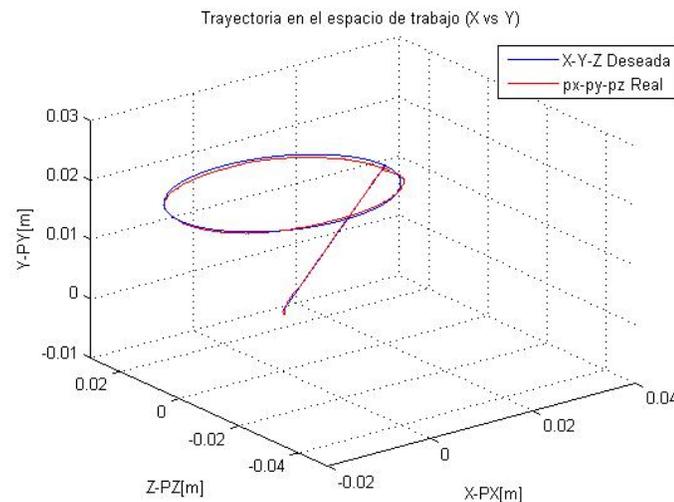


Figura 5.18: Trayectoria en el espacio de trabajo.

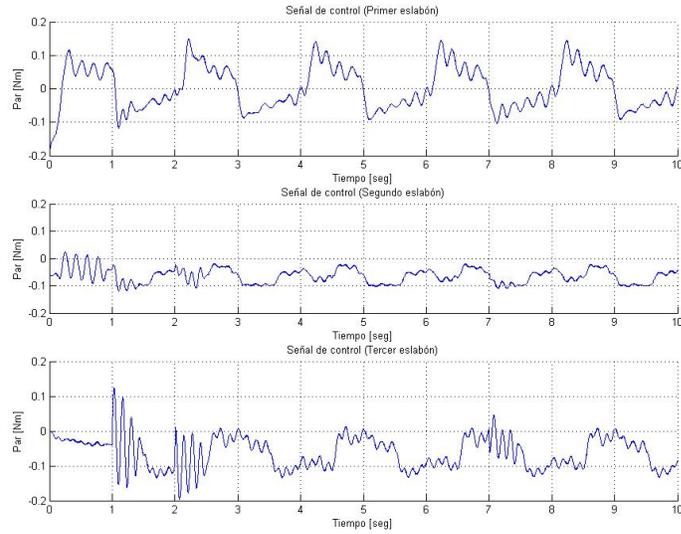


Figura 5.19: Ley de Control para un modo deslizado de primer orden compuesto.

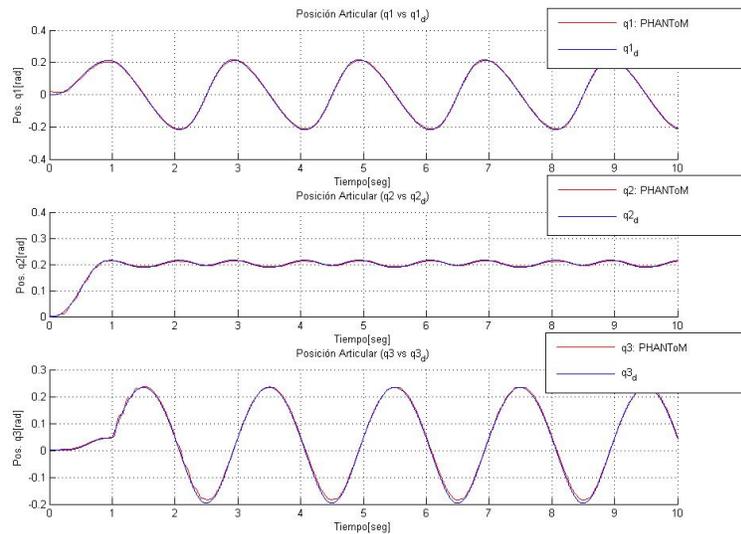


Figura 5.20: Posición articular para un modos deslizantes de primer orden compuesto.

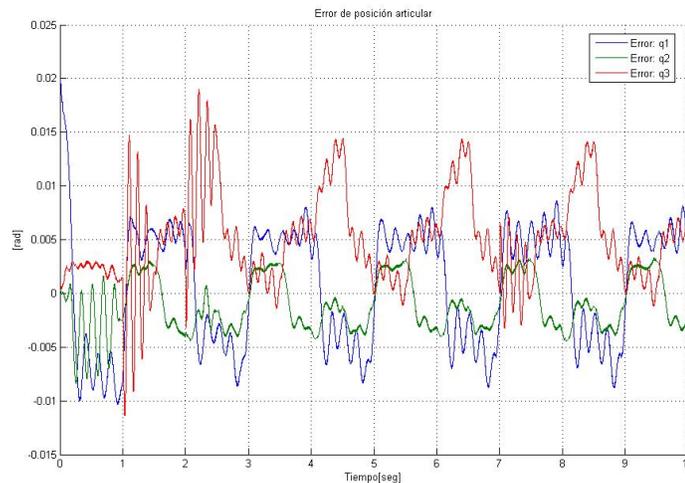


Figura 5.21: Error de posición articular para un modos deslizantes de primer orden compuesto.

5.5. Conclusiones

La teoría de Lyapunov ha tenido un gran impacto en el diseño de controles para sistemas no lineales ya que si se conoce la energía total del sistema se puede utilizar al proponer una función candidata a Lyapunov, además de ser una herramienta útil para el análisis de estabilidad del control en el sistema. Por otra parte empleando propiedades de pasividad que hacen uso del error extendido se pueden utilizar para el diseño de controles que cumplan estas propiedades. Utilizar funciones hiperbólicas en la función candidata a Lyapunov empleando el segundo método se puede dar solución al problema de los modos deslizantes y del chattering que se presentan en un sistema no lineal.

El uso de controladores clásicos tales como PID, PD o un simple P aplicados a dispositivos electromecánicos presentan ciertas desventajas al implementarlos tales como, la sintonización de ganancias ya que los controles son lineales y el sistema es no lineal. Ésta es una de las razones del diseño de un controlador no lineal basado en modos deslizantes el cual como se puede observar en los experimentos reduce el error en estado estacionario, realiza un seguimiento adecuado y presenta un buen desempeño en el espacio de trabajo de PHANToM.

Capítulo 6

Tipos de interfaces hápticas para exploración

6.1. Introducción

En esta sección se presenta la clasificación de las interfaces hápticas por su nivel de realismo en la interacción. El método para definir la fuerza de reacción más utilizado por la comunidad de interfaces hápticas es el que modela a una interfaz háptica pasiva, por su fácil implementación. Se describen, los fundamentos que el proceso de interacción dinámica con respuesta ideal, sin embargo, la dinámica del dispositivo háptico interviene en esta respuesta y se dan a conocer los modelos de impedancia intervenida y su extensión a la interacción operador humano-ambiente virtual. Para incrementar el nivel de realismo, se presenta la interfaz háptica quasipasiva que retroalimenta parcialmente la dinámica del sistema en interacción. Finalmente se describe la metodología propuesta para una interfaz háptica activa, que considera la dinámica no lineal de interacción, basada en la teoría de modelado de robots manipuladores con tareas de contacto.

6.1.1. Generación de fuerza de reacción

Los aspectos relevantes que definen la eficiencia de un dispositivo háptico, son los siguientes:

- Masa y fricción pequeñas.
- Mínimo juego mecánico de transmisión de movimiento.
- Resolución.
- Espacio de trabajo.

- Características de la plataforma de programación.

Estas características definen la calidad de la retroalimentación de fuerza ó fuerza de reacción, sin embargo, con más relevancia contribuye el método empleado para calcularla. El método utilizado por la comunidad de interfaces hápticas es el método de penalización, en el que la magnitud de la fuerza es definida a partir de la penetración que el operador humano, representado en el ambiente virtual, tiene en la superficie del objeto virtual. Existen muchos trabajos reportados en la literatura que emplean esta técnica [36][50], en los que el método de penalización es utilizado con la ausencia de un sensor de fuerza real o virtual, es decir, sin considerar la dinámica no lineal del sistema en interacción. En estas condiciones de operación la interfaz háptica es pasiva (para la interacción), en la Figura 2.4 se presenta gráficamente el método de penalización, donde, $F_r \in \mathbb{R}^{3 \times 1}$ corresponde al vector de fuerza de reacción $\vec{\Delta}x \in \mathbb{R}^{3 \times 1}$, representa la deformación ocurrida en la superficie virtual a lo largo de las componentes cartesianas $K \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$.

6.2. Interfaces hápticas pasiva y activa

6.2.1. Interfaz háptica pasiva

Las interfaces hápticas, por la calidad de la fuerza de contacto, se clasifican en pasiva y activa. Una interfaz háptica es *pasiva*, cuando la fuerza de reacción es definida exclusivamente por la posición y velocidad con que el operador humano representado en el ambiente virtual interactúa con un objeto virtual. El método de penalización define la fuerza de reacción basado en la ley de Hooke, Adicionando amortiguamiento a la superficie del objeto virtual induce estabilidad en la superficie de contacto, para ello se requiere conocer la velocidad operacional con la que el operador humano entra en contacto. En este último caso, la calidad de la fuerza de reacción es de mejor condición que tan solo considerar rigidez (método de penalización), sin embargo ambos casos corresponden a métodos de fuerza de reacción de una interfaz háptica pasiva.

$$F_r = K\Delta x + B\dot{x} \quad (6.1)$$

Donde $B \in \mathbb{R}^{n \times n}$ correspondiente a una matriz definida positiva que representa el amortiguamiento de la superficie del objeto virtual con relación a los ejes y $\dot{x} \in \mathbb{R}^{n \times 1}$ es la velocidad con que el operador humano interactúa con el objeto virtual. En la Figura (6.1) se presenta un diagrama equivalente de un objeto virtual con rigidez y amortiguamiento, típico de una interfaz háptica pasiva.

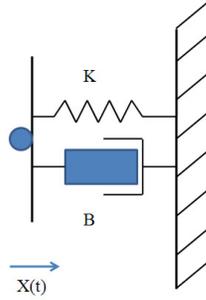


Figura 6.1: Modelo de un objeto virtual con rigidez y amortiguamiento.

El operador humano, al interactuar con el ambiente virtual mediante un dispositivo háptico, compensa la dinámica del sistema con el afán de desempeñar la tarea. La dinámica del operador humano puede ser representada por

$$f_n - f_h = m_h \ddot{x}_h + b_h \dot{x}_h + k_h x_h \quad (6.2)$$

donde m_h , b_h y k_h son la masa, el amortiguamiento, y la rigidez del brazo del operador humano, respectivamente, f_h denota la fuerza externa en la mano del operador humano, x_h corresponde al movimiento respectivo, y f_n representa la activación neurológica [98]. La ecuación (6.2) corresponde a un modelo simple de la dinámica del operador humano, en donde el amortiguamiento y la rigidez pueden variar en un rango muy amplio. Cuando el operador sujeta firmemente un objeto, b_h y k_h tienden a ser grandes, si la sujeción del objeto ocurre lenta y suavemente esos valores son relativamente pequeños. Considerando que el operador puede sujetar al objeto fácilmente, la masa del objeto puede considerarse despreciable en comparación con la masa m_h del operador.

La dinámica de contacto en el ambiente es representada por la ecuación de impedancia de segundo orden,

$$f_{amb} = m_a \ddot{x}_a + b_a \dot{x}_a + k_a x_a \quad (6.3)$$

donde m_a , b_a , y k_a son las propiedades de masa, amortiguamiento, y rigidez del ambiente, respectivamente. Si el ambiente es completamente rígido la fuerza de contacto f_{amb} es muy grande para pequeños movimientos x_a en el lugar de contacto (método de penalización).

Cuando la interacción entre el ambiente y el humano es directa, es decir el objeto que el operador humano sujeta con su mano corresponde al ambiente, ocurre una dinámica ideal descrita a continuación

$$\begin{aligned} f_n &= f_{amb} \\ x_h &= x_a \end{aligned} \quad (6.4)$$

En estas condiciones, el operador humano siente directamente la fuerza y posición de interacción, en consecuencia obtiene una respuesta ideal (figura 6.2). Sin embargo, cuando el operador humano interactúa con el ambiente

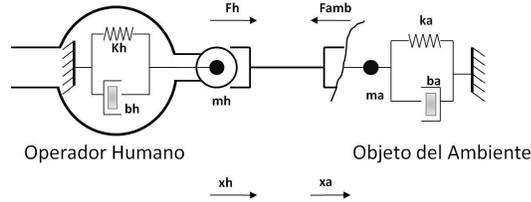


Figura 6.2: Interacción dinámica con respuesta ideal [94].

mediante el uso de un mecanismo de eslabones articulados, por ejemplo un robot, la dinámica de este repercute en la interacción. Teóricamente, bajo la suposición de sensores ideales y perfecto conocimiento de la dinámica, la entrada de control para el sistema robot puede ser diseñada por compensación completa de su dinámica. En la práctica los sensores tienen limitada resolución, muestreos discretos, existencia de ruido, efectos no lineales tales como la fricción como parte relevante en la dinámica, descrita como

$$f_h - f_{amb} = \hat{m}\ddot{x} + \hat{b}\dot{x} + \hat{k}x \quad (6.5)$$

En consecuencia esta dinámica interviene entre el operador humano y el objeto (figura 6.3), y es llamada impedancia intervenida o mas general dinámica intervenida. La existencia de esta impedancia intervenida le exige al operador humano que ejerza una fuerza f_h aun cuando no hay fuerza externa f_{amb} (sin contacto con el objeto). Como resultado, la percepción kinestética de la dinámica de la tarea es considerablemente cambiada. En consecuencia, el objetivo es diseñar un sistema de adquisición de movimiento y fuerza de reacción que minimice los efectos debidos a la impedancia intervenida. La respuesta ideal es definida por las ecuaciones (6.4).

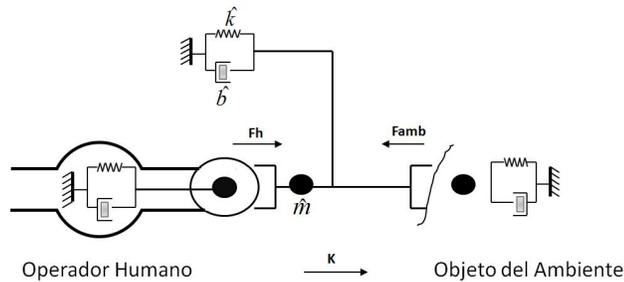


Figura 6.3: Interacción con dinámica intervenida [94].

La interacción entre un operador humano y el ambiente, representado por un dispositivo electromecánico como un robot, puede ser indirecta con retroalimentación visual y una estación electromecánica de comando (figura 6.4), ó bien directa en la que el operador humano establece la referencia de fuerza y posición directamente en el efector final (figura 6.5).

El sistema cooperativo humano-robot con retroalimentación visual consiste en enviar la referencia de fuerza f_h , mediante una estación de comando independiente, señal que se compara instantáneamente con la fuerza del ambiente f_{amb} , definida por la interacción entre el efector final del robot y la superficie del objeto. La señal de error de fuerza es llevada a cero mediante un control diseñado de forma tal que se cumplan las ecuaciones (6.4).

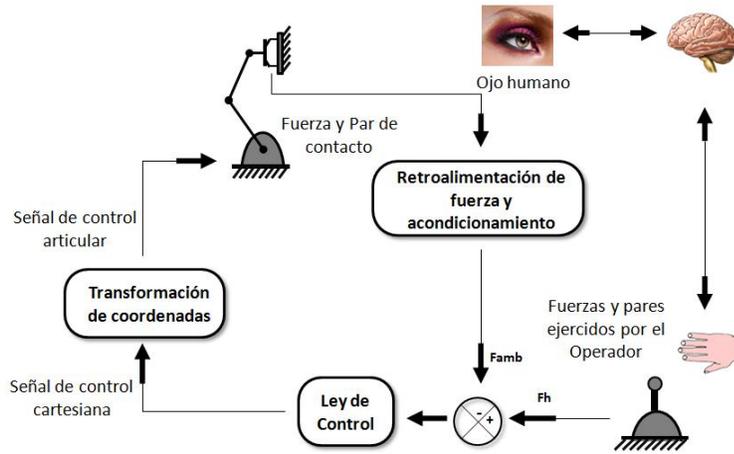


Figura 6.4: Sistema cooperativo humano-robot con retroalimentación visual.

En estas condiciones, el operador humano guía al sistema robótico, cuya dinámica es definida como:

$$f_h - f_{amb} + \tau = m\ddot{x} + b\dot{x} \quad (6.6)$$

donde τ corresponde a la entrada de control general para el robot, m y b , son la masa y amortiguamiento respectivamente. El operador humano está en contacto físico con el robot, definiendo un sistema de dos puertos: puerto humano-robot y puerto robot-ambiente. Una ley de control [98] puede ser derivada como

$$\tau = \begin{bmatrix} K_p + K'_p \frac{d}{dt} + K''_p \frac{d^2}{dt^2} & K_{fh} & -K_{famb} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ f_h \\ f_{amb} \end{bmatrix} \quad (6.7)$$

con K_p , K'_p , K''_p , K_{fh} y K_{famb} las ganancias de retroalimentación de la posición, velocidad y aceleración del robot, la fuerza del operador humano, y la fuerza de

contacto del ambiente, respectivamente. Estas ganancias pueden ser determinadas tal que la respuesta de fuerza sea ideal como se presenta en la ecuación (6.4), bajo la suposición de sensores de calidad y medición de aceleración. Sin embargo existe una dinámica o impedancia intervenida (6.2).

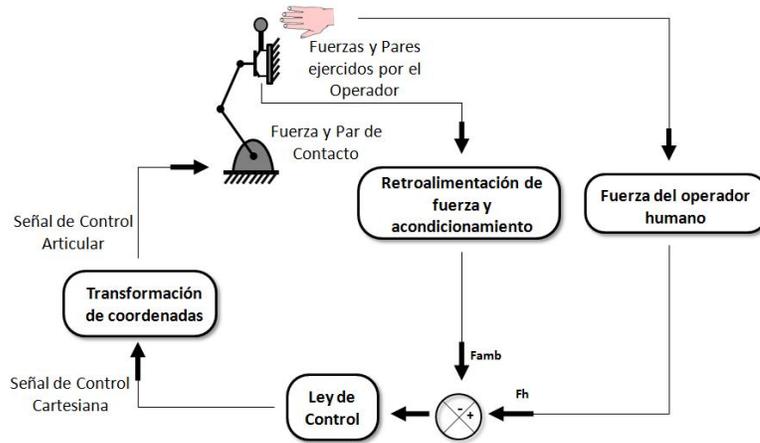


Figura 6.5: Sistema cooperativo humano-robot con interacción directa.

6.2.2. Interfaz háptica quasipasiva

Una Interfaz háptica quasipasiva considera el esquema de control de mando de fuerza y medición de posición y velocidad articular, el sistema de realidad virtual define la simulación de la respuesta de fuerza. La ley de control compensa parcialmente la dinámica del sistema (gravedad y fricción). En interfaz háptica quasipasiva se requiere del conocimiento parcial de la dinámica del dispositivo háptico y de la lectura de posición y velocidad articular. En estas condiciones la fuerza del ambiente o fuerza de reacción es más realista que en el caso de una interfaz háptica pasiva.

La fuerza del ambiente o fuerza de reacción es definida, como

$$f_{amb} = b_a \dot{x} + k_a x \quad (6.8)$$

La ley de control que garantiza que la dinámica de contacto sea una respuesta ideal (6.4), es

$$\tau = -J(q)^T f_{amb} + G(q) + F(\dot{q}) \quad (6.9)$$

donde $G(q)$ corresponde a la compensación gravitatoria, y $F(\dot{q})$ a la fricción dinámica del dispositivo háptico.

En estas condiciones, el operador humano modifica las variables articulares con una razón de cambio, y éstas son registradas por medio de los codificadores ópticos

o sensores de posición articular, cuyos valores instantáneos permiten determinar los términos gravitatorios y de fricción dinámica por articulación instantánea para la compensación dinámica, simultáneamente definen, mediante la transformación cinemática (posición y velocidad), las coordenadas operacionales de posición y velocidad que definirán la fuerza de contacto en el ambiente o fuerza de reacción. Para que $f_{amb} \neq 0N$, el algoritmo para la detección de la colisión debe definir el momento en el que el operador humano, representado en el ambiente virtual, entre en contacto con la superficie del objeto ó bien propicie la deformación. La detección de la colisión, como parte del modelo físico del ambiente virtual, involucra la detección automática de una interacción inminente de dos objetos y de la localización cartesiana donde ocurre [83].

6.2.3. Interfaz háptica activa

Una interfaz háptica activa Figura (6.6) involucra el conocimiento de la fuerza de reacción mediante el uso de un sensor físico o virtual, considera la impedancia del operador humano y parcial o totalmente la dinámica no lineal del dispositivo háptico. Los algoritmos que permiten implementar una interfaz háptica activa, permiten establecer propiedades de la superficie virtual como textura y rugosidad, tal como el Lagrangiano restringido y al método de descomposición ortogonal [110].

Se considera como interfaz háptica activa a un sistema de dos o mas puertos de comunicación que incrementa el realismo en la interacción con el afán de reproducir un experimento realista, es decir, obtener un estímulo kinestético realista y estable al interactuar con un objeto dinámico modelado virtualmente. El sistema más simple es cuando la interfaz es de dos puertos: operador humano-dispositivo háptico y dispositivo háptico-ambiente virtual dinámico deformable. Existen escasos trabajos que involucran la dinámica no lineal de interacción [18][190]sinembargo debido al considerable número de operaciones que debe realizar, los sistemas requieren mayor ancho de banda y del conocimiento de la dinámica del dispositivo háptico.

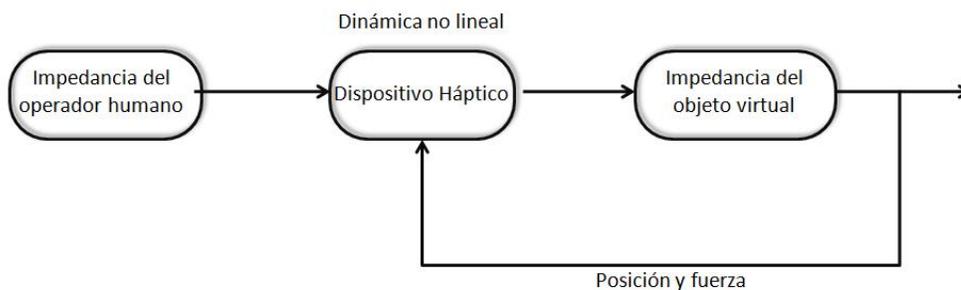


Figura 6.6: Diagrama a bloques de una interfaz háptica activa [51].

El principio propuesto, para integrar una interfaz háptica activa, considera el mo-

delo dinámico del dispositivo háptico como un robot manipulador efectuando tareas de contacto. El algoritmo propuesto para integrar una interfaz háptica activa que genera la fuerza de contacto en función de la dinámica del dispositivo háptico, la dinámica del ambiente y sus propiedades superficiales.

6.3. Breve introducción de una interfaz háptica para exploración

Durante la navegación aleatoria (exploración) en el espacio de trabajo del dispositivo háptico, el operador humano percibe fuerzas de reacción y de oposición a su movimiento, estas pueden surgir por la presencia de objetos virtuales sintetizados con base en los métodos dedicados para este propósito o bien, por la dinámica no lineal del dispositivo háptico, es decir fricción, efectos inerciales, juego mecánico en transmisiones, etc. Para ello, las leyes de control utilizadas en las interfaces hápticas consideran la dinámica o impedancia intervenida del dispositivo háptico y la dinámica del objeto virtual. Con el propósito de aumentar el realismo en la interacción háptica, diversos autores han propuesto algoritmos para asignar propiedades superficiales a los objetos, como son geometrías espaciales compuestas, texturas y rugosidad. En esta sección se hace referencia a una técnica propuesta y de fácil implementación denominada el *método del Lagrangiano Restringido*. En este capítulo se presenta leyes de control clásicas considerando la dinámica intervenida en movimiento libre, las estrategias de asignación de propiedades superficiales consideradas para este trabajo, y el algoritmo para la detección de contacto bajo condiciones de deformación, generalizando el principio para objetos virtuales compuestos geoméricamente.

6.4. Generalidades de una interfaz háptica para exploración

El propósito de una interfaz háptica, es estimular táctil y kinesteticamente al usuario cuando ocurre interacción con el ambiente virtual durante la exploración. En ésta sección se analizan las interfaces hápticas durante la exploración, es decir cuando el operador humano tiene y no tiene contacto. Sin contacto o en movimiento libre, la acción de control tiene como objetivo compensar la dinámica intervenida, es decir la dinámica del dispositivo háptico, tal que el operador no perciba fuerza de oposición al movimiento. Cuando ocurre contacto, es decir en movimiento restringido, el control no solo depende de la dinámica intervenida también de la fuerza de reacción deseada, definida a partir de la deformación del objeto virtual. La comunidad de interfaces hápticas ha definido al objeto virtual con propiedades de rigidez (penalización) y en

algunos casos propiedades de inercia y exhibibilidad sin considerar la dinámica no lineal de interacción [111][28][58][80][90][109].

6.4.0.1. Movimiento libre

La existencia de la dinámica intervenida le exige al operador humano que ejerza una fuerza f_h aún cuando no hay fuerza externa f_{amb} (sin interacción con el objeto virtual), es decir, operación en movimiento libre (ver figura 6.7).

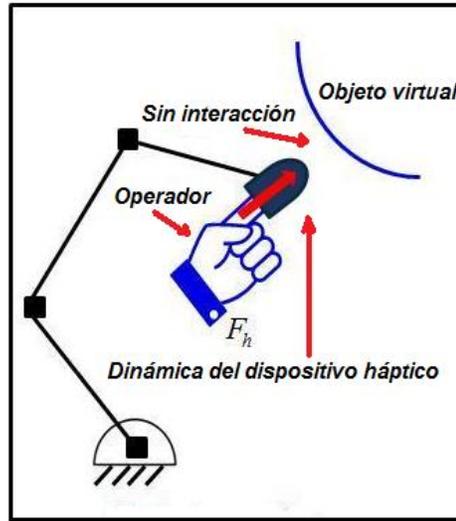


Figura 6.7: Dinámica intervenida sin interacción con ambiente virtual [94].

En estas condiciones la percepción kinestética de la dinámica de la tarea es considerablemente cambiada y el objetivo es diseñar un sistema de adquisición de movimiento y fuerza de reacción que minimice los efectos debidos a la dinámica intervenida. Bajo la suposición de sensores ideales y perfecto conocimiento de la dinámica, la entrada de control para el dispositivo háptico puede ser diseñada por compensación completa de su dinámica. Para ello, es considerada la resolución limitada de los sensores, la existencia de ruido, el muestreo discreto y la fricción no lineal existente como parte de la dinámica intervenida. El modelo dinámico representativo en estas condiciones, es definido por la siguiente ecuación,

$$H(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} + G(q) + B\dot{q} = \tau + \tau_h \quad (6.10)$$

donde $H(q) \in \mathbb{R}^{n \times n}$ denota una matriz de inercia definida positiva y simétrica, $C(q; \dot{q}) \in \mathbb{R}^{n \times n}$ corresponde a la matriz de fuerzas de Coriolis y centripetas, $G(q) \in \mathbb{R}^n$ modela el vector de fuerzas gravitacionales, $B \in \mathbb{R}^{n \times n}$ es una matriz diagonal y definida positiva cuyas entradas son los coeficientes de fricción viscosa, $\tau \in \mathbb{R}^n$ corresponde

al vector de torque de control, $\tau_h = J(q)^T f_h$ representa el torque aplicado por el operador humano definido a partir de la matriz Jacobiana $J(q)$ del dispositivo háptico, y $q \in \mathfrak{R}^n$ corresponde a las coordenadas generalizadas del dispositivo háptico.

Ley de Control

Las condiciones ideales durante la interacción háptica, ocurren cuando $f_h = f_{amb}$. Si el operador humano no tiene interacción con el ambiente virtual (figura 6.10), la $f_{amb} = 0$, esto significa que f_h deberá de ser nula. Sin embargo, la existencia de la dinámica intervenida del dispositivo háptico ocasiona que el operador humano tenga que ejercer una fuerza para desplazar el efector final a un punto del espacio de trabajo. Esta situación puede afectar considerablemente, cuando ocurre la interacción con un objeto virtual con dinámica despreciable en comparación a la dinámica intervenida. Una ley de control dependiente de la dinámica del dispositivo háptico [31] [108] es:

$$\tau = \hat{H}(q)\dot{q} + \hat{C}(q, \dot{q})\dot{q} + \hat{G}(q) + \hat{B}\dot{q} \quad (6.11)$$

donde $\hat{H}(q)$, $\hat{C}(q, \dot{q})$, $\hat{G}(q)$ y \hat{B} , corresponden a la dinámica estimada para la compensación. Las condiciones ideales para la compensación dinámica, ocurren cuando $\hat{H}(q) = H(q)$, $\hat{C}(q, \dot{q}) = C(q, \dot{q})$, $\hat{G}(q) = G(q)$ y $\hat{B} = B$.

Con un dispositivo háptico de baja inercia, despreciable fricción en articulaciones y compensación de gravedad [111] se reduce la ley de control de la forma siguiente,

$$\tau = -J(q)^T f_h^* \quad (6.12)$$

donde f_h^* representa la fuerza que el operador aplica al efector final del dispositivo háptico, y es determinada comunmente por un sensor de fuerza. $J(q) \in \mathfrak{R}^{n \times n}$ representa la matriz jacobiana del dispositivo háptico de n grados de libertad.

Cuando la fricción en articulaciones del dispositivo háptico es considerable o nada despreciable, la ley de control que permite asegurar la compensación dinámica en movimiento libre y lograr que f_h sea nula [98], es definida a continuación

$$\tau = -J(q)^T f_h^* + \hat{G}(q) + \hat{B}\dot{q} \quad (6.13)$$

en donde idealmente $\hat{G}(q) = G(q)$ y $\hat{B} = B$. La figura (6.8), representa el diagrama de bloques del sistema de control descrito por la ecuación (6.13). Cuando el operador humano durante la ejecución de una tarea en movimiento libre, ejerce un movimiento a muy baja velocidad, la aceleración es casi nula en estas condiciones, el término de Coriolis y fuerzas centripetas es muy reducido por el producto de dos velocidades pequeñas. El control (6.13) queda reducido de la forma siguiente [97].

$$\tau = \hat{G}(q) + \hat{B}\dot{q} \quad (6.14)$$

en donde idealmente $\hat{G}(q) = G(q)$ y $\hat{B} = B$, esta condición mejora con bajo efecto inercial. El diagrama de la figura (6.8) queda reducido en la figura (6.6).

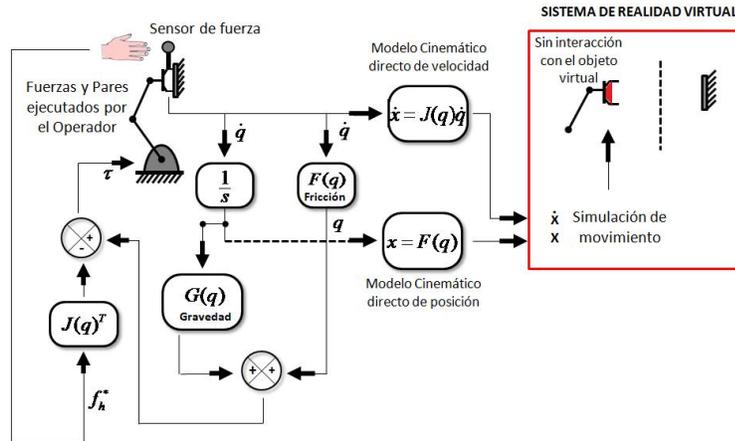


Figura 6.8: Control con compensación parcial de dinámica.

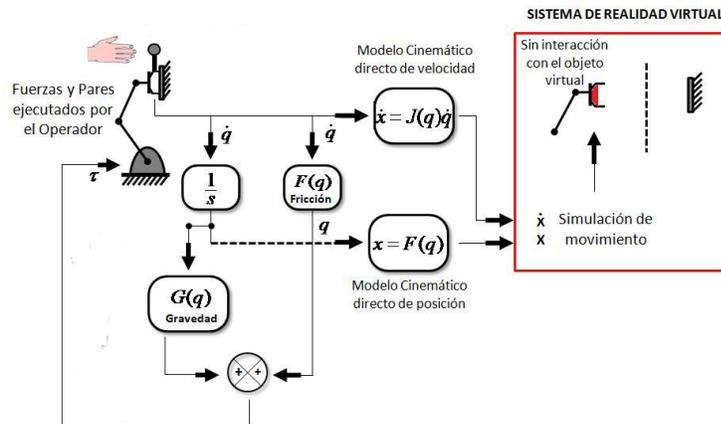


Figura 6.9: Control con compensación de fricción y gravedad.

Prueba de estabilidad

Considerando el modelo matemático de la ecuación (6.10) y la ley de control definida en (6.11) en lazo cerrado,

$$\left[H(q) - \hat{H}(q) \right] \ddot{q} + \left[C(q, \dot{q}) - \hat{C}(q, \dot{q}) \right] \dot{q} + \left[G(q) - \hat{G}(q) \right] + \left[B - \hat{B} \right] \dot{q} = \tau_h \quad (6.15)$$

y con una dinámica idealmente identificada,

$$\begin{aligned} H(q) - \hat{H}(q) &= 0 \\ C(q, \dot{q}) - \hat{C}(q, \dot{q}) &= 0 \\ G(q) - \hat{G}(q) &= 0 \\ B - \hat{B} &= 0 \end{aligned} \quad (6.16)$$

en estas condiciones el torque aplicado por el operador es $\tau_h = 0$, es decir, en consecuencia $f_h = f_{amb} = 0$. Es claro apreciar que en estas condiciones no se requiere un sensor de fuerza, pero es necesaria la medición o cálculo de la aceleración articular. Cuando se calcula a partir de velocidades, esta no es muy precisa y deberá aplicarse algún tipo de filtro digital.

Para el control definido en la ecuación (6.14) con el modelo matemático de la ecuación (6.10) en lazo cerrado se tiene,

$$H(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} + [G(q) - \hat{G}(q)] + [B - \hat{B}]\dot{q} = \tau_h \quad (6.17)$$

con una dinámica idealmente identificada,

$$\begin{aligned} G(q) - \hat{G}(q) &= 0 \\ B - \hat{B} &= 0 \end{aligned} \quad (6.18)$$

y considerando una velocidad muy pequeña, inducida por el operador humano y bajo efecto inercial. Adicionalmente el término de coriolis y fuerzas centripetas es reducido cercanamente a cero debido a al cuadrado de una velocidad muy pequeña. En estas condiciones el torque aplicado por el operador es $\tau_h = 0$, es decir, en consecuencia $f_h = f_{amb} = 0$. con esta forma de operar al dispositivo háptico se requiere conocimiento parcial de la dinámica y no se requiere sensor de fuerza, situación que beneficia reduciendo considerablemente el tiempo de computo y garantizando una eficiente operación en movimiento libre.

6.4.0.2. Movimiento restringido

Cuando el operador humano interactúa con el ambiente virtual mediante el dispositivo háptico, la fuerza de reacción para lograr una eficiente estimulación kinestética, es calculada en función de la dinámica del objeto virtual, exclusivamente. Esta metodología ha sido adoptada por múltiples investigadores y diseñadores de interfaces hápticas [31][80][96][114]. El algoritmo utilizado no considera la dinámica no lineal de interacción, situación que no asegura el realismo que se espera con un objeto real. Considerando los métodos convencionales y la dinámica intervenida durante la interacción con un objeto virtual (figura 6.10), el modelo matemático de la interfaz háptica es el descrito por la ecuación (6.10), la diferencia con movimiento libre (sin

interacción), se presenta en el control τ que depende de la dinámica del objeto virtual (figura 6.11). La dinámica del objeto virtual, buscando semejanza con los objetos reales, es considerada con masa M_o , amortiguamiento o exhibilidad B_o y rigidez ó elasticidad K_o . Sin embargo, la masa del operador humano y de la dinámica intervenida exceden de manera considerable a la masa del objeto virtual, y considerando que se necesitaría el cálculo de la aceleración del operador humano referido en el ambiente virtual, en estas condiciones la masa del objeto virtual es despreciada, y $M_o = 0$. Por lo que la fuerza de reacción o fuerza del ambiente, es solo determinada mediante la siguiente ecuación diferencial ordinaria,

$$f_{amb} = B_o \dot{x} + K_o \Delta x \quad (6.19)$$

donde x , representa la velocidad operacional que tiene el operador humano durante la interacción y Δx corresponde a la deformación de la superficie del objeto virtual.

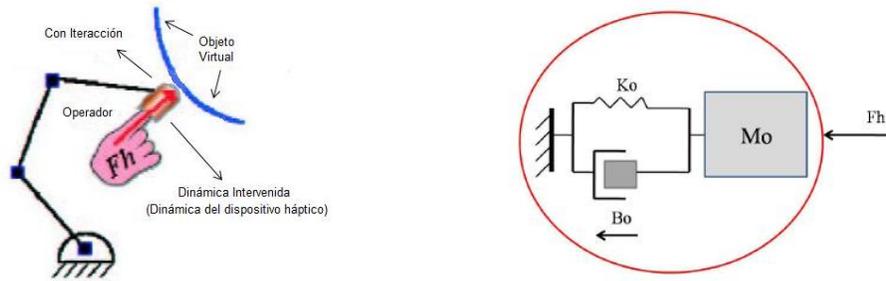


Figura 6.10: Dinámica intervenida con Figura 6.11: Dinámica del ambiente virtual [94].

Ley de Control

La ley de control convencionalmente utilizada por la comunidad científica (ecuación 6.12), y que considera la dinámica intervenida con baja inercia y fricción y una dinámica lineal de primer orden del objeto virtual (ecuación 6.19), es la siguiente:

$$\tau = -J(q)^T \{B_o \dot{x} + K_o \Delta x\} \quad (6.20)$$

Cuando la fricción en articulaciones del dispositivo háptico es considerable o nada despreciable y considerando la compensación de gravedad, la ley de control, es definida a continuación,

$$\tau = -J(q)^T \{B_o \dot{x} + K_o \Delta x\} + \hat{G}(q) + \hat{B} \dot{q} \quad (6.21)$$

en donde idealmente $\hat{G}(q) = G(q)$ y $\hat{B} = B$. La figura ??, representa el diagrama de bloques del sistema de control descrito por la ecuación 6.21.

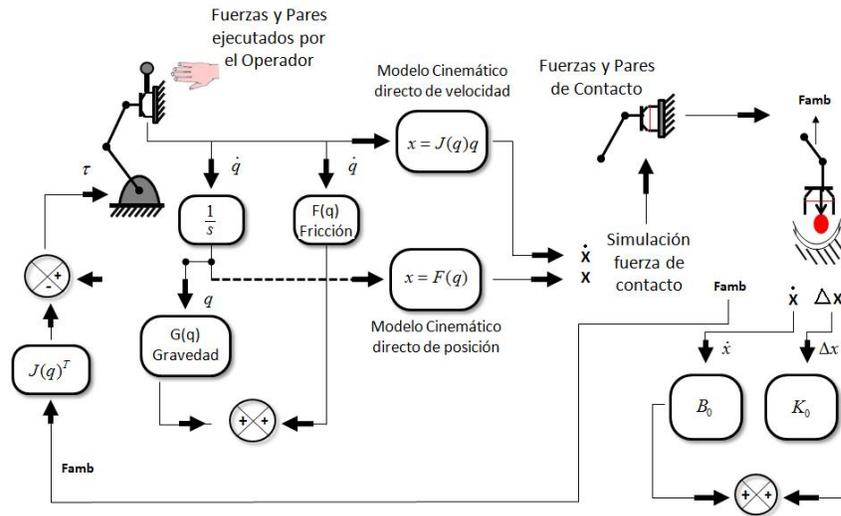


Figura 6.12: Diagrama de bloques de ley de control con dinámica intervenida y del ambiente virtual.

6.5. Asignación de propiedades en la superficie de contacto

A pesar del incremento considerable de la tecnología háptica para tareas de interacción hombre-máquina, la representación efectiva de la información háptica aún un problema de diseño relativamente nuevo. Existen métodos para la percepción de forma de objetos tridimensionales que permiten derivar percepción de texturas y otras propiedades superficiales, como por ejemplo el método de los campos de fuerza laterales [139]. La percepción de la textura superficial es un problema de diseño específico, ya que para la manipulación de objetos la textura es indispensable para tener un conocimiento exhaustivo de sus características [95], propiedad que incrementa el realismo en la interacción. Las propiedades físicas de la textura son complejas y difíciles de reproducir, la representación de texturas con un dispositivo de retroalimentación de fuerza es un problema abierto, ya que esta diseñado para ejercer estímulo kinestético al dedo, mano o cuerpo del usuario. Trabajos previos dan a conocer la dificultad por permanecer en la superficie de un objeto virtual texturizado, así como la información errónea durante la interacción [129]. Para ciertas frecuencias y amplitudes de operación hay percepción de inestabilidades durante la navegación y en consecuencia sensaciones no realistas, es por ello que una gran parte de la comunidad de interfaces hápticas se ha interesado en este ámbito [151]. La propiedad de la rugosidad se ha manejado hasta el momento como una derivación de la textura, con propósitos de estudios psicofísicos [110], el modelo utilizado no depende de la fricción tangencial como

ocurre en la interacción con objetos reales. En este trabajo se proponen modelos para la detección de forma, textura y rugosidad, con relativamente fácil implementación.

6.5.1. Forma

La detección de forma, durante la interacción háptica, es desarrollada a partir del algoritmo para la detección de contacto, y es quien define el momento y algortimo para el cálculo de la fuerza de reacción, por ejemplo, en condiciones de contacto y navegación y en condiciones de deformación de la superficie del objeto virtual. El principio propuesto para la detección de contacto esta definido en términos del modelo geométrico de la primitiva de contacto y del modelo cinemático directo de posición del dispositivo háptico. Por ejemplo para un plano virtual paralelo al plano X-Z, descrito por la figura 6.13,

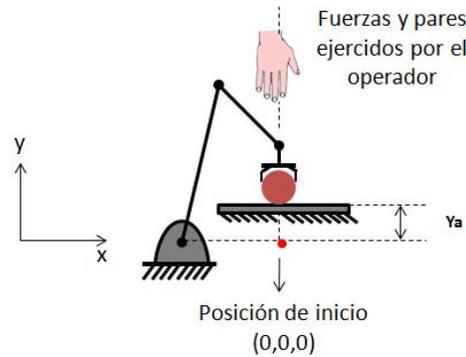


Figura 6.13: Descripción del modelo de un plano virtual para la detección de forma [94].

la función que determina la tarea de contacto, deformación y en consecuencia forma es definida a continuación para el caso del plano virtual paralelo a X-Z es

$$\begin{aligned}
 \varphi(x) &= Y - y_0 \cong 0 \\
 x &= f(q) \\
 \varphi(f(q)) &= \varphi(q) \cong 0
 \end{aligned}
 \tag{6.22}$$

donde $x = f(q)$ corresponde al modelo cinemático directo de posición del dispositivo háptico, y $\varphi(q)$ es la función que describe la tarea para la detección de contacto y deformación, y es dependiente de las coordenadas generalizadas del dispositivo háptico, información proporcionada por los codificadores ópticos o sensores de posición. Para el caso de una esfera con centro en $C(\alpha, \beta, \gamma)$ y radio r , es descrita por la figura 6.14,

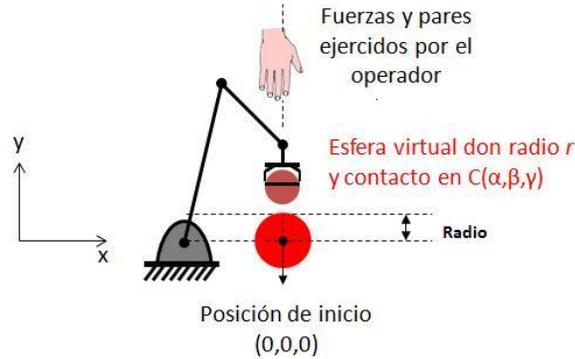


Figura 6.14: Descripción del modelo de una esfera virtual para la detección de forma [94].

La función que determina la tarea de contacto, deformación y en consecuencia forma es definida a continuación para el caso de la esfera virtual es

$$\begin{aligned}
 \varphi(x) &= (x - \alpha)^2 + (y - \beta)^2 + (z - \gamma)^2 \cong r^2 \\
 \varphi(x) &= (x - \alpha)^2 + (y - \beta)^2 + (z - \gamma)^2 - r^2 \cong 0 \\
 x &= f(q) \\
 \varphi(f(q)) &= \varphi(q) \cong 0
 \end{aligned} \tag{6.23}$$

La función $\varphi(q)$ describe la situación del objeto virtual y del operador humano de la forma siguiente,

- Cuando $\varphi(q) > 0$, el operador humano se encuentra alejado del objeto virtual (sin interacción o movimiento libre), en estas condiciones la fuerza de reacción $f_r = 0N$ y no se aplica ley de control para retroalimentar la fuerza de reacción únicamente para compensar la dinámica intervenida.
- Cuando $\varphi(q) = 0$, el operador humano se encuentra sobre la superficie de contacto del objeto virtual (interacción o movimiento restringido), en estas condiciones la fuerza de reacción $f_r > 0N$, en estas condiciones se aplica un control para retroalimentar la fuerza de reacción y compensar dinámica intervenida.
- Cuando $\varphi(q) < 0$, el operador humano se encuentra deformando la superficie de contacto del objeto virtual (interacción con deformación), en estas condiciones la fuerza de reacción $f_r > 0N$ determinada en condiciones de deformación, la ley de control es dependiente de una fuerza calculada a partir de la deformación.

Generalización del método

Utilizando programas para diseño avanzado de gráficos por computadora como MAYA, es posible diseñar objetos geométricos irregulares o compuestos, en el que

existen funciones que permiten determinar el mallado de la figura y las matrices que lo describen, tal que es posible conocer los vértices y en consecuencia el plano correspondiente. De ésta manera se sugiere la extensión del método para detección de forma en objetos virtuales compuestos. Por ejemplo, si se toma como base la ecuación general del plano,

$$ax + by + cz = d \quad (6.24)$$

en donde los coeficientes a , b , c y d , describen la situación del plano en el espacio. La función en el espacio cartesiano que define la detección de contacto, deformación y forma es,

$$\varphi(x) = ax + by + cz - d = 0 \quad (6.25)$$

el objetivo es determinar los coeficientes a , b , c y d , para que se pueda evaluar el método, es decir, del mallado de una figura compuesta se definen cuatro vértices que constituyen una cara, como indica la figura 6.15

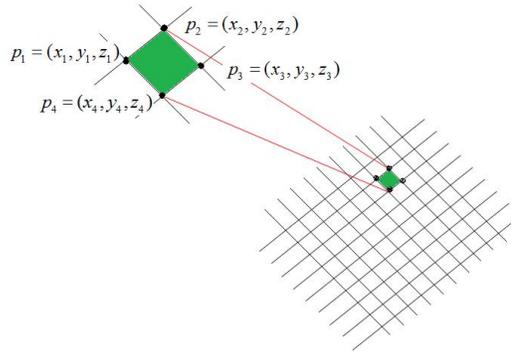


Figura 6.15: Determinación de los puntos de un plano de la malla de un objeto virtual compuesto [94].

tal que sea posible determinar un sistema de cuatro ecuaciones simultáneas con cuatro incógnitas, a partir de los vértices encontrados $P_1(x_1, y_1, z_1)$, $P_2(x_2, y_2, z_2)$, $P_3(x_3, y_3, z_3)$ y $P_4(x_4, y_4, z_4)$.

6.5.2. Textura

La superficie del objeto virtual se texturiza mediante un modelo descrito por una función sinusoidal de amplitud A y frecuencia f . La figura 6.16, describe la representación gráfica de esta propiedad superimpuesta en la superficie del objeto virtual primitivo.

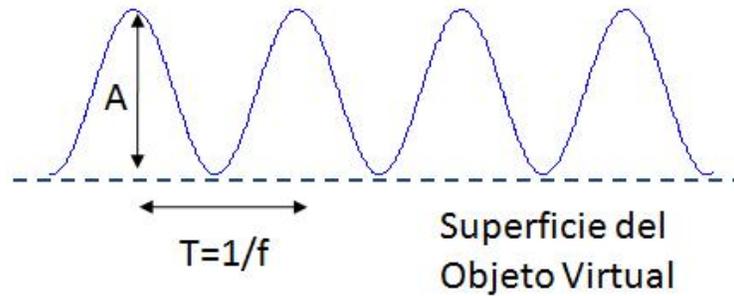


Figura 6.16: Modelo sinusoidal de textura [94].

La ecuación de par de textura representativa de la figura 6.16, es

$$\tau_{tex} = A(\text{sen}(2\pi ft) + 1) \tag{6.26}$$

donde t es el tiempo en segundos. Una función de par de textura que disminuye a voluntad la cresta, es la siguiente,

$$\tau_{tex} = A(\text{sen}(\dots \text{sen}(\text{sen}(2\pi ft))) + 1) \tag{6.27}$$

obteniendo como respuesta la representada en la figura 6.17. Una de las bondades del algoritmo de fuerza de reacción propuesto, es que para asignar la propiedad de textura es suficiente con poner a la fuerza de reacción en función del par de textura, situación que se complica en trabajos como los reportados recientemente en [151].

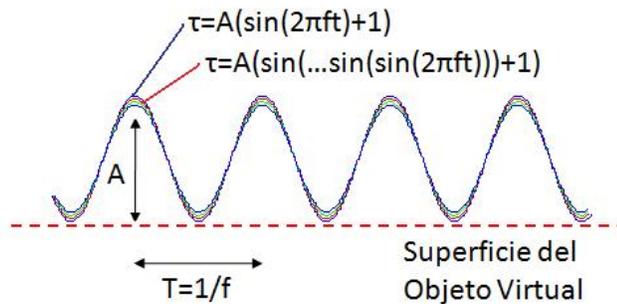


Figura 6.17: Modelo sinusoidal de textura con achatamiento [94].

6.5.3. Rugosidad

La propiedad de la rugosidad de los materiales, aplicada en ambientes virtuales para incrementar el realismo en la interacción háptica, se ha modelado a partir de

la textura [110], sin embargo de acuerdo a la teoría de los materiales, esta es dependiente de la fricción de contacto existente entre dos materiales en movimiento de igual o distinta naturaleza. En este trabajo, la propiedad de la rugosidad es definida en función de la fricción tangencial, es decir su magnitud dependerá de la velocidad de desplazamiento durante la navegación y del coeficiente de rozamiento asignado al material para la simulación.

La fricción deslizando F entre dos materiales diferentes con área de contacto A_c , donde A_c es definida por el cociente de la carga W y la tensión P_m del más débil de los dos materiales en contacto, las ecuaciones que rigen este principio son,

$$A_c = \frac{W}{P_m} \quad (6.28)$$

$$F = A_c S \quad (6.29)$$

$$\mu = \frac{F}{W} = \frac{S}{P_m} \quad (6.30)$$

donde S es la tensión de la esquila y el coeficiente de rozamiento o fricción es $\mu \ll 1$. La rugosidad se define como una función del movimiento deslizando sobre la superficie del objeto, por lo tanto la rugosidad es una función de la fricción tangencial f_T dependiente de la velocidad operacional descrita en el punto instantáneo de contacto, tal y como se presenta a continuación,

$$f_T = \mu \sqrt{f_x^2 + f_y^2} \dot{X} \quad (6.31)$$

donde $\dot{X} = J(q)\dot{q}$ corresponde a la velocidad operacional en función de la velocidad articular \dot{q} y de la matriz jacobiana $J(q)$ del dispositivo háptico, y $\vec{f}_x \vec{f}_y \in S_T$ son las fuerzas tangenciales existentes en el plano tangente al punto de contacto, como muestra la figura 6.18. La ecuación de par de rugosidad definida en términos de la fuerza de fricción tangencial, es definida como

$$\tau_T = J(q)^T f_T \quad (6.32)$$

$$= \mu \sqrt{f_x^2 + f_y^2} J(q)^T J(q) \dot{q} \quad (6.33)$$

La propiedad de rugosidad, al igual que la de textura, son de fácil implementación mediante el algoritmo de fuerza de reacción propuesto.

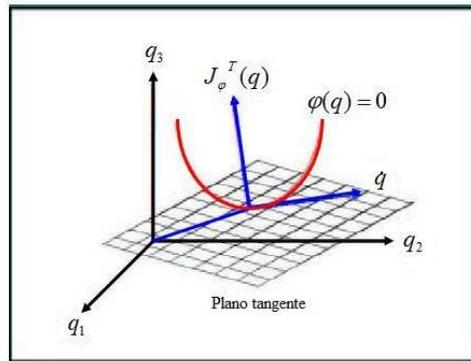


Figura 6.18: Plano tangente en el punto de contacto.

6.5.4. Algoritmo de detección

Los experimentos desarrollados para verificar el desempeño de la interfaz háptica PHANToM 1.0, así como el método de penalización utilizado para determinar la fuerza de reacción, se efectuaron sobre un plano y una esfera virtual. El plano virtual es paralelo al plano X con $Y = 5 \text{ mm}$ y con rigidez de 200 N/m y 2000 N/m a una frecuencia de muestreo de 1 KHz .

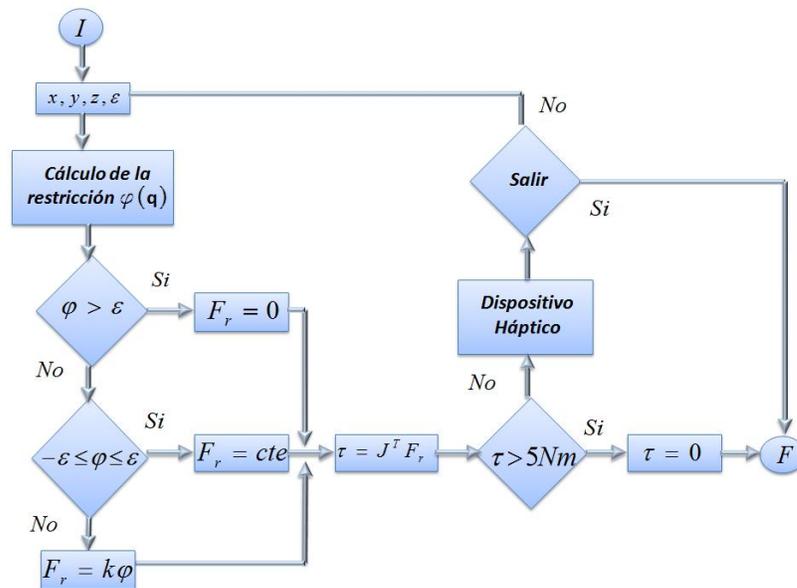


Figura 6.19: Algoritmo de detección de objetos virtuales.

Este algoritmo fue el utilizado para la detección del objeto virtual entre la máquina y el dispositivo háptico.

Plano sobre el eje X

La ecuación paramétrica 6.34 es la restricción representada como $F_{ee} \varphi$ en el algoritmo de detección.

$$x = (-by - cz - d)/a \quad (6.34)$$

La Figura 6.20, presenta el desempeño en el espacio de trabajo, desde el inicio al final del experimento con movimiento aleatorio. En este caso, la rigidez es relativamente baja, situación que evita que el operador perdure voluntariamente sobre la superficie, es decir, en todo momento durante el contacto ocurre deformación.

La segunda gráfica experimental, describe al detector de colisiones utilizado, representado por $\varphi(q)$ y que permite visualizar la posición del operador humano con respecto de la superficie de contacto. Cuando $\varphi(q) > 0$ el operador humano se encuentra alejado de la superficie del objeto virtual, y la fuerza de reacción es $F_r = 0$. Cuando $\varphi(q) < 0$ el operador humano se encuentra deformando la superficie del objeto virtual, y la fuerza de reacción es $F_r > 0$, (figura 6.21).

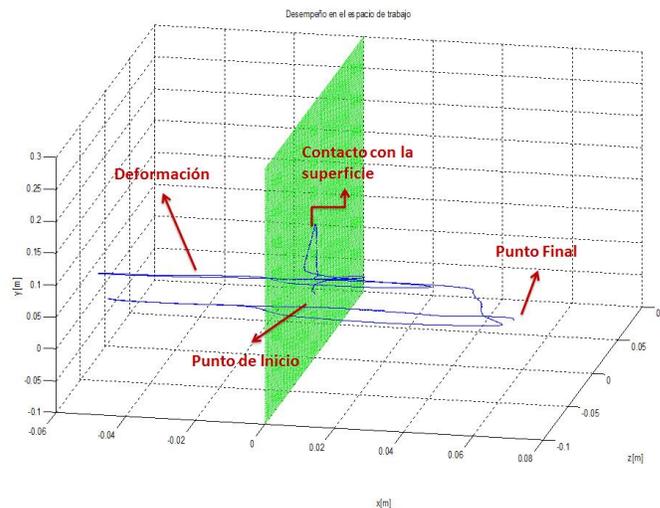


Figura 6.20: Plano virtual en el espacio de trabajo.

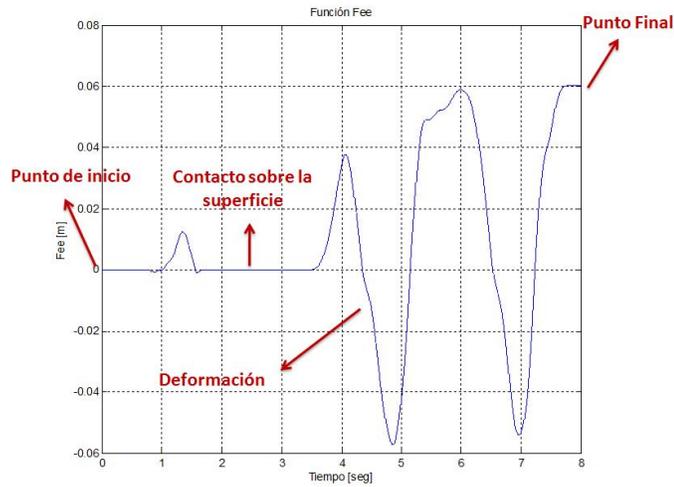


Figura 6.21: Restricción geométrica φ para el plano.

Esfera

La ecuación paramétrica 6.35 es la restricción representada como F_{ee} ϕ en el algoritmo de detección.

$$f_{ee} = (x - \alpha)^2 + (y - \beta)^2 + (z - \gamma)^2 - r^2 \quad (6.35)$$

En este experimento con rigidez de $K = 2000 \text{ N/m}$, la frecuencia única es $f_{\varphi} = 1 \text{ KHz}$. Es posible encontrar frecuencias superiores durante el contacto y navegación, considerando tiempos de muestreo inferiores a 1 msec . Estos experimentos permiten argumentar que, aún cuando PHANToM utiliza un método eficiente para discriminar la dinámica intervenida durante la interacción, existe un límite en la operación, es decir, al seleccionar los parámetros de la superficie de contacto y la dinámica asignada al ambiente virtual. Esto no significa que dentro de los límites de operación, PHANToM tenga un desempeño eficiente, debido a que no hay realismo en la interacción, situación que se ve superada cuando se considera la dinámica del sistema en interacción.

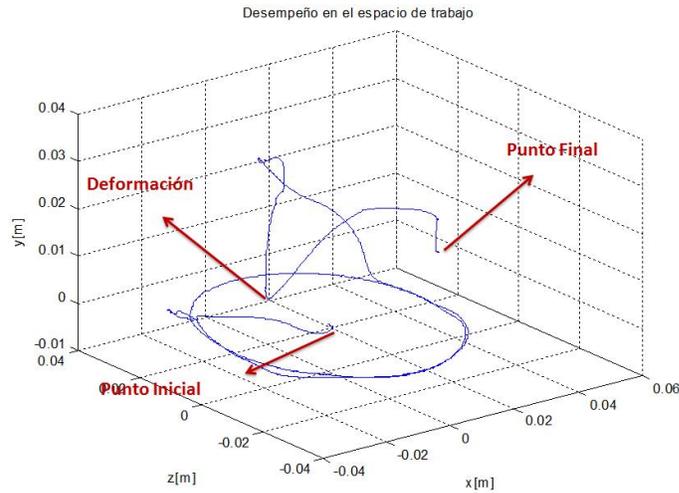


Figura 6.22: Esfera virtual en el espacio de trabajo.

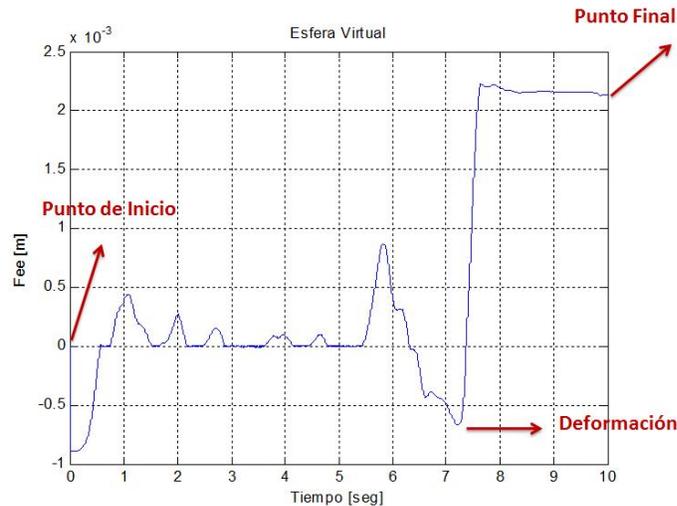


Figura 6.23: Restricción geométrica φ para la esfera.

6.6. Conclusiones

El modelo de interfaz háptica pasiva es el más utilizado por la sencillez en su programación, ya que no requiere conocimiento de la dinámica del dispositivo háptico y es de bajo costo computacional, sin embargo tiene bajo realismo debido a los límites de operación para parámetros dinámicos del objeto virtual. La comunidad de interfaces hápticas ha optado por la retroalimentación parcial de la dinámica del dispositivo

háptico para incrementar el realismo durante la simulación háptica, en la interfaz háptica quasipasiva, aun hay límites de operación y se desprecian dinámicas no lineales durante la interacción háptica. En este trabajo de investigación, se propone incrementar el realismo al considerar la dinámica no lineal de interacción definida por el operador humano y el dispositivo háptico, así como la dinámica lineal de la superficie de contacto del objeto virtual en condiciones de deformación, para lograr esto, se recurre a la teoría de modelado de robots manipuladores en tareas de contacto.

También se abordó la teoría de modelado y control utilizado en las interfaces hápticas con el propósito de mantener una interacción estable y realista, basado este último en la asignación de propiedades superficiales como textura y rugosidad. Se propuso un algoritmo para la detección de contacto, mismo que permite determinar la forma de un objeto virtual y su extensión a objetos virtuales compuestos, así como un modelo de textura y rugosidad para incrementar el realismo durante la interacción háptica. De este capítulo, la contribución del trabajo de tesis es descrita en el algoritmo para la detección de contacto y los modelos de textura y rugosidad presentados.

Capítulo 7

Control de fuerza y posición

7.1. Introducción

El movimiento Restringido ha sido objeto de intenso estudio en la comunidad de robótica en la última década, ya que se presenta como un problema fundamental para una variedad de tareas robóticas, tales como caminar, la simulación dinámica, la manipulación de la mano, por mencionar algunos. En este capítulo se muestra un control a nivel local estable para la convergencia simultánea exponencial de la fuerza y las trayectorias de la posición que se propone.

El nuevo modelo libre para el modos deslizantes de segundo orden en lazo cerrado induce localmente seguimiento exponencial a cualquier condición inicial.

Las tareas de movimiento restringido se definen como el ejercicio de un perfil deseado de fuerza en la fuerza en grados libertad restringidos ($f - DOF$), mientras se mueve a lo largo sin restricción de posición los grados de la libertad ($p - DOF$). La dinámica que se presenta en movimiento, se define por un conjunto de ($n = f + p$) DOF , acoplado a una restricción algebraica. Junto hace que un Sistema Dinámico Algebraica (DAE) de orden 2.

Para robots DAE , la dinámica inversa (con y sin coordinar las particiones) da lugar a la estabilidad exponencial, aunque el controlador es muy difícil de aplicar porque por lo menos un conjunto de parámetros físicos son inciertos. El control adaptable produce la convergencia simultánea asintótica de los errores de posición y fuerza de seguimiento, sin embargo en los gastos de desaceleración de la respuesta debido a su sobreparametrización. Por otro lado, el control de modos deslizantes de primer orden de velocidad da respuesta del sistema a costa de effort de control discontinuo.

7.2. Control para robots geoméricamente restringidos

La ley de control adaptable fue diseñado por referencias de propiedades básicas de los robots dinámicos, las cuales mencionamos a continuación

1. Pasividad de los robots dinámicos.
2. La retroalimentación de señales de posición y velocidad que son proyectadas en el plano tangente en el espacio articulado y ortogonal del vector de fuerza causado por el contacto también llamado (espacio de ortogonalización).
3. La convergencia de errores sobre la superficie es probada sobre condiciones iniciales apropiadas y la suavidad de la superficie.

Adicionalmente la convergencia del error de fuerza se demuestra con tal de que el punto final es diseñado para estar en contacto con alguna superficie.

7.2.1. Dinámica de robots bajo geometría restringida

Suponga que efector final del robot manipulador está en contacto con una superficie como se muestra en la figura 7.1. La superficie esta descrita por una función escalar $\varphi(x^1, x^2, x^3) = 0$, donde $x = (x^1, x^2, x^3)^T$ describe las coordenadas cartesianas.

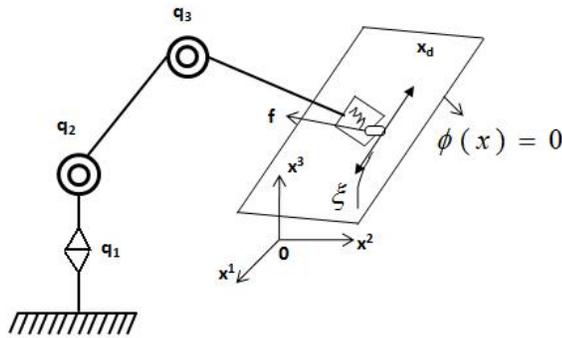


Figura 7.1: Control Híbrido (fuerza, posición y velocidad).

La fuerza de contacto se encuentra en dirección del vector normal a la superficie en el punto x y la fricción de contacto está en dirección de $-\dot{x}$ con magnitud $\xi(\|\dot{x}\|) \cdot \|\dot{x}\|$, donde $\xi(\alpha)$ es una función positiva de α . Entonces la dinámica del robot esta descrita en términos de las coordenadas articulares $q = (q^1, \dots, q^n)^T$ de la siguiente manera

$$H(q)\ddot{q} + \left\{ B_0 + \frac{1}{2}\dot{H}(q) + S(q, \dot{q}) \right\} \dot{q} + g(q) = J_\varphi^T(q)f - \xi(\|\dot{x}\|)J_x^T(q)\dot{x} + u \quad (7.1)$$

donde el primer término del lado derecho denota la fuerza de contacto ejercida en cada articulación, $J_x(q)$ y $J_\varphi(q)$ denota la matriz $3 \times n$ de x en q y un vector normal unitario $1 \times n$ de $\varphi(x(q)) = 0$ en el espacio articulado respectivamente, esto es

$$J_x(q) = \left(\frac{\partial x^i(q)}{\partial q^j} \right), J_\varphi(q) = \frac{\partial \varphi}{\partial x} J_x(q) / \left\| \frac{\partial \varphi}{\partial x} J_x(q) \right\|. \quad (7.2)$$

Del lado izquierdo de la ecuación 7.1 expresa la ecuación del Lagrangiano $L = K - U$, donde $K = (\dot{q}^T H(q) \dot{q} / 2)$ denota la energía cinemática y $U = (U(q))$ la energía potencial, B_0 una matriz definida positiva representando el factor de amortiguamiento, $H(q)$ es una matriz de inercia. Es bien conocido que la matriz de inercia $H(q)$ es simétrica y definida positiva, por otra parte cada entrada de $H(q)$ es constante o una función trigonométrica de componentes del vector articular q . También es conocido que la matriz $S(q, \dot{q})$ es lineal y homogénea en \dot{q} .

$$r^T S(q, \dot{q}) r = 0 \quad (7.3)$$

por algún n -vector r . Las dinámicas de la ecuación 7.1 bajo la geometría restringida también satisface la condición de pasividad con respecto a la entrada de control del vector u y el vector de velocidad \dot{q} , notese que $J_\varphi(q) \dot{q} = 0$ y por consiguiente

$$\int_0^t \dot{q}^T(\tau) u(\tau) d\tau = \int_0^t [\dot{q}^T(\tau) B_0 \dot{q}(\tau) + \xi(\|\dot{x}\|) \|\dot{x}(\tau)\|^2] d\tau + V(t) - V(0), \quad (7.4)$$

donde $V(t)$ es definido como la energía total descrita por

$$V(t) = \frac{1}{2} \dot{q}^T(t) H(q(t)) \dot{q}(t) + U(q(t)). \quad (7.5)$$

7.2.2. Espacio articulado "Ortogonalización"

Suponga que un par de la trayectoria de la posición deseada $q_d(t)$ en el espacio articulado y las trayectorias de fuerza deseada $f_d(t)$ sobre la superficie dada. El problema es encontrar un control eficiente que controle asintóticamente la fuerza y posición de las trayectorias de $t \rightarrow \infty$. Por esto asumimos que las señales de velocidad y posición $\dot{q}(t)$ y $q(t)$ y la señal de momentum definida por

$$F(t) = \int_0^t f(\tau) d\tau \quad (7.6)$$

En realidad, la ecuación de movimiento bajo la geometría restringida del efector final es expresada en la ecuación 7.1 y por lo tanto triplete de q , \dot{q} y F pueden ser consideradas como un vector de estado. También introducimos una señal llamada *Referencia Nominal*.

7.3. Dinámica del robot

El modelo dinámico de un robot manipulador cuando el efector final tiene un punto de contacto sobre una superficie sin deformación esta dada de la siguiente manera:

$$H(q)\ddot{q} + \{B_0 + C(q, \dot{q})\}\dot{q} + G(q) = \tau + J_{\varphi+}^T \lambda \quad (7.7)$$

$$\varphi(q) = 0 \quad (7.8)$$

donde $H(q) \in \mathbb{R}^{n \times n}$ denota la matriz de inercias definida positiva, $B_0 \in \mathbb{R}^{n \times n}$ denota la matriz diagonal positiva definida por los coeficientes de fricción de amortiguamiento de cada articulación, la matriz de Coriolis y fuerzas centripetas $C(q, \dot{q}) \in \mathbb{R}^{n \times n}$, $G(q) \in \mathbb{R}^n$ modela la fuerza de gravedad, $\tau \in \mathbb{R}^n$ representa la entrada de control, $\lambda \in \mathbb{R}$ es el lagrangiano restringido que representa la magnitud de la fuerza de contacto para $J_{\varphi+}^T = J_{\varphi+}^T(q) = \frac{J_{\varphi+}^T(q)}{J_{\varphi+}(q)J_{\varphi+}^T(q)}$ representa la proyección normalizada del Jacobiano $J_{\varphi+}(q) \in \mathbb{R}^n$ $J_{\varphi} = (\frac{\partial \varphi}{\partial q_1}, \frac{\partial \varphi}{\partial q_2}, \dots, \frac{\partial \varphi}{\partial q_n})$, que es normal al punto de contacto.

Una proyección ortogonal de $J_{\varphi}(q)$ se genera en el espacio una tangente en el punto de contacto entre el efector final y la superficie $\varphi(q) = 0$, como:

$$Q(q) = I - J_{\varphi}^T(q)J_{\varphi}(q) \in \mathbb{R}^{n \times n} \quad (7.9)$$

donde I denota la matriz identidad, donde $rank Q = n - \tau$ y $rank J_{\varphi}(q) = \tau$.

Mientras el manipulador está en movimiento a lo largo de $p - DOF$ en la superficie restringida medida por Q , así $Q\dot{q} = \dot{q}$. Ahora desde la ecuación 7.7 se puede parametrizar linealmente en terminos de una referencia nominal $(\dot{q}_r, \ddot{q}_r)^T \in \mathbb{R}^{2n}$ como se muestra

$$H(q)\ddot{q}_r + \{B_0 + C(q, \dot{q})\}\dot{q}_r + G(q) = Y_r \Theta \quad (7.10)$$

donde el regresor $Y_r = Y_r(q, \dot{q}, \ddot{q}_r)$ es compuesto de funciones no lineales y $\Theta \in \mathbb{R}^p$ se asume que representa parámetros desconocidos constantes, aun con (\dot{q}_r, \ddot{q}_r) definidos. Entonces, si agregamos 7.10 en 7.7, la ecuación en lazo abierto es

$$H\dot{S} = -\{B_0 + C(q, \dot{q})\}S - Y_r \Theta + J_{\varphi+}^T \lambda + \tau \quad (7.11)$$

donde la nueva variable $S = \dot{q} - \dot{q}_r$. En esta fase el problema es como diseñar τ en ecuación 7.11 tal que $Y_r \Theta$ no es disponible. Con este fin, considere el siguiente \dot{q}_r

$$\dot{q}_r = Q \left\{ \dot{q}_d - \sigma \Delta q + S_{dp} - \gamma_1 \int_{t_0}^t \text{sgn}(S_{qp}(\varsigma)) d\varsigma \right\} + \beta J_{\varphi}^T(q) \left\{ \Delta F - S_{dF} + \gamma_2 \int_{t_0}^t \text{sgn}(S_{qF}(\varsigma)) d\varsigma \right\} \quad (7.12)$$

donde $\Delta q = q - q_d$, $\Delta \dot{q} = \int_{t_0}^t (\lambda - \lambda_d)(\varsigma) d\varsigma$ y escalares positivos $\beta, \gamma_1, \gamma_2$ y $\sigma \in \mathfrak{R}^{n \times n}$, $q_d \in C^2$, y $\lambda_d \in \mathfrak{R}^n$ como las referencias deseadas para la posición y fuerza respectivamente, sustituyendo la ecuación 7.12 en $S = \dot{q} - \dot{q}_r$ da lugar a

$$S = QS_{vp} - \beta J_\varphi^T(q) S_{vF} \quad (7.13)$$

donde los manifold de posición y de fuerza S_{vp} y S_{vF} respectivamente son definidos por

$$S_{vp} = S_{qp} + \gamma_1 \int_{t_0}^t \text{sgn}(S_{qp}(\varsigma)) d\varsigma \quad (7.14)$$

$$S_{vF} = S_{qF} + \gamma_2 \int_{t_0}^t \text{sgn}(S_{qF}(\varsigma)) d\varsigma \quad (7.15)$$

con

$$S_{qp} = S_p - S_{dp} \quad (7.16)$$

$$S_p = \Delta \dot{q} + \sigma \Delta q \quad (7.17)$$

$$S_{dp} = S_p(t_0) e^{-\alpha(t-t_0)} \quad (7.18)$$

$$S_{qF} = S_F - S_{dF} \quad (7.19)$$

$$S_F = \Delta F \quad (7.20)$$

$$S_{dF} = S_F(t_0) e^{-\eta(t-t_0)} \quad (7.21)$$

donde α y η son constantes positivas. Desde la ecuación 7.10 involucra la derivada de la ecuación 7.12, entonces el resultado de \ddot{q}_r es

$$\begin{aligned} \ddot{q}_r = & \dot{Q} \{ \dot{q}_d - \sigma \Delta \dot{q} + S_{dp} - \gamma_1 \int_{t_0}^t \text{sgn}(S_{qp}) \} \\ & + Q \{ \ddot{q}_d - \sigma \Delta \ddot{q} - \dot{S}_{dp} - \gamma_1 \text{sgn}(S_{qp}) \} \\ & + \beta \dot{J}_\varphi^T \{ \Delta \dot{F} - S_{dF} + \gamma_2 \int_{t_0}^t \text{sgn}(S_{qF}) \} \\ & + \beta J_\varphi^T \{ \Delta \ddot{F} - \dot{S}_{dF} + \gamma_2 \text{sgn}(S_{qF}) \} \end{aligned} \quad (7.22)$$

7.4. Control modos deslizantes de segundo orden

7.4.1. Estructura del control

Considerando la siguiente ley de control

$$\tau = -K_d S + J_{\varphi+}^T \{-\lambda_d + \eta \Delta F\} + \gamma_2 J_{\varphi+}^T \{\tanh(\mu S_{qF}) + \eta \int_{t_0}^t \text{sgn}(S_{qF})\} \quad (7.23)$$

para $\mu > 0$, $K_d = K_+^T \in \mathbb{R}^{n \times n}$. Las ecuaciones 7.7 y 7.8, bajo el modo deslizante de segundo orden del esquema de la ecuación 7.23

$$H\dot{S} = -\{K + C(q, \dot{q})\}S - Y_r \Theta + J_{\varphi+}^T \{\Delta \lambda + \eta \Delta F\} + \gamma_2 J_{\varphi+}^T \{\text{sgn}(S_{qF}) + \eta \int_{t_0}^t \text{sgn}(S_{qF})\} + \gamma_2 J_{\varphi+}^T Z + \tau^*$$

donde $Z = \tanh(S_{qF}) - \text{sgn}(S_{qF})$, $K = B_0 + K_d$ y $\tau^* \equiv 0$ es una entrada de control virtual para el análisis de pasividad.

7.4.2. Análisis de estabilidad

Teorema 1 *Considera un robot manipulador restringido 7.7-7.8 bajo el modo deslizante de segundo orden por el esquema de la ecuación 7.23. Entonces el rendimiento de sistemas robóticos por modos deslizantes de segundo orden rige con la convergencia exponencialmente local para la posición y los errores de fuerza provienen de K_d y γ_1, γ_2 son errores en las condiciones iniciales.*

Prueba El análisis de pasividad (S, τ^*) indica que la siguiente función candidata de Lyapunov V califica como un función de Lyapunov

$$V = \frac{1}{2}(S^T H S + \beta S_{vF}^T S_{vF}) \quad (7.24)$$

donde β es un escalar. La derivada inmediata de la función de Lyapunov es

$$\begin{aligned} \dot{V} &= -S^T (K_d + B_0) S - \beta \eta S_{vF}^T S_{vF} - S^T Y_r \Theta + S^T \gamma_2 J_{\varphi+}^T Z \\ &\leq -S^T K_d S - \beta \eta S_{vF}^T S_{vF} + \|S\| \|Y_r \Theta\| + \|S\| \|\gamma_2\| \|J_{\varphi+}\| \|Z\| \\ &\leq -S^T K_d S - \beta \eta S_{vF}^T S_{vF} + \|S\| \in \end{aligned} \quad (7.25)$$

donde tenemos la propiedad geométrica de $\dot{H} - 2C(q, \dot{q})$, todos estos argumentos establecen la existencia de la fundamental ϵ . Entonces, si K_d, β y η son lo suficientemente grandes en un tal que S converge en una vecindad definida por ϵ centrado en el punto de equilibrio $S = 0$, por lo cual

$$S \rightarrow \epsilon \text{ comot} \rightarrow \infty \quad (7.26)$$

Los resultados de las posiciones para la estabilidad local de S con tal de que el estado esta cerca del diseño de trayectorias para alguna condición inicial. Estos límites en el \mathcal{L}_∞ , las primicias es que las constantes $\epsilon_3 > 0$ y $\epsilon_4 > 0$ tal que

$$|\dot{S}_{vp}| < \epsilon_3, \quad (7.27)$$

$$|\dot{S}_{vF}| < \epsilon_4 \quad (7.28)$$

Ahora probaremos la convergencia local de Δq . La ecuación 7.26 da lugar a $S = f(\epsilon)$ para algunas funciones $f(\epsilon)$ así la ecuación 7.13 da

$$QS_{vp} - \beta J_{\varphi+}^T(q)S_{vF} = f(\epsilon) \quad (7.29)$$

Multiplicado la ecuación 7.29 por Q^T , obtenemos

$$QS_{vp} = Qf(\epsilon) \quad (7.30)$$

desde $Q^T Q_\varphi^T(q) = 0$ y Q es independiente ($Q^T Q = Q$). Localmente en el $n - 1$ imagen dimensional de Q , tenemos que $S_{qp}^* = QS_{qp} \in \mathfrak{R}^n$. Ahora considerando condiciones iniciales pequeñas, si multiplicamos la derivada de S_{qp}^* en la ecuación 7.14 por S_{qp}^{*T} , obtenemos

$$S_{qp}^{*T} \dot{S}_{qp}^* = -\gamma_1 |S_{qp}^*| + S_{qp}^{*T} \dot{S}_{vp} \leq -\gamma_1 |S_{qp}^*| + |S_{qp}^{*T}| |\dot{S}_{vp}| \quad (7.31)$$

Sustituyendo la ecuación 7.27 en la ecuación 7.31 queda

$$S_{qp}^{*T} \dot{S}_{qp}^* \leq -(\gamma_1 - \epsilon_3) |S_{qp}^*| \quad (7.32)$$

donde γ_1 debe ser escogido tal que $\gamma_1 > \epsilon_3$. La ecuación 7.32 es precisamente la condición para la existencia de modo deslizante en $S_q^* p(t) = 0$. El modo deslizante esta establecido en un tiempo $t \leq |S_q^* p(t_0)| / (\gamma_1 - \epsilon_3)$, de acuerdo a la definición de S_{qp} (bajo la ecuación 7.14), $S_{qp}^*(t_0) = 0$, que simplemente significa que $S_{qp}^*(t) = 0$ para cualquier tiempo. Desde $S_{qp}(t) = 0$ tiene un equilibrio único en $(, \Delta \dot{q}) = (0, 0)$ localmente, en la imagen de Q , $S_{qp}^*(t) = 0$ un equilibrio único también a $(, \Delta \dot{q}) = (0, 0)$.

Ahora obtenemos la condición para el modo deslizante para $S_{vF}^* = 0$. Multiplicando la ecuación 7.29 por $J_\varphi(q)$, obtenemos

$$\beta J_\varphi(q) J_\varphi^T(q) S_{vF} = -f(\epsilon) \quad (7.33)$$

Desde el punto de contacto es independiente y consiste en ($rank J_\varphi(q) = 1$), entonces $J_\varphi(q)J_\varphi^T(q)$ no es singular y si multiplicamos por la ecuación 7.33 por $(\varphi(q)J_\varphi^T(q))^{-1}$, obtenemos

$$S_{vF} = -(\beta J_\varphi(q)J_\varphi^T(q))^{-1}f(\epsilon) \equiv \xi \quad (7.34)$$

Ahora, derivamos la ecuación 7.34 y la multiplicamos por S_{vF}^T , queda de la siguiente manera

$$\begin{aligned} S_{qF}^T S_{qF} &= -\gamma_2 |S_{qF}| + S_{qF}^T \dot{S}_{vF} - S_{qF}^T \dot{\xi} \\ &\leq -\gamma_2 |S_{qF}| + |S_{qF}| |\dot{S}_{vF}| + |S_{qF}| |\dot{\xi} \end{aligned} \quad (7.35)$$

Para $f(\epsilon)$ esta limitado por $\dot{\xi}$, seguido de $\dot{\xi} \leq \epsilon_5$, para $\epsilon_5 > 0$. Sustituyendo la ecuación 7.28 en la ecuación 7.35 obtenemos

$$S_{qF}^T \dot{S}_{qF} \leq -(\gamma_2 - \epsilon_4 - \epsilon_5) |S_{qF}| \quad (7.36)$$

donde γ_2 debe ser escogido tal que $\gamma_2 > (\epsilon_4 + \epsilon_5)$. La ecuación 7.36 es precisamente la condición para la existencia de modos deslizantes en $S_{qF}(t) = 0$. Dado que un modos deslizantes está establecido en un tiempo $t \leq |S_{qF}(t_0)| / (\gamma_2 - (\epsilon_4 + \epsilon_5))$ de acuerdo con la ecuación 7.15, $S_{qF}(t_0) = 0$, simplemente significa que $S_{qF}(t) = 0$ para cualquier tiempo, que es $\lambda \rightarrow \lambda_d$ exponencialmente rápido. **QED**

7.5. Resultados en simulación

Los resultados en simulación de la ley de control de fuerza y posición estan reportados a continuación, la herramienta de trabajo que se ocupó fue MATLAB 2008.

En la figura 7.2 apreciamos la trayectoria circular que obtuvimos en la simulación y en la figura 7.3 observamos que los errores de fuerza y de momentum tienden a ∞ conforme transcurre el tiempo.

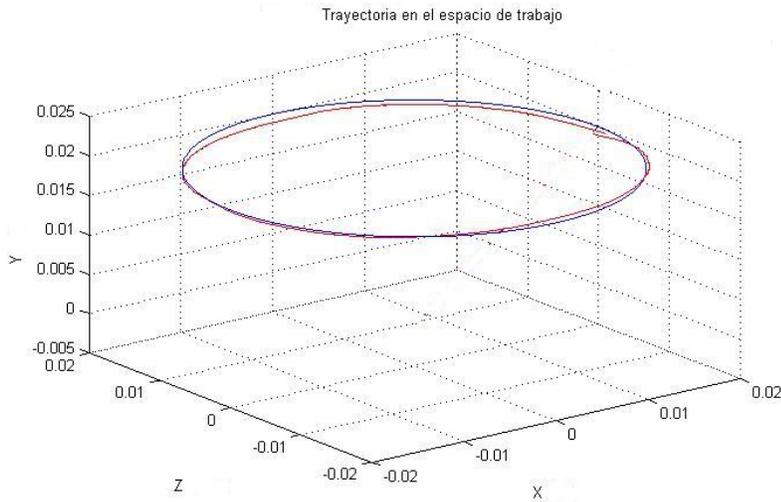


Figura 7.2: Trayectoria del efector final en el espacio de trabajo.

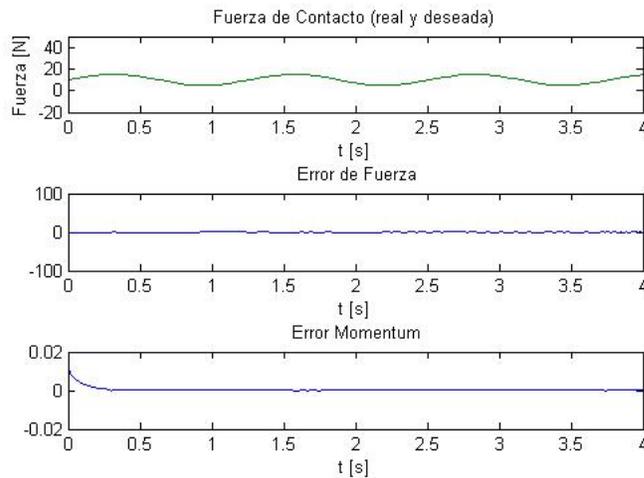


Figura 7.3: Seguimiento de la fuerza de contacto y el momentum.

En la figura (7.4) podemos observar que la ley de control en la primera articulación oscila en cero y en las siguientes articulaciones el control tiende a cero estabilizando todo el sistema. Posteriormente en la figura (7.5) observamos que el error de cada articulación va disminuyendo conforme pasa el tiempo.

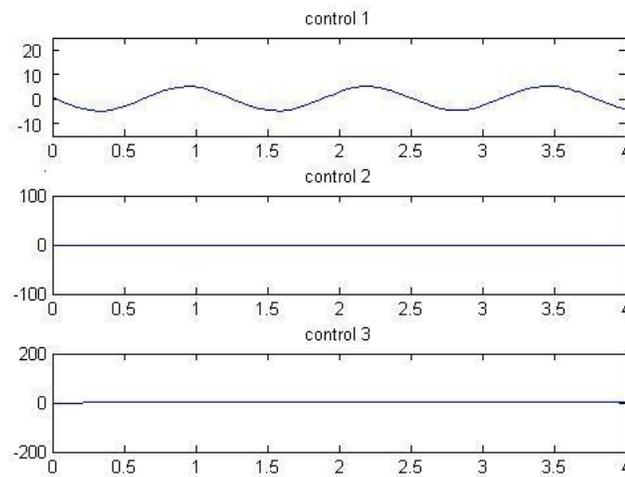


Figura 7.4: Comportamiento del control en simulación.

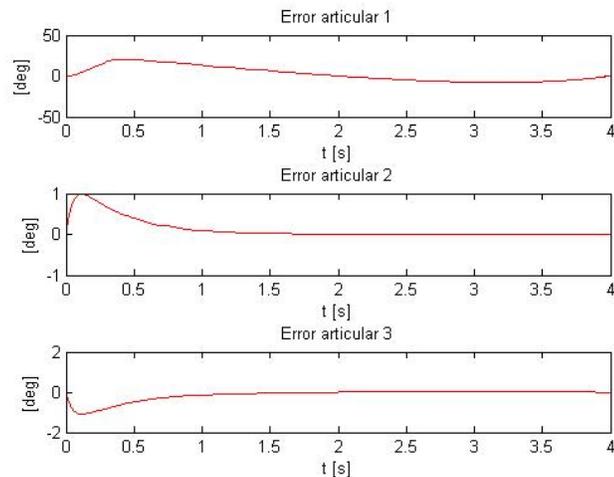


Figura 7.5: Error de articular en simulación.

7.6. Resultados experimentales

En los experimentos con PHANToM 1.0 de las figuras (7.6) y (7.7) la referencia es una constante, el error es máximo mientras no halla contacto con el sensor y va disminuyendo conforme alcanza la referencia. La integral de error va disminuyendo (energía).

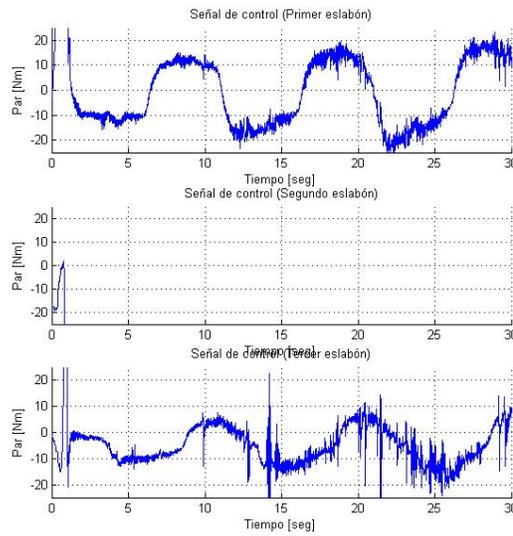


Figura 7.6: Comportamiento del control, $ref=cte..$

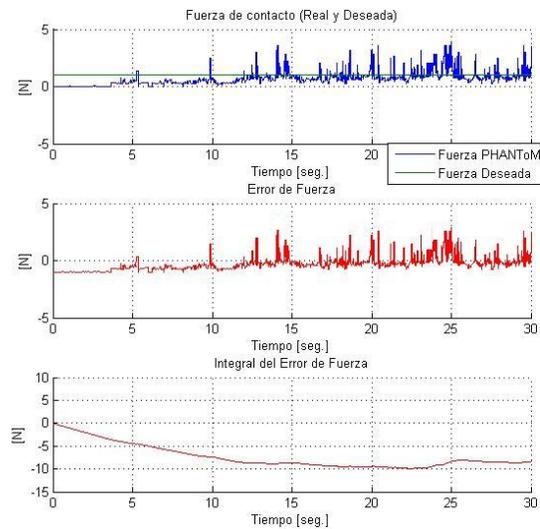


Figura 7.7: Comportamiento de la fuerza, $ref=cte.$

En los experimentos de las figuras (7.8) y (7.9) La referencia es constante, el error es máximo mientras alcanza la refererencia y al final por un momento se mantiene constante.

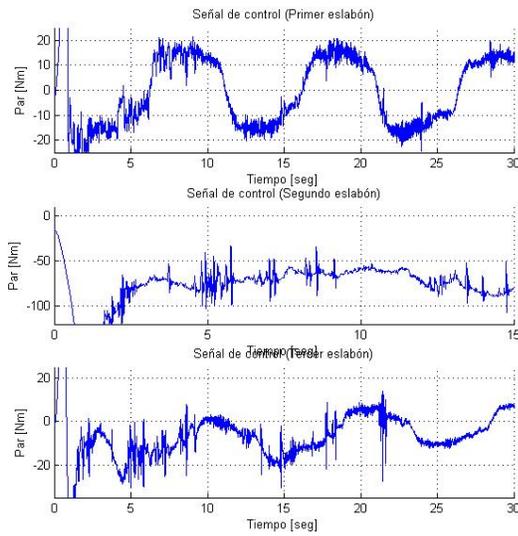


Figura 7.8: Comportamiento del control.

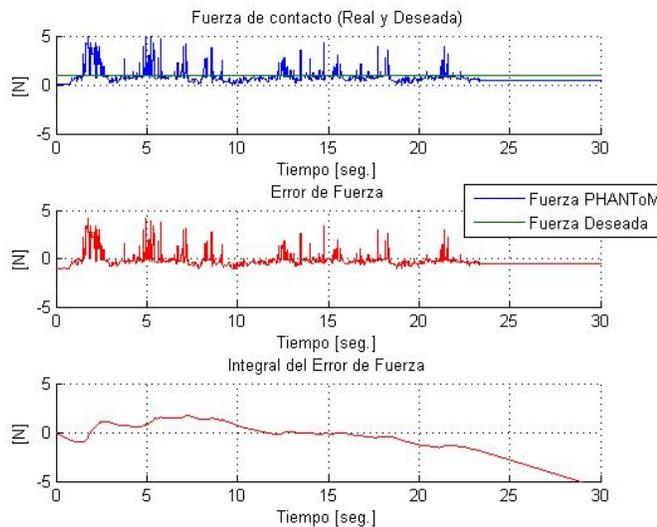


Figura 7.9: Comportamiento de la fuerza.

En los experimentos de las figuras (7.10) y (7.11) la referencia es senoidal, el error de fuerza sigue la trayectoria de la referencia senoidal y la integral de error va disminuyendo (energía).

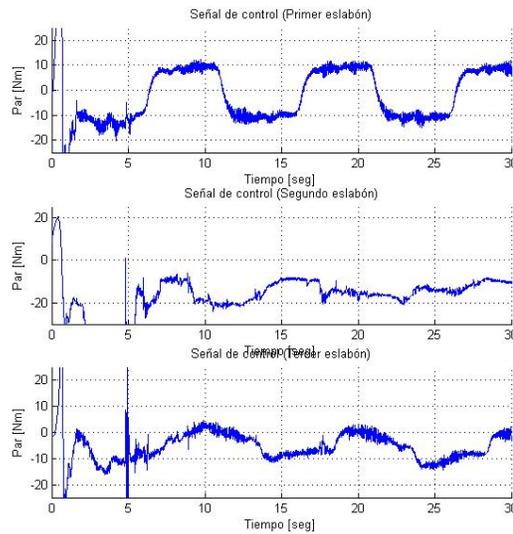


Figura 7.10: Comportamiento del control ref=senoidal.

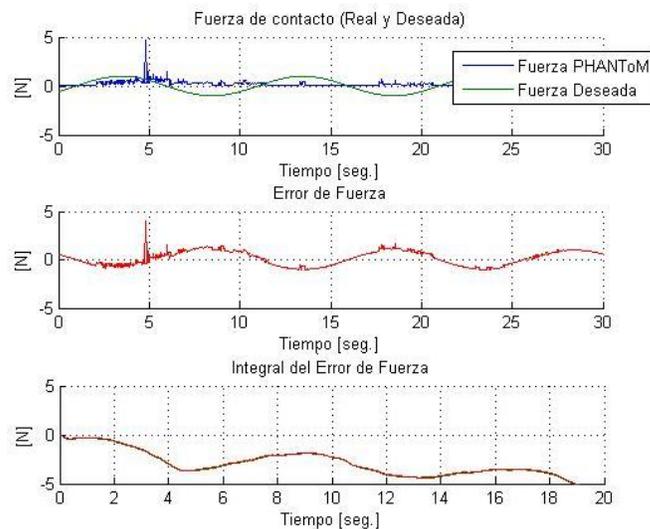


Figura 7.11: Comportamiento de la fuerza ref=senoidal.

7.7. Conclusiones

En este capítulo diseñamos un control por modos deslizantes de segundo orden para robots manipuladores. El concepto nombrado *ortogonalización* tiene papel en

el diseño de *la señal de la referencia nominal* la cual es particionada en dos partes ortogonales en el espacio articular. Este concepto puede ser interpretado como una generalización del control híbrido en el estricto sentido de las señales de retroalimentación de la posición y velocidad. La convergencia asintótica de los errores de la trayectoria y los errores de la fuerza de contacto se demuestra bajo algunas condiciones apropiadas sobre superficies suaves, con tal de que el efector final se mantenga en contacto con de la superficie a lo largo del maniobreo del manipulador.

Capítulo 8

Conclusiones y trabajos a futuro

8.1. Conclusiones

Los resultados obtenidos en esta tesis por medio de simulaciones y experimentos en PHANToM 1.0 como robot manipulador, permitieron resolver satisfactoriamente el problema planteado que fue , por medio de la correcta planificación de movimientos con el uso de regulación basada en seguimiento y un algoritmo planteado en esta tesis. La utilización de dos leyes de control en esta tesis permiten compararlas y es notorio que la ley de control PD+G presenta superioridad ante la ley de control PID, aunque la finalidad de este trabajo no es definir cual es la mejor ley de control, ya que los mejores resultados, sin importar la ley de control usada, son los obtenidos por medio de la correcta planificación, el uso de la regulación basada en seguimiento y el algoritmo planteado.

Como dispositivo háptico juega un papel importante dentro de las interfaz háptica dependiendo de cada aplicación, algunos de los factores que reflejan la eficiencia de un dispositivo son; masas pequeñas, bajo backlash, mínimo juego mecánico, entre otras. La compañía Sensable es una de las compañías pioneras en introducir este tipo de dispositivos al mercado, tal es el caso de PHANToM OMNI, PHANToM 1.0, PHANToM premium 1.5, entre otros. Estos dispositivos presentan diferentes características técnicas, en este trabajo de investigación se aborda al dispositivo háptico PHANToM 1.0 del cual se presenta su arquitectura abierta con la finalidad de evaluar leyes de control, no sin antes haber realizado de manera experimental la validación de sus modelos cinemáticos y dinámicos de PHANToM 1.0.

Por medio del estudio comparativo entre lo que es la técnica de regulación y regulación basada en seguimiento se concluye que para obtener un mejor desempeño del dispositivo en su espacio de trabajo y con la finalidad de realizar en algún determina-

do momento un control híbrido (control de movimiento libre y control de movimiento restringido) es preferible hacer uso de la técnica de convergencia en tiempo finito y conocer el tiempo de convergencia. Las trayectorias cerradas como la circunferencia, la rosa de n pétalos, una estrella, entre otras, permite evaluar la eficiencia de una ley de control. El control PD+G compensa toda la energía potencial del dispositivo háptico de tal manera que presenta un excelente seguimiento de trayectorias, sin embargo existe errores debido a que no se compensan la gran mayoría de las no linealidades que presenta el sistema.

El diseño de controladores basados en teoría de Lyapunov, propiedad de pasividad y modos deslizantes son controles no lineales debido a que se hace una compensación de las no linealidades del sistema. El control deslizante que se presenta en esta tesis garantiza la estabilidad del sistema en lazo cerrado con el operador humano en el lazo el cual perturba de manera consistente al dispositivo háptico. Al realizar un estudio comparativo con el control basado en estas técnicas (PD+G) se comprobó la eficiencia y la robustez que presenta un control basado en modos deslizantes mas aún sin hacer uso directo del modelo del dispositivo háptico y haciendo uso de una función hiperbólica de bajo costo computacional con lo que se puede asegurar que se trabaja cerca al tiempo real.

La planificación de tareas permite realizar un análisis de los movimientos del robot dentro de su espacio de trabajo, para realizar un guiado háptico en la solución de alguna trayectoria que propicie rehabilitación o algún proceso industrial como lo es en el caso de nuestro último capítulo, el cual tratamos de un control de Híbrido que nos dice que podemos controlar la fuerza y posición en movimiento libre y movimiento restringido de la trayectoria que deseamos.

Los artículos publicados y presentados con relación al trabajo de investigación, son los siguientes:

1. Ponce-de-Leon-Sanchez Edgar R., Trejo-Mota Itzel, Gabriel Sepúlveda-Cervantes, Domínguez-Ramírez Omar A., , *Kinematic and Dynamic Modeling of the PHAN-ToM 1.0 Haptic Device: Experimental Validation* CERMA 2010, Section: Force Control, Haptics and Teleoperation, 928-0-7695-1 IEEE, Cuernavaca, Morelos, México, September 2010.
2. Trejo-Mota Itzel, Ponce-de-Leon-Sanchez Edgar R., Domínguez-Ramírez Omar A., , *Robust Passive Computed Torque Control Applied to Haptic Human-Machine Interaction System* CERMA 2010, Section: Force Control, Haptics and Teleoperation, 928-0-4204-1 IEEE, Cuernavaca, Morelos, México, September 2010.
3. Ponce-de-Leon-Sanchez Edgar R., Trejo-Mota Itzel, Carlos Cruz-Valverde, Domínguez-

Ramírez Omar A., , *Local Kinesthetic Guidance based on Variable-Structure Control Techniques* CERMA 2010, Section: Force Control, Haptics and Teleoperation, 928-0-4204-1 IEEE, Cuernavaca, Morelos, México, September 2010.

8.2. Trabajos a futuro

La metodología lograda en este trabajo permitirá crear un sistema que genera una trayectoria de n coordenadas en el espacio de trabajo de manera generalizada, así como cualquier figura por medio de coordenadas y trayectorias cerradas. Sería interesante comprobar la metodología aplicada en este trabajo de tesis en algún proceso industrial de manufactura (soldadura, armado, procesos de precisión, etc.).

Algunos de los trabajos que pueden derivarse a partir de lo reportado en esta tesis, son los siguientes:

- Desarrollo de la visualización virtual deformable basada en el método del Lagrangiano Restringido.
- Desarrollar un sistema de visualización virtual del dispositivo háptico en línea, con movimientos basados en la dinámica Lagrangiana y tareas de contacto.

Glosario

Acción motora. es la habilidad humana para controlar fuerzas de contacto durante la manipulación y exploración manual.

Cinemática de un robot. estudia el movimiento del mismo con respecto a un sistema de referencia. Así, la cinemática se interesa por la descripción analítica del movimiento espacial del robot como una función del tiempo, y en particular por las relaciones entre la posición y la orientación del extremo final del robot con los valores que toman sus coordenadas articulares [111].

Detección de colisión. involucra la detección automática de una interacción inminente de dos objetos y de la locación donde esta interacción toma lugar. En el momento del impacto, la simulación produce una respuesta de colisión. Corresponde al primer paso del modelado físico de un mundo virtual [83].

Dispositivo háptico. conjunto de interfaces tecnológicos que interaccionan con el ser humano mediante el sentido del tacto. Se trata de una tecnología emergente que desde los 90 que está evolucionando prometedoramente. Los dispositivos hápticos de realimentación de fuerzas, permiten que los usuarios toquen y manipulen objetos virtuales, creando el efecto de textura, colisión, elasticidad; cuando se trabaja sobre los modelos 3D [111].

Efecto Coriolis. es la diferencia entre la aceleración medida del campo de referencia y la aceleración relativa medida con el marco del efector final [102].

Fricción dinámica estática. es la que existe cuando el objeto ya se encuentra en movimiento (en este caso hay movimiento relativo entre las dos superficies).

Fricción estática. es la que impide que un cuerpo comience a moverse (la velocidad relativa entre las dos superficies es cero).

Fuerza de fricción. es la fuerza que se opone a que un cuerpo se desplace al estar en contacto con otro. La fricción se origina en el hecho de que las superficies no suelen ser perfectamente lisas, por lo que las irregularidades que existen en las superficies impedirán que las superficies se desplacen libremente entre sí.

Fuerzas Centrípetas. son aquellas fuerzas que restringen a un cuerpo a rotar alrededor de un punto, son dirigidos hacia el centro del movimiento circular uniforme y son proporcionales al cuadrado de la velocidad articular.

Fuerzas de Coriolis. surgen a partir de las fuerzas vortiginosas derivadas de dos eslabones en rotación, estas fuerzas son similares a las fuerzas causadas en un vórtice, y son proporcionales al producto de las velocidades articulares de estos eslabones.

Fuerzas de inercia. es la propiedad de los materiales a oponerse al cambio en el movimiento, y esta cuantificado como la masa del material. Las fuerzas inerciales son proporcionales a la aceleración articular de acuerdo a la segunda ley de Newton.

Impedancia mecánica. es la relación entre la fuerza aplicada y el desplazamiento de la mano o dedo. La impedancia mecánica juega un papel en la sensibilidad y estabilidad de una interfaz hombre-máquina [46].

Lagrangiano. las ecuaciones de movimiento pueden ser derivadas de manera sistemática independientemente del marco de coordenadas de referencia. El lagrangiano de un sistema mecánico puede ser definido como una función generalizada de coordenadas: la diferencia de energías cinéticas y potenciales [111].

Manipulabilidad cinemática. permite la definición de los índices para la evaluación del comportamiento del robot. Tales índices pueden ser útiles para el diseño mecánico del manipulador y para determinar su apropiada postura para ejecutar una tarea dada en su actual configuración [111].

Manipulabilidad dinámica. con base a las propiedades dinámicas del robot, el índice de manipulabilidad se obtiene por la propiedad definida positiva a la matriz de inercia, se puede distinguir cuando el efector final del robot se acerca a la zona singular cuando el índice de manipulabilidad tiende a ser cero o un valor máximo [111].

Percepción háptica. ó percepción táctil, es el resultado de una cadena de eventos que inician con un estímulo aplicado al cuerpo, como calor, presión, o vibración. Dependiendo del tipo, magnitud y lugar de la piel, este estímulo activa una respuesta de receptores especializados (termorreceptores, mecanorreceptores y nociceptores) [113].

Planeación de trayectoria. es generar las referencias de entrada del sistema de control de movimiento, el cual asegura que el manipulador ejecuta las trayectorias de planeación. Planeando consiste en generar un tiempo de secuencia

de los valores obtenidos por una función polinomial interpolando la trayectoria deseada [111].

Precepción humana. es la habilidad humana para percibir las propiedades de los objetos como forma, textura y suavidad, y es medida con equipo computacional controlado y métodos psicofísicos [8, 124].

Respuesta de colisión. corresponde a la consecuencia de la detección de colisión y esta puede ser un salto, deformación, caída o explosión de un objeto en el ambiente de visualización virtual. La respuesta de colisión también produce fuerzas, vibraciones u otras formas de retroalimentación háptica [84].

Retroalimentación de fuerza. sensación de peso o resistencia en un mundo virtual. La retroalimentación de fuerza requiere del uso de un dispositivo que produzca una fuerza sobre un cuerpo equivalente (o escalado) al de un objeto real. Esto permite a una persona en el ciberespacio sentir el peso de un objeto virtual, o la resistencia al movimiento que ellos crean [20].

Retroalimentación háptica. del griego haptesthai, significa tocar, es sinónimo de retroalimentación táctil [131]. Algunos autores extienden su significado al de retroalimentación de fuerza [14].

Retroalimentación kinestética. sinónimo de propiocepción, es referente a la kinestesia, corresponde a un sentido mediado por órganos extremos localizados en músculos, tendones, y articulaciones, y es simulado por movimientos y tensión corporal [131].

Retroalimentación táctil. sensación aplicada a la piel, típicamente en respuesta al contacto u otras acciones en un mundo virtual. La retroalimentación táctil puede ser utilizada para generar un símbolo, un código Braille o simplemente una sensación que indica alguna condición [14].

Sensor táctil. son utilizados para medir las variables de la simulación háptica, como fuerzas locales o distribuidas, presión y deformación [14].

Tacto. sensación evocada cuando la piel es sujeta a estímulos mecánicos, térmicos, químicos, o eléctricos [?].

Tribología. es la ciencia que estudia la fricción, el desgaste y la lubricación que tiene lugar durante el contacto entre superficies sólidas en movimiento.

Apéndice A

Caracterización de sensor de fuerza

A.1. Introducción

Para el desarrollo del modelo matemático del sensor de fuerza se realizaron tres pasos, los cuales son mencionados a continuación:

- Recolectar datos técnicos del sensor de fuerza resistivo para la configuración del sensor.
- Caracterización del sensor de fuerza.
- Obtener el modelo matemático del sensor por el método de regresión polinomial.

Masa	Fuerza	Voltaje	Resistencia
0 g	0 N	3.735 V	1M Ω
9 g	0.088N	3.2 V	490 K Ω
17 g	0.1667 N	2.5 V	130 K Ω
37 g	0.3629 N	1.6 V	64.7 K Ω
48 g	0.4708 N	1.25 V	31.5 K Ω
67 g	0.6572 N	1.18 V	20.2 K Ω
100 g	0.981 N	1.12 V	10.92 K Ω
395 g	3.8749 N	1.079 V	2.3 K Ω
449 g	4.4096 N	1.073 V	1.7 K Ω
1.102 kg	10.81 N	1.07 V	1.2 K Ω

Tabla A.1: Sensor de fuerza y masas para experimentos.

Realizando una descripción de los resultados obtenidos mediante 13 experimentos con el sensor de fuerza (ver Tabla 1), en dicha tabla observamos datos de acuerdo que corresponde a un comportamiento es lineal, obtenemos Fuerza N Voltaje V y Resistencia Ω , variables que permiten realizar una evaluación numérica en relación con el desempeño del operador humano en cada experimento.

El cual fue comprobado experimentalmente con la DAC6009 de National Instrument y la herramienta de trabajo MATLAB R2008b por medio del siguiente código.

```
function y = compvolt(w)

Voltaje = w(1);

%----- Sección 1 -----

if ((Voltaje >= 2.5) && (Voltaje <=3.735))

V = Voltaje;

fFuerza3=0.0035*V.^3-0.0758*V.^2+0.2343*V;

figure (1) plot(V,fFuerza3,'+b'); grid on title('Curva de Fuerza
vs Voltaje') xlabel('Voltaje (volts)') ylabel('Fuerza (Newtons)')
hold on

else if ((Voltaje > 1.6) && (Voltaje < 2.5))

%----- Sección 2 -----

V = Voltaje

fFuerza3=-0.218*V+0.7117;

figure (2) plot(V,fFuerza3,'+r'); grid on title('Curva de Fuerza
vs Voltaje') xlabel('Voltaje (volts)') ylabel('Fuerza (Newtons)')
hold on

else if ((Voltaje >= 1.18) && (Voltaje <= 1.6))

%----- Sección 3 -----
```

V = Voltaje

```
fFuerza3=3.0365*V.^3-6.6313*V.^2+4.9016;
```

```
figure (3) plot(V,fFuerza3,'+b'); grid on title('Curva de Fuerza
vs Voltaje') xlabel('Voltaje (volts)') ylabel('Fuerza (Newtons)')
hold on
```

```
else if ((Voltaje > 1.12) && (Voltaje < 1.18))
```

```
%----- Sección 4 -----
```

V = Voltaje

```
fFuerza3=-5.3966*V+7.0251;
```

```
figure (4) plot(V,fFuerza3,'+r'); grid on title('Curva de Fuerza
vs Voltaje') xlabel('Voltaje (volts)') ylabel('Fuerza (Newtons)')
hold on
```

```
else if ((Voltaje >= 1.063) && (Voltaje <= 1.12))
```

```
%----- Sección 5 -----
```

V = Voltaje

```
fFuerza3=60.2384*V.^3-132.3090*V.^2+82.3189;
```

```
figure (5)
```

```
plot(V,fFuerza3,'+b');%,V3,fFuerza2,':k',V3,fFuerza3,':g');%,V3,fFuerza34,':y')
title('Curva de Fuerza vs Voltaje') xlabel('Voltaje (volts)')
ylabel('Fuerza (Newtons)') grid on
```

```
end;
```

```
y = fFuerza3;
```

Se hace uso de una fuente de voltaje, un multímetro, un amplificador y el sensor como se muestra en la Figura 6.9, con la finalidad de visualizar el desempeño que genera el operador humano con el sensor.

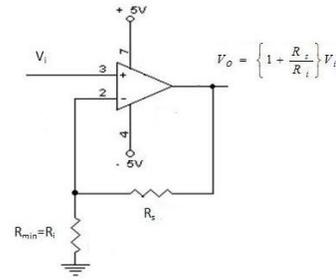


Figura A.1: Dispositivos y diagrama del amplificador no inversor.

Apéndice B

Disipatividad y pasividad

Disipatividad es una propiedad fundamental de sistemas físicos estrechamente relacionados con un fenómeno bastante intuitivo de pérdida o disipación de energía. Este fué introducido por Willeams como una generalización de lo bien conocido propiedad de pasividad. Ejemplos típicos de sistemas disipativos son los circuitos eléctricos, en donde la parte de energía eléctrica y magnética es disipada como calor en los resistores. Una papel similar es visto en sistemas mecánicos en la parte de la fricción. Para definir matemáticamente la propiedad de disipatividad, debemos introducir dos funciones: la velocidad de suministro, que es la velocidad con la cual la energía fluye dentro del sistema; y la función de almacenamiento, la cual mide la cantidad de energía que es almacenada dentro del sistema. Estas funciones son relacionadas vía la desigualdad de disipación, esto expresa el hecho que un sistema disipativo no puede almacenar más energía de la que se suministra al sistema.

En esta formulación general la notación de disipatividad no requiere de la definición de entradas y salidas del sistema dinámico. Para el propósito de este trabajo de tesis se realiza esta distinción, y se considera $u \in \mathbb{R}^n$ y $y \in \mathbb{R}^m$ respectivamente. Además se realiza restricciones para clases particulares de sistemas disipativos, nombrados sistemas pasivos, para lo cual la función de velocidad de suministro es simplemente $u^T y$.

B.1. Espacios de funciones

Una clase particular de espacios vectoriales son los denominados espacios \mathcal{L}_p^n . Los elementos o vectores de los espacios \mathcal{L}_p^n son funciones con propiedades particulares.

Los espacios lineales denominados \mathcal{L}_2^n y \mathcal{L}_∞^n , que se definirán posteriormente, son particularmente empleados en el análisis de sistemas dinámicos interconectados en

la metodología denominada: enfoque entrada-salida. Esta metodología involucra la noción de operadores, que caracterizan el comportamiento de las diversas partes del sistema dinámico interconectado.

A continuación se presentan una serie de conceptos y definiciones sobre espacios de funciones.

Una función $f : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^m$ es una función continua si:

$$\lim_{x \rightarrow x_0} f(x) = f(x_0) \quad \forall x_0 \in \mathbb{R}^n$$

Una condición necesaria para que una función sea continua es que esté definida en todo $x \in \mathbb{R}^n$. También se deduce que no es necesario que una función continua tenga derivada en todo su dominio de definición. Tal es el caso, por ejemplo, de la función continua $f(x) = |x|$, cuya derivada con respecto a x en el punto $x = 0 \in \mathbb{R}$ no está definida. Sin embargo, si una función tiene derivada en todo punto, entonces la función es continua.

El espacio \mathcal{L}_2^n consiste en el conjunto de todas las funciones continuas $f : \mathbb{R}_+ \rightarrow \mathbb{R}^n$ tales que:

$$\int_0^\infty f(t)^T f(t) dt = \int_0^\infty \|f(t)\|^2 dt < \infty$$

Dicho de otro modo, una función f pertenece al espacio \mathcal{L}_2^n ($f \in \mathcal{L}_2^n$) si la integral del cuadrado de su norma euclidiana está acotada superiormente.

El espacio \mathcal{L}_∞^n consiste en el conjunto de todas las funciones continuas $f : \mathbb{R}_+ \rightarrow \mathbb{R}^n$ tales que sus normas euclidianas sean acotadas, es decir,

$$\sup \|f(t)\| < \infty \quad \forall t \geq 0$$

B.2. Pasividad y estabilidad de ganancia finita

El concepto de pasividad y estabilidad de entrada-salida son desarrollados de manera independiente de la definición del sistema espacio-estado, para simplificar se realizan restricciones del sistema, de tal manera que se considere:

$$\Sigma : \begin{cases} \dot{x} = f(x, u), & x(0) = x_0 \in \mathbb{R}^n \\ y = h(x, u) \end{cases} \quad (\text{B.1})$$

con el estado $x \in \mathbb{R}^n$, entrada $u \in \mathbb{R}^m$ y la salida $y \in \mathbb{R}^m$. En B.1 se define un operador dinámico causal $\Sigma : u \mapsto y$ el Σ es un sistema pasivo si este es disipativo con una velocidad de suministro de energía $w(u, y) = u^T y$. Esta es una entrada estrictamente pasiva (ISP) si esta es disipada con una velocidad de suministro

$w(u, y) = u^T y - \delta_i \|u\|^2$ donde $\delta_i > 0$. Finalmente Σ es una salida estrictamente pasiva (OSP) si este es disipativo con un suministro de energía $w(u, y) = u^T y - \delta_0 \|y\|^2$ donde $\delta_0 > 0$.

B.3. Pasividad en sistemas Euler-Lagrange

Como ya se abordó en el trabajo de esta tesis, un sistema dinámico de n grados de libertad con coordenadas generalizadas $q \in \mathbb{R}^n$ y fuerzas externas $\Omega \in \mathbb{R}^n$, está descrito por ecuaciones EL

$$\frac{d}{dt} \left[\frac{\partial \mathcal{L}(q, \dot{q})}{\partial \dot{q}_i} \right] - \frac{\partial \mathcal{L}(q, \dot{q})}{\partial q_i} = \Omega \quad (\text{B.2})$$

Donde:

$$\mathcal{L} = \sum_{i=1}^n (\mathcal{K}_i(q, \dot{q}) - \mathcal{U}_i(q)) \quad (\text{B.3})$$

Donde $\mathcal{U}(q)$ es la función de la energía potencial, la cual se asume que está acotada, y que existe una $c \in \mathbb{R}$ tal que $\mathcal{U}(q) \geq c$ para todo $q \in \mathbb{R}^n$.

En esta apéndice se consideran tres tipos de fuerzas externas: la acción del control, disipación y la interacción del sistema con el ambiente. Se asume el control como $\mathcal{M}\tau \in \mathbb{R}^n$, donde $\mathcal{M} \in \mathbb{R}^{n \times n_\tau}$ describe una matriz constante y $\tau \in \mathbb{R}^{n_\tau}$ es el vector de control. Las fuerzas disipativas son de la forma $-\frac{\partial \mathcal{F}}{\partial \dot{q}}(\dot{q})$, donde $\mathcal{F}(\dot{q})$ corresponde a la función de disipación de Rayleigh, la cual por definición satisface

$$\dot{q}^T \frac{\partial \mathcal{F}}{\partial \dot{q}}(\dot{q}) \geq 0 \quad (\text{B.4})$$

En consecuencia las fuerzas externas son:

$$\Omega = -\frac{\partial \mathcal{F}}{\partial \dot{q}}(\dot{q}) + \Omega_c + \mathcal{M}\tau \quad (\text{B.5})$$

Donde Ω_c corresponde a los modelos de las señales externas debido a los efectos de perturbación. De tal manera que las ecuaciones de movimiento que describen un sistema EL son:

$$\frac{d}{dt} \left[\frac{\partial \mathcal{L}(q, \dot{q})}{\partial \dot{q}} \right] - \frac{\partial \mathcal{L}(q, \dot{q})}{\partial q} + \frac{\partial \mathcal{F}}{\partial \dot{q}}(\dot{q}) = \mathcal{M}\tau + \Omega_c \quad (\text{B.6})$$

Los sistemas pasivos son una clase de sistemas dinámicos en los cuales la energía intercambiada con el medio ambiente juega un papel importante. De tal manera que

un sistema pasivo no puede almacenar mas energía que la que le es aplicada de manera externa, con la diferencia siendo la disipación de la energía.

Proposición 1 El sistema EL (ver ec. B.6) con $\mathfrak{Q}_c \equiv 0$ define un operador pasivo $\Sigma : \tau \rightarrow \mathcal{M}^T \dot{q}$ teniendo como una función de almacenamiento la suma total de las energías del sistema $\mathcal{H}(q, \dot{q})$, que se describe como:

$$\langle \tau | \mathcal{M}^T \dot{q} \rangle_T \geq \mathcal{H}[q(T), \dot{q}(T)] - \mathcal{H}[q(0), \dot{q}(0)] \quad (\text{B.7})$$

Para todo $T \geq 0$ y para todo $\tau \in \mathcal{L}_{2e}$. Además, esta propiedad hace que el sistema sea estrictamente pasivo sí el sistema es completamente amortiguado. En este caso

$$\langle \tau | \mathcal{M}^T \dot{q} \rangle_T \geq \alpha \| \mathcal{M}^T \dot{q} \|_{2T}^2 + \mathcal{H}[q(T), \dot{q}(T)] - \mathcal{H}[q(0), \dot{q}(0)] \quad (\text{B.8})$$

Para alguna $\alpha > 0$ y todo $\tau \in \mathcal{L}_{2e}$.

Prueba. La propiedad puede ser establecida tomando la derivada con respecto al tiempo del Lagrangiano $\mathcal{L}(q, \dot{q})$, donde simplificando la notación se obtiene,

$$\frac{d\mathcal{L}}{dt} = \left(\frac{\partial \mathcal{L}}{\partial q} \right)^T \frac{dq}{dt} + \left(\frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \dot{q}} \right)^T \frac{d\dot{q}}{dt} \quad (\text{B.9})$$

Y usando las ecuaciones de EL B.2,

$$\frac{\partial \mathcal{L}}{\partial q} = \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \dot{q}} \right) - \mathfrak{Q}$$

Así que B.9 puede ser descrita como,

$$\frac{d\mathcal{L}}{dt} = \left(\frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \dot{q}} \right)^T \frac{d\dot{q}}{dt} + \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \dot{q}} \right)^T \dot{q} - \dot{q}^T \mathfrak{Q}$$

Entonces, utilizando los términos de arriba y utilizando B.5, se obtiene,

$$\frac{d}{dt} \left[\left(\frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \dot{q}} \right)^T \dot{q} - \mathcal{L} \right] = \dot{q}^T \left(\mathcal{M}\tau - \frac{\partial \mathcal{F}}{\partial \dot{q}} \right) \quad (\text{B.10})$$

Ahora, verificando que los términos del paréntesis del lado izquierdo coincide con la energía total del sistema, el cual se denota como $\mathcal{H}(q, \dot{q})$, y esta definido como,

$$\left(\frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \dot{q}} \right)^T \dot{q} - \mathcal{L} = \mathcal{K}(q, \dot{q}) + \mathcal{U}(q) \triangleq \mathcal{H}(q, \dot{q})$$

Integrando B.10 por ambos lados de 0 a T se establece una ecuación de balance de energías descrito como,

$$\underbrace{\mathcal{H}[q(T), \dot{q}(T)] - \mathcal{H}[q(0), \dot{q}(0)]}_{\text{energía almacenada}} + \underbrace{\int_0^T \dot{q}^T \frac{\partial \mathcal{F}}{\partial \dot{q}}(\dot{q}) ds}_{\text{energía disipada}} = \underbrace{\int_0^T \dot{q}^T \mathcal{M} \tau ds}_{\text{energía administrada}}$$

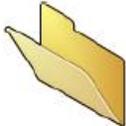
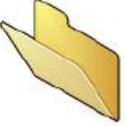
Ahora, observe que por definición $\mathcal{U}(q)$ es acotada, y por definición c , y $\mathcal{K}(q, \dot{q}) \geq 0$, de tal manera que $\mathcal{H}(q, \dot{q}) \geq c$. Finalmente, la función de disipación de Rayleigh satisface B.4 en B.8.

La ecuación de balance de energía revela interesantes propiedades de los sistemas EL. Primero, si $\tau = 0$ la energía no se está incrementando, por esta razón el equilibrio trivial del sistema sin control es estable en el sentido de Lyapunov. Segundo, la estabilidad también es preservada si $\mathcal{M}\dot{q}$ es igual con cero.

Apéndice C

Contenido del CD

En el CD se incorporan todos los programas, gráficas y el documento de la tesis.

	 Algoritmos		{ En esta carpeta se encuentran todos los algoritmos que fueron elaborados en visual c++, también se encuentran algoritmos elaborados en Matlab para obtener las gráficas reportadas en la tesis.
	 Ápéndices		{ Los apéndices del A al C que se encuentran al final de la tesis se encuentran en esta carpeta.
	 Gráficas		{ En esta carpeta encontramos todas las gráficas de la tesis como son: la respuesta de cada control, las propiedades dinámicas, las trayectorias para evaluar las técnicas de planificación de movimiento.
	 Tesis		{ Por último se encuentran los archivos correspondientes a cada capítulo de la tesis.

Bibliografía

- [1] A. Grodecki, *Multivariable Decentralized Robot Controller*, 0-7803-1772-6/94/, 1994 IEEE.
- [2] Adachi, Y., *Development of a Haptic Interface for Virtual Reality*, 2nd Japan-France Congress on Mechatronics, Takamatsu, Japan, 4 pp., November, 1994.
- [3] Anderson, R., and B. Davies, *Using Virtual Objects to Aid Underground Storage Tank Teleoperation*, Proceedings of 1994 IEEE International Conference on Robotics and Automation, IEEE, New York, pp. 1421-1426, May 1994.
- [4] Vicente Parra-Vega, Saguru Arimoto, Yun-Hui Liu, Gerhard Hirzinger and Prasad Akella, *Dynamics Sliding PID Control for Tracking of Robot Manipulators: Theory and Experiments*, IEEE TRANSACTIONS ON ROBOTICS AND AUTOMATION, VOL. 19, December 2003.
- [5] Akella, P. Parra-Vega, V. Arimoto, S. Tanie, *Discontinuous model-based adaptive control for robots executing free and constrained tasks*, IEEE International Conference on Robotics and Automation Applications, Hong Kong, 1994, pp. 110-117.
- [6] Baratoff, G., *Tracking Devices*, Encyclopedia of Virtual Environments, [http : //www.cs.umd.edu/projects/hcil/eve.restore/eve - articles/I.D.1.b.TrackingDevices.html](http://www.cs.umd.edu/projects/hcil/eve.restore/eve-articles/I.D.1.b.TrackingDevices.html).
- [7] Bostrom, M., S. Singh, and C. Wiley, *Design of an Interactive Lumbar Simulator with Tactile Feedback*, Proceedings of IEEE Virtual Reality Annual International Symposium (VRAIS), IEEE, New York, pp.280-286, September 1993.
- [8] Beauregard, G. L., Srinivasan, M. A. and Durlach, N.I., *Manual Resolution of Viscosity and Mass*, Proceedings of the ASME Dynamics Systems and Control Division, DSC-Vol.57.2, pp. 657-662, ASME, 1995.

-
- [9] Benjamin A.C. Forsyth and Karon E. MacLean, *Predictive Haptic Guidance: Intelligent User Assistance for the Control of Dynamic Tasks*, IEEE TRANSACTIONS ON VISUALIZATION AND COMPUTER GRAPHICS, VOL. 12, NO. 1, FEBRUARY 2006.
- [10] Bergamasco, M., B. Alotta, L. Bosio, L. Ferreti, G. Parrini, G. Prisco, F. Salsedo and Sartini, *An Arm Exoskeleton System for Teleoperation and Virtual Environments Applications*, Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation, San Diego, CA, pp.1449-1454, May 1994.
- [11] Brooks, F.P., *The Computer Scientist as Toolsmith-Studies in Interactive Computer Graphics*, Proceedings of IFIP 1977, pp. 625-634, 1977.
- [12] Brooks, F.Jr. M. Ouch-Young, J. Batter and A. Jerame, *Project GROPE: Haptic Display for Scientific Visualization*, Computer Graphics, Vol 24, No 4, pp. 177-185, 1990.
- [13] Brown, P., D. Jones, S. Singh and J. Rosen, *The Exoskeleton Glove for Control of Paralyzed Hands*, Proceedings of 1993 IEEE International Conference on Robotics and Automation, Atlanta, GA, pp. 642-647, May 1993.
- [14] Burdea G. C., *Force and Touch Feedback for Virtual Reality*, John Wiley and Sons, Inc., Electrical and Computer Engineering Department, The State University of New Jersey, 1996.
- [15] Burdea G. C, J. Zhvang, E. Roskos, D. Silver and N. Langrano, *A Portable Dextrous Master with Force*, Precense- Teleoperator and Virtual Environments, Vo 1, No1, MIT Press, Cambridge, MA, pp. 18-27, 1992.
- [16] Burdea G. C. and Coiffet, P., *Virtual Reality Technology*, John Wiley and Sons, Inc., New York, 1994.
- [17] Cardona Martín, Miguel et al. (2001), *Discapacidad motórica*, en *Adaptamos la escuela. Orientaciones ante la discapacidad motórica*, Málaga, Aljibe (Monográficos Aljibe) pp. 15-18.
- [18] Caldwell, D., N. Tsagarakis and A. Wardle, *Mechano-Thermo and Proprioceptor Feedback for Integrated Haptic Feedback*, IEEE International Conference on Robotics and Automation, Albuquerque, New Mexico, Robotic and Automation Society, pp. 2491-2496, April 1997.
- [19] Cholewiak, R. and A. Collins, *Sensory and Physiological Bases of Touch*, in M. Heller and W. Schiff Eds., *The Psychology of Touch*, Lawrence Erlbaum Associates, Mahwah, NJ, pp. 23-60, 1991.

- [20] CyberEdge Journal, *The Virtual Lexicon*, Special Edition, No. 1, Sausalito, CA, pp. 4, 1993.
- [21] David Feygin, Madeleine Keehner and Frank Tendick, *Haptic Guidance: Experimental Evaluation of a Haptic Training Method for a Perceptual Motor Skill*, Haptic Interfaces For Virtual Environment and Teleoperator Systems, IEEE 2002.
- [22] Dandekar, K. and Mandayam A. Srinivasan, *A 3-dimensional finite element model of the monkey fingertip for predicting responses of slowly adapting mechanoreceptors*, Proceedings of the 1995 Bioengineering Conference, Eds: R.M. Hochmuth, N.A. Langrana, and M.S. Hefzy, BED-Vol.29, pp. 257-258, 1995.
- [23] Díaz-Montiel, Domínguez-Ramírez, *Convergencia en tiempo finito de robots manipuladores con tareas de seguimiento*, CITIS, México, 2007.
- [24] Dragoljub Surdilovic and Jelena Radojicic, *Robust Control of Interaction with Haptic Interfaces*, IEEE International Conference on Robotics and Automation Roma, Italy, 2007.
- [25] Domínguez-Ramírez, Vicente-Parra, *Diseño e integración de una interfaz háptica activa realista*, CINVESTAV México, 2004.
- [26] Domínguez-Ramírez, V. López-Morales, R. Samperio-Llano, *Resultados Preliminares Sobre Interacción Háptica en Laberintos Virtuales* Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, 2005.
- [27] Driels, M. and Bereri, P., *A Finite Memory Model for Haptic Teleoperation*, IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, pp. 690-698, 1994.
- [28] Ellis, R. E., O. M. Ismaeil, M. G. Lipsett, *Design and Evaluation of a High-Performance Haptic Interface*, Robotica, vol. 4, pp. 321-327, 1996.
- [29] EXOS Co, *Personal Communication*, Woburn, MA, pril 1995.
- [30] E. Hagmann¹, P. Rouiller¹, P. Helmer¹, S. Grange¹ and C. Baur¹, *A Haptic Guidance Tool for CT-Directed Percutaneous Interventions*, Proceedings of the 26th Annual International Conference of the IEEE EMBS San Francisco, CA, USA † September 1-5, 2004.
- [31] David Feygin, Madeleine Keehner and Frank Tendick, *Haptic Guidance: Experimental Evaluation of a Haptic Training Method for a Perceptual Motor Skill*, Proceedings of the 10th Symp. On Haptic Interfaces For Virtual Envir. Teleoperator Sysys. (HAPTICS.02), 2002 IEEE.

- [32] Francesca Morganti, Andrea Gaggioli, Lorenzo Strambi, Maria Luisa Rusconi, and Giuseppe Riva, *Computer-enhanced route and survey spatial knowledge assessment in clinical neuropsychology*, 2006 IEEE.
- [33] F.L. Lewis, C.T. Abdallah and D.M. Dawson, *Control of robot manipulators*, Macmillan Publishing Company, New York, 1993.
- [34] Gabriel Sepulveda-Cervantes, Vicente Parra-Vega y Omar Dominguez-Ramirez, *Haptic Cues for Effective Learning in 3D Maze Navigation*, HAVE 2008 IEEE International Workshop on Haptic Audio Visual Environments and their Applications Ottawa Canada, 18-19 October 2008.
- [35] Graham Grindlay, *Haptic Guidance Benefits Musical Motor Learning*, Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environments and Teleoperator Systems 2008 13-14 March, Reno, Nevada, USA, 2008 IEEE.
- [36] Gigante, M. A., *"Virtual Reality Systems"*, London, Academic Press, 1993.
- [37] G. Sepulveda-Cervantes, V. Parra-Vega and O. A. Dominguez-Ramirez, *Dynamic Coupling Haptic Suturing Based on Orthogonal Decomposition*, Third Joint Eurohaptics Conference and Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems, Salt Lake City, UT, USA, March 18-20, 2009.
- [38] Goertz, R. and R. Thomson, *Electronically Controlled Manipulator*, Nucleonics, pp 46-47, 1954.
- [39] J. C. Goswami and A. K. Chan, *Fundamentals of wavelets: Theory, Algorithms and applications.*, Wiley-Interscience: John Wiley and sons, Inc, 1999.
- [40] Gómez, D., G. Burdea and N. Langrana, *Integration of the Rutgers Master II in a Virtual Reality Simulation*, IEEE Proceedings of the Virtual Reality Annual International Symposium in Research, Triangle Park, NC, IEEE Computer Society Press, pp. 198-202, Washington, USA, March 11-15, 1995.
- [41] Gulati, R.J. and Mandayam A. Srinivasan, *Human Fingerpad under Indentation I: Static and Dynamic Force Response*, Proceedings of the 1995 Bioengineering Conference, Eds: R.M. Hochmuth, N.A. Langrana, and M.S. Hefzy, BED-Vol.29, pp. 261-262, 1995.
- [42] Hannaford, B., and S. Venema, *Kinesthetic Displays for Remote and Virtual Environments*, W. Barfield and T. Furness, Eds., Virtual Environments and Advance Interface Design, Oxford University Press, New York, pp. 415-436, 1995.

-
- [43] Hannaford, B., and Rainer Leuschke, *Fast Rendering for a Multifinger Haptic Display*, EuroHaptics Conference and Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems, IEEE, 2007.
- [44] Hashimoto, H., M. Boss, Y. Kuni and F. Harashima, *Intelligent Cooperative Manipulation System Using Dynamic Force Simulator*, Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation, IEEE, New York, pp. 2598-2603, May, 1994.
- [45] Hiroyuki Fujioka and Hiroyuki Kano, *Design of Cursive Characters Using Robotic Arm Dynamics as Generation Mechanism*, Proceedings of the 2006 IEEE International Conference on Robotics and Automation Orlando, Florida - May 2006.
- [46] Hogan, N., *Controlling Impedance at the Man/Machine Interface*, Proceedings 1989, International Conference on Robotics and Automation, IEEE, New York, pp. 1626-1631, 1989.
- [47] Hou, I. A. and Srinivasan, M. A., *Multimodal Virtual Environments: MAGIC Toolkit and Visual-Haptic Interaction Paradigms*, 1996.
- [48] Ishii, M. and M. Sato, *A 3D Spatial Interface Device Using Tensed Strings*, Presence-Teleoperators and Virtual Environments, Vol. 3, no. 1, MIT Press, Cambridge, MA, pp. 81-86, 1994.
- [49] Iwata, H., *Pen-based Haptic Virtual Environment*, Proceedings of IEEE Virtual Reality Annual International Symposium, IEEE, New York, pp. 287-292, September, 1993.
- [50] Jacobsen, S., E. Iversan, C. Davis, D. Potter and T. McLain, *Design of a Multiple Degree-of-Freedom, Force Reflective Hand Master/Slave with High Mobility Wrist*, Proceedings of ANS/IEEE/SMC, 3rd Topical Meeting on Robotics and Remote Systems, IEEE, N.Y, March. 1989.
- [51] Jarillo-Silva, Domínguez-Ramírez, Vicente-Parra, *Diseño e implementación de técnicas de control no lineal basadas en Pasividad aplicadas a Guiado Háptico*, CITIS UAEH, México 2009.
- [52] Jones. L. and J. Thousand, *Servo Controlled Manipulator Device*, U.S. Patent 3263824, Northrop Corporation, Beverly Hills, August 2, 1966.
- [53] Joel C. Huegel and Marcia K. OMalley, *Visual versus Haptic Progressive Guidance for Training in a Virtual Dynamic Task*, Third Joint Eurohaptics Conference and Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems Salt Lake City, UT, USA, March 18-20, 2009.

- [54] Julio Guadalupe Moctezuma Ramirez *Tesis "Manipulación Tridimensional de Objetos Deformables Virtuales"* Centro de Investigaciones y Estudios Avanzados del Instituto Politecnico Nacional Mexico, 2006.
- [55] J. Liu, J. L. Emken, S. C. Cramer and D.J Reinkensmeyer, *Learning to perform a novel movement pattern using haptic guidance: slow learning, rapid forgetting, and attractor paths*, Proceedings of the 2005 IEEE, 9th International Conference on Rehabilitation robotics, June 28-Julio 1, Chicago, USA.
- [56] Kazuyuki HENMI y Tsuneo YOSHIKAWA, *Virtual Lesson and Its Application to Virtual Calligraphy System*, Proceedings of the 1998 IEEE International Conference on Robotics and Automation Leuven, Belgium May 1998.
- [57] Khalil, H. *Nonlinear Systems*, Segunda edición. Prentice Hall, NJ, 1996.
- [58] Kabelac, C., *Rendering Sti Walls with PHANToM*, Fifth PHANToM Users Group Workshop, Aspen Colorado, 2000.
- [59] Katsuhiko Ogata, *Ingeniería de Control Moderna*, Prentice Hall, Segunda edición, ISBN 968-880-234-4, 1993.
- [60] Karason, S.P. and Srinivasan, M. A., *Passive Human Grasp Control of an Active Instrumented Object*, Proceedings of the ASME Dynamic Systems and Control Division, DSC-Vol.57-2, pp. 641-647, ASME 1995.
- [61] Kelly and Santibañez, 2004; Lewis F.L. and Dawson, 1993.
- [62] Kennedy, J. M., Gabias, P., and Heller, M. A., *Space, Haptics and the Blind*, Geoforum, 23(2), pp. 175-189, 1992.
- [63] Ryo Kikuuwe, Takahiro Yamamoto and Hideo Fujimoto, *Low-Force Kinesthetic Guidance for Accurate Positioning and Tracking*, Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems 2006 March 25 - 26, Alexandria, Virginia, USA, 2006 IEEE.
- [64] Kilpatrick, P., *The use of kinesthetic suplement in an interactive system*, PhD Thesis, Computer Science Departament, University of North Carolina at Chapel Hill, 1976.
- [65] Kotoku, T., K. Komoriya, and K. Tanie, *A Force Display System for Virtual Environments and its Evaluation*, Proceedings of IEEE International Workshop on Robot and Human Communication (RoMan 92), IEEE, New York, pp. 246-251, September 1992.

- [66] Lane, C., and Smith, J. *Force and Tactile Feedback*, Encyclopedia of Virtual Environments. [http : //www.cs.umd.edu/projects/hcil/eve:restore/eve - articles/I.C.ForceTactile.html](http://www.cs.umd.edu/projects/hcil/eve:restore/eve-articles/I.C.ForceTactile.html).
- [67] Lance A. Page and Arthur C. Sanderson, *Robot motion planning for sensor-based Control with uncertainties*, *Robotics and Automation*, Proceedings, IEEE International Conference on Volume 2 Page(s):1333 - 1340 vol.2 Digital Object Identifier, 21-27 May 1995.
- [68] Laehyun Kim, Gaurav S. Sukhatme and Mathieu Desbrun, *A Haptic-Rendering Technique Based on Hybrid Surface Representation*, Authorized licensed use limited to: Tec de Monterrey. Downloaded on July 23, 2009 at 23:34 from IEEE Xplore.
- [69] Lederman, S. J., Klatzky, R. L., and Balakrishnan, J. D., *Task-Driven Extraction of Object Contour by Human Haptics: Part 2*, *Robotica* 9, April 179-188, 1991.
- [70] Lugo-Villeda L.I., Frisoli A., Sandoval-Gonzalez O., Padilla M.A., Parra-Vega P., Avizzano C.A., Ruffaldi E. and Bergamasco M. *Haptic guidance of Light-Exoskeleton for arm-rehabilitation tasks* , *Robot and Human Interactive Communication*, ROMAN 2009.
- [71] Maryam Mousavi and Faieza Abdul Aziz, *State of the art of haptic feedback in virtual reality in manufacturing*, IEEE, 2008.
- [72] Makinson, B., *Research and Development Prototype for Machine Argumentation of Human Strength and Endurance*, *Hardiman I project*, Technical Report s-71-1056, General Electric, Shenectady, NY, May, 1971.
- [73] S. Mallat, *A Theory Multiresolution Signal Descomposition: The Wavelet Transform*, IEEE Trans. Pattern. Annal. Machine Intell, pag. 674-693, 1989.
- [74] S. Mallat, *Multiresolution aproximations and Wavelet Orthonormal Bases of $L^2(R)$* , Trans. Amer. Math. Soc, pp. 69-87, september 1989.
- [75] M. A. Moreno-Chávez, *Operación óptima de robots manipuladores basada en la planificación de movimiento*, CITIS UAEM Tesis, México 2009.
- [76] S. Parvez and Z. Gao, *A Wavelet-Based Multiresolution PID Controller*, IEEE Transactions on Industry Applications, pp. 537-543, Hills, OH. U.S.A., 2005.

- [77] Y. Meyer, *Wavelets: Algorithms and applications*, SIAM, 1993
- [78] Mark W. Spong, M. Vidyasagar *Robot Dynamics and Control* Canada, 1989.
- [79] Mark Mulder¹, David A. Abbink² y Erwin R. Boer, *The Effect of Haptic Guidance on Curve Negotiation Behavior of Young, Experienced Drivers*, 2008 IEEE.
- [80] Massie, T. and K. Salisbury, *The PHANTOM Haptic Interface A Dvice for Probing Virtual Objects*, Proceedings of the ASME Winter Annual Meeting, Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems, Chicago, IL, November 1994.
- [81] Miguel A. Otaduy and Ming C. Lin *A Modular Haptic Rendering Algorithm for Stable and Transparent 6-DOF Manipulation*, IEEE TRANSACTIONS ON ROBOTICS, VOL. 22, NO. 4, AUGUST 2006.
- [82] Misagh Mansouri Boroujeni¹ y Ali Meghdari², *Haptic Device Application in Persian Calligraphy*, International Conference on Computer and Automation Engineering, 2009 IEEE DOI 10.1109/ICCAE.2009.55.
- [83] Moore, M. and J. Wilhelms, *Collision Detection and Response for Computer Animation*, Computer Graphics, Vol. 22, No. 4, pp. 369-374, 1988.
- [84] Moreyra, M. and B. Hannaford, *A Practical Measure of Dynamic Response of Haptic Devices*, International Conference on Robotics and Automation, Proceedings of the 1998 IEEE, pp. 369-374, Leuven Belgium, 1998.
- [85] Murat Cenk, David Faygin *Kinematics and Dynamics of Phantom(TM) model 1.5 Haptic Interface* University of California, 2006.
- [86] Murray, R.M Sastry, S. S. (1994) *A mathematical introduction to robotic manipulation* CRO PRESS, Inc Boca Raton. FL.
- [87] Nathan Ulrich y Vijay Kumar, *Passive Mechanical Gravity Compensation for robot Manipulators*, proceedings of the 1991 IEEE Intemational Conference on Robotics and Automation Sacramento, California April 1991.
- [88] Nishimura T., Sugawara K., Yoshiharat I., Abe K., *A Motion Planning Method for a Hyper Multi-joint Manipulator using Genetic Algorithm*, Systems, Man, and Cybernetics, IEEE SMC Conference Proceedings, 1999 IEEE International Conference on Volume 4, Page(s):645 - 650, 12-15 Oct. 1999.
- [89] Nissho Electronics Co., *Haptic Master*, Company brochure, Tokyo, Japan, 2 pp. (in Japanese).

- [90] Oakley, I., M. R. McGee, S. Brewster and P. Gray, *Putting the Feel in Look and Feel*, Proceedings of CHI'2000, The Hague, NL. 2000.
- [91] Ordaz Oliver J. Patricio, Domínguez Ramírez Omar A., Parra-Vega Vicente, Jarillo-Silva Alejandro., *Diseño de estrategias de control basadas en pasividad para sistemas Euler-Lagrange aplicado en robots manipuladores.*, capítulo de libro: Mecatronica, aceptado y de proxima publicación por el Instituto Politecnico Nacional, México 2009.
- [92] Organización Panamericana de la Salud (OPS) y Organización Mundial de la Salud (OMS). Clasificación Estadística Internacional de Enfermedades y Problemas Relacionados con la Salud. Décima Revisión 1996.
- [93] ONU, Manual de Elaboración de Información Estadística para Políticas y Programas Relativos a las Personas con Discapacidad, 1997.
- [94] O. A. Domínguez-Ramírez, *Diseño e integración de una interfaz háptica activa realista*, CINVESTAV, Mechatronic Section, PhD Thesis, México, 2005.
- [95] O. A. Domínguez-Ramírez and Vicente Parra-Vega, *Active Haptic Interface for Remote Training Purposes* ICAR International Conference on Advanced Robotics Coimbra, Portugal 2003.
- [96] Omar A. Domínguez-Ramírez and Vicente Parra-Vega, *HAPTIC REMOTE GUIDED EXPLORATION OF DEFORMABLE OBJECTS*, IMECE2003-43894, Proceedings of IMECE2003 2003 International Mechanical Engineering Congress and Exposition November 16-21, 2003, Washington, D.C. USA.
- [97] Parra-Vega, V., Omar A. Domínguez-Ramírez and J. A. Méndez-Iglesias, *Haptic Guidance for Training Motor Skills*, Memorias del Congreso Nacional de Control Automático, Asociacion de México de Control Automático A.C. AMCA 2003, Ensenada, Baja California, México, ISBN 970-32-1173-9, pp. 180-186, 2003.
- [98] Paul, R., Stevenson, C.N., *Kinematic of Robot Wrist-The international Journal of Research*, 1983.
- [99] P.V. Patel and F. Shadpey, *Control of redundant manipulators: theory and experiments*, Springer-Verlag Berlin and Heidelberg GmbH, 2005, vol.316, pp. 7-27.
- [100] Parra-Vega V., Navarro-Alcón D., *Force-Position exponential tracking of redundant manipulators with model-free sliding PD control*, Memorias del Congreso Nacional de Control Automático, Asociacion de México de Control Automático A.C. AMCA 2008, ISBN 978-1-4244-2499-3.

- [101] Peñafiel Martínez, Fernando (1998), *Clasificaciones de la deficiencia motórica*, en Antonio Sánchez Palomino y José Antonio Torres González (coords.), Educación especial. Ámbitos específicos de intervención, t. II, Madrid, Pirámide, pp. 97-99.
- [102] Phillip John McKerrow, *Introduction to Robotics*, University of Wollongong, Australia, 1991.
- [103] Rafael Kelly y Victor Santibañez, *Control de movimiento de robots manipuladores*, Prentice Hall, México, 2003.
- [104] Remis Balaniuk *A Differential Method for the Haptic Rendering of Deformable Objects*, Brasilia, Brazil, 2003.
- [105] Rafael Kelly, *Comments on Adaptive PD Controller for Robot Manipulators*, IEEE TRANSACTIONS ON ROBOTICS AND AUTOMATION, VOL. 9, NO. 1, FEBRUARY 1993.
- [106] Rosen, J., Lasko-Harwill and R. Satava, *Virtual Reality and Surgery*, Computer-Integrated Surgery, R. Taylor, S. Lavallee, G. Burdea, and R. Moesges Eds., MIT Press, Cambridge, MA, pp. 231-244, 1996.
- [107] Romeo Ortega, Antonio Loría, Per Johan Nicklasson, and Hebertt Sira-Ramírez, *Passivity-based Control of Euler-Lagrange Systems*, Mechanical, Electrical and Electromechanical Applications, Spriger, 1998.
- [108] Ruspini, D. and O. Khatib, *Dynamic Models for Haptic Rendering Systems* Advances in Robot Kinematics: ARKt'98, June 1998, Strobl/Salzburg, Austria, pp. 523-532. tual Environment Technology.
- [109] Salisbury, K. and Mandayam A. Srinivasan, *Virtual Environment Technology for Training (VETT)*, BBN Report No. 7661, VETREC, MIT, Cambridge, MA, 1992.
- [110] Sepulveda Cervantes, G, Domínguez Ramírez, O.A, and Parra Vega, V, *A New Paradigm For Haptic Rendering Based On Orthogonal Decomposition*, Chapter 60 in DAAAM International Scientific Book 2008, pp. 743-758, B. Katalinic (Ed), published by DAAAM International, ISBN 978-3-901509-69-0, ISSN 1726-9687, Vienna, Austria DOI: 10.2507/daaam.scibook.2008.60.
- [111] Sciavicco, L. and B. Siciliano, *Modelling and Control of Robot Manipulators*, Springer-Verlag, Second Edition, 2000.

- [112] SensAble Technologies, Inc., *PHANTOM PREMIUM 1.0/1.5A, 3D Touch Components: Hardware Installation and Technical Manual*, Revision 6.5, 18 August, 2000.
- [113] Seow, K., *Physiology of Touch, Grip and Gait*, in J. Webster Ed., *Tactile Sensing for Robotics and Medicine*, John Wiley and Sons, New York, pp. 13-40, 1988.
- [114] Jean-Jacques E. Slotine and Weiping Li, *Applied Nonlinear Control*, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, 1991.
- [115] B. Siciliano, L. Sciavicco, *Modelling and Control of Robots Manipulators*, Springer, Great Britain, 2001.
- [116] Shimoga, K.B., *A Survey of Perceptual Feedback Issues in Dexterous Telemanipulation: Part II. Finger Touch Feedback*, 1993 IEEE Annual Virtual Reality International Symposium, pp. 271-279.
- [117] Sowizral, K., *Tutorial: An Introduction to Virtual Reality*, Virtual Reality Annual International Symposium, 1995.
- [118] Srinivasan M. A., *Haptics Research at the MIT Touch Lab*, The First Phantom user's Group Workshop, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, MA, pp. 10-13, 1996.
- [119] Srinivasan, Mandayam A., Whitehouse, J.M. and LaMotte R.H., *Tactile Detection of Slip: Surface Microgeometry and Peripheral Neural Codes*, *Journal of Neurophysiology*, Vol. 63, No.6, pp. 1323-1332, 1990.
- [120] Stansfeld, S. A., *Haptic Perception with an Articulate, Sensate Robot Hand*, *Robotica* 10, pp. 497-508, 1992.
- [121] Stone, R., *Advance Human-System Interfaces for Telerobotics Using Virtual Reality and Telepresence Technologies*, *Proceedings of the Fifth International Conference on Advance Robotics, ICAR 91*, IEEE, New York, pp. 168-173, 1991.
- [122] Sutherland I., *The Ultimate Display*, *Prodedings of international Federation of Information Processing*, pp. 506-508, 1965.
- [123] Tachi, S., *Whither Force Feedback?*, *IEEE Proceedings of the Virtual Reality Annual International Symposium in Research*, Triangle Park, NC, IEEE Computer Society Press, Washington, USA, March 11-15, 1995.
- [124] Tan, H.Z., Srinivasan, M. A., Eberman, B. and Cheng, B., *Human Factors for the Design of Force-Reecting Haptic Interfaces*, *Dynamic System and Control*, Vol. 1, Ed: C.J. Radcliffe, DSC-Vol.55-1, pp. 353-359, ASME, 1994.

- [125] Toshio Asano, Yutaka Ishibashi y Seiji Kameyama, *Interactive Haptic Transmission for Remote Control Systems*, ICME 2006.
- [126] Vadim Utkin, Jurgen Guldner and Jingxin Shi, *Sliding Model Control in Electromechanical Systems*, Taylor and Francis, London Philadelphia, 1999.
- [127] Carlos Cruz-Valverde, Gabriel Sepúlveda-Cervantes, Omar A. Domínguez-Ramírez *Kinematic and Dynamic Modeling of the PHANToM Premium 1.0 Haptic Device: Experimental Validation* CERMA, Electronics, Robotics and Automotive Mechanics Conference 2010.
- [128] Virtual Reality Inc., *MIS Training and Rehearsal System 323*, Company Brochure, Pleasantville, NY, 1993.
- [129] M. Vetterli and J. Kovacevic, *Wavelets and Subband Coding*, Prentice Hall PTR, 2007.
- [130] M. Vidyasagar, *Nonlinear Systems Analysis*, Secon Edition, Prntice-Hall, inc A Simon and Schuster Company, Englewood Cliffs, New Jersey, 1993.
- [131] Webster, M., *Websterss Ninth New Collegiate Dictionary*, Merriam-Webster Inc., Springfield, MA, 1985.
- [132] Wentao Yu, Rajiv Dubey and Noreli Pernalete, *Robotic Therapy for Persons with disabilities using hidden Markov model based skill learning*, Proeedings of the 2004 IEEE, International Conference on Robotics and Automation, New Orlands, April 2004.
- [133] Yokoi, H., J. Yamashita, Y. Fukui and M. Shimojo, *Development of the Virtual Shape Manipulating System*, Proceedings of the Fourth International Conference on Artiftial Reality and Tele-Existence (ICAT'94), Tokyo, Japan, pp. 43-48, July 1994.
- [134] Youn K. (Clara)Kim and Xiaolic(Lucy) Yang, *Real-Time Performance Analysis of Hand Writing Rehabilitation Excercise in Haptic Virtual Reality*, Departament of Electrical and Computer Engineering, Purdue University Calumet Hammond, IN, U.S.A, 2007.
- [135] Yoshikawa, T. *Foundations of Robotics: Analisis and Control* Cambridge, MA, MIT Press, 1990.

-
- [136] Yizhong Wang, Yonghua Chen, Wenjie Zhang, Dingcheng Liu and Huafang Huang, *Study on underwater wet arc welding training with haptic device*, Virtual Environments, Interfaces and Measurements Systems, IEEE International Conference 2009.
- [137] Yoshikawa, T. and A. Nagura, *A Touch and Force Display System for Haptic Interface*, International Conference on Robotics and Automation, Albuquerque, New Mexico, IEEE Robotics and Automation Society, pp. 3018-3024, April 1997.
- [138] Zarvdianski, A., *Remote Handling Device*, U.S. Patent 4392138, November 24, 1981.
- [139] Zhan Gao y Anatole Lt'ecuyer, *Path-Planning and Manipulation of Nanotubes Using Visual and Haptic Guidance*, VECIMS 2009 - International Conference on Virtual Environments, Human-Computer Interfaces and Measurements Systems Hong Kong, China May 11-13, 2009.
- [140] Zhengmao Ye and Gregory Auner, *Haptic Interface Prototype for Feedback Control on Robotic Integration of Smart Sensors*, IEEE 2003.
- [141] <http://www.logismarket.com.mx/fanuc-robotics/robot-de-pintura>
- [142] <http://www.hapticwalker.de/>
- [143] <http://robots10.galeon.com/moviles.html>
- [144] <http://www.sensable.com>
- [145] <http://www.saludalia.com>