



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA
DEL ESTADO DE HIDALGO



INSTITUTO DE CIENCIAS BÁSICAS E INGENIERÍA

ÁREA ACADÉMICA DE COMPUTACIÓN Y ELECTRÓNICA

MAESTRÍA EN CIENCIAS EN AUTOMATIZACIÓN Y CONTROL

INTERACCIÓN FÍSICA ADAPTABLE HOMBRE-ROBOT PARA EL
RESTABLECIMIENTO BIOMECÁNICO DE MIEMBRO SUPERIOR

T E S I S

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

Presenta

ING. JOSÉ DANIEL MENESES GONZÁLEZ

Asesores

DR. OMAR ARTURO DOMÍNGUEZ RAMÍREZ

DR. LUIS ENRIQUE RAMOS VELASCO

MINERAL DE LA REFORMA, HIDALGO, ENERO DE 2019



Ing. José Daniel Meneses González

**Interacción Física
Adaptable Hombre-Robot
para el Restablecimiento
Biomecánico de Miembro
Superior**



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE HIDALGO

Instituto de Ciencias Básicas e Ingeniería

Area Académica de Computación y Electrónica

Mineral de la Reforma, Hgo., a 07 de enero de 2019

Número de control: ICBI-AACyE/008/2019

Asunto: Autorización de impresión de tesis.

M. EN C. JULIO CÉSAR LEINES MEDÉCIGO
DIRECTOR DE ADMINISTRACIÓN ESCOLAR DE LA UAEH

Por este conducto le comunico que el comité revisor asignado al Ing. José Daniel Meneses González, alumno de la Maestría en Ciencias en Automatización y Control, autoriza la impresión del proyecto de tesis titulado " Interacción física adaptable hombre-robot para el restablecimiento biomecánico de miembro superior" en virtud de que se han efectuado las revisiones y correcciones pertinentes.

A continuación, se registran las firmas de conformidad de los integrantes del comité revisor.

Dr. Raúl Villafuerte Segura	Presidente	UAEH
Dr. Jesús Patricio Ordaz Oliver	Secretario	UAEH
Dr. Omar Arturo Domínguez R	Vocal 1	UAEH
Dr. Pablo Antonio López Pérez	Vocal 2	UAEH

Atentamente
"Amor, Orden y Progreso"

Dr. Jesús Patricio Ordaz Oliver
Coordinador de la Maestría en Ciencias en Automatización y Control



JPOO/APL



Ciudad del Conocimiento
Carretera Pachuca-Tulancingo km 4.5 Colonia
Carboneras, Minera de la Reforma, Hidalgo,
México. C.P. 42184
Teléfono: +52 (771) 71 225 00 ext. 2250, 2251
Fax 2105
aacye_icbi@uaeh.edu.mx

www.uaeh.edu.mx

Es una gran satisfacción personal el haber culminado una meta más en mi vida profesional, trabajo arduo con duración de dos años, a quien dedico completamente a mis padres, que en todo momento me han apoyado e impulsado a seguir luchando por lo que quiero. Gracias por tanto, gracias por lo que soy y por lo que espero llegar a ser.

Gracias a

CONACYT por la beca de maestría otorgada durante el periodo Agosto 2016 - Julio 2018, con número de registro 275394.

CITIS - UAEH por la formación académica brindada a lo largo de mi estancia en sus instalaciones, y de manera particular a su laboratorio de robótica avanzada e interfaces hápticas, por el apoyo durante la ejecución del presente trabajo de investigación.

Agradecimientos

En primera instancia, agradezco a la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, ya que fue el medio por el cual tuve la posibilidad de inicial y culminar satisfactoriamente esta travesía profesional y convertirme en Maestro en Automatización y Control, lo que me permitirá fortalecer mis conocimientos e incursionar con mayor preparación en el mundo laboral.

A las dos personas que me dieron la vida, quiero recordarles que sin ellos, esto no sería posible. Mis padres, que día con día me demuestran que su afecto hacia mí no tiene límites, que en todos los sentidos me apoyan y a los que siempre les agradeceré por la persona en que me he convertido.

A mis dos grandes amigos, David y Andrés, que a pesar de las diferencias normales que se pueden presentar entre hermanos, siempre me han demostrado que la familia es primero, y que podré contar con ellos en todo momento.

A Nayely, una persona que ha formado parte de mi vida desde hace más de 12 años, y con la que he confirmado que pueden existir tropiezos y momentos malos, sin embargo, el tiempo nos enseña a comprender la razón de dichas circunstancias y para lo que vivimos y por lo que queremos luchar y lograr, al final del camino.

Al Dr. Omar Arturo Domínguez Ramírez, una persona a la que admiro y respeto por su perseverancia y profesionalismo, con una gran capacidad para compartir sus conocimientos, y con ello haberme aportado las herramientas necesarias para poder culminar este Posgrado.

Al Dr. Luis Enrique Ramos Velasco, quien siendo una persona dotado de gran inteligencia y capacidad, siempre me permitió desarrollar amplios conocimientos los cuales coadyuvaron a que este trabajo lo pudiera realizar, y quien, además, me ha impulsado siempre a continuar con esta preparación profesional.

A los sinodales que fueron partícipes de mi trabajo, los cuales se permitieron el tiempo para revisarlo y darme a saber sus puntos de vista, tan enriquecedores y los cuales complementaron mi desarrollo profesional.

A mis compañeros de Maestría, con los que pasé gratos momentos, entre risas, charlas, y hasta momentos de estrés y cansancio, pero siempre acompañándome en mis

días de estudio, apoyándome cuando lo necesité, y los cuales ya han formado parte importante en mi vida.

Por último, y sin menospreciar, a todas aquellas personas que indirectamente me permitieron iniciar, mantenerme y culminar esta gran meta que siempre tuve en mente, y de la cual me siento muy orgulloso y satisfecho.

Resumen

Interacción Física Adaptable Hombre-Robot para el Restablecimiento Biomecánico de Miembro Superior

En este trabajo de investigación se presenta un sistema de control inteligente articular para sistemas MIMO. La planta está conformada por dos componentes: un dispositivo háptico (Geomagic Touch) equipado con tres codificadores ópticos acoplados cada uno al eje de un motor de CD y la interacción física del humano en el lazo. Para realizar la identificación entrada salida de la planta se emplea una red neuronal de base radial con wavelets hijas como funciones de activación donde una componente de la identificación es empleada para la autosintonización de las ganancias de los controladores PID. Es importante destacar que el esquema de control e identificación propuesto compensa las incertidumbres por la interacción humano-robot. Se presentan los resultados obtenidos experimentalmente del error articular, la señal de control y también los parámetros de identificación. El propósito de la integración del control adaptable en un sistema HRpI es compensar la incertidumbre del operador humano en el lazo en condiciones de discapacidad, y con ello establecer una plataforma útil con el propósito de rehabilitación física o neurorehabilitación.

Abstract

Human-Robot Adaptive Physical Interaction for Upper Limb Rehabilitation

In this research work an articulated intelligent control system for MIMO systems is presented. The plant is comprised of two components: an efficient device (Geomagic Touch) equipped with three optical encoders each linked to the axis of a CD motor and the physical interaction of the human in the loop. To carry out the identification of the plant's output, a radial - based neural network with wavelets daughters is used as activation functions where a component of the identification is used for the self - tuning of the gains. of the PID controllers. It is important to note that the proposed control and identification scheme compensates for the uncertainties due to human-robot interaction. The experimentally obtained results of the joint error, the control signal and also the identification parameters are presented. The purpose of the integration of adaptive control in an HRpI system is to compensate the uncertainty of the human operator in the loop in conditions of disability, and thereby establish a useful platform for the purpose of physical rehabilitation or neurorehabilitation.

Publicación

José Daniel Meneses-González, Omar Arturo Domínguez-Ramírez, Luis Enrique Ramos-Velasco, Félix Agustín Castro-Espinoza and Vicente Parra-Vega ***An Adaptive Robotic Assistance Platform for Neurorehabilitation Therapy of Upper Limb.***

Title: Advances in Computational Intelligence, Subtitle: 17th Mexican International Conference on Artificial Intelligence, MICAI 2018, Guadalajara, Mexico, October 22 27, 2018, Proceedings, Part II Springer Nature Switzerland AG 2018, Editors : Ildar Batyrshin, María de Lourdes Martínez-Villaseñor, Hiram Eredín Ponce Espinosa, LNAI volume 11289, <https://doi.org/10.1007/978-3-030-04497-824> [Apéndice E]

Índice general

Agradecimientos	I
Índice de tablas	IX
Índice de figuras	X
1. Introducción	1
1.1. Breve descripción del estado del arte	3
1.2. Motivación	5
1.3. Justificación	5
1.4. Planteamiento del problema	6
1.5. Hipótesis	7
1.6. Solución propuesta	8
1.7. Objetivos	8
1.8. Aportaciones	9
1.9. Organización de la Tesis	9
2. Control no lineal avanzado de sistemas HRpI	11
2.1. Introducción	11
2.2. Control par calculado pasivo robusto	16
2.3. Diseño basado en pasividad del control par calculado pasivo robusto	19
2.4. Diseño basado en pasividad del control PD+G	20
3. Control inteligente de sistemas HRpI	23
3.1. Introducción	23
3.2. Algoritmos del control PID	24
3.3. Autosintonización de un PID mediante una red <i>wavenet</i>	26
3.4. Esquema de identificación <i>wavenet</i> y sintonización del PID	26
3.4.1. Identificación del sistema	27
3.5. Sistemas no lineales discretos	30
3.5.1. Auto-sintonización	32
3.6. Regulación basada en seguimiento	33

4. Exposición concluyente de resultados	35
4.1. Introducción a la plataforma	35
4.1.1. Características	35
4.1.2. Requerimientos del sistema	36
4.1.3. Plataforma experimental	36
4.2. Experimentos control no lineal avanzado de sistemas HRpI	37
4.2.1. Control PD+G	38
4.2.2. Control par calculado pasivo robusto	40
4.3. Experimentos control inteligente de sistemas HRpI	42
4.3.1. Control adaptativo sin el operador humano en el lazo	43
4.3.2. Control adaptativo con el operador humano en el lazo	48
4.4. Tarea Médica	53
4.5. Propuesta de rehabilitación	53
4.6. Resultados experimentales	53
4.7. Discusion de los experimentos	54
4.8. Conclusiones	54
5. Conclusiones Generales y Trabajo Futuro	57
5.1. Conclusiones generales	57
5.2. Trabajo futuro	58
A. Modelo matemático obtenido por el método de Denavit-Hartenberg del dispositivo háptico Geomagic Touch	61
A.1. Modelo cinemático directo	61
A.2. Modelo cinemático inverso	62
A.3. Matriz Jacobiana	62
A.4. Ecuación dinámica	63
B. Modelo matemático obtenido por el método de cuaterniones del dispositivo háptico Geomagic Touch	67
B.1. Cuaterniones	67
B.1.1. Rotación con cuaterniones	68
B.2. Cinemática directa de dispositivo Geomagic Touch	68
B.2.1. Cinemática directa 3GDL	68
B.3. Matriz Jacobiana para dispositivo Geomagic Touch	70
B.3.1. Matriz Jacobiana para dispositivo Geomagic Touch de 3GDL	70
B.4. Cinemática inversa a partir del vector Jacobiano cuaternionico	71
C. Acronimos y abreviaturas	73
D. Glosario	74

E. Publicación en Capítulo de Libro 79

Bibliografía 93

Índice de tablas

3.1. Variables que intervienen en cada una de las etapas.	27
3.2. Parámetros de la red neuronal <i>wavenet</i> y los filtros IIR para el experimento	32
3.3. Valores iniciales y tasas de aprendizaje.	33
C.1. Acronimos y abreviaturas	73

Índice de figuras

1.1. Diagrama clásico control retroalimentado.[26]	1
1.2. Diagrama de un controlador PID donde k_p, k_i, k_d : Ganancias de control. [25]	2
1.3. Paciente con mielomeningocele en lazo de un control que no garantiza regulación global	7
2.1. Comprobación experimental de la matriz de inercias.	12
2.2. Comprobación experimental de la propiedad de anti-simetría.	12
2.3. Controlador de trayectoria.	14
2.4. Diagrama de control par calculado pasivo robusto.	20
2.5. Diagrama de control PD+G.	22
3.1. Diagrama a bloques del controlador PID auto-sintonizable.	27
3.2. Diagrama de la red neuronal <i>wavenet</i> , donde $\tau_l = \frac{\ \mathbf{u}(k) - \mathbf{b}_l\ }{\mathbf{a}_l}$	28
3.3. Estructura del filtro IIR.	28
4.1. Plataforma experimental.	37
4.2. Espacio de trabajo.	38
4.3. Trayectoria caartesiana del control PD+G.	39
4.4. Señal de control PD+G.	39
4.5. Error articular del control PD+G.	40
4.6. Espacio de trabajo.	40
4.7. Trayectoria caartesiana del control par calculado pasivo robusto.	41
4.8. Señal de control par calculado pasivo robusto.	41
4.9. Error articular del control par calculado pasivo robusto.	42
4.10. Espacio de trabajo.	43
4.11. Trayectoria caartesiana sin el operador humano en el lazo.	43
4.12. Identificación sin el operador humano en el lazo.	44
4.13. Error de identificación sin el operador humano en el lazo.	44
4.14. Error articular sin el operador humano en el lazo.	45
4.15. Señal de control sin el operador humano en el lazo.	45

4.16. Ganancia k_p sin el operador humano en el lazo.	46
4.17. Ganancia k_i sin el operador humano en el lazo.	46
4.18. Ganancia k_d sin el operador humano en el lazo.	47
4.19. Comportamiento de los pesos sin el operador humano en el lazo.	47
4.20. Espacio de trabajo.	48
4.21. Trayectoria caartesiana con el operador humano en el lazo.	48
4.22. Identificación con el operador humano en el lazo.	49
4.23. Error de identificación con el operador humano en el lazo.	49
4.24. Error articular con el operador humano en el lazo.	50
4.25. Señal de control con el operador humano en el lazo.	50
4.26. Ganancia k_p con el operador humano en el lazo.	51
4.27. Ganancia k_i con el operador humano en el lazo.	51
4.28. Ganancia k_d con el operador humano en el lazo.	52
4.29. Comportamiento de los pesos con el operador humano en el lazo.	52

Capítulo 1

Introducción

En la ingeniería comúnmente existe la necesidad de llevar a un sistema físico hasta un punto determinado con cierto grado de precisión. Un sistema de control es el conjunto de técnicas y herramientas que guían a un sistema físico hasta las condiciones deseadas. Dentro de la vida cotidiana son cada vez más los aspectos en que se han visto involucrados los sistemas de control, ya sea en la producción industrial, sistemas de transporte, líneas de ensamble, sistemas de seguridad, entre otros. En algunos de éstos, la precisión y certidumbre de los procesos realizados es de vital importancia, y en ellas el control juega un papel fundamental. El control automático clásica consiste en calcular una acción correctiva u , en función del error e , que se define como la diferencia entre la salida actual de la planta y , y de la salida deseada y_{ref} . Esto se conoce como control realimentado y está conformado por tres bloques básicos: un proceso, planta o sistema a controlar, un sensor (lazo de retroalimentación) y un controlador (ley de control), como se muestra en la Figura 1.1 [26].

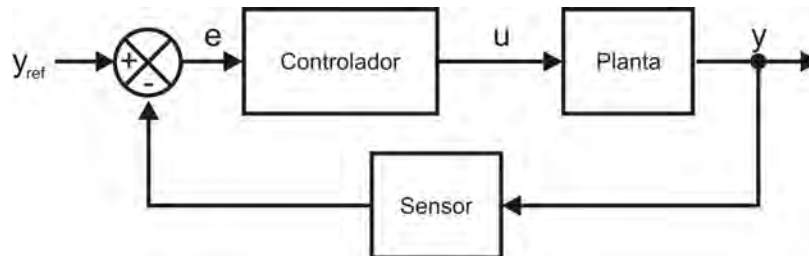


Figura 1.1: Diagrama clásico control retroalimentado.[26]

El controlador es un conjunto de elementos (de tipo mecánico, eléctrico, electrónico, hidráulico, neumático, entre otros) que recibe en su entrada al error de seguimiento

e y calcula una ley de control u , para producir la señal correctiva de entrada al actuador integrado en la planta.

El control PID es el controlador industrial más utilizado, empleado por su buen desempeño y fácil implementación [4]. El acrónimo PID proviene de las tres acciones de control que lo componen: una acción proporcional, una acción integral y una acción derivativa: el componente proporcional ajusta la ganancia en relación directa con la magnitud del error, el componente integral elimina el error en estado estacionario y el componente derivativo mejora la velocidad de respuesta [23].

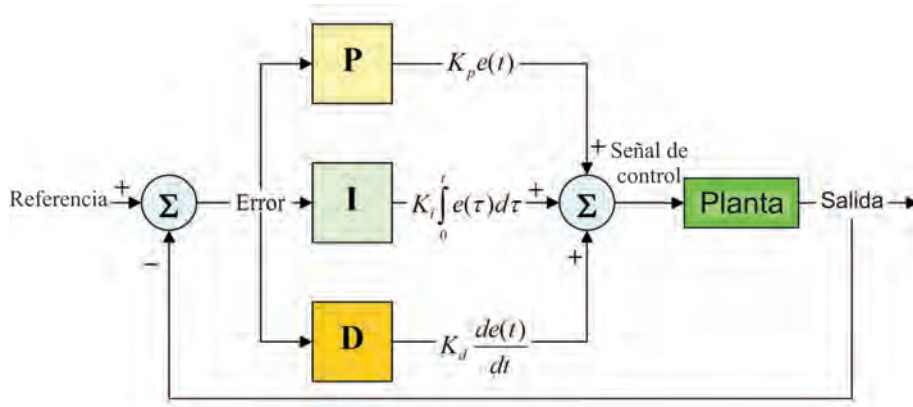


Figura 1.2: Diagrama de un controlador PID donde k_p, k_i, k_d : Ganancias de control. [25]

Para conseguir un buen rendimiento y evitar comportamientos indeseables en el sistema es preciso ajustar los parámetros del controlador hasta que el desempeño del proceso se considere satisfactorio [17], [25], [26]. A este procedimiento se le conoce como sintonización del controlador y puede realizarse por prueba y error, considerando los límites nominales de operación de la planta, o siguiendo uno de un conjunto de algoritmos de sintonización que permiten encontrar de manera sistemática valores adecuados de los parámetros del controlador. Existen diversos métodos de diseño de controladores, que requieren ya sea el modelo del proceso o su respuesta en frecuencia para calcular las ganancias óptimas del controlador. Aún así se requiere hacer pruebas de campo para realizar ajustes finales, sobre todo si la información del proceso es incompleta o inexacta. De manera alternativa, se han planteado controladores adaptables, que tienen la capacidad de encontrar valores adecuados durante la operación automática [4].

El presente trabajo propone el desarrollo e implementación de un controlador tipo PID discreto [3], [17], [25] empleando una red *wavenet* para la sintonización. Las redes *wavenet* se han utilizado con anterioridad para aproximación de funciones e identificación de procesos cuyo modelo matemático que describe el comportamiento del proceso es desconocido. En trabajos previos [5], [9], [7] y [28] se han empleado algoritmos *wavenet* para sintonizar controladores en plantas con modelos no lineales.

El propósito de utilizar un PID *wavenet* es que las ganancias k_p , k_i y k_d del PID se auto-ajusten a posibles cambios de la planta como se muestra en la Figura 3.1. Un método autosintonizado es una consideración importante de diseño de sistemas para construir controles adaptables de un sistema desconocido que varía lentamente. La idea básica en el control adaptable es estimar los parámetros desconocidos de la planta y correspondientemente ajustar en línea los parámetros del controlador, basados en las señales medidas del sistema, empleando los parámetros estimados en el cálculo de la entrada de control [31].

1.1. Breve descripción del estado del arte

Las primeras menciones de teoría *wavelet* aparecen en el trabajo de Haar en 1909. Gran parte del desarrollo se realizó durante la década de 1930 por varios grupos de investigación en el tema de la representación de funciones empleando funciones base variantes de escala. David Marr produjo un algoritmo para procesar imágenes empleando *wavelets* en la década de 1980. En esta misma década Meyer construyó *wavelets* continuamente diferenciables (en contraste con las *wavelets* de Haar). Daubechies se basó en el trabajo de Mallat para construir una base ortonormal de funciones *wavelet* de soporte compacto, que se ha convertido en el fundamento de las aplicaciones más recientes de las *wavelets* [11]. Entre los usos más comunes de las transformadas *wavelet* están el análisis multiresolución y aproximación de funciones e identificación de parámetros. Por otro lado las redes neuronales artificiales se desarrollaron como un modelo matemático generalizado del aprendizaje humano basado en neuronas reales [29]. Esta forma de modelado fue estudiada originalmente por McCulloch y Pitts [22]. Este modelo permite almacenar información y reconocer patrones. Lippman las utilizó en 1987 para reconocimiento de patrones [20]. En la década de 1990 se investigó la descripción matemática de modelos de redes neuronales, su arquitectura y algoritmos de aprendizaje [10], [14] y [30]. Las redes neuronales ven uso en diversos campos, tales como las telecomunicaciones y reconocimiento de

patrones en medicina e ingeniería.

La aplicación conjunta de las dos técnicas anteriores da lugar a las redes *wavenet*: redes neuronales que utilizan *wavelets* como funciones de activación, como en [33], que se presenta un control PID autosintonizable, [19] se utiliza una red *wavenet* para identificación de parámetros y otra red para la sintonización del controlador. También se le utiliza en [32] para controlar un generador eólico. En [5] se describe un método similar al presentado en esta tesis para sintonizar un control multiresolución.

Por otra parte la háptica estudia la manera de cómo articular el tacto con un mundo generado por una computadora (mundo virtual). Uno de los problemas actuales de la realidad virtual es la limitación de estímulos para el sentido del tacto. La retroalimentación de fuerza de contacto o kinestésia, es un campo de investigación de la háptica que trata con dispositivos que interactúan con músculos y tendones, y proporcionan al operador humano la sensación de que se aplica una fuerza en un mundo virtual. La retroalimentación táctil, trata con dispositivos que interactúan con los nervios terminales en la piel los cuales indican la presencia de calor, presión y textura. El caso de estudio de este trabajo de tesis, es diseñar e implementar técnicas de control adaptable basadas en redes neuronales *wavelets* para un guiado háptico con el propósito de que sea usado en rehabilitación médica de manera local.

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 diversificará las aplicaciones, propusiera algoritmos nuevos y más rápidos, lograr la integración con otros dispositivos especializados, etc. Los dispositivos que lograron este propósito son el Touch Master y el SAFIRE Master en 1995 [21], el PHANToM Arm en 1994 [15] utilizado experimentalmente como plataforma de entrenamiento a este trabajo de investigación y el Impulse Engine en 1995 [12].

Paralelamente, surge en Japón y en países europeos, una gran diversidad de dispositivos hápticos portables y no portables o de escritorio. Los dispositivos hápticos desk-top o no portables han tenido un impacto relevante por su bajo costo, por el tipo de aplicaciones y por las especificaciones técnicas que presentan. Otros dispositivos de alto desempeño fueron desarrollados paralelamente en Japón, como el SPIDAR I y II [15] del Instituto de Tecnología de Tokyo, el Sensing Glove de Hashimoto [12]

desarrollado en la Universidad de Tokyo en 1994, el Joystick de seis grados de libertad Haptic Master de Nissho Electronics Co en 1995 [24], la interfaz háptica Pen-Based de la universidad de Tsukuba en 1993 [16], la interfaz háptica SPICE de Suzuki Motor Co. en 1994 y 1995 [1], y manipuladores cartesianos como el joystick cartesiano SICE [34] del Instituto Nacional de Biociencia y Tecnología Humana en 1994, *SensAble Technologies, Inc.* produce el sistema mayordomo - exoesqueleto CyberTeam, el cual está constituido de un mayordomo de 6 grados de libertad CyberForce que garantiza el posicionamiento global de un exoesqueleto de 5 grados de libertad de fuerza CyberGrasp empleado en tareas de agarre en ambientes virtuales dinámicos deformables, para ello emplea la retroalimentación de un guante con 22 sensores de fibra de carbono para medición de orientación de muñeca, flexión-extensión y aducción-abducción de dedos.

1.2. Motivación

Los sistemas de interacción física hombre-robot (HRpI), son sistemas dinámicos complejos que asumen condiciones de incertidumbre ante la presencia del humano en el lazo. Las leyes de control empleadas deben tomar en consideración una dinámica no modelada con incertidumbre. El control adaptable es una estrategia para buscar resolver la estabilización del sistema HRpI en el seguimiento de trayectorias con el operador humano en el lazo de control. El motivo esencial de este trabajo de tesis, corresponde al buscar aplicar un protocolo clínico PEAbody 2 a partir de las ecuaciones paramétricas de las geometrías que representan la consigna de movimiento; y el empleo de un control adaptable basado en la identificación de la dinámica total de salida y el autoajuste de las ganancias de control de una estrategia de alto rendimiento para regulación operacional como es el control PID. La plataforma ideada, reserva su aplicación para personas con discapacidad motriz en miembro superior. Para el caso generalizado de una de las trayectorias del protocolo clínico se estableció como consigna una hélice que establece circunferencias en distintos planos paralelos al plano de trabajo del dispositivo Háptico.

1.3. Justificación

Diversas estrategias de control han sido implementadas en sistemas robóticos e interfaces hápticas con excelentes resultados en seguimiento de trayectorias para lograr

convergencia en movimiento (posición y velocidad), así como convergencia en fuerza. Sin embargo, la presencia de un operador humano en el lazo de control, implica la presencia de incertidumbres en la dinámica modificando sus efectos en condición de movimiento libre (inerciales, gravitacionales y tribológicos). Ante esa situación, la calidad en la operación y confiabilidad en el desempeño se ven disminuidas, por lo que la adaptabilidad, corresponde a una estrategia deseable. Diversas técnicas adaptativas han sido implementadas, y muchos de los casos con excelentes resultados, en algunos casos se requiere parcialmente del conocimiento del modelo del sistema robótico (regresor), otros requieren una evaluación exhaustiva en el espacio de trabajo y caracterización que relaciona par-movimiento, en ambos casos el trabajo computacional se ve incrementado dada la programación excesiva que demanda la ley de control propuesto y que además de reducir la frecuencia de muestreo posibilita a errores de cálculo numérico con mayor probabilidad de ocurrencia a un control libre de modelo. La adaptabilidad, la búsqueda y la aplicación de un control libre de modelo y en la mejor de las condiciones que únicamente dependa de la variable de posición es la consigna que justifica el desarrollo de esta tesis de investigación.

1.4. Planteamiento del problema

Del trabajo realizado y ya reportado en la literatura, descrito previamente, se encontró la siguiente problemática: Sea un dispositivo háptico en movimiento libre (sin el humano en el lazo) con baja o nula dinámica inercial y de fricción articular, y modelado matemáticamente con la formulación Euler-Lagrange como un sistema robótico, serial y cadena abierta, la ecuación de movimiento es la siguiente:[43]

$$H(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} + G(q) = \tau, \quad (1.1)$$

en donde, $H(q) \in \mathbb{R}^{n \times n}$ y corresponde a la matriz de fuerzas inerciales, $C(q, \dot{q}) \in \mathbb{R}^{n \times n}$ representa a las fuerzas de Coriolis y centripetas, y $G(q) \in \mathbb{R}^{n \times 1}$ y mapea al vector de fuerzas gravitacionales. Y q, \dot{q}, \ddot{q} comprenden a la posición, velocidad y aceleración articular con dimension vectorial ($n \times 1$) y, τ corresponde al vector de pares generalizados de entrada.

Dada la ecuación (1.1) y considerando cambios en la tribología articular, y la presencia del operador humano en el lazo, la ecuación de movimiento queda descrita de la manera siguiente[43]:

$$H(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} + G(q) = \tau - \tau_f + \tau_h, \quad (1.2)$$

en donde, $\tau_f \in \mathbb{R}^{n \times 1}$ corresponde a los pares de fricción articular; y $\tau_h = J^T f_h$ comprende la distribución de pares generalizados en articulaciones a partir de la fuerza kinestésica f_h aplicada en el efector final del dispositivo háptico por parte del operador humano; $J^T \in \mathbb{R}^{n \times n}$ y corresponde al transpuesto del Jacobiano analítico del sistema robótico. Si $\tau \in \mathbb{R}^{n \times 1}$ es definido por un control articular que busca estabilizar al sistema robot-humano en una tarea de seguimiento sin garantizar regulación global se adquiere un bajo desempeño más aun si el operador humano es paciente con discapacidad motriz en el miembro superior. En la Figura 1.3 se muestra a un paciente en el lazo de un control que no garantiza la regulación global. El desempeño espacio-temporal del paciente es incierto; la dinámica del dispositivo háptico cambia con el uso, particularmente su tribología articular y las estrategias de control y sus parámetros no son flexibles ante el cambio del dispositivo háptico.

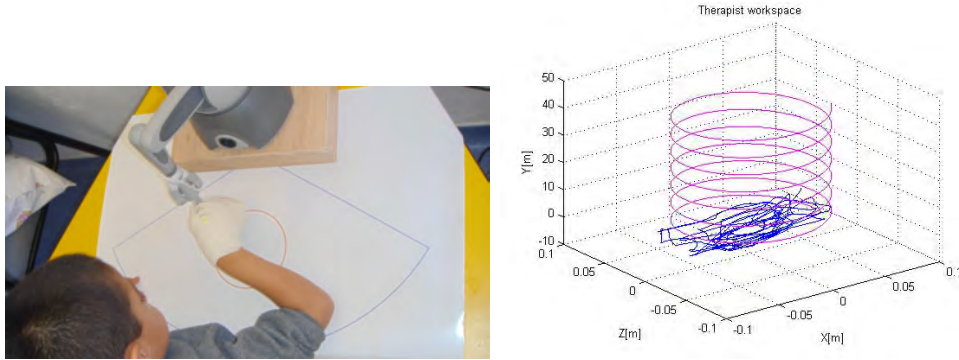


Figura 1.3: Paciente con mielomeningocele en lazo de un control que no garantiza regulación global

1.5. Hipótesis

La adaptabilidad requerida, para la compensación de la incertidumbre dinámica con el operador humano (paciente clínico con discapacidad en miembro superior) en el lazo de control de un sistema HRpI, es resuelta con la implementación de un control *wavelet* tipo PID con ganancias autoajustables a partir de un método de identificación basado en redes neuronales de base radial como estrategia de identificación empleando como funciones de activación a funciones *wavelet* hijas del tipo Morlet.

1.6. Solución propuesta

La solución que se propone al problema planteado es aplicar algoritmos de inteligencia artificial para diseñar un control inteligente articular aplicado a sistemas MIMO, como es el caso de un dispositivo háptico (Geomagic Touch) equipado con tres codificadores ópticos acoplados cada una al eje de un motor de CD y la interacción física del humano en el lazo. Se realiza la identificación entrada salida de la interacción humano-robot mediante una red neuronal de base radial con *wavelet* hijas como funciones de activación donde una componente de la identificación es empleada para la autosintonización de las ganancias de los controladores PID. Es importante destacar que el esquema de control e identificación propuesto compensa las incertidumbres por la interacción humano-robot. Se realizan experimentos en lazo cerrado con el esquema de control propuesto.

1.7. Objetivos

Objetivo general

Proponer una plataforma de interacción física hombre-robot de alto desempeño con propósitos de guiado háptico pasivo adaptable (AHRpI) para miembro superior empleando un sistema robótico Geomagic Touch.

Objetivos particulares

- Analizar el desempeño de dos controladores no lineales basados en la dinámica de un sistema robótico para tareas de guiado háptico pasivo con el operador humano en el lazo;
- Diseñar e implementar de manera experimental, un control inteligente para establecer condiciones de adaptabilidad en un sistema robótico para guiado háptico pasivo con el operador humano en el lazo.
- Abrir la arquitectura de un dispositivo háptico Geomagic Touch de 6 grados de libertad sobre la plataforma de Simulink/Matlab.

1.8. Aportaciones

En este trabajo de investigación y desarrollo, no sólo se establecen beneficios que impactan en la solución del problema planteado como propósito de esta tesis; ya que para la evaluación de la propuesta se tuvieron que obtener resultados teórico-experimentales. Aportaciones desarrolladas hasta este momento son:

- Obtención del modelo cinemático y dinámico y, validación experimental del dispositivo háptico Geomagic Touch,
- Arranque de la interfaz háptica Geomagic Touch en Simulink/Matlab (lectura y escritura);
- Analisis del desempeño de dos controladores no lineales basados en la dinámica de un sistema robótico para tareas de guiado háptico pasivo con el operador humano en el lazo.
- Planificación de una tarea basada en 2 trayectorias: regulación basada en seguimiento, y seguimiento estructurado de una hélice, inspirado en el protocolo clínico Peabody 2 utilizado para neurorehabilitación de pacientes con mielomeningocele y hemiparesia;
- Diseño e implementación de un control PID wavenet para seguimiento de trayectorias y compensación adaptable de la dinámica del dispositivo háptico Geomagic Touch con un operador en el lazo.

1.9. Organización de la Tesis

La escritura de la tesis, es descrita de la manera siguiente:

- **Capítulo 1**, es denominado la introducción a la tesis fortalecido con antecedentes del control de sistemas dinámicos empleados en el control de movimiento de sistemas Euler-Lagrange, particularmente los de tipo robótico. Se presenta una breve revisión de estructuras PID y particularmente la que se promueve en esta tesis. Para ello, se considera una breve descripción del estado del arte, el enunciado motivacional, la argumentación que justifica al planteamiento del problema y la solución propuesta; se establecen los objetivos, hipótesis y aportaciones del trabajo realizado.

- **Capítulo 2**, en este capítulo se presenta los controles no lineales PD+G y par calculado pasivo robusto, sus limitaciones y la evidencia experimental en movimiento libre y movimiento restringido por el operador humano en lazo.
- **Capítulo 3**, se presenta los beneficios de la adaptabilidad para sistemas con incertidumbre, desarrollo de un control PID discreto *Wavenet*, se presenta las características del controlador PID discreto *wavenet* propuesto, así como los resultados experimentales utilizando para ello la interfaz háptica Geomagic Touch.
- **Capítulo 4**, se presenta los experimentos de control no lineal avanzado de sistemas HRpI, control par calculado pasivo robusto así como el control PD+G, experimentos control inteligente de sistemas HRpI, control adaptativo con el operador humano en el lazo, sin el operador humano en el lazo, tarea médica, de una propuesta de rehabilitación teniendo los resultados experimentales, discusión de los experimentos.
- **Capítulo 5**, finalmente, se presentan las conclusiones generales y el trabajo futuro que permitirá fortalecer a la presente propuesta de investigación.

Capítulo 2

Control no lineal avanzado de sistemas HRpI

2.1. Introducción

En esta sección se evalúa la estrategia de control no lineal sobre el dispositivo háptico Geomagic Touch. A partir del modelo dinámico del sistema y de sus propiedades, se implementa la ley de control a comparar. El modelo dinámico reducido de este dispositivo es obtenido por medio del método de Euler-Lagrange y se define por[45]:

$$H(\mathbf{q})\ddot{\mathbf{q}} + C(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})\dot{\mathbf{q}} + G(\mathbf{q}) = \boldsymbol{\tau}, \quad (2.1)$$

donde $H = H^T \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$ es la matriz de inercias, $C(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$ es la matriz de Coriolis y fuerzas centrífugas, y $G(\mathbf{q}) \in \mathbb{R}^{3 \times 1}$ representan las fuerzas de gravedad que actúan sobre las articulaciones $\mathbf{q} = [q_1, q_2, q_3]^T \in \mathbb{R}^{3 \times 1}$ es el vector de articulaciones y $\mathbf{u} = [\tau_1, \tau_2, \tau_3]^T \in \mathbb{R}^{3 \times 1}$ es el vector de par, que actúan sobre las articulaciones. La matriz $H(\mathbf{q})$ es simétrica y definida positiva, de tal manera que

$$\dot{\mathbf{q}}^T H(\mathbf{q}) \dot{\mathbf{q}} > 0, \quad (2.2)$$

donde $\dot{\mathbf{q}} \in \mathbb{R}^{3 \times 1}$, $H(\mathbf{q}) \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$. En la Figura 2.1 se muestra la comprobación experimental realizada en el dispositivo háptico Gemagic Touch, donde la matriz de inercias $H(\mathbf{q})$ es definida positiva.

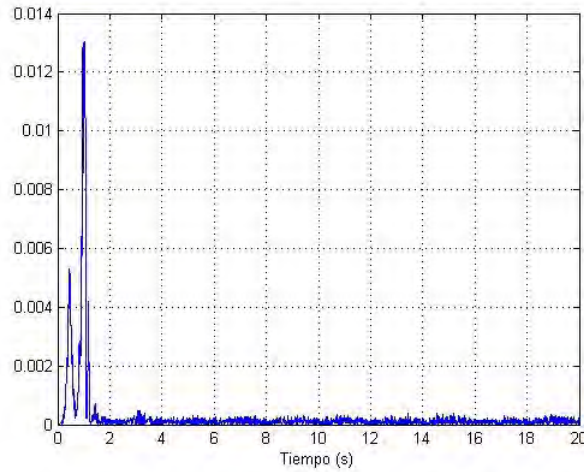


Figura 2.1: Comprobación experimental de la matriz de inercias.

La matriz de Coriolis $C(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})$ se relaciona con la matriz de inercias $H(\mathbf{q})$ de la siguiente manera:

$$\dot{\mathbf{q}}^T \left(\frac{1}{2} \dot{H}(\mathbf{q}) - C(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) \right) \dot{\mathbf{q}} = 0, \quad (2.3)$$

donde $\dot{\mathbf{q}} \in \mathbb{R}^{3 \times 1}$, $H(\mathbf{q}), \dot{H}(\mathbf{q}), C(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$

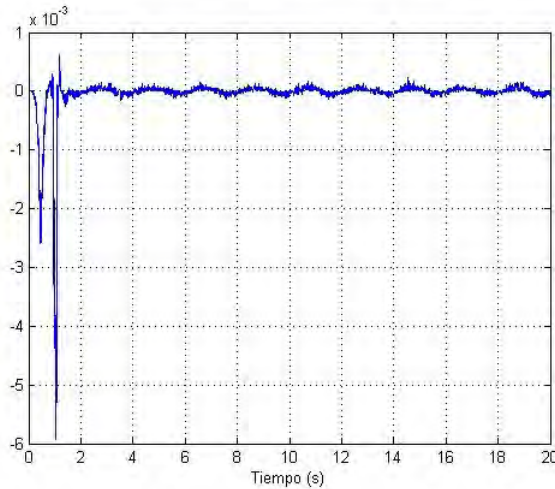


Figura 2.2: Comprobación experimental de la propiedad de anti-simetría.

En la Figura 2.2 se muestra la comprobación experimental de la propiedad de anti-simetría es igual a cero en el dispositivo háptico Gemagic Touch. Considerando el modelo dinámico de un sistema robótico, serial con cadena abierta con n grados de

libertad, con eslabones rígidos, actuadores ideales para evitar fricción en las articulaciones, descrita a continuación:

$$H(\mathbf{q})\ddot{\mathbf{q}} + C(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})\dot{\mathbf{q}} + \mathbf{g}(\mathbf{q}) = \boldsymbol{\tau}. \quad (2.4)$$

En términos del vector de estado $[\mathbf{q}^T \ \dot{\mathbf{q}}^T]^T$ la ecuación es representada de la manera siguiente:

$$\frac{d}{dt} \begin{pmatrix} \mathbf{q} \\ \dot{\mathbf{q}} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \dot{\mathbf{q}} \\ H(\mathbf{q})^{-1}[\boldsymbol{\tau}(t) - C(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})\dot{\mathbf{q}} - \mathbf{g}(\mathbf{q})] \end{pmatrix}$$

Donde $H(\mathbf{q}) \in \mathbb{R}^n$ es la matriz de inercias, $C(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})\dot{\mathbf{q}} \in \mathbb{R}^n$ es el vector de Coriolis y fuerzas centrífugas, $\mathbf{g}(\mathbf{q}) \in \mathbb{R}^n$ representa al vector de fuerzas de gravedad y $\boldsymbol{\tau} \in \mathbb{R}^n$ es un vector de fuerzas y pares aplicados en las articulaciones. Los vectores $\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}, \ddot{\mathbf{q}} \in \mathbb{R}^n$ denotan la posición, la velocidad y la aceleración articular respectivamente. El problema del control de movimiento, particularmente el de seguimiento para un sistema robótico serial de cadena abierta puede ser formulado bajo los siguientes términos. Considerando el modelo dinámico de n grados de libertad. Dado un conjunto vectorial de una función $\mathbf{q}_d, \dot{\mathbf{q}}_d$ y $\ddot{\mathbf{q}}_d$ donde son las posiciones articulares deseadas, velocidades y aceleraciones deseadas, deseamos encontrar una función vectorial $\boldsymbol{\tau}$ tal que la posición \mathbf{q} siga de manera precisa las coordenadas de la articulación del robot \mathbf{q}_d . En términos formales el objetivo del control de seguimiento consiste en encontrar $\boldsymbol{\tau}$ tal que

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \tilde{\mathbf{q}}(t) = 0,$$

donde $\tilde{\mathbf{q}} \in \mathbb{R}^n$ representa el vector de errores de posición articular y es definida por

$$\tilde{\mathbf{q}}(t) := \mathbf{q}_d(t) - \mathbf{q}(t).$$

Considerando la previa definición, el vector $\dot{\tilde{\mathbf{q}}}(t) = \dot{\mathbf{q}}_d(t) - \dot{\mathbf{q}}(t)$ se representa como el error de velocidad. El objetivo del control es que las variables de las articulaciones de los manipuladores sigan la trayectoria de manera asintótica del movimiento deseado. El vector calculado $\boldsymbol{\tau}$ es una función vectorial no lineal de $\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}$ y $\ddot{\mathbf{q}}$. Esta función es llamada ley de control y de manera simplificada controlador. Es importante recordar que los robots manipuladores están equipados con sensores de medición de posición y velocidad en cada articulación, los vectores \mathbf{q} y $\dot{\mathbf{q}}$ pueden ser medibles y ser utilizados por los controladores. En algunos robots, solamente se puede medir la posición de las articulaciones y la velocidad puede ser estimada. En general, la ley de control de seguimiento puede ser expresada.

$$\boldsymbol{\tau} = \boldsymbol{\tau}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}, \ddot{\mathbf{q}}, \mathbf{q}_d, \dot{\mathbf{q}}_d, \ddot{\mathbf{q}}_d, H(\mathbf{q}), C(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}), \mathbf{g}(\mathbf{q})). \quad (2.5)$$

Sin embargo, de manera práctica este control no sólo depende de la aceleración articular $\ddot{\mathbf{q}}$ usualmente se ocupan acelerómetros.

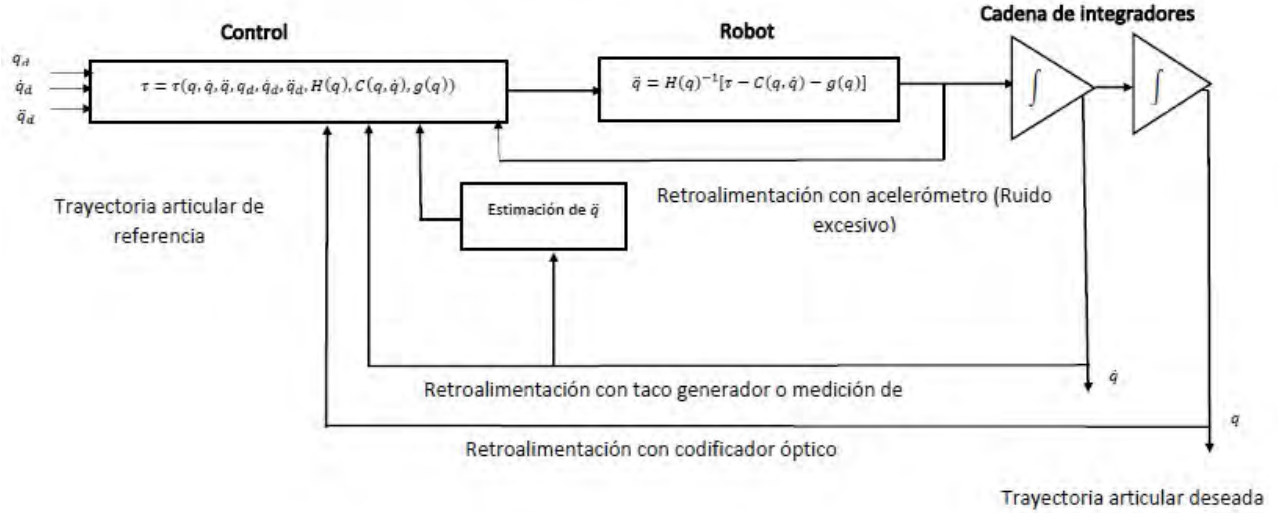


Figura 2.3: Controlador de trayectoria.

La metodología del análisis de estabilidad es resumida en los siguientes pasos:

- 1.-La derivación de la ecuación de la dinámica en lazo-cerrado. Tal ecuación es obtenida para reemplazar la acción de control τ en el modelo dinámico del manipulador. En general la ecuación en lazo-cerrado es no autónoma, es una ecuación diferencial ordinaria no lineal desde $\mathbf{q}(t) = \mathbf{q}_d(t)$.
- 2.-La representación en forma espacio de estado de la ecuación en lazo-cerrado es,

$$\frac{d}{dt} \begin{pmatrix} \mathbf{q}_d - \mathbf{q} \\ \dot{\mathbf{q}}_d - \dot{\mathbf{q}} \end{pmatrix} = \mathbf{f}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}, \mathbf{q}_d, \dot{\mathbf{q}}_d, \ddot{\mathbf{q}}_d, H(\mathbf{q}), C(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}), \mathbf{g}(\mathbf{q})).$$

Esta ecuación en lazo-cerrado puede ser considerada como un sistema dinámico cuyas referencias son $\mathbf{q}_d, \dot{\mathbf{q}}_d, \ddot{\mathbf{q}}_d$ y cuyas salidas de los vectores de estado

$$\tilde{\mathbf{q}} = \mathbf{q}_d - \mathbf{q}$$

$$\dot{\tilde{\mathbf{q}}} = \dot{\mathbf{q}}_d - \dot{\mathbf{q}}.$$

3.-Estudiando la unicidad y existencia del equilibrio de la ecuación en lazo-cerrado.

$$\frac{d}{dt} \begin{pmatrix} \tilde{\mathbf{q}} \\ \dot{\tilde{\mathbf{q}}} \end{pmatrix} = \tilde{\mathbf{f}}(t, \tilde{\mathbf{q}}, \dot{\tilde{\mathbf{q}}}) \quad (2.6)$$

Donde $\tilde{\mathbf{f}}$ es obtenida y remplazando \mathbf{q} con $\mathbf{q}_d(t)$ y $\dot{\mathbf{q}}$ con $\dot{\mathbf{q}}_d(t) - \dot{\tilde{\mathbf{q}}}$ donde la dependencia de $\tilde{\mathbf{f}}$ en t . Es decir la ecuación en lazo-cerrado del sistema es no autónoma.

Así para la ecuación (2.6) se verifica el origen $[\tilde{\mathbf{q}}^T, \dot{\tilde{\mathbf{q}}}^T]^T = 0 \in \mathbb{R}^{2n}$ es un equilibrio y es único.

4.-Proponemos una función de Lyapunov para estudiar la estabilidad de cualquier equilibrio de interés para la ecuación de lazo-cerrado. En este caso no podemos utilizar el teorema La Salle ya que el sistema en lazo-cerrado es descrito de forma general para una ecuación diferencial no autónoma.

5.-Alternativamente al paso 4, en este caso se propone una función de Lyapunov sin embargo no satisface todas las condiciones requeridas para establecer las propiedades de estabilidad de un equilibrio bajo estudio, entonces podemos proponer una función definida positiva con características que permitan determinar el comportamiento cualitativo de la solución de la ecuación en lazo-cerrado. En particular la convergencia es parte del estado. En la Figura 2.3 es basada en algunas propiedades del modelo dinámico de robots manipuladores. Antes tendremos una introducción detallada de estos diferentes esquemas, primero damos una lista de estas propiedades.

Propiedad 2.1

La matriz de inercia es simétrica y definida positiva, que puede ser expresada

$$\lambda_h I_n \leq H(\mathbf{q}) \leq \lambda_H I_n \quad (2.7)$$

donde λ_h y λ_H son constantes positivas.

Propiedad 2.2

La matriz $N(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) = \dot{H}(\mathbf{q}) - 2C(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})$ es antisimétrica para una elección particular $C(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})$ (Esto es siempre posible)

$$z^T N(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) z = 0 \quad (2.8)$$

para ningún vector $z \in \mathbb{R}^{n \times 1}$

Propiedad 2.3

La matriz $C(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) \in \mathbb{R}^{n \times n}$ satisface $\|C(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})\| \geq c_0 \|\dot{\mathbf{q}}\|$ para una vecindad c_0 constante

Propiedad 2.4

La fuerza de gravedad/satisface el vector de fuerzas $\|\tau_g(\mathbf{q})\| \geq g_0$ para una vecindad

g_0 constante donde $\tau_g(\mathbf{q}) = g(\mathbf{q})$

Propiedad 2.5

La ecuación de movimiento es lineal con respecto a los parámetros. En otras palabras esto es un vector constante a ($r \times 1$) y una matriz de regresión ($n \times r$) $Y(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}, \ddot{\mathbf{q}})$ talque

$$H(\mathbf{q})\ddot{\mathbf{q}} + C(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})\dot{\mathbf{q}} + \tau_g(\mathbf{q}) = Y(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}, \ddot{\mathbf{q}})a. \quad (2.9)$$

2.2. Control par calculado pasivo robusto

El modelo dinámico está caracterizado por el comportamiento del sistema robótico serial con cadena abierta en general, está compuesto de funciones no lineales de las variables de estado (posición y velocidades articulares). Esta es una característica del modelo dinámico que nos puede llevar a creer que, dado cualquier controlador, la ecuación diferencial que se usa en el sistema de control en lazo cerrado también debe estar compuesto por funciones no lineales de las variables de estado correspondientes. Sin embargo, existe un controlador no lineal en lazo cerrado y es descrito por una ecuación lineal diferencial[45]. Este controlador es capaz de cumplir el objetivo de un control de movimiento, globalmente y más aún una selección trivial de sus parámetros de diseño. Recibe el nombre de control par calculado. La ley de control par calculado es dado por

$$\tau = H(\mathbf{q})[\ddot{\mathbf{q}}_d + K_v\dot{\tilde{\mathbf{q}}} + K_p\tilde{\mathbf{q}}] + C(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})\dot{\mathbf{q}} + \mathbf{g}(\mathbf{q}), \quad (2.10)$$

donde K_v y K_p son matrices simétricas definidas positivas y $\tilde{\mathbf{q}} = \mathbf{q}_d - \mathbf{q}$ se refiere al error de posición. Darse cuenta que la ley de control anterior (2.10) contiene términos $K_p\tilde{\mathbf{q}} + K_v\dot{\tilde{\mathbf{q}}}$ que son términos de un tipo PD. Sin embargo estos términos son premultiplicados por la matriz de inercia $H(\mathbf{q}_d - \tilde{\mathbf{q}})$ por lo tanto no es un control no lineal como el PD, desde las ganancias de posición y la velocidad no son constantes pero dependen del error de posición $\tilde{\mathbf{q}}$. Esto podría ser claramente visto cuando la ley de control par calculado (2.10) se expresa como:

$$\tau = H(\mathbf{q}_d - \tilde{\mathbf{q}}) + K_p\tilde{\mathbf{q}} + H(\mathbf{q}_d - \tilde{\mathbf{q}})K_v\dot{\tilde{\mathbf{q}}} + H(\mathbf{q})\ddot{\mathbf{q}}_d + C(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})\dot{\mathbf{q}} + \mathbf{g}(\mathbf{q}). \quad (2.11)$$

El control par calculado pasivo robusto fue uno de los primeros modelos basados en control de movimiento creados un enfoque para manipuladores, esto es, cual hace uso explícito del conocimiento de las matrices $H(\mathbf{q})$, $C(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})$ y del vector $\mathbf{g}(\mathbf{q})$. Además, se observa que la trayectoria deseada de movimiento $\mathbf{q}_d(t)$, y sus derivadas $\dot{\mathbf{q}}_d(t)$ y $\ddot{\mathbf{q}}_d(t)$ tanto como las mediciones de $\mathbf{q}(t)$ y $\dot{\mathbf{q}}(t)$ se utilizan para el control par calculado

(2.12). La ecuación en lazo cerrado es obtenida por la sustitución de la acción de control (2.12) τ como en la ecuación del modelo robot obtenida en la Figura 2.3.

$$H(\mathbf{q})\ddot{\mathbf{q}} = H(\mathbf{q})[\ddot{\mathbf{q}}_d + K_v\dot{\tilde{\mathbf{q}}} + K_p\tilde{\mathbf{q}}] \quad (2.12)$$

Ya que $H(\mathbf{q})$ es una matriz definida positiva (Propiedad 2.1) y por lo tanto también es invertible la ecuación (2.12) se reduce a

$$\ddot{\tilde{\mathbf{q}}} + K_v\dot{\tilde{\mathbf{q}}} + K_p\tilde{\mathbf{q}} = 0$$

que a su vez puede ser expresada en términos del vector de estado $[\tilde{\mathbf{q}}^T \dot{\tilde{\mathbf{q}}}^T]^T$ como

$$\frac{d}{dt} \begin{pmatrix} \tilde{\mathbf{q}} \\ \dot{\tilde{\mathbf{q}}} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \dot{\tilde{\mathbf{q}}} \\ -K_p\tilde{\mathbf{q}} - K_v\dot{\tilde{\mathbf{q}}} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & I \\ -K_p & -K_v \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \tilde{\mathbf{q}} \\ \dot{\tilde{\mathbf{q}}} \end{pmatrix}, \quad (2.13)$$

donde I es la matriz de identidad de dimension n . Es importante esa observación de la ecuación (2.13) en lazo cerrado es representada por una ecuación diferencial lineal autónoma cuyo único punto de equilibrio es dado por $[\tilde{\mathbf{q}}^T \dot{\tilde{\mathbf{q}}}^T]^T = 0 \in \mathbb{R}^{2n}$. La unicidad del equilibrio se deriva del hecho de que la matriz K_p es diseñada para ser definida positiva por lo tanto no singular. Ya que la ecuación (2.13) en lazo cerrado es lineal y autónoma, esta solución puede ser obtenida en forma cerrada y ser utilizada para concluir sobre la estabilidad del origen. Sin embargo para fines pedagógicos, procedemos analizar la estabilidad del origen como el punto de equilibrio de la ecuación en lazo cerrado. Nosotros hacemos esto utilizando el método directo de Lyapunov. Para ello, comenzamos por introducir la constante ε satisfaciendo[46]

$$\lambda_{\min}(K_v) > \varepsilon > 0.$$

Multiplicando por $x^T x$ donde $x \in \mathbb{R}^n$ es cualquier vector distinto de cero, obtenemos $\lambda_{\min}(K_v)x^T x >^T x$ ya que K_v es una matriz simétrica entonces $x^T K_v x \geq \lambda_{\min}(K_v)x^T x$ y por lo tanto,

$$x^T [K_v - \varepsilon I] x > 0 \quad \forall x \neq 0 \in \mathbb{R}^n.$$

Esto significa que la matriz $K_v - \varepsilon I$ es definida positiva,

$$K_v - \varepsilon I > 0. \quad (2.14)$$

Considerando todo esto la matriz K_p es positiva y el de la constante ε concluimos los siguiente

$$K_p + \varepsilon K_v - \varepsilon^2 I > 0. \quad (2.15)$$

Considerando la siguiente función candidata a ser Lyapunov

$$\begin{aligned} V(\tilde{\mathbf{q}}, \dot{\tilde{\mathbf{q}}}) &= \frac{1}{2} \begin{pmatrix} \tilde{\mathbf{q}} \\ \dot{\tilde{\mathbf{q}}} \end{pmatrix}^T \begin{pmatrix} K_p + \varepsilon K_v & \varepsilon I \\ \varepsilon I & I \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \tilde{\mathbf{q}} \\ \dot{\tilde{\mathbf{q}}} \end{pmatrix} \\ &= \frac{1}{2} [\dot{\tilde{\mathbf{q}}} + \varepsilon \tilde{\mathbf{q}}]^T [\dot{\tilde{\mathbf{q}}} + \varepsilon \tilde{\mathbf{q}}] + \frac{1}{2} \tilde{\mathbf{q}}^T [K_p + \varepsilon K_v - \varepsilon^2 I] \tilde{\mathbf{q}}, \end{aligned} \quad (2.17)$$

donde la constante ε satisface (2.14) y por supuesto también (2.15) de esto se deduce la función (2.17) es definida globalmente positiva. Esto puede ser más claro si se reescribe la función candidata a ser Lyapunov $V(\tilde{\mathbf{q}}, \dot{\tilde{\mathbf{q}}})$ en (2.17) como

$$V(\tilde{\mathbf{q}}, \dot{\tilde{\mathbf{q}}}) = \frac{1}{2} \dot{\tilde{\mathbf{q}}}^T \dot{\tilde{\mathbf{q}}} + \frac{1}{2} \tilde{\mathbf{q}}^T [K_p + \varepsilon K_v] \tilde{\mathbf{q}} + \varepsilon \tilde{\mathbf{q}}^T \dot{\tilde{\mathbf{q}}}$$

Evaluando el tiempo total derivativo de $V(\tilde{\mathbf{q}}, \dot{\tilde{\mathbf{q}}})$ obtenemos

$$\dot{V}(\tilde{\mathbf{q}}, \dot{\tilde{\mathbf{q}}}) = \ddot{\tilde{\mathbf{q}}}^T \dot{\tilde{\mathbf{q}}} + \dot{\tilde{\mathbf{q}}}^T [K_p + \varepsilon K_v] \dot{\tilde{\mathbf{q}}} + \varepsilon \dot{\tilde{\mathbf{q}}}^T \dot{\tilde{\mathbf{q}}} + \varepsilon \dot{\tilde{\mathbf{q}}}^T \ddot{\tilde{\mathbf{q}}}.$$

Sustituyendo $\ddot{\tilde{\mathbf{q}}}$ de la ecuación en lazo cerrado (2.13) en la expresión anterior y haciendo algunas simplificaciones obtenemos

$$\begin{aligned} \dot{V}(\tilde{\mathbf{q}}, \dot{\tilde{\mathbf{q}}}) &= -\dot{\tilde{\mathbf{q}}}^T [K_v - \varepsilon I] \dot{\tilde{\mathbf{q}}} - \varepsilon \dot{\tilde{\mathbf{q}}}^T K_p \tilde{\mathbf{q}} \\ &= \begin{pmatrix} \tilde{\mathbf{q}} \\ \dot{\tilde{\mathbf{q}}} \end{pmatrix}^T \begin{pmatrix} \varepsilon K_p & 0 \\ 0 & K_v - \varepsilon I \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \tilde{\mathbf{q}} \\ \dot{\tilde{\mathbf{q}}} \end{pmatrix} \end{aligned} \quad (2.18)$$

Ahora se elige ε para que $k_v - \varepsilon I > 0$, y K_p es definida positiva, la función $\dot{V}(\tilde{\mathbf{q}}, \dot{\tilde{\mathbf{q}}})$ en (2.18) es definida globalmente negativa. Concluimos que el origen $[\tilde{\mathbf{q}}^T \dot{\tilde{\mathbf{q}}}^T]^T = 0 \in \mathbb{R}^n$ de la ecuación en lazo cerrado es uniformemente asintóticamente estable tal que

$$\begin{aligned} \lim_{t \rightarrow \infty} \dot{\tilde{\mathbf{q}}}(t) &= 0 \\ \lim_{t \rightarrow \infty} \tilde{\mathbf{q}}(t) &= 0 \end{aligned}$$

De lo cual se logra el objetivo de control de movimiento. De hecho, desde la ecuación (2.13) se observa que es lineal y autónoma esto es equivalente a la estabilidad exponencial global del origen. Para efectos prácticos, las matrices K_p y K_v pueden ser diseñadas de manera diagonal. Esto significa que la ecuación en lazo cerrado (2.15) representa el sistema lineal multivariable desacoplado que es el comportamiento dinámico de los errores de cada una de las posiciones articulares es gobernada por una ecuación diferencial lineal de segundo orden que son independientes el uno del otro. En este escenario la selección de las matrices K_p y K_v se puede especificar como

$$K_p = \text{diag}[\omega_1^2, \dots, \omega_n^2]$$

$$K_v = \text{diag}[2\omega_1, \dots, 2\omega_n]$$

Con esta elección, cada articulación responde como un sistema lineal críticamente amortiguado con ancho de banda ω_i . Este ancho de banda define la velocidad de la articulación en cuestión y consecuencia, la tasa decaimiento exponencial de los errores $\tilde{\mathbf{q}}(t)$ y $\dot{\tilde{\mathbf{q}}}(t)$ [46].

2.3. Diseño basado en pasividad del control por calculado pasivo robusto

Por lo que se propone una función candidata a ser Lyapunov la cual involucre directamente las referencias anteriores. Entonces la función de Lyapunov, queda de la siguiente manera: Proponiendo una función de Liapunov:

$$V(\mathbf{q}) = \frac{1}{2} \dot{\tilde{\mathbf{q}}}^T H(\mathbf{q}) \dot{\tilde{\mathbf{q}}} + \frac{1}{2} \tilde{\mathbf{q}}^T K_p \tilde{\mathbf{q}}, \quad (2.19)$$

derivando la función de Lyapunov

$$\dot{V}(\mathbf{q}) = \dot{\tilde{\mathbf{q}}}^T H(\mathbf{q}) \ddot{\tilde{\mathbf{q}}} + \frac{1}{2} \dot{\tilde{\mathbf{q}}}^T \dot{H}(\mathbf{q}) \dot{\tilde{\mathbf{q}}} + \dot{\tilde{\mathbf{q}}}^T K_p \tilde{\mathbf{q}}, \quad (2.20)$$

donde $\ddot{\tilde{\mathbf{q}}} = \ddot{\mathbf{q}} - \ddot{\mathbf{q}}_d$, y por la ecuación general de robótica

$$H(\mathbf{q}) \ddot{\mathbf{q}} = \tau - C(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) \dot{\mathbf{q}} - G(\mathbf{q}), \quad (2.21)$$

sabemos que $C(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) \dot{\tilde{\mathbf{q}}} = C(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) \dot{\mathbf{q}} - C(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) \dot{\mathbf{q}}_d$. y aplicando la propiedad de anti simetría

$$\dot{V}(\mathbf{q}) = \dot{\tilde{\mathbf{q}}}^T \tau - \dot{\tilde{\mathbf{q}}}^T C(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) \dot{\mathbf{q}}_d - \dot{\tilde{\mathbf{q}}}^T G(\mathbf{q}) - \dot{\tilde{\mathbf{q}}}^T H(\mathbf{q}) \ddot{\mathbf{q}}_d + \dot{\tilde{\mathbf{q}}}^T K_p \tilde{\mathbf{q}}. \quad (2.22)$$

Para garantizar que sea definida negativa se considera

$$\dot{V}(\mathbf{q}) = -\dot{\tilde{\mathbf{q}}}^T K_d \dot{\tilde{\mathbf{q}}}, \quad (2.23)$$

la entrada de control o el par que hace que se cumpla la ecuación anterior es:

$$\tau = H(\mathbf{q}) \ddot{\mathbf{q}}_d + C(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) \dot{\mathbf{q}}_d + G(\mathbf{q}) - K_d \dot{\tilde{\mathbf{q}}} - K_p \tilde{\mathbf{q}}. \quad (2.24)$$

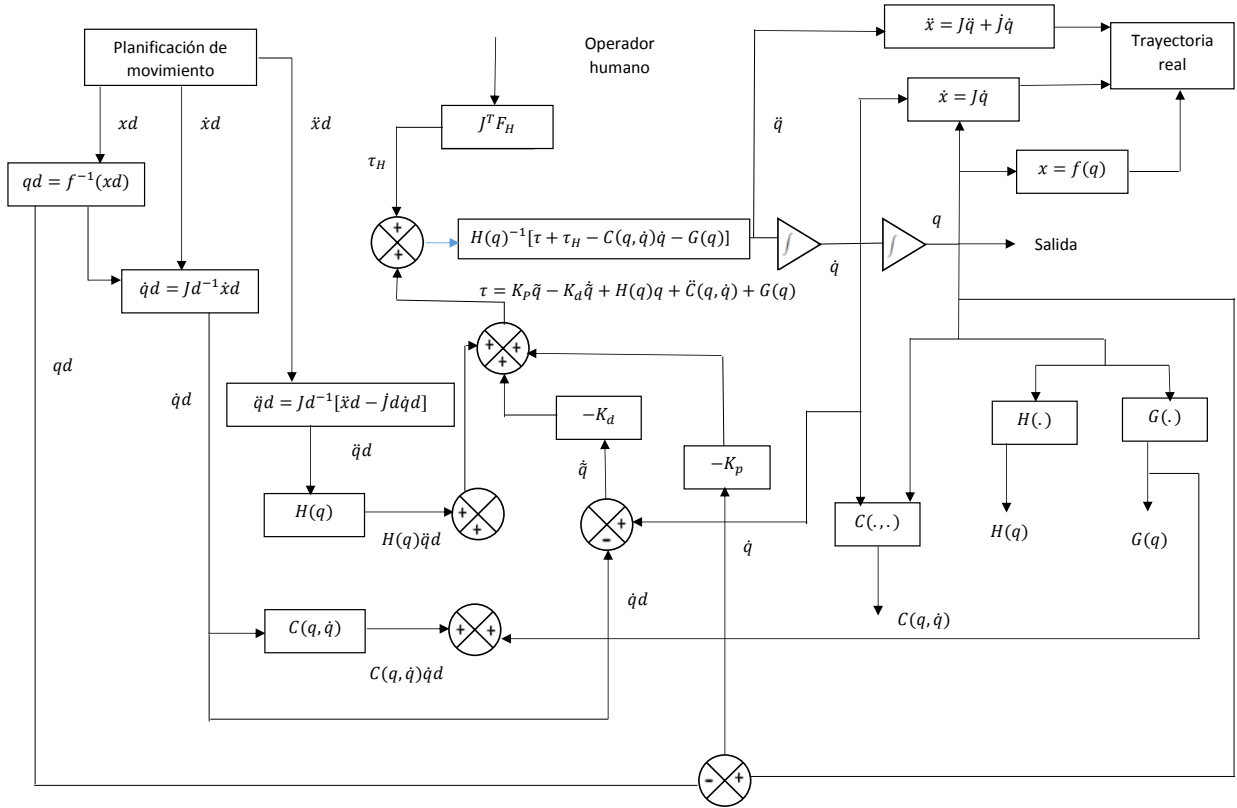


Figura 2.4: Diagrama de control par calculado pasivo robusto.

2.4. Diseño basado en pasividad del control PD+G

Ahora bien para resolver el problema de seguimiento de trayectorias es necesario involucrar aspectos dentro de la función de Lyapunov, donde se introduce un error de velocidad $\dot{\tilde{q}} = \dot{q} - \dot{q}_d$ donde \dot{q}_d sea una trayectoria y el problema de control involucra que se cumpla con:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} (\tilde{q}(t)) = \lim_{t \rightarrow \infty} (q - q_d) \rightarrow 0 \quad (2.25)$$

$$\lim_{t \rightarrow \infty} (\dot{\tilde{q}}(t)) = \lim_{t \rightarrow \infty} (\dot{q} - \dot{q}_d) \rightarrow 0. \quad (2.26)$$

Ecuación estándar de robótica

$$H(\mathbf{q})\ddot{\mathbf{q}} + C(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})\dot{\mathbf{q}} + G(\mathbf{q}) = \tau, \quad (2.27)$$

donde $|H(\mathbf{q})| \geq 0$. Para la prueba proponemos una función de Lyapunov:

$$V(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) = \frac{1}{2}\dot{\mathbf{q}}^T H(\mathbf{q})\dot{\mathbf{q}} + \frac{1}{2}\tilde{\mathbf{q}}^T K_d \tilde{\mathbf{q}}, \quad (2.28)$$

sabemos $V(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) > 0$, $\dot{\mathbf{q}}^T H(\mathbf{q})\dot{\mathbf{q}} > 0$ y $\dot{\mathbf{q}}^T (\frac{1}{2}\dot{H}(\mathbf{q}) - C(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})\dot{\mathbf{q}})\dot{\mathbf{q}} = 0$,

finalmente queda de la siguiente manera

$$\dot{V}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) = \dot{\mathbf{q}}^T \tau - \dot{\mathbf{q}}^T G(\mathbf{q}) + \dot{\mathbf{q}}^T K_d \dot{\mathbf{q}}, \quad (2.29)$$

por simplicidad es trivial que el control τ es solución a esta ecuación, y resulta:

$$\tau = -k_d \dot{\mathbf{q}} + G(\mathbf{q}). \quad (2.30)$$

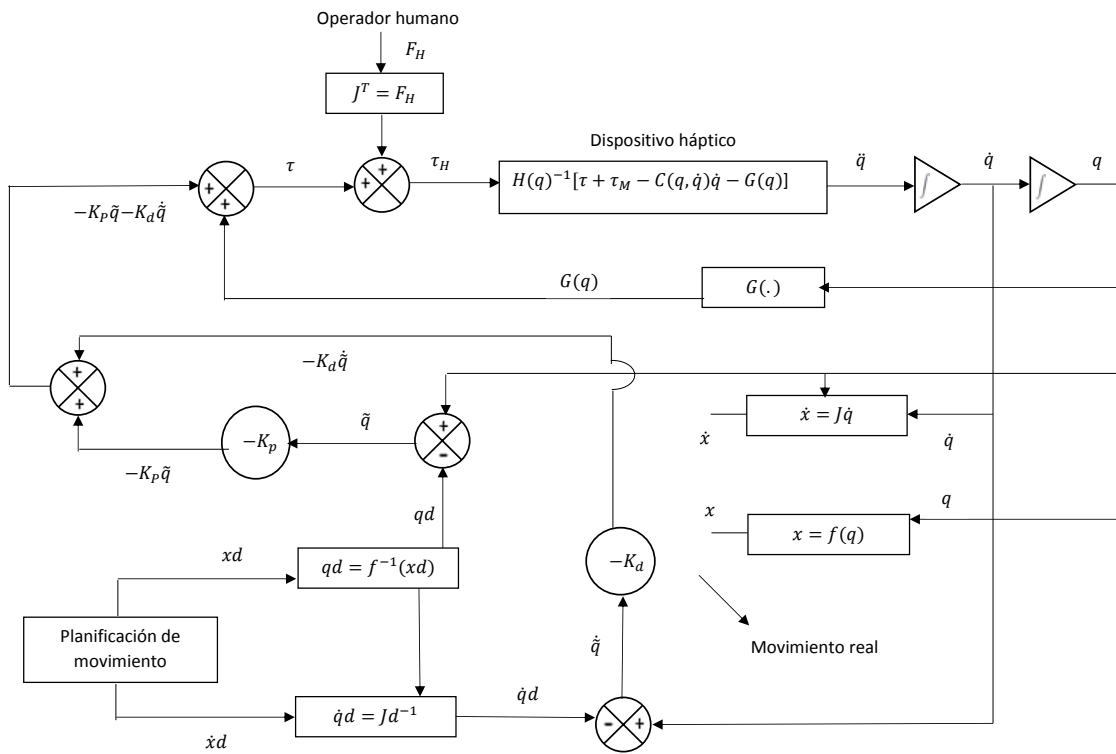


Figura 2.5: Diagrama de control PD+G.

Capítulo 3

Control inteligente de sistemas HRpI

3.1. Introducción

La interacción háptica con un objeto virtual establece una sensación cinestésica para el usuario. es aceptado que para percibir mejor un objeto virtual dado, es relevante proporcionar algunas propiedades de superficie del objeto, por ejemplo, la forma a través de la fuerza de contacto normal, y la textura como una combinación de ambos. basado en una nueva formulación del cálculo de la fuerza de contacto de interfaces háptica, se propone un nuevo paradigma para la orientación háptica. Se proporciona información cinestésica guiada para mejorar y capacitar eficazmente al usuario con el control del robot PID wavenet. El sistema introduce una ruta de entrenamiento utilizando campos potenciales, que pueden ajustarse de acuerdo con la puntuación de desventaja del usuario, mejorando gradualmente las habilidades motoras del usuario. Con este fin, presentamos una plataforma de guía háptica para apoyar la rehabilitación física de discapacidades neuromusculares, que brinda una solución al problema de la creciente demanda de terapia neuromuscular en instalaciones superpobladas con déficit de profesionales en rehabilitación. La plataforma, caracterizada por una arquitectura modular portátil, se puede configurar de acuerdo con el tratamiento sugerido por el médico, por ejemplo, una configuración de guía háptica local para pacientes que requieren una repetición continua de movimientos coordinados para recuperar o mejorar las habilidades motoras y una asistencia remota. Guía háptica para una intervención directa del terapeuta, evaluando y estimulando, simultáneamente, el estado neuromuscular del paciente. Para este objetivo, se propone y sintetiza un novedoso

esquema de control PID global para un sistema MIMO no lineal para una interfaz háptica. El proceso de identificación (HRPI) utilizado para sintonizar las ganancias de retroalimentación del PID discreto. La identificación de la dinámica inversa es basada en la red neuronal de base radial con funciones de activación wavelets hijas tipo MORLET con un filtro en cascada de respuesta de impulso infinito (IIR) en la salida para eliminar nodos y señales irrelevantes. El sistema en lazo cerrado garantiza la regulación global para una clase de sistemas de Euler-Lagrange, conveniente, por ejemplo, en plantas cuya dinámica es bastante incierta o desconocida, en los dispositivos hápticos.

El control PID wavenet está conformado por tres bloques funcionales principales: el controlador PID, la red neuronal wavenet y el algoritmo de sintonización. El controlador PID es un PID discreto que genera la señal de control que lleva la planta hasta la referencia, y reduce el efecto de perturbaciones en el ciclo de control principal. La red neuronal wavenet se encarga de aproximar localmente el comportamiento de la planta desconocida, y genera una señal de estimación de la salida de la planta. El algoritmo de sintonización, a través de un algoritmo de minimización del error, calcula los nuevos valores para las ganancias del controlador y los parámetros de la red neuronal. El desarrollo a continuación está basado en el algoritmo desarrollado en [2].

3.2. Algoritmos del control PID

Un control PID clásico actúa sobre la señal de error e aplicando tres acciones correctivas diferentes para generar una señal de control, como se muestra en la ecuación 3.1,

$$u_c(k) = k_P e(t) + k_I \int_0^t e(t) dt + k_D \frac{de(t)}{dt} \quad (3.1)$$

donde k_P , k_I y k_D son las ganancias proporcional, integral y derivativa, respectivamente. El término integral tiende a capturar la información de baja frecuencia y afecta el error en estado estacionario, mientras que el término derivativo responde a la información de alta frecuencia y afecta el estado transitorio de la señal de salida de la planta. En el caso del tiempo discreto, la ley de control PID se expresa como:

$$u_c(k) = k_P e(k) + k_I \sum_{i=0}^k e(k) + k_D [e(k) - e(k-1)] \quad (3.2)$$

La expresión integral de la ley de control del PID discreto se escribe como:

$$\Delta u_c(k) = u_c(k) - u_c(k-1) \quad (3.3)$$

Sustituyendo 3.2 en 3.3 se obtiene

$$\begin{aligned} \Delta u_c(k) = & k_P e(k) + k_I \sum_{i=0}^k e(i) + k_D [e(k) - e(k-1)] - k_P e(k-1) + \\ & k_I \sum_{i=0}^k e(k-1) + k_D [e(k-1) - e(k-2)] \end{aligned}$$

$$\Delta u_c(k) = k_P [e(k) - e(k-1)] + k_I e(k) + k_D [e(k) - 2e(k-1) + e(k-2)] \quad (3.4)$$

Finalmente

$$u_c(k) = u_c(k-1) + k_P [e(k) - e(k-1)] + k_I e(k) + k_D [e(k) - 2e(k-1) + e(k-2)] \quad (3.5)$$

Corresponde a la ley de control PID en tiempo discreto.

3.3. Autosintonización de un PID mediante una red *wavenet*

Los enfoques de control adaptables tradicionales son limitados en lo que respecta a no poder tratar con sistemas no lineales complejos. Típicamente, estas técnicas suponen que el modelo de control está operando en una región lineal. Los parámetros del modelo de la planta linealizada son calculados recursivamente y usados para actualizar el controlador. En general, el diseño de un controlador basado en el análisis matemático para tales plantas que constan de la no linealidad e incertidumbres, es muy complicado. El problema empeora cuando las funciones que describen la planta son desconocidas y variantes en el tiempo. Tales problemas de control adaptable no lineal variantes en el tiempo no lineales están surgiendo con una frecuencia creciente en la tecnología de hoy. Por esto es importante desarrollar una técnica eficaz en la que la estructura de los modelos desconocidos de la planta ya sea lineales o no lineales pueden ser identificados como un proceso adaptable; y los controladores tienen que ser diseñados para actuar rápidamente, con exactitud y en un modo estable [8].

3.4. Esquema de identificación *wavenet* y sintonización del PID

El esquema de identificación *wavenet* y sintonización se muestra en la Figura 4.29. En él se pueden identificar las tres etapas que manipulan la salida del sistema dinámico MIMO no lineal: identificación, autosintonización y control PID. En la Tabla 3.1 se muestran las distintas variables que intervienen en cada etapa, las cuales se describen a continuación:

Tabla 3.1: Variables que intervienen en cada una de las etapas.

$y_{ref}(k)$	Referencia deseada
$\epsilon(k)$	Error de seguimiento
$u_c(k)$	Señal de control del PID
$u_h(k)$	Señal de control del usuario
$\mathbf{u}(k)$	Señal de control total
$r(k)$	Señal de ruido
$\mathbf{y}(k)$	Salida de la planta
$\hat{\mathbf{y}}(k)$	Salida estimada
$\mathbf{e}(k)$	Error de estimación
$v(k)$	Señal de persistencia

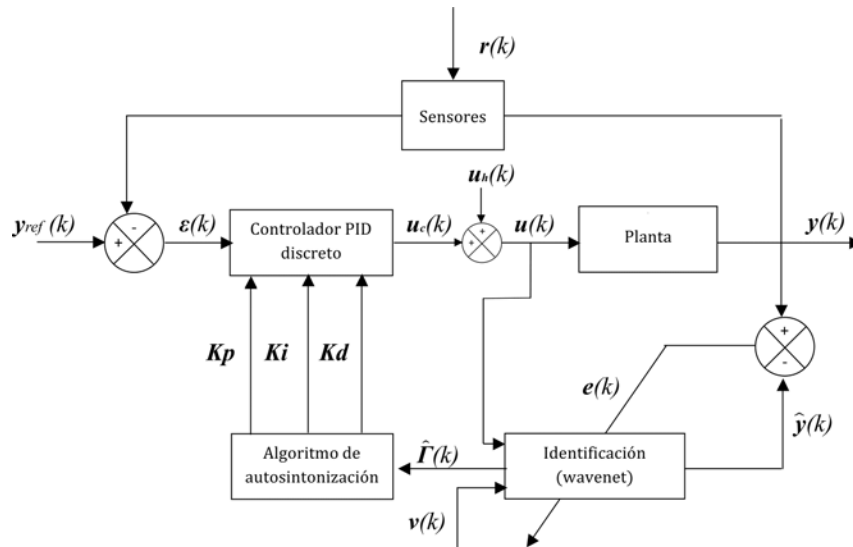


Figura 3.1: Diagrama a bloques del controlador PID auto-sintonizable.

3.4.1. Identificación del sistema

El proceso de identificación se hace mediante una red neuronal de base radial en la que las funciones de activación $\psi(\tau)$ son funciones *wavelets* hijas $\psi_l(\tau_l)$ del tipo Morlet, la selección de dicha wavelet se debe principalmente a la sencillez para ser programada. Además, cuenta en cascada con p filtros IIR que tienen como función filtrar (podar) las neuronas que tienen poca contribución en el proceso de identificación, permitiendo

con esto reducir el número de iteraciones en el proceso de aprendizaje [13]. Estos dos elementos se pueden ver en las Figuras 3.2 y 3.3, respectivamente.

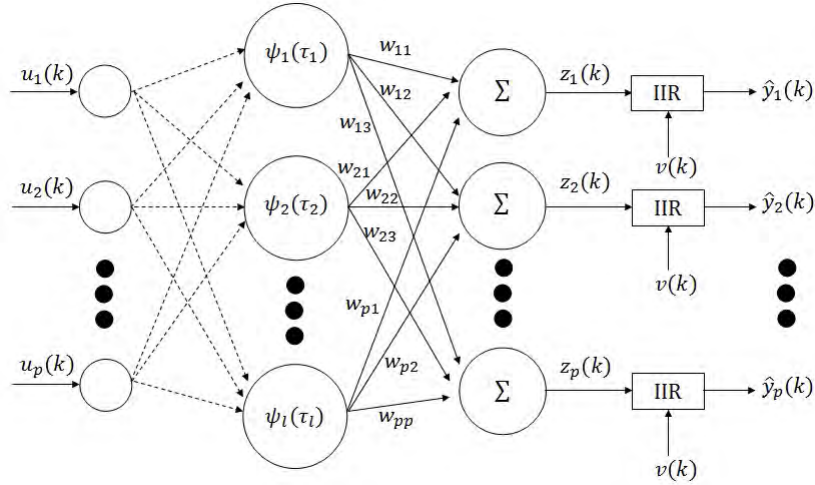


Figura 3.2: Diagrama de la red neuronal *wavenet*, donde $\tau_l = \frac{\|\mathbf{u}(k) - \mathbf{b}_l\|}{a_l}$

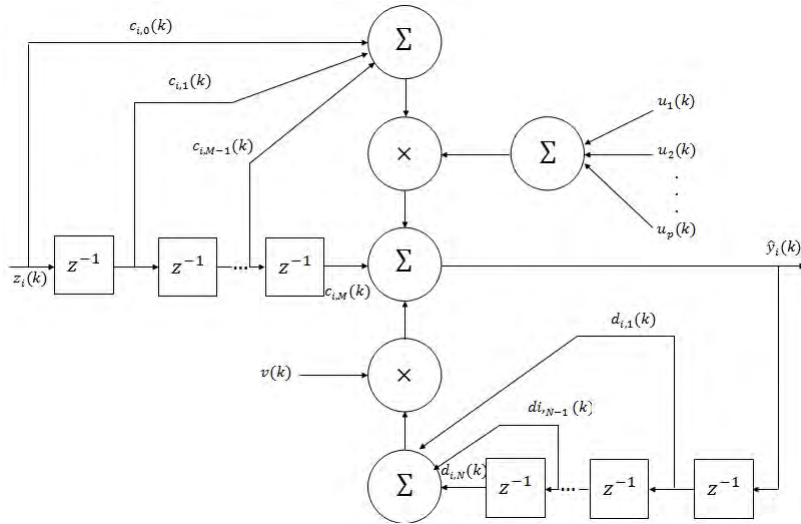


Figura 3.3: Estructura del filtro IIR.

En el caso de una red neuronal multivariable, se propone:

$$\tau_{l_j} = \left(\sum_{j=1}^p (u_j - b_{l,j})^2 \right)^{1/2} / a_{l_j}, \quad (3.6)$$

donde a_{l_j} es la j -ésima variable de escala, que permite dilataciones y contracciones, $b_{l,j}$

es el (l, j) -ésimo elemento de traslación, que permite desplazamientos en el instante k . La representación matemática de la *wavelet* Morlet está dada por:

$$MORLET = \cos(\omega_0\tau)e^{-0.5\tau^2},$$

La i -ésima señal de aproximación de la *wavenet* con filtro IIR $\hat{y}_i(k)$ puede ser calculada como:

$$\hat{y}_i(k) = \sum_{q=1}^p \sum_{l=0}^M c_{i,l} z_i(k-l) u_p(k) + \sum_{j=1}^N d_{i,j} \hat{y}_i(k-j) v(k), \quad (3.7)$$

donde

$$z_i(k) = \sum_{l=1}^L w_{i,l} \psi_l(k), \quad (3.7)$$

L es el número de *wavelets* hijas, $w_{i,l}$ son los pesos de cada neurona en la *wavenet*, $c_{i,i}$ y $d_{i,j}$ son los coeficientes de adelanto y atraso del filtro IIR, respectivamente. M y N representan el número de los coeficientes de adelanto y atraso del mismo filtro, respectivamente. Los parámetros de la *wavenet* son optimizados por medio de un algoritmo de aprendizaje basado en mínimos cuadrados medios (LMS), tras minimizar las funciones de costo de \mathbf{E} , definidas como:

$$\mathbf{E} = \left[E_1 \quad E_2 \quad \cdots \quad E_i \quad \cdots \quad E_p \right]^T, \quad (3.7)$$

para el caso particular de la i -ésima salida se tiene que E_i está dado por:

$$E_i = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^T e_i^2(k), \quad (3.7)$$

donde el error de estimación $e_i(k)$ se define como la diferencia entre la salida de la *wavenet* con filtro IIR $\hat{y}_i(k)$ y la salida real del sistema $y_i(k)$, es decir:

$$e_i(k) = y_i(k) - \hat{y}_i(k), \quad (3.7)$$

Para minimizar \mathbf{E} se aplica el método del descenso más pronunciado (steepest decent), para el cual se requiere el cálculo de los gradientes: $\frac{\partial \mathbf{E}}{\partial \mathbf{A}(k)}$, $\frac{\partial \mathbf{E}}{\partial \mathbf{B}(k)}$, $\frac{\partial \mathbf{E}}{\partial \mathbf{W}(k)}$, $\frac{\partial \mathbf{E}}{\partial \mathbf{C}(k)}$, $\frac{\partial \mathbf{E}}{\partial \mathbf{D}(k)}$, para actualizar los cambios incrementales de cada parámetro en particular y que para cada coeficiente se define como el negativo de sus gradientes:

$$\Delta \mathbf{W}(k) = -\frac{\partial \mathbf{E}}{\partial \mathbf{W}(k)} \quad (3.7)$$

$$\Delta \mathbf{A}(k) = -\frac{\partial \mathbf{E}}{\partial \mathbf{A}(k)} \quad (3.7)$$

$$\Delta \mathbf{B}(k) = -\frac{\partial \mathbf{E}}{\partial \mathbf{B}(k)} \quad (3.7)$$

$$\Delta \mathbf{C}(k) = -\frac{\partial \mathbf{E}}{\partial \mathbf{C}(k)} \quad (3.7)$$

$$\Delta \mathbf{D}(k) = -\frac{\partial \mathbf{E}}{\partial \mathbf{D}(k)} \quad (3.7)$$

Así cada coeficiente de la red *wavenet* es actualizado en concordancia con las siguientes reglas:

$$\mathbf{W}(k+1) = \mathbf{W}(k) + \mu_{\mathbf{W}} \Delta \mathbf{W}(k) \quad (3.7)$$

$$\mathbf{A}(k+1) = \mathbf{A}(k) + \mu_{\mathbf{A}} \Delta \mathbf{A}(k) \quad (3.7)$$

$$\mathbf{B}(k+1) = \mathbf{B}(k) + \mu_{\mathbf{B}} \Delta \mathbf{B}(k) \quad (3.7)$$

$$\mathbf{C}(k+1) = \mathbf{C}(k) + \mu_{\mathbf{C}} \Delta \mathbf{C}(k) \quad (3.7)$$

$$\mathbf{D}(k+1) = \mathbf{D}(k) + \mu_{\mathbf{D}} \Delta \mathbf{D}(k) \quad (3.7)$$

3.5. Sistemas no lineales discretos

Los sistemas dinámicos MIMO no lineales pueden ser descritos por las siguientes ecuaciones de estado discretas [18]:

$$\mathbf{x}(k+1) = f[\mathbf{x}(k), \mathbf{u}(k), k] \quad (3.8)$$

$$\mathbf{y}(k) = g[\mathbf{x}(k), k] \quad (3.9)$$

donde $\mathbf{x} \in \mathbb{R}^n$, $\mathbf{u}, \mathbf{y} \in \mathbb{R}^p$ y

$$f : \mathbb{R}^n \times \mathbb{R}^p \longrightarrow \mathbb{R}^n \quad (3.10)$$

$$g : \mathbb{R}^n \longrightarrow \mathbb{R}^p \quad (3.11)$$

son funciones no lineales que se asumen desconocidas. La entrada $\mathbf{u}(k)$ y la salida del sistema $\mathbf{y}(k)$ corresponden a las señales disponibles. Si el sistema es linealizado alrededor del punto de equilibrio y es observable, existe una representación entrada-salida del mismo sistema dada por [18]:

$$\mathbf{y}(k+1) = \beta[\mathbf{Y}(k), \mathbf{U}(k)] \quad (3.12)$$

donde

$$\mathbf{Y}(k) = [\mathbf{y}(k) \ \mathbf{y}(k-1), \dots, \mathbf{y}(k-n+1)] \quad (3.13)$$

$$\mathbf{U}(k) = [\mathbf{u}(k) \ \mathbf{u}(k-1), \dots, \mathbf{u}(k-n+1)] \quad (3.14)$$

En otras palabras, existe una función β que mapea a la salida $\mathbf{y}(k)$, la entrada $\mathbf{u}(k)$ y sus $n-1$ valores pasados en $\mathbf{y}(k+1)$. Un modelo alternativo de una planta desconocida que puede simplificar el algoritmo de control es el siguiente:

$$\mathbf{y}(k+1) = \Phi[\mathbf{Y}(k), \mathbf{U}(k)] + \Gamma[\mathbf{Y}(k), \mathbf{U}(k)] \cdot \mathbf{u}(k) \quad (3.14)$$

si los términos Φ y Γ son exactamente conocidos, la señal de control $\mathbf{u}(k)$ para obtener la salida deseada $\mathbf{y}_{ref}(k+1)$ es:

$$\mathbf{u}(k) = \Gamma^{-1}[\mathbf{Y}(k), \mathbf{U}(k)](\mathbf{y}_{ref}(k+1) - \Phi[\mathbf{Y}(k), \mathbf{U}(k)]) \quad (3.14)$$

Sin embargo, los términos Φ y Γ son desconocidos. Por lo tanto, se utiliza una red neuronal *wavenet* con filtro IIR en cascada como la que se muestra en la Figura 3.2, para poder aproximar las dinámicas del sistema como sigue:

$$\hat{\mathbf{y}}(k+1) = \hat{\Phi}[\mathbf{y}(k), \Theta_{\Phi}] + \hat{\Gamma}[\mathbf{y}(k), \Theta_{\Gamma}] \cdot \mathbf{u}(k) \quad (3.14)$$

comparando la expresión anterior (3.5) con la salida estimada de la *wavenet* con filtro IIR (3.7) se obtiene

$$\hat{\Phi}_i[\mathbf{y}(k), \Theta_{\Phi}] = \sum_{j=1}^N d_{i,j} \hat{\mathbf{y}}(k-j) v(k) \quad (3.15)$$

$$\hat{\Gamma}_{i,q}[\mathbf{y}(k), \Theta_{\Gamma}] = \sum_{q=1}^p \sum_{l=0}^M c_{i,l} z_i(k-i) u_q \quad (3.16)$$

$$z_i(k) = \sum_{l=1}^L w_{i,l} \psi_l(k) \quad (3.17)$$

donde $\hat{\Phi}_i$ representa la i -ésima componente de $\hat{\Phi}$, mientras que $\hat{\Gamma}_{i,q}$ es el (i, q) elemento de la matriz $\hat{\Gamma}$. Por lo tanto, si ambas no linealidades Φ y Γ son estimadas por las dos

funciones de la *wavenet* $\hat{\Phi}$ y $\hat{\Gamma}$ con parámetros ajustables Θ_{Φ} y Θ_{Γ} respectivamente, la señal de control del PID que sigue la referencia deseada $\mathbf{y}_{ref}(k)$ puede ser calculada como [3, 17, 25]:

$$\begin{aligned} u_{\sigma}(k+1) = & u_{\sigma}(k) + k_{p_{\sigma}}(k)[\varepsilon_{\sigma}(k) - \varepsilon_{\sigma}(k-1)] + k_{i_{\sigma}}(k)\varepsilon_{\sigma}(k) \\ & + k_{d_{\sigma}}(k)[\varepsilon_{\sigma}(k) - 2\varepsilon_{\sigma}(k-1) + \varepsilon_{\sigma}(k-2)] \end{aligned} \quad (3.18)$$

donde $k_{p_{\sigma}}(k)$, $k_{i_{\sigma}}(k)$ y $k_{d_{\sigma}}(k)$ son las ganancias proporcional, integral y derivativa del σ -ésimo controlador PID, $u_{\sigma}(k)$ es la σ -ésima entrada de la planta en el instante k , y

$$\varepsilon_{\sigma}(k) = y_{ref_{\sigma}}(k) - y_{\sigma}(k) \quad (3.18)$$

donde $\sigma = 1, 2, 3, \dots, p$.

3.5.1. Auto-sintonización

Como las ganancias de los controladores $k_{p_{\sigma}}(k)$, $k_{i_{\sigma}}(k)$ y $k_{d_{\sigma}}(k)$ fueron consideradas en la función de costo \mathbf{E} pueden ser actualizadas de la siguiente forma

$$\begin{aligned} k_{p_{\sigma}}(k) &= k_{p_{\sigma}}(k-1) + \mu_p e_{\sigma}(k) \hat{\Gamma}_{i,q}(k) [\varepsilon_{\sigma}(k) - \varepsilon_{\sigma}(k-1)] \\ k_{i_{\sigma}}(k) &= k_{i_{\sigma}}(k-1) + \mu_i e_{\sigma}(k) \hat{\Gamma}_{i,q}(k) \varepsilon_{\sigma}(k) \\ k_{d_{\sigma}}(k) &= k_{d_{\sigma}}(k-1) + \mu_d e_{\sigma}(k) \hat{\Gamma}_{i,q}(k) \\ & \quad [\varepsilon_{\sigma}(k) - 2\varepsilon_{\sigma}(k-1) + \varepsilon_{\sigma}(k-2)] \end{aligned}$$

donde $\hat{\Gamma}_{i,q}(k)$ es el elemento (i, q) de la matriz $\hat{\Gamma}$ de la identificación del sistema descrita por (3.16). Las constantes μ son las tasas de aprendizaje de las ganancias del controlador PID. Los parámetros para la red neuronal *wavenet* se dan en la Tabla 3.2, los valores iniciales del experimento se muestran en la Tabla 3.3.

Tabla 3.2: Parámetros de la red neuronal *wavenet* y los filtros IIR para el experimento

Neuronas	3
Coefficientes de atraso del filtro IIR	3
Coefficientes de adelanto del filtro IIR	2
Epocas	20
Señal de persistencia v	0.5
Wavelet	Morlet

Tabla 3.3: Valores iniciales y tasas de aprendizaje.

W	$\begin{bmatrix} 0.5 & 0.5 & 0.5 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$	$\mu_{\mathbf{W}}$	0.5
A	$\begin{bmatrix} -302 & -55 & -14.2 \end{bmatrix}$	$\mu_{\mathbf{A}}$	0.5
B	$\begin{bmatrix} 8 & 9 & 10 \\ 8 & 9 & 10 \\ 8 & 9 & 10 \end{bmatrix}$	$\mu_{\mathbf{B}}$	0.5
C	$\begin{bmatrix} 2.5 & 2.5 & 2.5 \\ 0.5 & 0.5 & 2.5 \\ 0.5 & 0.5 & 2.5 \end{bmatrix}$	$\mu_{\mathbf{C}}$	0.5
D	$\begin{bmatrix} 0.63 & 2.75 \\ 0.43 & 1.75 \\ 0.51 & 1.75 \end{bmatrix}$	$\mu_{\mathbf{D}}$	0.5
K_p	$\begin{bmatrix} 16.66 & 22.24 & 9.42 \end{bmatrix}$	$\mu_{\mathbf{K}_p}$	0.5
K_i	$\begin{bmatrix} 2.77 & 3.84 & 1.85 \end{bmatrix}$	$\mu_{\mathbf{K}_i}$	0.5
K_d	$\begin{bmatrix} 0.09 & 0.065 & 0.135 \end{bmatrix}$	$\mu_{\mathbf{K}_d}$	0.5

3.6. Regulación basada en seguimiento

Se propone un conjunto de polinomios para un desempeño óptimo en tareas de regulación. La regulación basada en seguimiento es de gran importancia para hacer frente a la regulación de punto a punto. En nuestro enfoque este puede ser implementado por una función que está diseñado de tal forma que garantice una transición suave entre los puntos. $\xi(t)$ es conocida como generador de tiempo con rangos de 0 a 1 en un tiempo finito arbitrario $t = t_b > 0$ con t_b como el tiempo de convergencia deseado, elegido arbitrariamente por el diseñador y $\xi(t)$ es tal que $\dot{\xi}(t_0) = \dot{\xi}(t_b) \equiv 0$. [8] El polinomio propuesto $\xi(t)$ es dado por:

$$\xi(t) = a_3 \frac{(t - t_0)^3}{(t_b - t_0)^3} - a_4 \frac{(t - t_0)^4}{(t_b - t_0)^4} + a_5 \frac{(t - t_0)^5}{(t_b - t_0)^5} \quad (3.14)$$

Si derivamos (3.6) obtenemos la velocidad

$$\dot{\xi}(t) = 3a_3 \frac{(t - t_0)^2}{(t_b - t_0)^3} - 4a_4 \frac{(t - t_0)^3}{(t_b - t_0)^4} + 5a_5 \frac{(t - t_0)^4}{(t_b - t_0)^5} \quad (3.14)$$

y la segunda derivada de (3.6) esta dada por

$$\ddot{\xi}(t) = 6a_3 \frac{(t-t_0)}{(t_b-t_0)^3} - 12a_4 \frac{(t-t_0)^2}{(t_b-t_0)^4} + 20a_5 \frac{(t-t_0)^3}{(t_b-t_0)^5} \quad (3.14)$$

El generador de base debe cumplir con $\xi(t_0) = 0$, $\xi(t_b) = 1$, $\dot{\xi}(t_0) = 0$, $\dot{\xi}(t_b) = 0$ y $\ddot{\xi}(\frac{1}{2}t_b) = 0$, [6]. Los coeficientes están definidos por las siguientes ecuaciones:

$$\begin{aligned} a_3 - a_4 + a_6 &= 1 \\ 3a_3 - 4a_4 + 5a_6 &= 0 \\ 6a_3 - 12a_4 + 20a_6 &= 0 \end{aligned}$$

donde $a_3 = 10$, $a_4 = 15$ y $a_6 = 6$.

Capítulo 4

Exposición concluyente de resultados

4.1. Introducción a la plataforma

El dispositivo háptico Geomagic Touch mejora la productividad y la eficiencia, al permitir la interacción humano/robot de la manera más intuitiva posible y la capacidad de resolver problemas mediante el tacto. El modelo Geomagic Touch es un dispositivo háptico rentable. La retroalimentación de fuerza de alta fidelidad del sistema Geomagic Touch puede detectar el movimiento en 6 grados de libertad, proporcionando la mejor y más realista sensación Touch 3D para cualquier aplicación. Puedes sentir el punto del stylus en todos los ejes, y seguir su orientación (cabeceo, balanceo y guiñada). El diseño portátil de Geomagic Touch tiene un tamaño compacto y un puerto de conexión Ethernet.

4.1.1. Características

- Diseño del manipulador de forma diestra.
- Espacio operacional de 6 grados de libertad.
- Diseño portátil y espacio compacto para flexibilidad en el lugar de trabajo.
- Espacio de trabajo compacto para facilidad de uso.
- Cómodo lápiz óptico de goma moldeada con pintura texturizada para uso a largo plazo y agarre seguro.

4.1.2. Requerimientos del sistema

El dispositivo háptico Geomagic Touch requiere ciertos componentes de hardware y software para poder funcionar correctamente. Esta sección describe los requisitos mínimos para operar el dispositivo háptico Geomagic Touch.

- Procesador Intel Core 2 Duo o mejor.
- Puerto Ethernet o puerto USB integrado en RJ45.
- Windows 7 o Windows 8.
- 512 MB de espacio libre en el disco duro.
- 2 GB de RAM.
- La versión más actual del controlador Geomagic Touch Device.
- Cable Ethernet RJ45 suministrado por Geomagic.
- Tarjeta de red que admite compatibilidad Ethernet 10/100 MBPS.

4.1.3. Plataforma experimental

Considerando la interfaz Geomagic Touch, cuyo dispositivo háptico es un robot articular no lineal de tres grados de libertad, como se ve en la Figura 4.1, en el cual se muestra una inercia aparentemente baja en su efector final, el cual muestra una inercia aparentemente baja, surge un fuerte acoplamiento no lineal y está sujeto a la fricción articular y a los pares de gravedad.



Figura 4.1: Plataforma experimental.

4.2. Experimentos control no lineal avanzado de sistemas HRpI

Se realizó la comparación del desempeño del control PD+G y el control par calculado pasivo robusto, a partir del tiempo de convergencia a la trayectoria deseada, comparación del error de posición articular, el par de entrada global, medición de la energía total y la misma posición inicial en la coordenada $(0,0,0)$. La tarea consistió en regulación basada en seguimiento de una trayectoria determinada por las siguientes ecuaciones paramétricas:

$$\begin{aligned}x_d &= h + r\cos(\omega t) \\y_d &= 0 \\z_d &= k + r\sin(\omega t)\end{aligned}$$

donde $h = 0$, $k = 0$, $r = 20\text{mm}$, $\omega = 2\pi f$, que se proponen considerando el espacio de trabajo del dispositivo háptico Geomagic Touch.

La velocidad y aceleración deseadas se definen por la primera y segunda derivada respectivamente de las ecuaciones paramétricas definidas anteriormente. La frecuencia de muestreo $f = 1\text{ KHz}$ y el tiempo de ejecución es de 20 segundos.

Se emplea el modelo cinemático directo e inverso de posición y velocidad para poder leer la posición operacional con los encoders ópticos del dispositivo háptico y aplicar un control articular a los actuadores.

4.2.1. Control PD+G

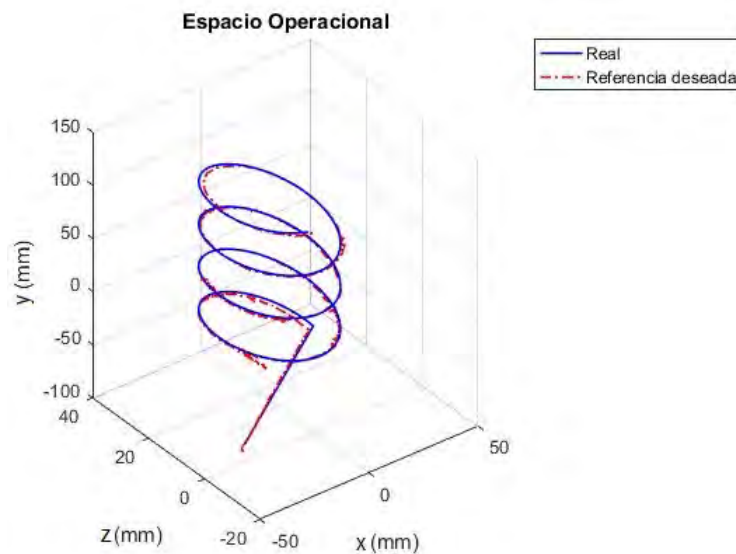


Figura 4.2: Espacio de trabajo.

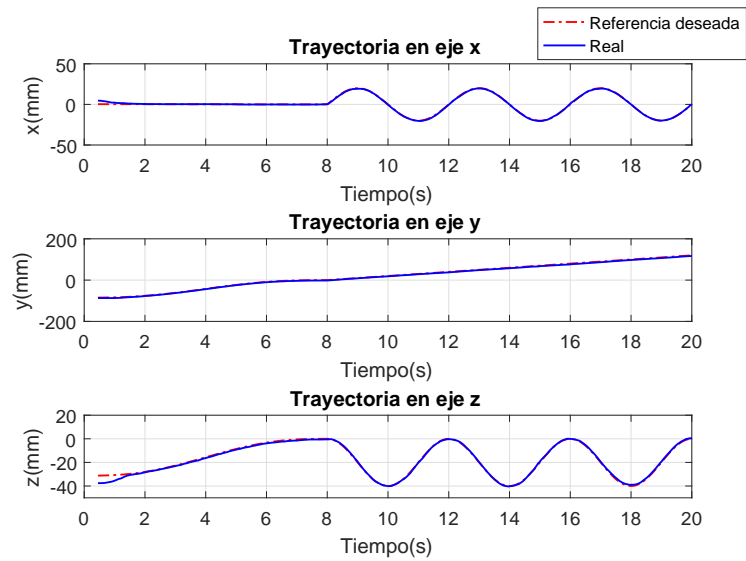


Figura 4.3: Trayectoria caartesiana del control PD+G.

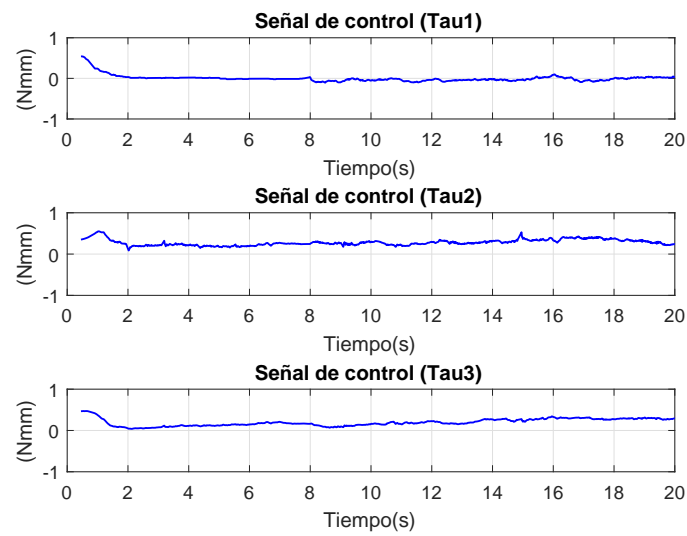


Figura 4.4: Señal de control PD+G.

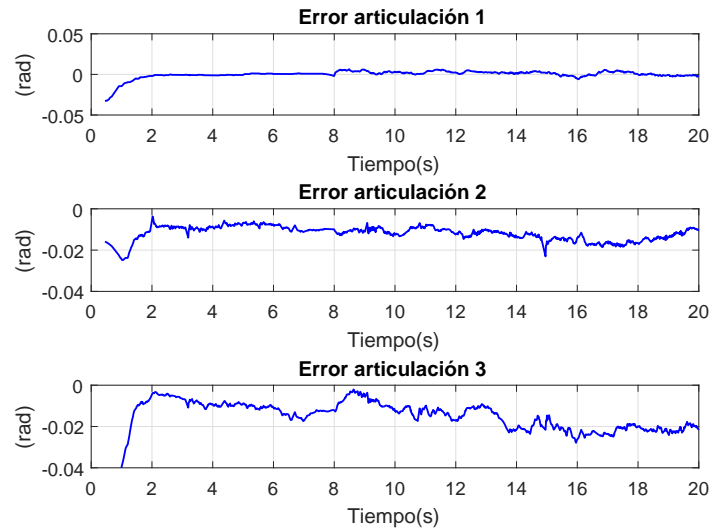


Figura 4.5: Error articular del control PD+G.

4.2.2. Control par calculado pasivo robusto

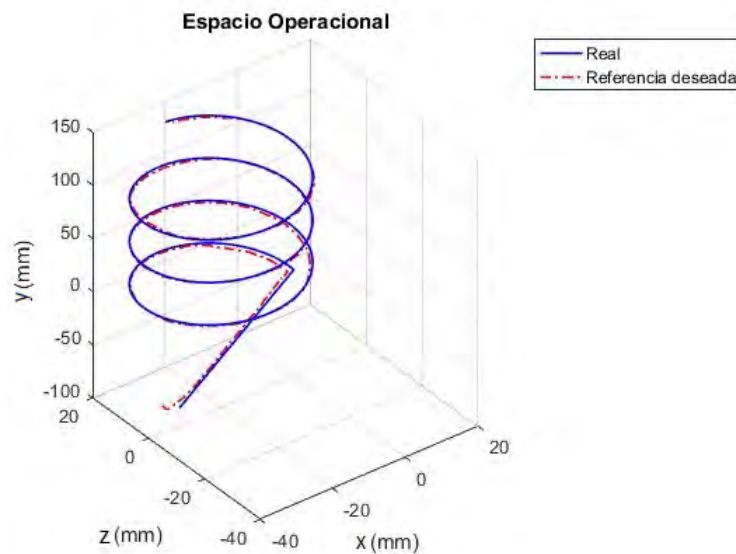


Figura 4.6: Espacio de trabajo.

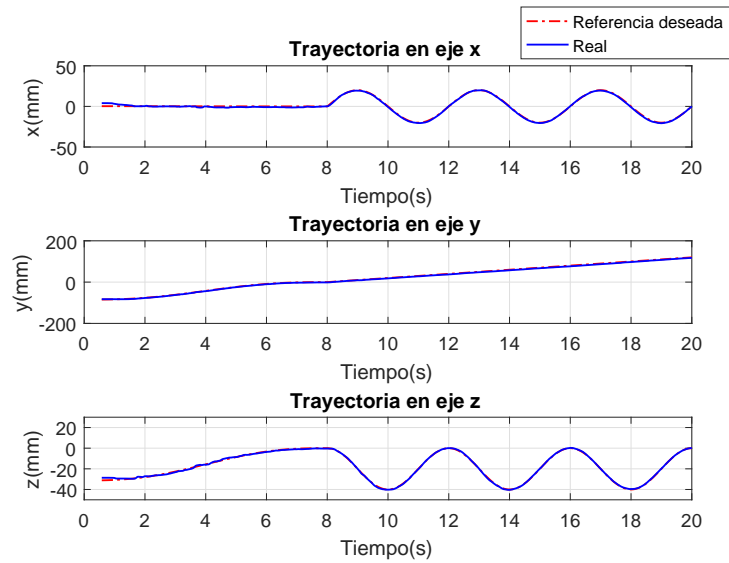


Figura 4.7: Trayectoria caartesiana del control par calculado pasivo robusto.

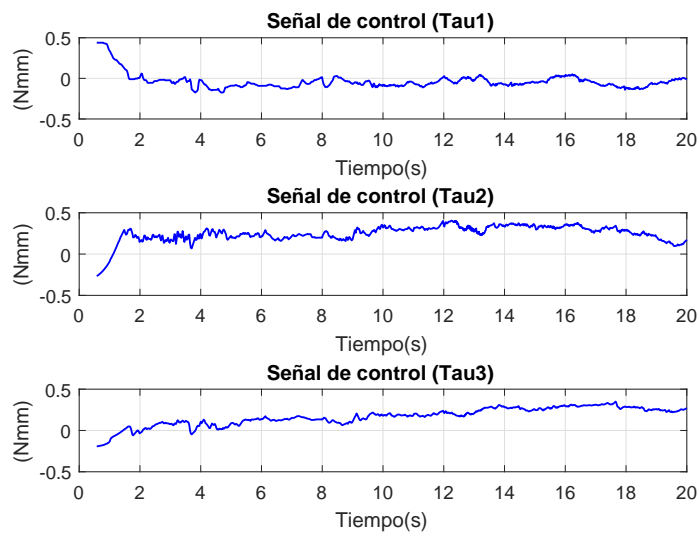


Figura 4.8: Señal de control par calculado pasivo robusto.

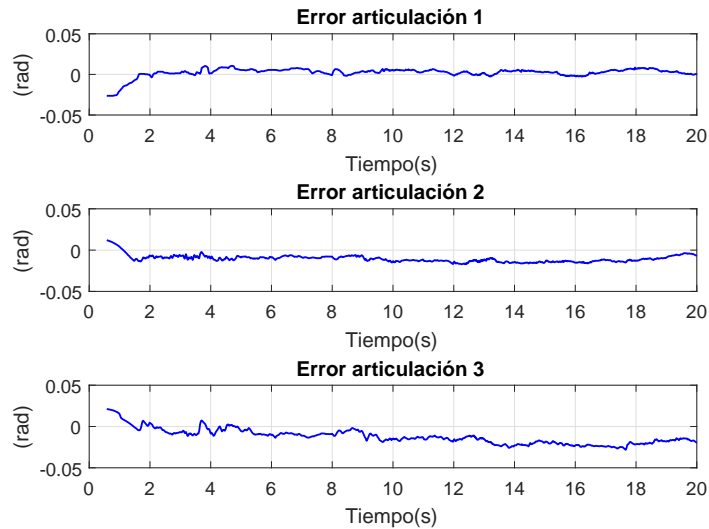


Figura 4.9: Error articular del control par calculado pasivo robusto.

4.3. Experimentos control inteligente de sistemas HRpI

Se realizó el experimento del control inteligente de sistemas HRpI, a partir del tiempo de convergencia a la trayectoria deseada, el error de posición articular, el par de entrada global. La tarea consistió en regulación basada en seguimiento de una trayectoria determinada por las siguientes ecuaciones paramétricas:

$$\begin{aligned}xd &= h + r\cos(\omega t) \\yd &= mt + b \\zd &= k + r\sin(\omega t)\end{aligned}$$

donde $h = 0$, $k = 0$, $r = 20\text{mm}$, $b = 0$, $m = 10$, $y \omega = 2\pi f$, que se proponen considerando el espacio de trabajo del dispositivo háptico Geomagic Touch. La velocidad y aceleración deseadas se definen por la primera y segunda derivada respectivamente de las ecuaciones paramétricas definidas anteriormente. La frecuencia de muestreo $f = 1\text{ KHz}$ y el tiempo de ejecución es de 20 segundos. El software a utilizar es MatLab Simulink donde se programa el control inteligente de sistemas HRpI.

4.3.1. Control adaptativo sin el operador humano en el lazo

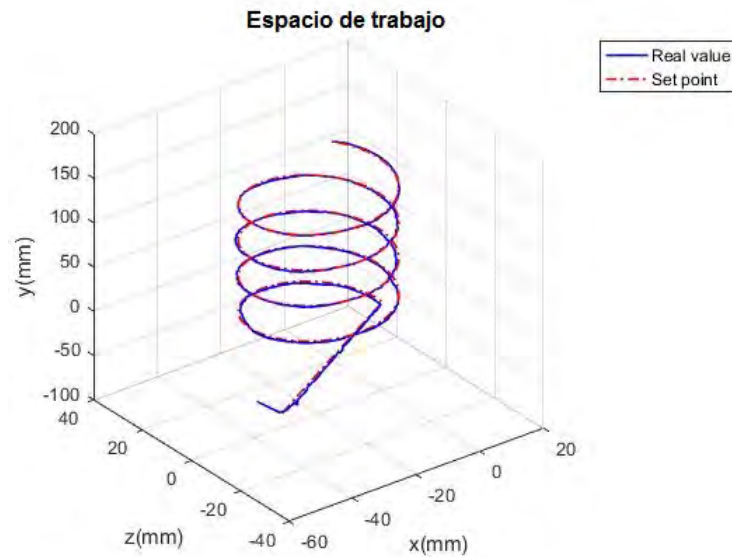


Figura 4.10: Espacio de trabajo.

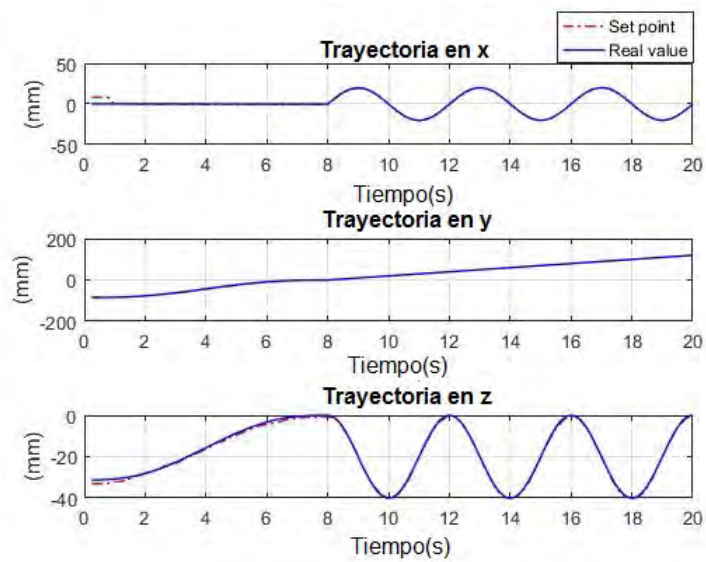


Figura 4.11: Trayectoria cartesiana sin el operador humano en el lazo.

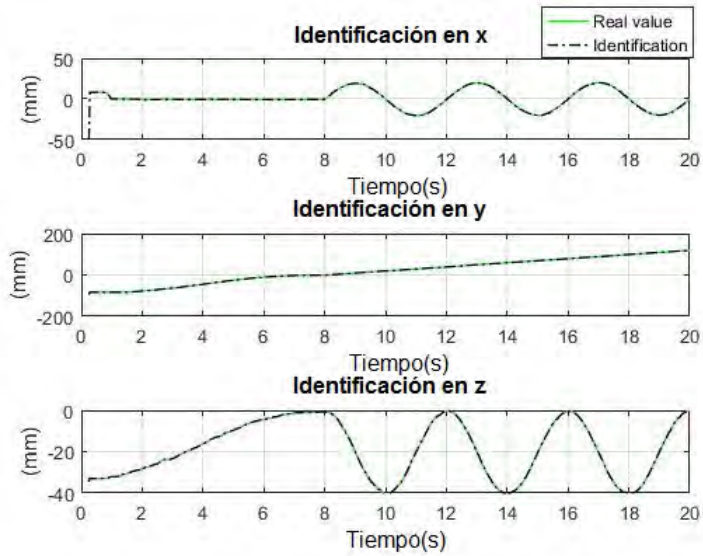


Figura 4.12: Identificación sin el operador humano en el lazo.

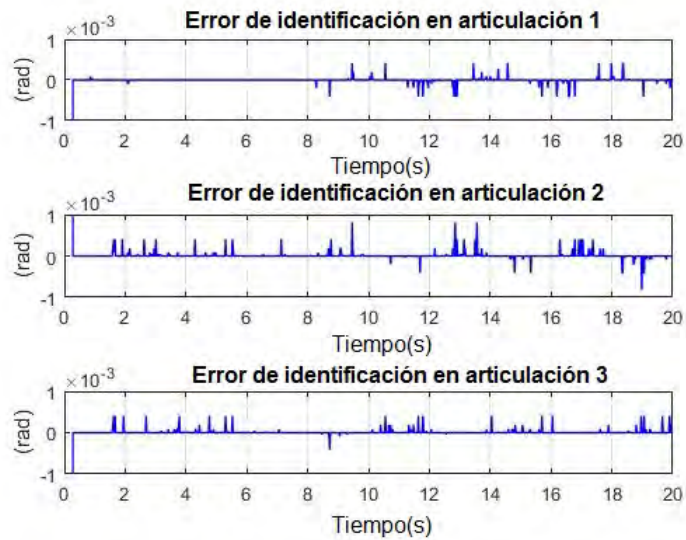


Figura 4.13: Error de identificación sin el operador humano en el lazo.

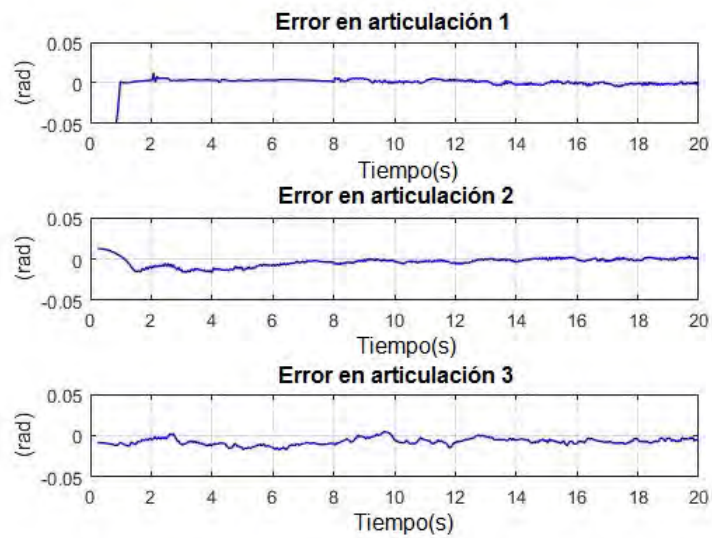


Figura 4.14: Error articular sin el operador humano en el lazo.

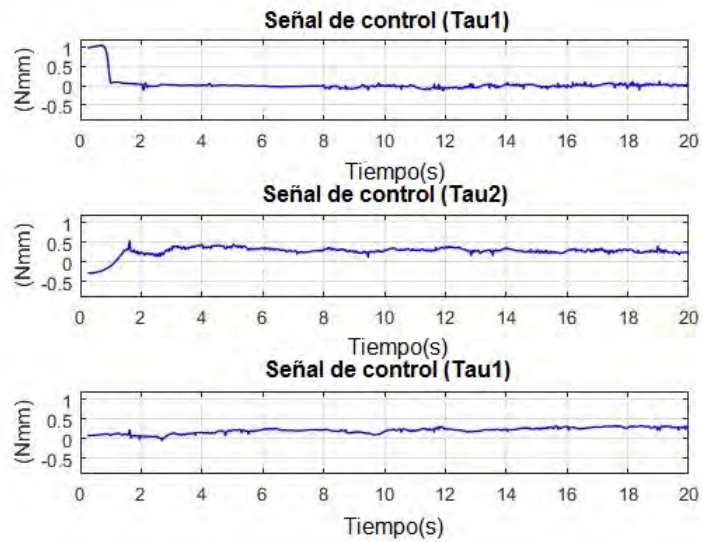


Figura 4.15: Señal de control sin el operador humano en el lazo.

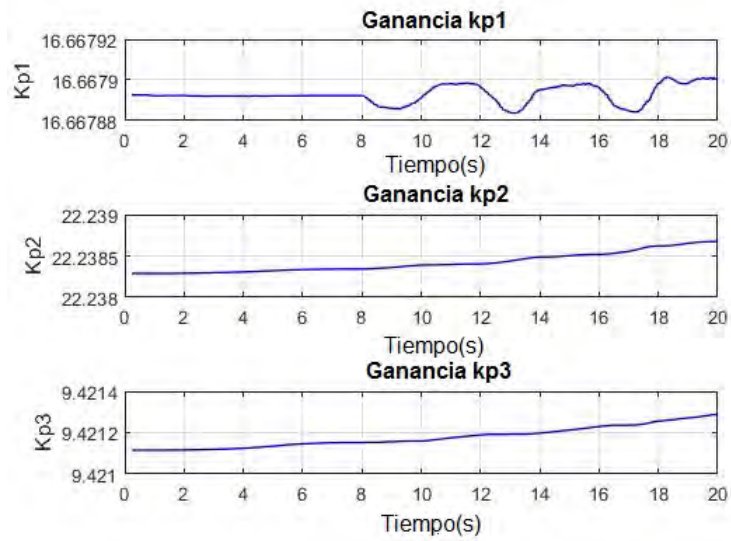


Figura 4.16: Ganancia kp sin el operador humano en el lazo.

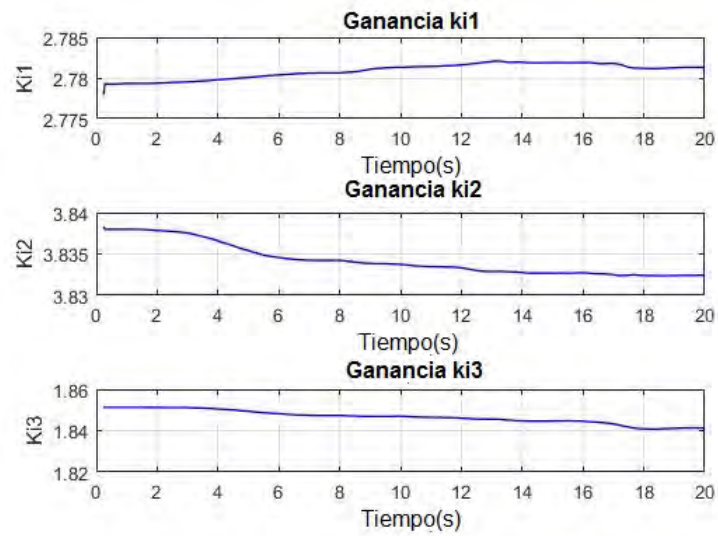


Figura 4.17: Ganancia ki sin el operador humano en el lazo.

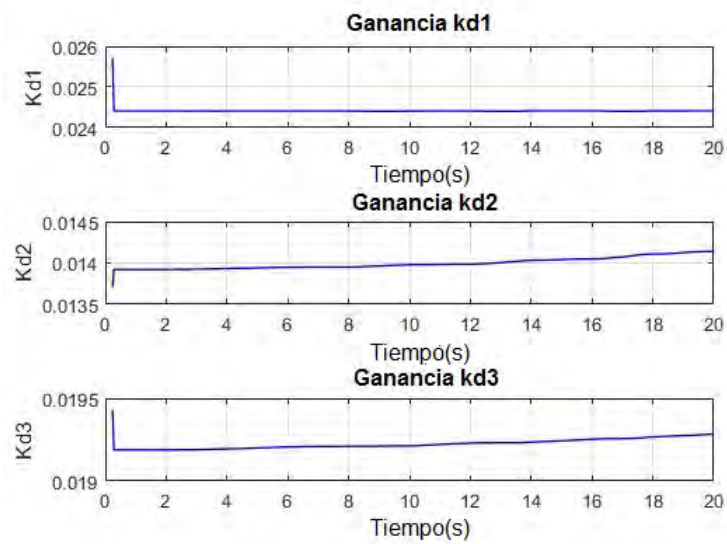


Figura 4.18: Ganancia kd sin el operador humano en el lazo.

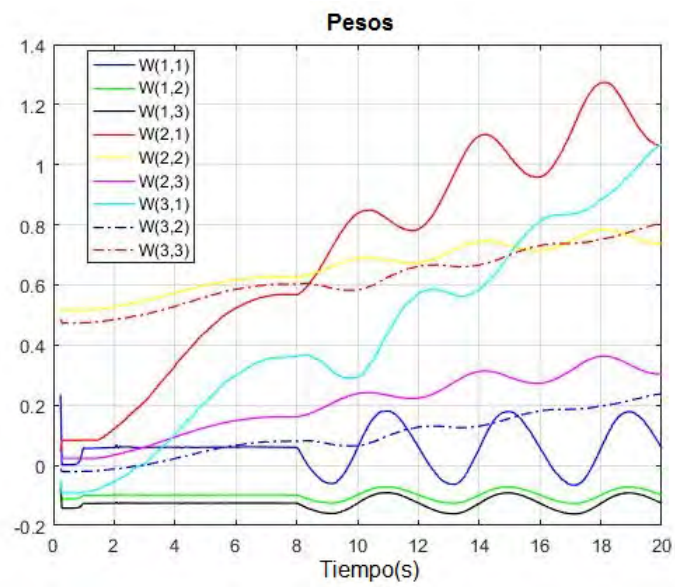


Figura 4.19: Comportamiento de los pesos sin el operador humano en el lazo.

4.3.2. Control adaptativo con el operador humano en el lazo

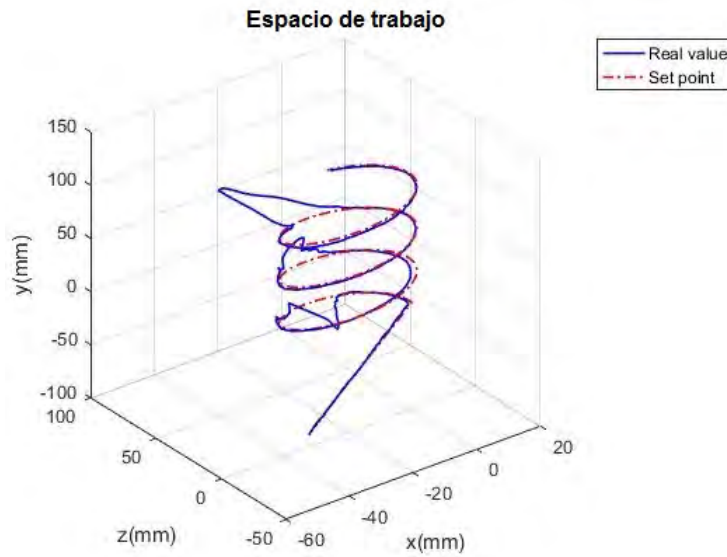


Figura 4.20: Espacio de trabajo.

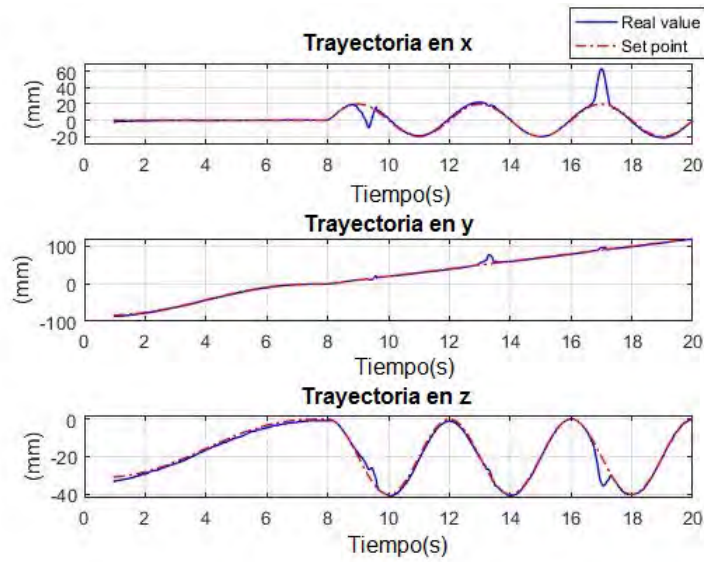


Figura 4.21: Trayectoria cartesiana con el operador humano en el lazo.

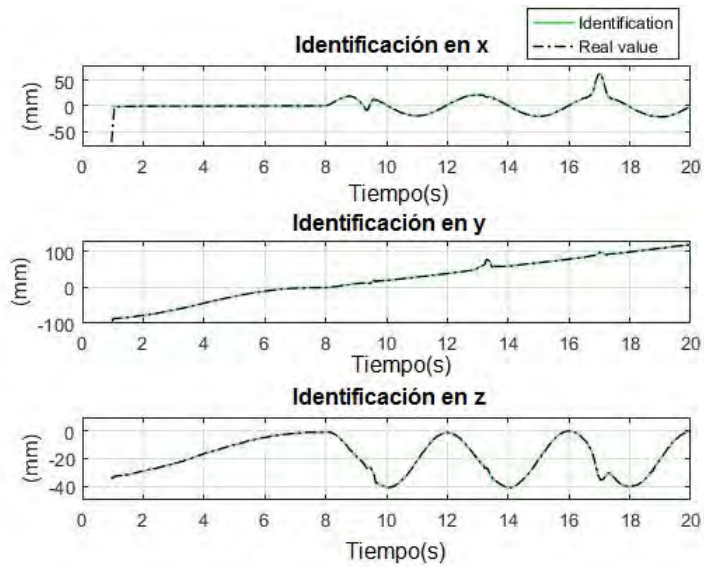


Figura 4.22: Identificación con el operador humano en el lazo.

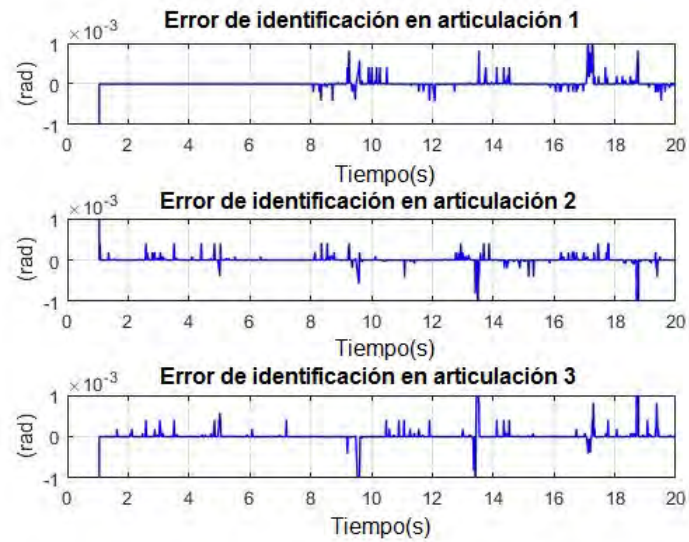


Figura 4.23: Error de identificación con el operador humano en el lazo.

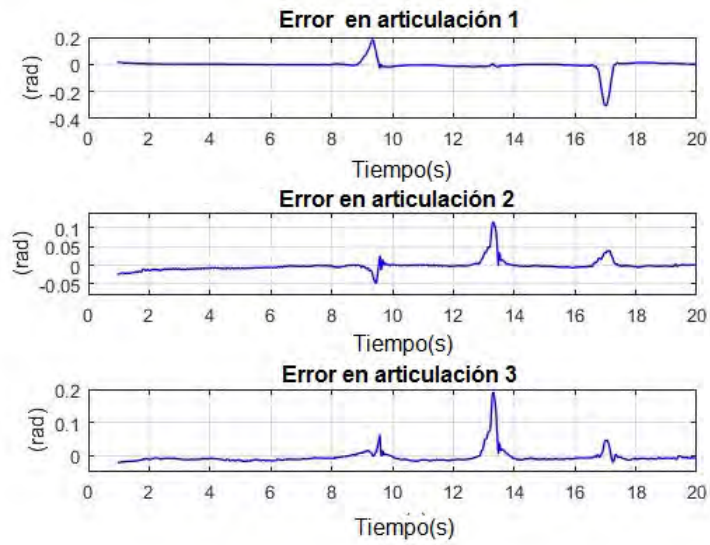


Figura 4.24: Error articular con el operador humano en el lazo.

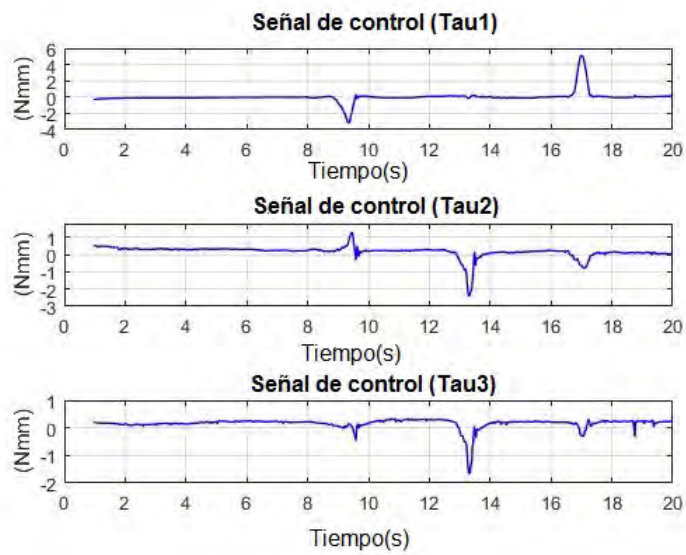


Figura 4.25: Señal de control con el operador humano en el lazo.

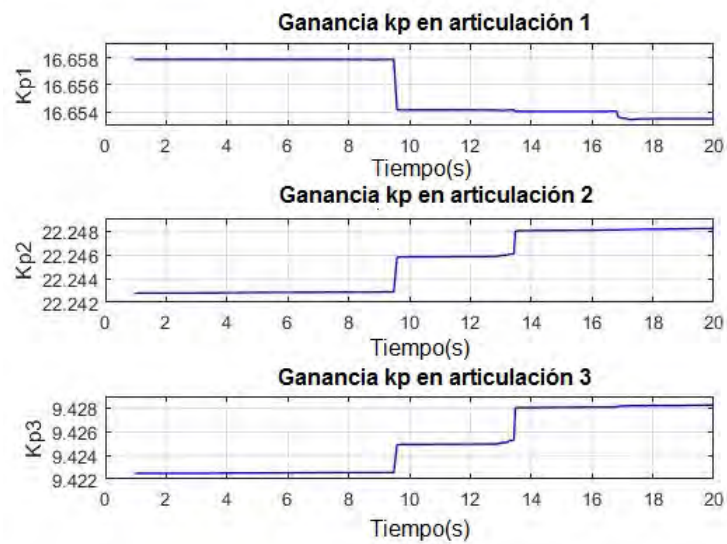


Figura 4.26: Ganancia k_p con el operador humano en el lazo.

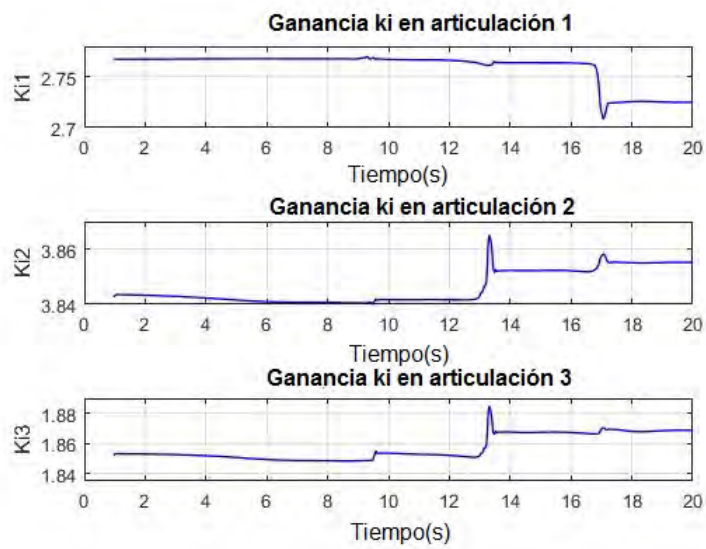


Figura 4.27: Ganancia k_i con el operador humano en el lazo.

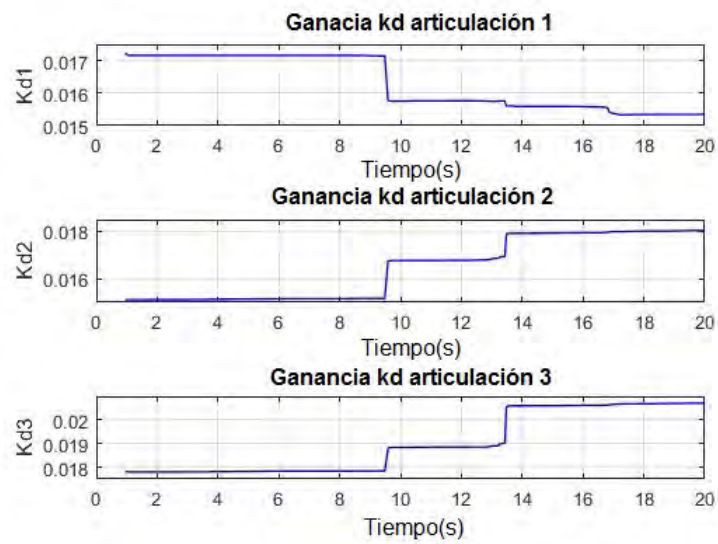


Figura 4.28: Ganancia kd con el operador humano en el lazo.

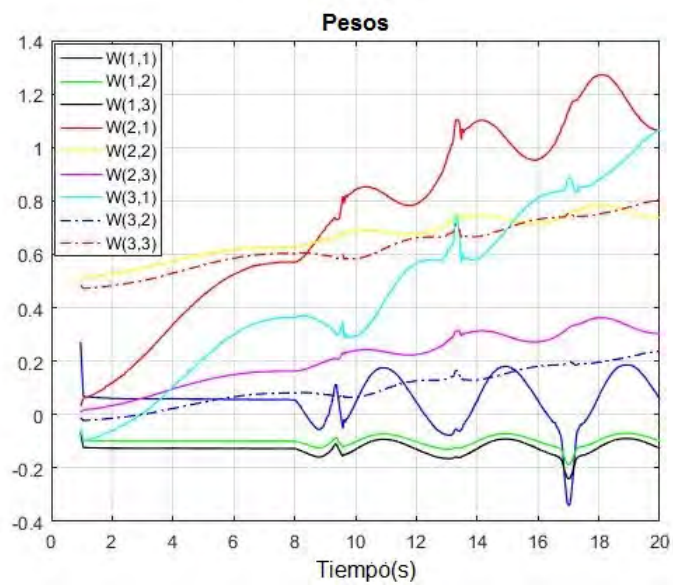


Figura 4.29: Comportamiento de los pesos con el operador humano en el lazo.

4.4. Tarea Médica

La plataforma de guía háptica es un sistema modular designado para asistir a tratamientos de rehabilitación en pacientes con afectaciones neuromusculares. Ofrece la posibilidad de ser configurado acorde a la terapia para una amplia clase de discapacidades. La plataforma esta compuesta por tres bloques funcionales principales: Terapia de Rehabilitación considerando aspectos médicos un protocolo medico determina el tratamiento acorde a la condición del paciente y sugiere los estímulos visuales y cinestésicos para el sistema neuromuscular. Interfaz Háptica incluye hardware y software del dispositivo háptico, incluye drivers, controles en lazo cerrado y una pantalla visual para entornos de realidad virtual, y Plataforma Computacional contiene los algoritmos de planificación, interfaz de comunicación y protocolos, interfaces de requeridas para conectar el ordenador de la computadora para dispositivos externos. Todo el diseño, obtenido bajo un enfoque robótico, respecto a especificaciones medicas permite su uso para pacientes, Antropometría, ergonomía y seguridad.

4.5. Propuesta de rehabilitación

Hemiparesis es relativamente una condición común en niños, de etiología adquirida o congénita. Esta es caracterizada por un decremento unilateral de fuerza y presión de movimiento, debido a un deterioro del sistema nervioso. La configuración local del sistema háptico orientación, asiste al niño en la coordinación de tareas de seguimiento de patrones indicados visualmente. La acción de orientación correcta de sus movimientos por una fuerza atractiva que lo lleva hacia la trayectoria deseada produciendo una estimulación cinestésica que promueve la sincronización y la secuencia correcta de movimientos. Esta configuración fue implementada usando el dispositivo háptico Geomagic Touch y es propuesto para una sesión de terapia en pacientes con hemiparesia. El control en lazo cerrado fue designado bajo un control inteligente basado en un control Wavenet con un alto rendimiento.

4.6. Resultados experimentales

El experimento consiste en aplicar una estrategia de control adaptable basada en una red neuronal wavenet y la autosintonización de un control PID. Las gráficas de las señales derivadas de cada experimento corresponden a i) espacio de trabajo(x,

y, z), ii) variación en el tiempo de las coordenadas operacionales, iii) señal del error operacional, iv) señal de control articular, v) error de identificación por grado de libertad, vi) la dinámica de los pesos y parámetros de la red neuronal, y vii) autosintonización de las ganancias del PID discreto. El segundo experimento se presenta en las fases siguientes a) experimento sin el humano en el lazo, en este caso el control adapta las ganancias acorde a la configuración admisible en la tarea de la trayectoria y la compensación de la dinámica sin la incertidumbre en el lazo; y b) experimento con el humano en el lazo, con las señales iguales como en el anterior caso, pero con el operador humano en el lazo. En la cual hay presencia de alteraciones inducidas artificialmente para mostrar la respuesta de adaptabilidad.

4.7. Discusion de los experimentos

Aunque se desarrolla la práctica experimental con el operador humano en condiciones de salud física y mental, la emulación de un paciente que modifica la trayectoria involuntariamente o ejercicios de fuerzas espaciales que ponen a prueba la robustez de la plataforma, se observa un alto rendimiento. La señal de control tiene la finalidad de garantizar el seguimiento y compensar la dinámica del dispositivo háptico con el operador humano: $\tau = \tau_{dispositivohaptico} - \tau_h$. Bajo estas condiciones, se da la tarea de orientación háptica satisfactoriamente; es visible que con la perturbación, las ganancias del control PID discreto se autoajustan por el cambio en el error de identificación. La presencia del operador humano, y esta acción de perturbación demanda un exceso de energía con magnitudes por debajo de los valores operativos. Que garantiza que la plataforma tendrá un excelente rendimiento para diferentes usuarios.

4.8. Conclusiones

En esta tesis, una nueva identificación y esquema de control para un sistema MIMO basado en wavenet con filtro IIR, poda nodos irrelevantes, se proponen wavelets hijas MORLET es propuesta para una eficiente aproximación de la dinámica inversa tales capacidades de aproximación y la base de la matriz de entrada es usada para designar las ganancias de retroalimentación en tiempo variante tal que el ajuste discreto recurrente del PID la retroalimentación se produce sin ningún conocimiento de dispositivo háptico. Al contrario de la mayoría de los controladores de redes neuronales, la aproximación de la dinámica inversa no es usada para la estabilización pero

para sintonizar las ganancias de retroalimentación de un simple controlador PID. La convergencia global es obtenida a medida que aumentan las iteraciones. Los experimentos muestran la viabilidad del modelo exacto ahora conocido, en particular, esto captura todo lo esencial y la dinámica no lineal, sin ninguna linealización ni idealización de robótica no lineal. Experimentos en un sistema robótico altamente lineal 3D no acoplado en tiempo real. Muestra la relevancia del esquema de control propuesto. Bajo estas condiciones la plataforma de interacción física es idela para la aplicación de protocolos clínicos atravez de un seguimiento de la tarea con el paciente en el lazo de control.

Capítulo 5

Conclusiones Generales y Trabajo Futuro

5.1. Conclusiones generales

El sistema de interacción física hombre-robot (HRpI), representa un tipo especial de sistema robótico con incertidumbre dada la existencia del operador humano en el lazo; en este trabajo de investigación y validación experimental se buscó consolidar una plataforma adaptable con el propósito de compensar la dinámica total del sistema, y atenuar los efectos de la incertidumbre, más aún cuando el operador humano es un paciente con discapacidad en miembro superior. Para ello, se logró identificar de manera concluyente lo siguiente:

1. Cualquier estrategia de control de movimiento y/o fuerza empleada en un sistema HRpI que requiera la modificación fuera de línea, tanto de su estructura como de sus parámetros, resulta ineficiente debido a la nula generalización de su aplicación para un cierto número de usuarios y la lentitud del proceso de evaluación y tratamiento, lo que condiciona a motivar al estrés del paciente;
2. La consigna de movimiento y/o fuerza (define total o parcialmente al protocolo clínico aplicado) independientemente de la estrategia de control empleada, debe modificarse en función de las limitaciones biomecánicas del usuario, en principio por la presencia de condiciones espásticas en miembro superior;
3. Dadas las especificaciones técnicas de los dispositivos hápticos Geomagic-Touch, una plataforma de diagnóstico y neurorehabilitación a partir de fisioterapia robótica asistida, resulta reservada para la aplicación de fuerzas no superiores a los 5 N en

pinza gruesa; es por ello que pacientes infantiles, particularmente con mielomeningocele son candidatos a emplearlas. En este sentido, las técnicas de control y planificación son transparentemente aplicables con otros dispositivos más robustos, y con ello la extensión de pacientes que demandan mayor energía;

4. La adaptabilidad, en un sistema HRpI, a partir de la identificación de la señal de salida, garantiza con eficiencia el cambio de la señal de control aplicada al sistema robótico con el operador humano en el lazo; siendo la contribución más relevante de la presente tesis de investigación, es posible evidenciar la modificación de las ganancias de control ante la presencia de cambios súbitos de espasticidad corporal que se traducen en resistencia al movimiento;

A pesar de que el logro conseguido en esta tesis permitió resolver con plataformas robóticas de bajo costo, y la compensación dinámica dada la incertidumbre del humano para diferentes condiciones y niveles de discapacidad en miembro superior, es relevante puntualizar en la evaluación y tratamiento adaptable, desde el punto de vista de la tarea del robot como consigna de movimiento y fuerza para la estrategia de control.

5.2. Trabajo futuro

La continuación de la línea de investigación que es fortalecida con las contribuciones de esta tesis, están descritas por un trabajo futuro que buscará consolidar a una plataforma de diagnóstico y neurorehabilitación de miembro superior con el uso de sistemas hápticos, a continuación se describen las que inmediatamente deberán desarrollarse:

1. Evaluación NASA TLX de la plataforma, para medición del desempeño desde el punto de vista del confort del usuario;
2. Evaluación general de 50 pacientes infantiles con discapacidad en miembro superior, aplicando criterio de inclusión y medición de signos vitales y ambientales para objetivizar los resultados de la evaluación;
3. Desarrollar un esquema adaptable para la modificación en línea de la tarea del sistema HRpI a partir de la medición de señales biomédicas, y particularmente aquellas que deriven de la intención del usuario: mioeléctricas y cerebrales;
4. Esquematizar el concepto de plataforma para diagnóstico y fisioterapia robótica con adaptabilidad en la tarea y el control, así como la integración del esquema global

de diagnóstico.

Apéndice A

Modelo matemático obtenido por el método de Denavit-Hartenberg del dispositivo háptico Geomagic Touch

La finalidad de este apéndice es la de mostrar los cálculos necesarios para la obtención del modelo matemático del dispositivo háptico Geomagic Touch. El modelo matemático del dispositivo háptico Geomagic Touch proporcionado en este documento se deriva en el cual combina el modelo cinemático directo, modelo cinemático inverso, matriz Jacobiana y ecuación dinámica[43].

A.1. Modelo cinemático directo

El modelo cinemático directo muestra la relación entre la posición y orientación de los efectores finales y las coordenadas conjuntas. Después de emplear la convención de Denavit-Hartenberg en el manipulador, la matriz de transformación y la cinemática se puede expresar como:

$$x_m = -\sin(q_1)(L_2\sin q_3 + L_1\cos q_2), \quad (\text{A.0})$$

$$y_m = -L_2\cos q_3 + L_2\sin q_2 + L_3, \quad (\text{A.0})$$

$$z_m = L_2\cos q_1\sin q_3 + L_1\cos q_1\cos q_2 - L_4, \quad (\text{A.0})$$

A.2. Modelo cinemático inverso

El modelo cinemático inverso calcula los ángulos de cada articulación en función de la posición de los efectores finales en coordenadas cartesianas[43].

$$q_1 = -atan2(x, z + L_4), \quad (A.0)$$

$$q_2 = \gamma + \beta, \quad (A.0)$$

$$q_3 = q_2 + \alpha - \pi/2, \quad (A.0)$$

donde,

$$R = \sqrt{x^2 + (z + L_4)^2}, \quad (A.0)$$

$$r = \sqrt{x^2 + (z + L_4)^2 + (y - L_3)^2}, \quad (A.0)$$

$$\gamma = \cos^{-1}\left(\frac{L_1^2 + r^2 - l_2^2}{2l_1 r}\right), \quad (A.0)$$

$$\beta = atan2(y - L_3, R), \quad (A.0)$$

$$\alpha = \cos^{-1}\left(\frac{L_1^2 + L_2^2 - r^2}{2L_1 L_2}\right), \quad (A.0)$$

A.3. Matriz Jacobiana

Para transformar velocidades, aceleraciones y fuerzas entre espacio conjunto y cartesiano, la matriz Jacobiana, $J_m \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$ tiene que ser conocida, se puede derivar quedando de la siguiente forma[43]:

$$\dot{\mathbf{x}} = J_m \dot{\mathbf{q}}. \quad (A.0)$$

Donde $\dot{\mathbf{x}} \in \mathbb{R}^{3 \times 1}$ denota el vector de velocidades operacionales, $\dot{\mathbf{q}} \in \mathbb{R}^{3 \times 1}$ define el vector de velocidades conjuntas, y J_m expresado como:

$$J_m = \begin{bmatrix} \dot{j}_{m1,1} & \dot{j}_{m1,2} & \dot{j}_{m1,3} \\ \dot{j}_{m2,1} & \dot{j}_{m2,2} & \dot{j}_{m2,3} \\ \dot{j}_{m3,1} & \dot{j}_{m3,2} & \dot{j}_{m3,3} \end{bmatrix}, \quad (A.0)$$

donde:

$$\begin{aligned}
 \dot{j}_{m1,1} &= -\cos q_1(L_2 \sin q_3 + L_1 \cos q_2), \\
 \dot{j}_{m1,2} &= L_2 = \sin q_1 \sin q_2, \\
 \dot{j}_{m1,3} &= L_2 = \sin q_1 \cos q_3, \\
 \dot{j}_{m2,1} &= 0 \\
 \dot{j}_{m2,2} &= L_1 \cos q_2, \\
 \dot{j}_{m2,3} &= L_2 \sin q_3 \\
 \dot{j}_{m3,1} &= -L_2 \sin q_1 \sin q_3 - L_1 \sin q_1 \cos q_2, \\
 \dot{j}_{m3,2} &= -L_1 \sin q_2 \cos q_1 \\
 \dot{j}_{m3,3} &= L_2 \cos q_1 \cos q_3
 \end{aligned}$$

A.4. Ecuación dinámica

La ecuación dinámica de movimiento para el dispositivo háptico Geomagic Touch se puede mostrar en la representación general de robótica de la siguiente forma[43]:

$$H(\mathbf{q})\ddot{\mathbf{q}} + C(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})\dot{\mathbf{q}} + G(\mathbf{q}) = \boldsymbol{\tau}, \quad (\text{A.0})$$

donde $H = H^T \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$ es la matriz de inercias, $C \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$ es la matriz de coriolis y fuerzas centrífugas, y $G(\mathbf{q}) \in \mathbb{R}^{3 \times 1}$ representan las fuerzas de gravedad que actúan sobre las articulaciones $\mathbf{q} = [q_1, q_2, q_3]^T \in \mathbb{R}^{3 \times 1}$ es el vector de articulaciones y $\mathbf{u} = [\tau_1, \tau_2, \tau_3]^T \in \mathbb{R}^{3 \times 1}$ es el vector de torques que actúan sobre las articulaciones, la matriz de inercias puede ser definida de la siguiente manera.

$$H = \begin{bmatrix} h_{1,1} & h_{1,2} & h_{1,3} \\ h_{2,1} & h_{2,2} & h_{2,3} \\ h_{3,1} & h_{3,2} & h_{3,3} \end{bmatrix}, \quad (\text{A.0})$$

donde los elementos son:

$$\begin{aligned}
 h_{1,1} &= (I_{C_{yy}} + 0.5I_{A_{yy}} + 0.5I_{B_{yy}} + 0.5I_{A_{zz}} + 0.5I_{B_{zz}} + 0.125m_A l_2^2 + 0.125m_B l_1^2 + \\
 &0.5m_A l_1^2 + m_B l_3^2) + (0.5I_{B_{yy}} - 0.5I_{B_{zz}} + 0.125m_B l_1^2 + 0.5m_A l_1^2) \cos(2q_2) + (0.5I_{A_{yy}} - \\
 &0.5I_{A_{zz}} - 0.5m_A l_2^2) \cos(2q_3) + (m_A l_1 l_2) \cos q_2 \sin q_3 \\
 h_{1,2} &= (0.5m_B l_1 l_3) \sin q_2 \\
 h_{1,3} &= 0 \\
 h_{2,1} &= (0.5m_B l_1 l_3) \sin q_2 \\
 h_{2,2} &= I_{B_{xx}} + m_A l_1^2 + 0.25m_B l_1^2 \\
 h_{2,3} &= -0.5(m_A l_1 l_2) \sin(q_2 - q_3) \\
 h_{3,1} &= 0
 \end{aligned}$$

$$h_{3,2} = -0.5(m_A l_1 l_2) \sin(q_2 - q_3)$$

$$h_{3,3} = I_{A_{xx}} + 0.25m_A l_2^2$$

La de coriolis y fuerzas centrífugas

$$C = \begin{bmatrix} c_{1,1} & c_{1,2} & c_{1,3} \\ c_{2,1} & c_{2,2} & c_{2,3} \\ c_{3,1} & c_{3,2} & c_{3,3} \end{bmatrix} \quad (\text{A.0})$$

$$c_{1,1} = -(0.5I_{B_{yy}} - 0.5I_{B_{zz}} - 0.125m_B l_1^2 + 0.5m_A l_1^2) \dot{q}_2 \sin(2q_2) - (0.5I_{A_{yy}} - 0.5I_{A_{zz}} - 0.5m_A l_2^2) \dot{q}_3 \sin(2q_3) - 0.5(m_A l_1 l_2) \dot{q}_2 \sin(q_2) \sin(q_3) + 0.5((m_A l_1 l_2) \dot{q}_2 \cos(q_2) \cos(q_3))$$

$$c_{1,2} = (0.5I_{B_{yy}} - 0.5I_{B_{zz}} + 0.125m_B l_1^2 + 0.5m_A l_1^2) \dot{q}_1 \sin(2q_2) + (0.5m_B l_1 l_3) \cos(q_2) - 0.5((m_A l_1 l_2) \dot{q}_1 \sin(q_2) \sin(q_3))$$

$$c_{1,3} = (0.5I_{A_{yy}} - 0.5I_{A_{zz}} - 0.5m_A l_2^2) \dot{q}_1 \sin(2q_3) + 0.5((m_A l_1 l_2) \dot{q}_1 \cos(q_2) \cos(q_3))$$

$$c_{2,1} = (0.5I_{B_{yy}} - 0.5I_{B_{zz}} + 0.125m_B l_1^2 + 0.5m_A l_1^2) \dot{q}_1 \sin(2q_2) + 0.5((m_A l_1 l_2) \dot{q}_1 \sin(q_2) \sin(q_3))$$

$$c_{2,2} = 0$$

$$c_{2,3} = 0.5((m_A l_1 l_2) \dot{q}_3 \cos(q_2 - q_3))$$

$$c_{3,1} = (0.5I_{A_{yy}} - 0.5I_{A_{zz}} - 0.5m_A l_2^2) \dot{q}_1 \sin(2q_3) + 0.5((m_A l_1 l_2) \dot{q}_1 \cos(q_2) \cos(q_3))$$

$$c_{3,2} = -0.5((m_A l_1 l_2) \dot{q}_2 \cos(q_2 - q_3)),$$

$$c_{3,3} = 0,$$

el efecto de la gravedad en el sistema:

$$G = \begin{bmatrix} g_1 \\ g_2 \\ g_3 \end{bmatrix}, \quad (\text{A.0})$$

donde:

$$g_1 = 0$$

$$g_2 = (0.5m_B l_1 g + m_A l_1 g) \cos(q_2) + k_{10}(q_2 - 0.5\pi)$$

$$g_3 = 0.5m_A l_2 g \sin(q_3),$$

donde:

$$l_1 = 0.135m$$

$$l_2 = 0.135m$$

$$l_3 = 0.0233m$$

$$g = 9.81m/s^2$$

Los valores de los parámetros estimados son:

$$k_1 = 1.798x10^{-3}$$

$$k_2 = 0.864x10^{-3}$$

$$k_3 = 0.486x10^{-3}$$

$$k_4 = 2.766x10^{-3}$$

$$k_5 = 0.308x10^{-3}$$

$$k_6 = 2.526x10^{-3}$$

$$k_7 = 0.652x10^{-3}$$

$$k_8 = 164.158x10^{-3}$$

$$k_9 = 94.050x10^{-3}$$

$$k_{10} = 117.294x10^{-3}$$

Apéndice B

Modelo matemático obtenido por el método de cuaterniones del dispositivo háptico Geomagic Touch

B.1. Cuaterniones

Los cuaterniones unitarios proporcionan una notación matemática para representar las orientaciones y las rotaciones de objetos en tres dimensiones. Comparados con los ángulos de Euler, son más simples de componer y evitan el problema del bloqueo del cardán. Comparados con las matrices de rotación, son más eficientes y más estables numéricamente. Los cuaterniones son útiles en aplicaciones de gráficos por computadora, robótica, navegación y mecánica orbital de satélites.

Un cuaternión puede expresarse como el conjunto:

$$\mathbb{H} = \{a + b\mathbf{i} + c\mathbf{j} + d\mathbf{k} : a, b, c, d \in \mathbb{R}\} \subset \mathbb{C}^2 \subset \mathbb{R}^4 \quad (\text{B.0})$$

donde $\mathbf{i}, \mathbf{j}, \mathbf{k}$ son llamados *los imaginarios principales*, los cuales obedecen las reglas de Hamilton:

$$\mathbf{i}^2 = \mathbf{j}^2 = \mathbf{k}^2 = \mathbf{ijk} = -1 \quad (\text{B.0})$$

la multiplicación de estas bases imaginarias es no conmutativa y funcionan como un

producto cruzado.

$$\begin{aligned} ij &= k, \quad jk = i, \quad ki = j, \\ ji &= -k, \quad kj = -i, \quad ik = -j \end{aligned} \quad (\text{B.0})$$

B.1.1. Rotación con cuaterniones

Si se desea rotar un punto dado $P(P_0\mathbf{i}, P_1\mathbf{j}, P_2\mathbf{k})$, alrededor de un eje arbitrario (cuyo vector unitario es \mathbf{v}) un ángulo θ . El cuaternión que representa la rotación viene dado por:

$$Q = \cos\frac{\theta}{2} + \sin\frac{\theta}{2}\mathbf{v} \quad (\text{B.0})$$

la ecuación que describe este movimiento está dada por

$$P' = Q \otimes P \otimes \tilde{Q} \quad (\text{B.0})$$

donde \otimes representa la multiplicación cuaterniónica mientras que \tilde{Q} se refiere al conjugado del cuaternion q ,

$$\tilde{Q} = \cos\frac{\theta}{2} - \sin\frac{\theta}{2}\mathbf{v} \quad (\text{B.0})$$

B.2. Cinemática directa de dispositivo Geomagic Touch

El modelo cinemático establece la relación entre la posición y orientación del efector final y el conjunto de rotaciones y traslaciones que el sistema posee.

B.2.1. Cinemática directa 3GDL

Se utilizaron 3 cuaterniones para obtener el modelo de cinemática directa para el dispositivo Geomagic Touch de 3GDL, cada uno de estos orientado con el eje de rotación correspondiente ($V_n : n = [1, 2, 3]$):

$$\begin{aligned} Q_1 &= \cos\frac{\theta_1}{2} - \sin\frac{\theta_1}{2}\mathbf{j} \\ Q_2 &= \cos\frac{\theta_2}{2} + \sin\frac{\theta_2}{2}\mathbf{k} \end{aligned}$$

$$Q_3 = \cos \frac{\theta_3}{2} + \sin \frac{\theta_3}{2} \mathbf{k} \quad (\text{B.0})$$

además de los cuaterniones, se necesita los puntos a rotar, estos son obtenidos por las longitudes L_1 y L_2 orientadas cuando todos los ángulos son igual a cero ($L_1 i, -L_2 j$).

La ecuación cuaterniónica que genera el modelo cinemático es:

$$P_F = Q_1 Q_2 L_1 \widetilde{Q}_2 \widetilde{Q}_1 + Q_1 Q_2 Q_3 L_2 \widetilde{Q}_3 \widetilde{Q}_2 \widetilde{Q}_1 \quad (\text{B.0})$$

El problema de trabajar con la representación cuaterniónica Ec.(B.2.1) es que es necesario de algún software que respete las leyes propuestas por Hamilton para cuaterniones (Ec.(B.1) y Ec.(B.1)), de esta forma se vuelve muy fácil trabajar con cadenas cinemáticas, aunque esta no es la única forma de obtener las ecuaciones de posición del efector final *i.e.*; si se desea pasar de la representación cuaterniónica a 3 ecuaciones con coordenadas rectangulares, lo único que se necesita hacer es descomponer cada cuaternión Q_n a su forma $\cos \frac{\theta_n}{2} + \sin \frac{\theta_n}{2} v_n$ y realizar los productos cruz correspondientes. Esto quiere decir que para nuestra ecuación Ec.(B.2.1) se tiene que:

$$Q_1 Q_2 L_1 \widetilde{Q}_2 \widetilde{Q}_1 = \begin{bmatrix} L_1 c_1 c_2 & i \\ L_1 s_2 & j \\ L_1 s_1 c_2 & k \end{bmatrix} \quad (\text{B.0})$$

donde $c_n = \cos(\theta_n)$ así para $s_n = \sin(\theta_n)$ si realizamos las operaciones correspondientes para el segundo término

$$Q_1 Q_2 Q_3 L_2 \widetilde{Q}_3 \widetilde{Q}_2 \widetilde{Q}_1 = \begin{bmatrix} L_2 c_1 s_{(2+3)} & i \\ -L_2 c_{(2+3)} & j \\ L_2 s_1 s_{(2+3)} & k \end{bmatrix} \quad (\text{B.0})$$

donde $c_{(a+b)} = \cos(\theta_a + \theta_b)$ así para $s_{(a+b)} = \sin(\theta_a + \theta_b)$., finalmente sustituyendo la ecuación Ec.(B.2.1) y la ecuación Ec.(B.2.1) en la ecuación Ec.(B.2.1) se tiene:

$$Q_1 Q_2 L_1 \widetilde{Q}_2 \widetilde{Q}_1 + Q_1 Q_2 Q_3 L_2 \widetilde{Q}_3 \widetilde{Q}_2 \widetilde{Q}_1 = \begin{bmatrix} c_1(L_1 c_2 + L_2 s_{(2+3)}) & i \\ L_1 s_2 - L_2 c_{(2+3)} & j \\ s_1(L_1 c_2 + L_2 s_{(2+3)}) & k \end{bmatrix} \quad (\text{B.0})$$

La ecuación Ec.(B.2.1) es la ecuación final de cinemática directa para el dispositivo Geomagic Touch tomando en cuenta sólo las articulaciones actuadas (los primeros 3GDL)

B.3. Matriz Jacobiana para dispositivo Geomagic Touch

En Robótica la matriz Jacobiana describe las relaciones entre las velocidades articulares y las velocidades lineales del efector final. En el caso de los cuaterniones la matriz Jacobiana es sólo un vector Ec.(B.3)

$$J = [JQ_1 \ JQ_2 \ JQ_3 \ \cdots \ JQ_m]$$

$$= \left[\frac{\partial P_F}{\partial \theta_1} \ \frac{\partial P_F}{\partial \theta_2} \ \frac{\partial P_F}{\partial \theta_3} \ \cdots \ \frac{\partial P_F}{\partial \theta_m} \right] \quad (\text{B.0})$$

en donde m es el número de grados de libertad y P_F es la cadena cinemática cuaternionica completa. Si recordamos que la rotación de un punto P es P' , donde cada cuaternion Q_m puede ser expresado como:

$$Q_m = e^{\left(\frac{\theta_m}{2} v_m\right)} \quad (\text{B.0})$$

Realizando las respectivas derivadas parciales a la cadena cinemática cuaternionica respecto a los ángulos correspondientes se puede deducir que JQ_n está dado por la ecuación:

$$\frac{1}{2} \sum_{l=1}^L (R(v_n R(L_l)|_n^{m_l})|_1^{n-1} - R(R(L_l)|_n^{m_l} v_n)|_1^{n-1}) \quad (\text{B.0})$$

donde L es el número de articulaciones o puntos a rotar, L_l se refiere a la l -ésima articulación, $R(\cdot)|_n^{m_l}$ se refiere a la cadena cinemática desde n hasta m_l (obviamente la rotación $R(\cdot)|_n^{m_l}$ sólo existe si $n \leq m_l$), de la misma forma se define $R(\cdot)|_1^{n-1}$.

NOTA: A pesar de que se están implementando derivadas parciales para obtener la matriz Jacobiana, la ecuación en cuaterniones (Ec.(B.3)) sólo utiliza la multiplicación de las rotaciones por los ejes de rotación (implicitamente dicha multiplicación opera como derivada), esto significa que es posible automatizar un algoritmo, ahorrando tiempo de calculo y ecuaciones.

B.3.1. Matriz Jacobiana para dispositivo Geomagic Touch de 3GDL

Basado en la ecuación Ec.(B.3) la matriz Jacobiana para el modelo de 3GDL es:

$$J = [JQ_1 \ JQ_2 \ JQ_3] = \left[\frac{\partial P_F}{\partial \theta_1} \ \frac{\partial P_F}{\partial \theta_2} \ \frac{\partial P_F}{\partial \theta_3} \right] \quad (\text{B.0})$$

y a partir de la ecuacion Ec.(B.3) se obtiene que

$$\begin{aligned} JQ_1 &= \frac{1}{2}(\mathbf{v}_1 Q_1 Q_2 L_1 \widetilde{Q}_2 \widetilde{Q}_1 + \mathbf{v}_1 Q_1 Q_2 Q_3 L_2 \widetilde{Q}_3 \widetilde{Q}_2 \widetilde{Q}_1 \\ &\quad - Q_1 Q_2 L_1 \widetilde{Q}_2 \widetilde{Q}_1 \mathbf{v}_1 - Q_1 Q_2 Q_3 L_2 \widetilde{Q}_3 \widetilde{Q}_2 \widetilde{Q}_1 \mathbf{v}_1) \\ JQ_2 &= \frac{1}{2}(Q_1 \mathbf{v}_2 Q_2 L_1 \widetilde{Q}_2 \widetilde{Q}_1 + Q_1 \mathbf{v}_2 Q_2 Q_3 L_2 \widetilde{Q}_3 \widetilde{Q}_2 \widetilde{Q}_1 \\ &\quad - Q_1 Q_2 L_1 \widetilde{Q}_2 \mathbf{v}_2 \widetilde{Q}_1 + Q_1 Q_2 Q_3 L_2 \widetilde{Q}_3 \widetilde{Q}_2 \mathbf{v}_2 \widetilde{Q}_1) \\ JQ_3 &= \frac{1}{2}(Q_1 Q_2 \mathbf{v}_3 Q_3 L_2 \widetilde{Q}_3 \widetilde{Q}_2 \widetilde{Q}_1 \\ &\quad - Q_1 Q_2 Q_3 L_2 \widetilde{Q}_3 \mathbf{v}_3 \widetilde{Q}_2 \widetilde{Q}_1) \end{aligned} \quad (\text{B.0})$$

en donde $\mathbf{v}_1 = -j$, $\mathbf{v}_2 = k$ y $\mathbf{v}_3 = k$ se obtienen de las ecuaciones Ec.(B.2.1). Desarrollando las ecuaciones Ec.(B.3.1) se tiene:

$$\begin{aligned} JQ_1 &= \begin{bmatrix} -s_1(L_1 c_2 + L_2 s_{(2+3)}) & i \\ 0 & j \\ c_1(L_1 c_2 + L_2 s_{(2+3)}) & k \end{bmatrix} \\ JQ_2 &= \begin{bmatrix} -c_1(L_1 s_2 + L_2 c_{(2+3)}) & i \\ L_1 c_2 + L_2 s_{(2+3)} & j \\ -s_1(L_1 s_2 + L_2 c_{(2+3)}) & k \end{bmatrix} \\ JQ_3 &= \begin{bmatrix} c_1(L_1 c_2 + L_2 c_{(2+3)}) & i \\ L_1 s_2 + L_2 s_{(2+3)} & j \\ s_1(L_1 c_2 + L_2 s_{(2+3)}) & k \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (\text{B.0})$$

B.4. Cinemática inversa a partir del vector Jacobiano cuaternionico

El problema cinemático inverso consiste en encontrar los valores que deben adoptar las coordenadas articulares del robot para que su extremo se posicione y oriente según una determinada localización espacial. Al contrario que el problema cinemático directo, el cálculo de la cinemática inversa no es sencilla ya que consiste en la resolución de una serie de ecuaciones fuertemente dependiente de la configuración del robot, además de existir diferentes soluciones el problema. Aunque en el caso del vector Jacobiano cuaternionico se puede aproximar la solución con la ecuación:

$$\begin{bmatrix} \theta_1 \\ \theta_2 \\ \theta_3 \\ \vdots \\ \theta_n \end{bmatrix}^T = \frac{1}{2} \int ((J_Q)E + E(J_Q))dt \quad (\text{B.0})$$

donde $\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_n$ son los ángulos de cada uno de los grados de libertad, J_Q es el vector Jacobiano cuaternionico (Ec.(B.3.1) y E es el error que se genera de la diferencia entre la posición del efector final y el punto deseado:

$$E = P_F - P_D; \{P_F, P_D\} \subset \mathbb{C}^2 \quad (\text{B.0})$$

Para obtener la posición del efector final se utiliza la cinemática directa (Ec.(B.2.1).

Apéndice C

Acronimos y abreviaturas

Tabla C.1: Acronimos y abreviaturas

GDL	Grados De Libertad
HRPI	Interacción Física Hombre Robot
IIR	Respuesta Infinita al Impulso
LMS	Mínimo Cuadrado Medio
MIMO	Multientradas, Multisalidas
PID	Proporcional, Integral, Derivativo
PD+G	Proporcional, Derivativo mas Gravedad
RBF	Función de Base Radial

Apéndice D

Glosario

Acción motora. Es la habilidad humana para controlar fuerzas de contacto durante la manipulación y exploración manual[43].

Actuador. Dispositivo capaz de convertir energía eléctrica, hidráulica u otro tipo de energía en movimiento[43].

Algoritmo. Conjunto ordenado y finito de operaciones que permite hallar la solución de un problema[13].

Aprendizaje. Proceso por el cual los parámetros libres de una red neuronal son adaptados a través de estimulaciones generadas por el entorno en el cual la red neuronal esta empotrada[13].

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 [47].

Codificador óptico. Dispositivo de retroalimentación que convierte un movimiento mecánico en señales eléctricas, las cuales indican la posición de un actuador.

Control adaptable. Esquema de control en el cual los parámetros del controlador se ajustan ante cambios de la planta, de manera que el comportamiento en lazo cerrado conserva las características deseadas de diseño. El control adaptable es inherentemente no lineal. Se aplica a sistemas con parámetros que varían lentamente en el tiempo[46].

Control. Proceso mediante el cual un sistema es llevado a parámetros preestablecidos[26].

Energía. Capacidad de realizar un trabajo[43].

Entrenamiento. Se refiere al proceso consiente y planeado de transferir conocimiento, habilidades y capacidades[19].

Epoca. Presentación completa del conjunto de entrenamiento a la red neuronal[19].

Dispositivo háptico. Conjunto de interfaces tecnológicas que interactúan 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 [47].

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 [48].

Función wavelet hija. Es una función wavelet resultado de dilatar o contraer y trasladar una función wavelet madre[19].

Función wavelet madre. Es una función wavelet que se puede dilatar o contraer y trasladar, generando funciones wavelet hijas[19].

Función wavelet. Es una función de onda oscilatoria de duración muy corta, también se le llama ondoleta[19].

Grados de libertad pasivos. Grados de libertad que no se encuentran actuados[43].

Grados de libertad. Número de coordenadas que describen de manera única la posición de todos los eslabones de un sistema[43].

Identificación. Conjunto de métodos para la obtención de modelos matemáticos a partir de datos experimentales de las entradas y salidas de un sistema. Evitándose la obtención de un modelo a partir de complejas leyes[19].

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 [49].

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 [47].

Percepción háptica. 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 nocioreceptores) [50].

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 [47].

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 [51].

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 [52].

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 [55].

Retroalimentación háptica. Del griego haptesthai, significa tocar, es sinónimo de retroalimentación táctil [53]. Algunos autores extienden su significado al de retroalimentación de fuerza [52].

Retroalimentación kinestética. Sinónimo de propiocepción, es referente a la kinesiología, corresponde a un sentido mediado por órganos extremos localizados en músculos, tendones, y articulaciones, y es simulado por movimientos y tensión corporal [53].

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 [56].

Sensor táctil. Son utilizados para medir las variables de la simulación háptica, como fuerzas locales o distribuidas, presión y deformación [52].

Tacto. Sensación evocada cuando la piel es sujeta a estímulos mecánicos, térmicos, químicos, o eléctricos [54].

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[43].

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[43].

Tribología. Es la ciencia que estudia la fricción, el desgaste y la lubricación que tiene lugar durante el contacto entre superficies sólidas en movimiento[43].

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 [47].

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 [47].

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 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[43].

Fricción dinámica. Es la que existe cuando el objeto ya se encuentra en movimiento (en este caso hay movimiento relativo entre las dos superficies)[43].

Apéndice E

Publicación en Capítulo de Libro



An Adaptive Robotic Assistance Platform for Neurorehabilitation Therapy of Upper Limb

José Daniel Meneses-González¹, Omar Arturo Domínguez-Ramírez^{1(✉)},
Luis Enrique Ramos-Velasco², Félix Agustín Castro-Espinoza¹,
and Vicente Parra-Vega³

¹ Research Center in Information Technologies and Systems,
Autonomous University of Hidalgo State (UAEH), Pachuca, Mexico
`dants_300@hotmail.com`, `{omar,fcastro}@uaeh.edu.mx`

² Aerospace Engineering Department,
Metropolitan Polytechnic University of Hidalgo (UPMH), Tolcayuca, Mexico
`lramos@upmh.edu.mx`

³ Center for Research and Advanced Studies (CINVESTAV), Saltillo, Mexico
`vparra@cinvestav.mx`

Abstract. There are many human-robot physical interaction methods for physical therapy in patients of upper limbs disabilities. The use of haptic devices for this purpose is abundant, as are the different proposals for motion control in haptic guidance, as part of a clinical protocol with the patient in the loop. A conclusive result of these interaction platforms is the need to modify elements of the control strategy and the motion planning, this for each patient. In this paper, we propose a new approach to the control of human-robot physical interaction systems. To guarantee the bilateral energy flow between the robotic system and the patient under stable conditions and, without modifying the interaction platform; we propose an adaptive control structure, free of the dynamic model. The control scheme is called PID Wavenet, and identifies the dynamics using a radial basis neural network with daughter RASP1 wavelets activation function; its output is in cascaded with an infinite impulse response (IIR) filter to prune irrelevant signals and nodes as well as to recover a canonical form. Then, online adaptive of a discrete PID regulator is proposed, whose closed-loop guarantees global regulation for nonlinear dynamical plants, in our case a haptic device with the human in the loop. Effectiveness of the proposed method is verified by the real-time experiments on a Geomagic Touch haptic interface.

Keywords: Human robot interaction · Haptic interface
Wavelet neural network control · Rehabilitation robotics

1 Introduction

1.1 Background

Haptic interaction with a virtual object establishes a kinesthetic sensation to the user. It is well accepted that to better perceive a given virtual object, it is relevant to yield some surface properties of the object, for instance the shape through the normal contact force, the roughness by the sliding friction, and the texture as a combination of both of them. Based on a novel formulation of the computation of the contact force of haptic interfaces, a new paradigm for haptic guidance is proposed. Guided kinesthetic feedback is provided to improve and effectively train the user with PID Wavenet robot control. The system introduces a training path using potential fields, which can be tuned according to the handicap score of the user, to gradually improve the motor skills of the user. To this end, we present a haptic guidance platform to support physical rehabilitation of neuromuscular disabilities, providing a solution to the problem of the increasing demand of neuromuscular therapy in overcrowded facilities with deficit of rehabilitation professionals. The platform, characterized by a portable modular architecture, can be configured according to the treatment suggested by the physician, for instance, a Local Haptic Guidance configuration for patients requiring a continuous repetition of coordinated movements to recover, or improve, motor skills, and, a Remotely-Assisted Haptic Guidance for a direct intervention of the therapist, evaluating and stimulating, simultaneously, the neuromuscular condition of the patient. To this goal, a novel global PID control scheme for nonlinear MIMO systems is proposed and synthesized for a haptic interface. The identification process (human-robot physical interaction) is used for online tuning of the discrete linear PID feedback gains. Inverse dynamics identification is based on radial basis neural network with daughter RASP1 wavelets activation functions in cascaded with an infinite impulse response (IIR) filter in the output to prune irrelevant signals and nodes. The closed-loop system guarantees global regulation for a class of Euler-Lagrange systems, convenient for instance in plants whose dynamics are rather uncertain or unknown, such as in haptic devices.

1.2 Contribution

In this paper, a novel wavenet control based on closed-loop identification scheme of the human-robot interaction as a full contact is proposed, and representative experiments are presented to purpose in rehabilitation of upper limb. The input of the wavelet neural network is the human contact force as altogether with the position and velocity of the haptic device, such that approximate identification of the coupled dynamics is achieved. The adaptive wavenet adapts to the time-varying nature of human arm dynamics coupled to the haptic device such that a multiresolution wavenet scheme synthesizes a so-called model-free *PIDWavenet* controller. The proposed methodology has been implemented in a Geomagic Touch haptic robot system.

2 The Problem to Solve

Consider a haptic device as an interaction platform; the nonlinear dynamic model is similar to a robot manipulator, as follows:

$$H(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} + G(q) = \tau - \tau_f, \quad (1)$$

where $q \in R^n$, $\dot{q} \in R^n$ are the generalized position and velocity joint coordinates, respectively, $H(q) \in R^{n \times n}$ denotes a symmetric positive definite inertial matrix, $C(q, \dot{q}) \in R^{n \times n}$ represents the Coriolis and centripetal forces, $G(q) \in R^n$ models the gravity forces, and $\tau \in R^n$ stands for the torque input. Where it only compensates the device dynamics. Term $\tau_f = f_b \dot{q} + f_c \tanh(\gamma \dot{q})$ stands for joint friction, for f_b, f_c, γ are positive definite $n \times n$ matrices modelling viscous damping and the dry friction and its coefficient, respectively. However, the control techniques that allow global regulation to be solved a perfect tracking of trajectories have been worked by the control community, [9]. When considering the human operator in the loop of the device, the dynamics change remarkably; the nonlinear dynamic model is:

$$H(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} + G(q) = \tau - \tau_f + \tau_h, \quad (2)$$

Where the disturbance torque τ_h is assumed a differentiable bounded small time-varying function as the bounded persistent disturbance term, and represent the human in the loop. Now, in our application case, the human operator is a patient with disability in upper limb. Previous work, integrated the solution with non-linear control structures with limited performance, [10]. The problem is the modification of the control gains for each patient, see Fig. 1.

The conclusion of [10] is the necessity of the adaptability of the control strategy, being the purpose of this preliminary work to induce rehabilitation conditions. In the Fig. 1, the patient is guided in a trajectory based on a clinical protocol.

2.1 Experimental Platform

Consider a *Geomagic Touch* haptic interface, whose haptic device is a joint nonlinear robot of three degrees of freedom, see Fig. 2, which although shows purposely low apparent inertia at its end-effector, there arises strong nonlinear coupling and it is subject to joint friction and gravitational torques. The experimental platform runs on a workstation iCore7 at 3.6 GHz Intel Core with 16 Gb of RAM. Software features is under OS Windows 10, running a compiler Simulink under Matlab 2014. Experiments are run at $[h = 1 \text{ ms}]$ or a sampling frequency of 1 KHz.

3 Adaptive Human Robot Physical Interaction

3.1 Intelligent Control Design

The wavenet PID controller scheme is based on an identification of inverse dynamics and a IRR filter to tune PID feedback gains (k_p, k_i and k_d), and guarantees global regulation, see Fig. 3. The following variables are used: $\mathbf{y}_{ref}(k)$ is

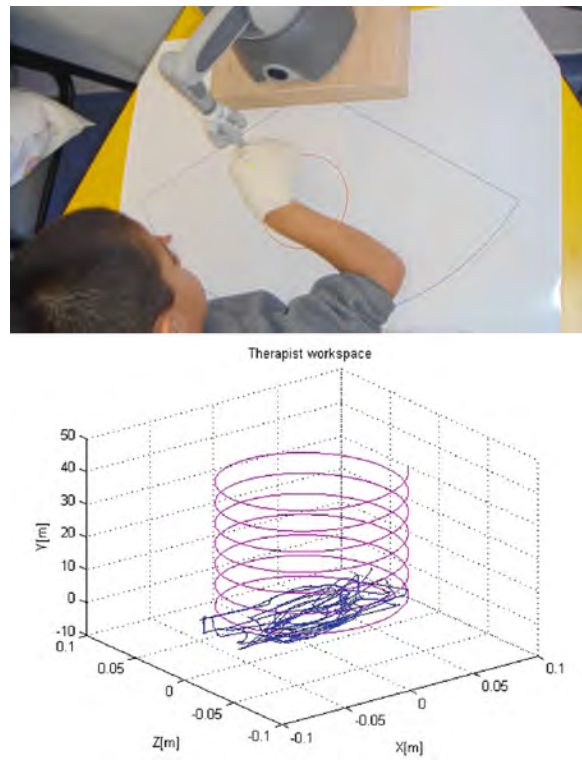


Fig. 1. Auto-tuning feedback gains of the PDH controller.

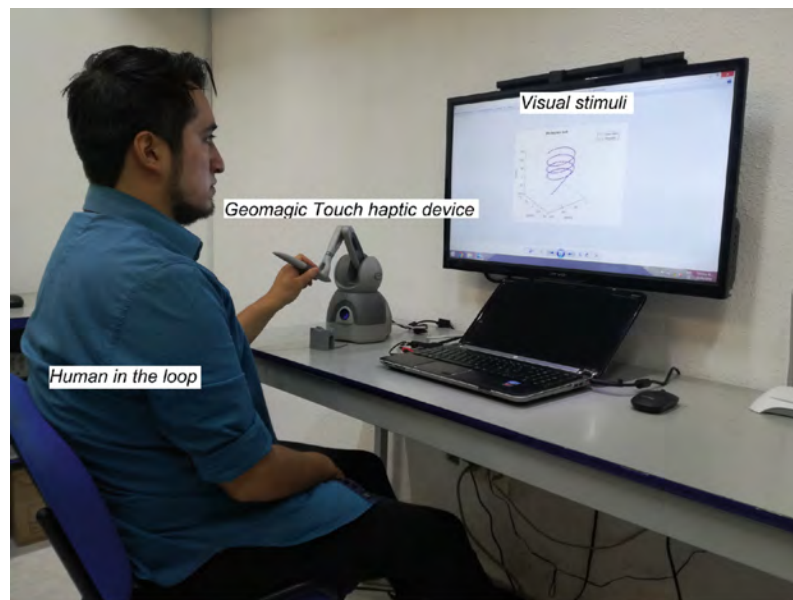


Fig. 2. Experimental platform.

the reference signal, $\epsilon(k)$ stands for the error signal, the control input is $\mathbf{u}(k)$, $r(k)$ models the noise signal, $\mathbf{y}(k)$ is the HRpI (human patient in the haptic loop) output with $\hat{\mathbf{y}}(k)$ its estimate, and $\mathbf{e}(k)$ the error estimated, finally, $v(k)$ stands for the persistence signal.

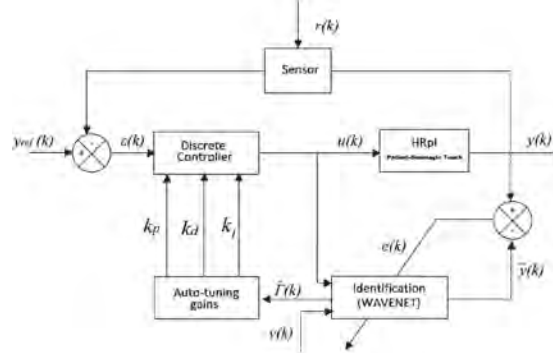


Fig. 3. Scheme of the PID Wavenet controller.

Haptic Device Dynamics. Consider the nonlinear dynamic model of a rigid serial n -link robot manipulator as follows, in the continuous domain. HRpI based on human patient in the loop and haptic interface as the Eq. 2, can be interpreted as a general nonlinear MIMO dynamical system, which can be represented by a general discrete state equation, [6]:

$$\mathbf{x}(k+1) = f[\mathbf{x}(k), \mathbf{u}(k), k] \quad (3)$$

$$\mathbf{y}(k) = g[\mathbf{x}(k), k] \quad (4)$$

where $\mathbf{x} \in R^n$, $\mathbf{u}, \mathbf{y} \in R^p$ and

$$f : R^n \times R^p \longrightarrow R^n \quad (5)$$

$$g : R^n \longrightarrow R^p \quad (6)$$

are unknown smooth functions. Robot friction and disturbances are considered affine and state dependent, then those are represented in (5)–(6). Notice that input $\mathbf{u}(k)$ and system output $\mathbf{y}(k)$ are the only data available, and since the linearized system of (2) is observable around the equilibrium point, then there exists an input-output representation that can be reconstructed with a basis, [6]. That is, consider the following canonical realization:

$$\mathbf{y}(k+1) = \beta[\mathbf{Y}(k), \mathbf{U}(k)] \quad (7)$$

where

$$\mathbf{Y}(k) = [\mathbf{y}(k) \ \mathbf{y}(k-1), \dots, \mathbf{y}(k-n+1)] \quad (8)$$

$$\mathbf{U}(k) = [\mathbf{u}(k) \ \mathbf{u}(k-1), \dots, \mathbf{u}(k-n+1)] \quad (9)$$

Then, there exists a function β that maps the output $y(k)$, input $u(k)$ and their $n - 1$ past values in $y(k + 1)$, [6]. Thus, [1] establishes that there exists a wavenet neural network $\hat{\beta}$ that can be trained to converge locally to β . In this paper, we exploit this property of wavenets, but additionally we consider IIR filter in the output layer to prune irrelevant signals to build an efficient identification scheme useful to tune PID feedback gains.

3.2 Wavenet Identification (IWNN)

It is proposed radial basis neural network for the identification process, in which the activation functions $\psi(\tau)$ are daughter wavelet functions $\psi_j(\tau)$ of RASP1 type. This incorporates three IIR filter in cascade whose function is to filter neurons that have little or null contribution in the identification process, allowing a reduction in the number of iterations in the learning process, [3]. This scheme identifies approximately the inverse plant using as few neurons as possible, which stands for an efficient approximator for practical applications due to its reduced computational load. The general interconnection and signal propagation is presented in Fig. 4, where $\tau_l = \frac{\|\mathbf{u}(k) - \mathbf{b}_l\|}{\mathbf{a}_l}$. Infinite impulse response (IIR) recurrent structure, in cascading structure, yields double improving speed of learning by pruning those nodes with insignificant relevant information from the cross contribution summation of daughters wavelets, located in the third layer. The inner structure of the IIR filter is shown in Fig. 5, notice the forward delayed structure modulated by the input and the feedback loop modulated by the persistent signal to allows swapping a range of frequency. The mother wavelet function $\psi(k)$ generates daughter wavelets $\psi_{a,b}(\tau)$ by its property of expansion or contraction and translation, represented as, [1]:

$$\psi_l(\tau_l) = \frac{1}{\sqrt{a}} \psi(\tau_l) \tag{10}$$

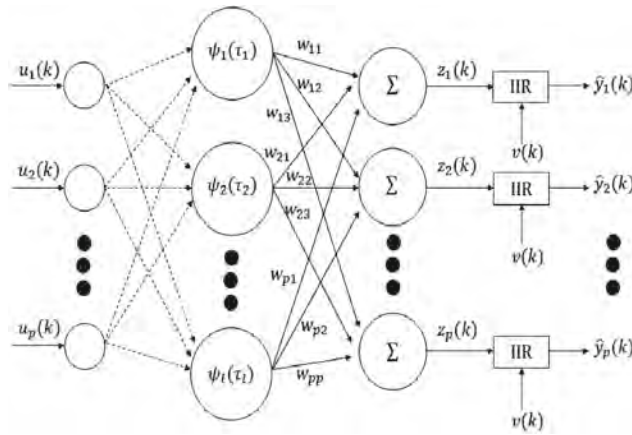


Fig. 4. Diagram of a wavenet neural network with an IIR filter in cascade.

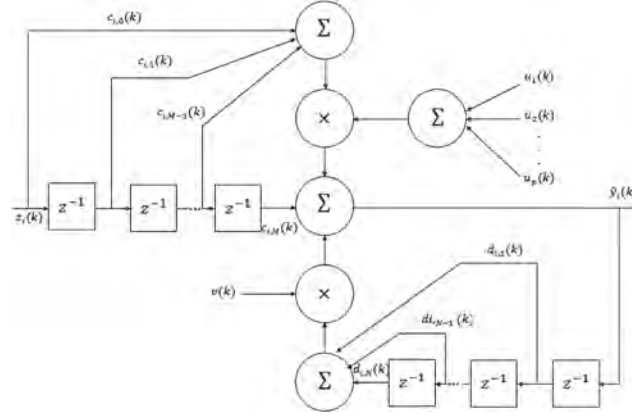


Fig. 5. IIR filter structure.

with $a \neq 0$; $a, b \in R$ and

$$\tau_{l_j} = \left(\sum_{j=1}^p (u_j - b_{l,j})^2 \right)^{1/2} / a_{l_j} \quad (11)$$

The j scale variable, a_{l_j} allows expansion and contraction, and $b_{l,j}$ stands for the (l, j) translation variable at k , in the classical role of RBF, with the advantage of dealing with more refinement through daughters wavelets $\psi_l(\tau_l)$. This last feature is essential in the present algorithm together with the pruning capability of the IIR filter. As suggested in [1], the mathematical representation of wavelet RASP1 is a singularity-free normalization of the argument of the wavelet

$$RASP1 = \frac{\tau}{(\tau^2 + 1)^2} \quad (12)$$

whose partial derivative with respect to $b_{i,j}$ is

$$\frac{\partial \tau}{\partial b_{i,j}} = \frac{1}{a} \frac{3\tau^2 - 1}{(\tau^2 + 1)^3} \quad (13)$$

In this way, the i wavenet approximation signal with IIR filter can be calculated as:

$$\begin{aligned} \hat{y}_i(k) &= \sum_{q=1}^p \sum_{l=0}^M c_{i,l} z_i(k-l) u_p(k) + \sum_{j=1}^N d_{i,j} \hat{y}_i(k-j) v(k) \\ z_i(k) &= \sum_{l=1}^L w_{i,l} \psi_l(k) \end{aligned} \quad (14)$$

where L stands for the number of daughter wavelets, w_l the weights of each neuron in the wavenet, c_i and d_j are the coefficients of forward and backward IIR filter, respectively, and M and N the coefficients number of forward and backward IIR filter, respectively. The wavenet parameters are optimized by a

least mean square algorithm (LMS) subject to minimizing a convex radially unbounded cost functions \mathbf{E} , defined by

$$\mathbf{E} = [E_1 E_2 \cdots E_i \cdots E_p]^T \quad (15)$$

where

$$E_i = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^T e_i^2(k) \quad (16)$$

Let the estimation error between wavenet output signal with IIR filter and system output be

$$e_i(k) = y_i(k) - \hat{y}_i(k) \quad (17)$$

To minimize \mathbf{E} , the steepest gradient-descent method is considered. To this end, notice that partial derivatives of \mathbf{E} wrt $\mathbf{A}(k)$, $\mathbf{B}(k)$, $\mathbf{W}(k)$, $\mathbf{C}(k)$, $\mathbf{D}(k)$ are required to update the incremental changes of each parameter along its negative gradient direction. That is,

$$\Delta \mathbf{W}(k) = -\frac{\partial \mathbf{E}}{\partial \mathbf{W}(k)} \quad (18)$$

$$\Delta \mathbf{A}(k) = -\frac{\partial \mathbf{E}}{\partial \mathbf{A}(k)} \quad (19)$$

$$\Delta \mathbf{B}(k) = -\frac{\partial \mathbf{E}}{\partial \mathbf{B}(k)} \quad (20)$$

$$\Delta \mathbf{C}(k) = -\frac{\partial \mathbf{E}}{\partial \mathbf{C}(k)} \quad (21)$$

$$\Delta \mathbf{D}(k) = -\frac{\partial \mathbf{E}}{\partial \mathbf{D}(k)} \quad (22)$$

then, the tuning update parameter becomes:

$$\mathbf{W}(k+1) = \mathbf{W}(k) + \mu_{\mathbf{W}} \Delta \mathbf{W}(k) \quad (23)$$

$$\mathbf{A}(k+1) = \mathbf{A}(k) + \mu_{\mathbf{A}} \Delta \mathbf{A}(k) \quad (24)$$

$$\mathbf{B}(k+1) = \mathbf{B}(k) + \mu_{\mathbf{B}} \Delta \mathbf{B}(k) \quad (25)$$

$$\mathbf{C}(k+1) = \mathbf{C}(k) + \mu_{\mathbf{C}} \Delta \mathbf{C}(k) \quad (26)$$

$$\mathbf{D}(k+1) = \mathbf{D}(k) + \mu_{\mathbf{D}} \Delta \mathbf{D}(k) \quad (27)$$

The update parameters follows the next rule:

$$\Delta \theta(k) = -\mu \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial \theta(k)} \quad (28)$$

$$\theta(k+1) = \theta(k) + \Delta \theta(k) \quad (29)$$

where θ can be any of the parameters set $\mathbf{W}(k)$, $\mathbf{A}(k)$, $\mathbf{B}(k)$, $\mathbf{C}(k)$ o $\mathbf{D}(k)$. The value of $\mu \in R^m$ represents the learning rate for each of the parameters.

3.3 Discrete PID Controller

Canonical observable realization of the discrete domain equations of the robot suggests, in view of previous subsection, that the following models the unknown robot, which is useful to derive a wavenet schemes as follows. Consider

$$\mathbf{y}(k+1) = \Phi[\mathbf{Y}(k), \mathbf{U}(k)] + \Gamma[\mathbf{Y}(k), \mathbf{U}(k)] \cdot \mathbf{u}(k) \quad (30)$$

when terms Φ and Γ are exactly known, computed torque or inverse dynamics algorithms provides the following controller $u(k)$ that ensured convergence to a desired output $\mathbf{y}_{ref}(k+1)$ as follows:

$$\mathbf{u}(k) = \Gamma^{-1}[\mathbf{Y}(k), \mathbf{U}(k)](\mathbf{y}_{ref}(k+1) - \Phi[\mathbf{Y}(k), \mathbf{U}(k)]) \quad (31)$$

Thus, the closed-loop Eqs. (30)–(31) produces, ideally $\mathbf{y}(k+1) = \mathbf{y}_{ref}(k+1)$. However, it is assumed that such realization (30) is not known, but observability of robot dynamics implies that there exist basis function that approximates (30). Then, (30) is estimated as follows

$$\hat{\mathbf{y}}(k+1) = \hat{\Phi}[\mathbf{y}(k), \Theta_\Phi] + \hat{\Gamma}[\mathbf{y}(k), \Theta_\Gamma] \cdot \mathbf{u}(k) \quad (32)$$

System (32) is estimated by two wavenet functions as follows

$$\hat{\Phi}_i[\mathbf{y}(k), \Theta_\Phi] = \sum_{j=1}^N d_{i,j} \hat{y}(k-j) v(k) \quad (33)$$

$$\hat{\Gamma}_{i,q}[\mathbf{y}(k), \Theta_\Gamma] = \sum_{q=1}^p \sum_{l=0}^M c_{i,l} z_i(k-i) u_q \quad (34)$$

$$z_i(k) = \sum_{l=1}^L w_{i,l} \psi_l(k) \quad (35)$$

with adjustable parameters Θ_Φ and Θ_Γ , for function $\hat{\Phi}_i$ and $\hat{\Gamma}_{i,q}$ representing the i component of $\hat{\Phi}$ and the (i, q) -element of the matrix $\hat{\Gamma}$, respectively. Therefore, since nonlinear functions wavenet functions $\hat{\Phi}(k)$ and $\hat{\Gamma}(k)$ estimate $\Phi(k)$ and $\Gamma(k)$, as $k \rightarrow \infty$, then error $e_i(k) = y_i(k) - \hat{y}_i(k)$ can be used as a Lebesgue measure useful to tune feedback gains. The following discrete PID controller is proposed:

$$\begin{aligned} u_\sigma(k+1) = & u_\sigma(k) + k_{p_\sigma}(k)[\varepsilon_\sigma(k) - \varepsilon_\sigma(k-1)] + \\ & k_{d_\sigma}(k)[\varepsilon_\sigma(k) - 2\varepsilon_\sigma(k-1) + \varepsilon_\sigma(k-2)] + \\ & k_{i_\sigma}(k)\varepsilon_\sigma(k) \end{aligned} \quad (36)$$

where $k_{p_\sigma}(k)$, $k_{i_\sigma}(k)$ and $k_{d_\sigma}(k)$ stand for strictly positive definite proportional, integral and derivative feedback gains, respectively; $u(k)$ is the controller at instant k , and error is defined as

$$\varepsilon_\sigma(k) = y_{ref_\sigma}(k) - y_\sigma(k) \quad (37)$$

for $\sigma = 1, 2, 3, \dots, p$. Each feedback gain is tuned according to the corresponding error they affect in (36) and modulated by $\hat{\Gamma}$, the input matrix of (32).

3.4 Auto-tuning PID Gains

Due to the gains $k_{p_\sigma}, k_{i_\sigma}$ are considered within the cost function (16), those can be updated similar to (23)–(27). Let

$$\begin{aligned} k_{p_\sigma}(k) &= k_{p_\sigma}(k-1) + \mu_p e_\sigma(k) \hat{\Gamma}_{i,q}(k) [\varepsilon_\sigma(k) - \varepsilon_\sigma(k-1)] \\ k_{i_\sigma}(k) &= k_{i_\sigma}(k-1) + \mu_i e_\sigma(k) \hat{\Gamma}_{i,q}(k) \varepsilon_\sigma(k) \\ k_{d_\sigma}(k) &= k_{d_\sigma}(k-1) + \mu_d e_\sigma(k) \hat{\Gamma}_{i,q}(k) \\ &\quad [\varepsilon_\sigma(k) - 2\varepsilon_\sigma(k-1) + \varepsilon_\sigma(k-2)] \end{aligned}$$

where $\hat{\Gamma}$ is defined by (34), for $0 < \mu < 1$ the learning rate of the PID controller gains. Notice that learning rates μ are designer parameters.

3.5 The Medical Task

The Haptic Guidance Platform is a modular system designed to assist rehabilitation treatments in patients with neuromuscular affections. It offers the possibility of being configured according to the therapy for a wide class of disabilities. The platform is composed of three main functional blocks: *Rehabilitation Therapy* concerning medical aspects in a medical protocol to determine the treatment according to the condition of the patient and suggests the visual and kinaesthetic stimuli for his/her neuromuscular system. *Haptic Interface* including hardware and software of the haptic device itself, including drivers, close loop controllers and a visual display for virtual reality environments, and *Computational Platform* containing the path planning algorithms, communication interfaces and protocols, and software interfaces required to connect the host computer to the external devices. The whole design, obtained under a robotic approach, respects biomedical specifications to allow its use with patients, i.e., anthropometry, ergonomics, and safety.

3.6 Proposal for Rehabilitation

Hemiparesis is relatively common condition in children, of congenital or acquired aetiology. It is characterized by a unilateral decrement of force and precision of movements, due to injuries in the nervous system. The system in Local Haptic Guidance configuration, assists the child in coordination tasks tracking flat patterns indicated visually. The guidance action corrects his movements by an attractive force towards the desired trajectory producing a kinaesthetic stimulus that promotes the synchrony and the correct sequence of movements. This configuration was implemented using a Geomagic Touch haptic device (Fig. 2) and is proposed for a therapy session in patients with hemiparesia. The close loop controller was designed under a Intelligent control based on a Wavenet controller with high performance.

4 The Experimental Results

The experiment consists of applying the adaptive control strategy based on a wavenet network and the self-tuning of a PID control. The graphs of the signals derived from each experiment correspond to: (i) the workspace (x vs y vs z), (ii) the variation in time of the operational coordinates, (iii) the operational error signals, (iv) the joint control signals, (v) the identification error by degree of freedom, (vi) the dynamic weights and parameters of the neural network, and (vii) the self-tuning of discrete PID control gains. Two experimental phases are presented: (a) experiment without human in the loop, in this case the control adapts the gains according to the admissible configurations in the tracking task and the compensation of the dynamics without uncertainty in the loop; and (b) experiment with human in the loop, with the same signals as in the previous case, but with the human operator in the loop. In which there is presence of artificially induced disturbances to show the response of adaptability.

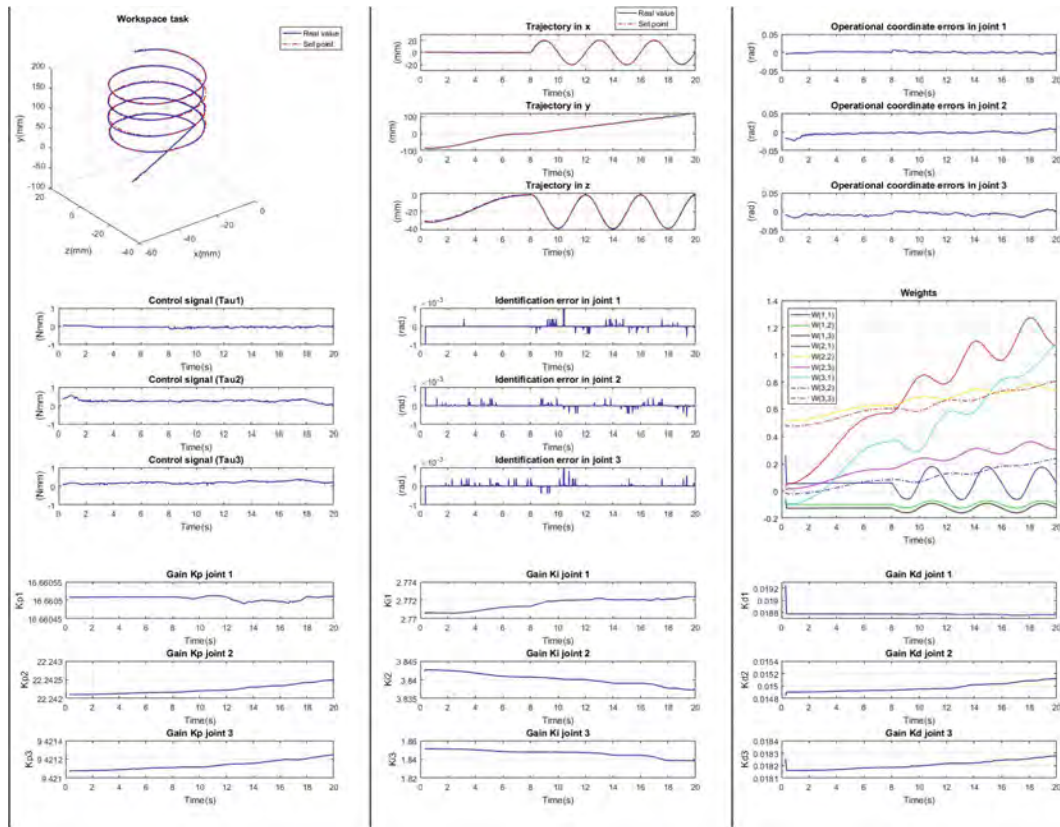


Fig. 6. Adaptive control performance **without** human operation in the loop. Tracking in Workspace. Haptic device control signal performance. Error identification for each degree of freedom. The weights of the wavelet neural network. Control gains.

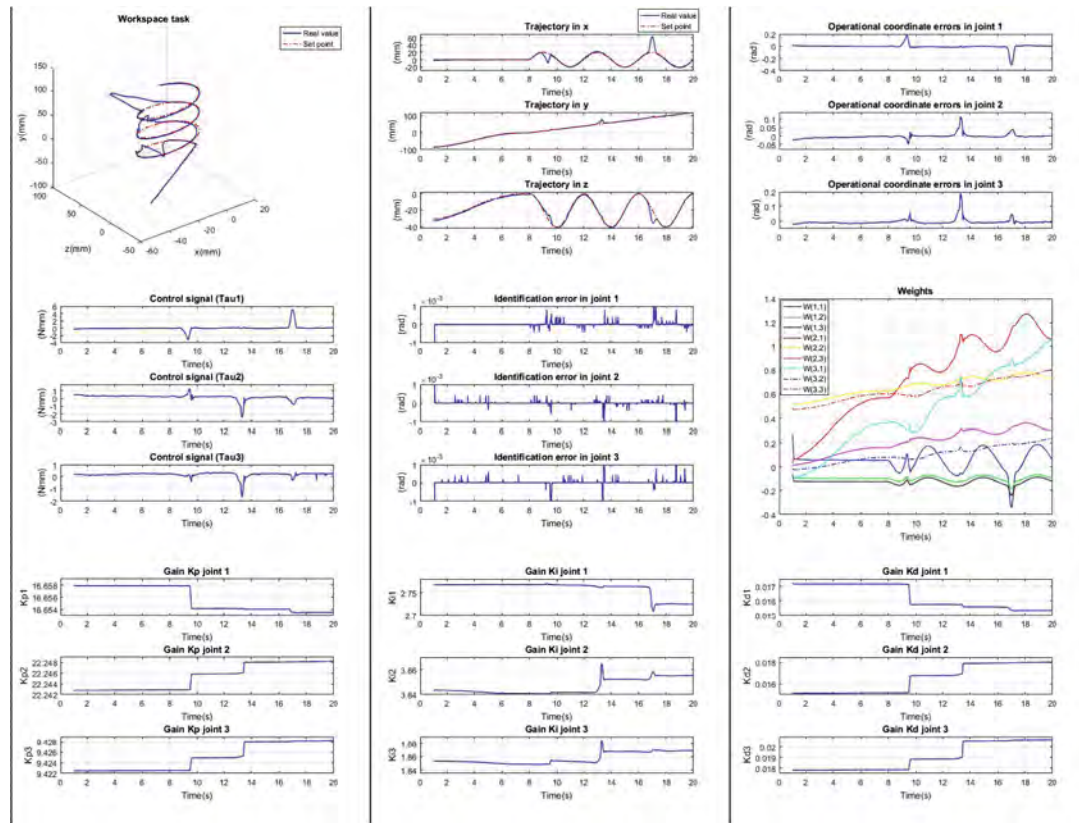


Fig. 7. Adaptive control performance **with** human operation in the loop. Tracking in Workspace. Haptic device control signal performance. Error identification for each degree of freedom. The weights of the wavelet neural network. Control gains.

4.1 Discussions of the Experiments

Although the experimental practice is developed with a human operator in conditions of physical and mental health, the emulation of a patient that modifies the trajectory involuntarily or exercises spatial forces that test the robustness of the platform, a high performance is observed. The control signal has the purpose to guarantee the tracking and compensate the dynamics of the haptic device and the human operator: $\tau = \tau_{haptic_device} - \tau_h$. Under these conditions, the task of haptic guidance is given satisfactorily; it is visible that with the disturbance, the gains of the discrete PID control are self-adjusted by the change in the identification error. The presence of the human operator, and its disturbing action demand an excess of energy with magnitudes below the operating values. What guarantees that the platform will have an excellent performance for different users.

5 Conclusion

In this paper, a novel identification and control scheme for nonlinear MIMO systems based in wavenet with IIR filter, as pruning of irrelevant nodes, and RASP1

daughters wavelets is proposed for an efficient inverse dynamics approximation scheme. Such approximation capabilities and the basis of the input matrix is used to design a time-varying feedback gains such that recurrent discrete tuning of PID feedback gains occurs without any a priori knowledge of the haptic device. Contrary to most neural network controllers, approximation of inverse dynamics are not used for stabilization but for tuning feedback gains of a simple PID controller. Global convergence is obtained as iteration increases. Experiments show the viability of the proposed scheme for practical implementation, where typically the exact model is now known, in particular, it captures the essential full and real nonlinear dynamics, without any linearization nor idealization of non-linear robotics. Experiments on a nonlinear 3D highly coupled robotic system in real-time shows the relevance of the proposed control scheme. Under these conditions, the physical interaction platform is ideal for the application of clinical protocols through a task tracking with the patient in the control loop.

References

1. Daubechies, I.: Ten Lectures on Wavelets. SIAM, Philadelphia (1992)
2. Fu, M.J., Cavusoglu, M.C.: Human-arm-and-hand-dynamic model with variability analyses for a stylus-based haptic interface. *IEEE Trans. Syst., Man, Cybern., Part B (Cybern.)* **42**, 1633–1644 (2012)
3. Haykin, S.: Kalman Filtering and Neural Networks. Wiley, Hoboken (2001)
4. Jarillo-Silva, A., Domínguez-Ramírez, O.A., Parra-Vega, V., Ordaz-Oliver, J.P.: PHANToM OMNI haptic device: kinematic and manipulability. In: IEEE, Electronics, Robotics and Automotive Mechanics Conference 2009, CERMA 2009, pp. 193–198 (2016). <https://doi.org/10.1109/CERMA.2009.55>
5. Krebs, H.I., Hogan, N., Aisen, M.L., Volpe, B.T.: Robot-aided neurorehabilitation. *IEEE Trans. Rehabil. Eng.* **6**, 75–87 (1998)
6. Levin, A., Narendra, K.: Control of nonlinear dynamical systems using neural networks: controllability and stabilization. *IEEE Trans. Neural Netw.* **4**, 192–206 (1993)
7. Ramos-Velasco, L.E., Domínguez-Ramírez, O.A., Parra-Vega, V.: Wavenet fuzzy PID controller for nonlinear MIMO systems: experimental validation on a high-end haptic robotic interface. *Appl. Soft Comput.* **40**, 199–205 (2016)
8. Suleman, K., Andersson, K., Wikander, J.: Dynamic based control strategy for haptic devices. In: IEEE, World Haptics Conference, pp. 131–136 (2011)
9. Spong, M.W., Vidyasagar, M.: Robot Dynamics and Control. Wiley, Hoboken (1989)
10. Turijan-Rivera, J.A., Ruiz-Sanchez, F.J., Domínguez-Ramírez, O.A., Parra-Vega, V.: Modular platform for haptic guidance in paediatric rehabilitation of upper limb neuromuscular disabilities. In: Pons, J., Torricelli, D., Pajaro, M. (eds.) *Converging Clinical and Engineering Research on Neurorehabilitation*. BIOSYSROB, vol. 1, pp. 923–928. Springer, Heidelberg (2013). https://doi.org/10.1007/978-3-642-34546-3_150

Bibliografía

- [1] Adachi Y., *Development of a Haptic Interface for Virtual Reality*, 2nd Japan-France Congress on Mechatronics, Takamatsu, Japan, 4 pp., November, 1994.
- [2] Agilent Technologies, *Quick Assembly. Two and Three Channel Optical Encoders. HEDM-550x/560x, HEDS-550x/554x, HEDS-560x/564x*, www.agilent.com/semiconductors, 2002.
- [3] K. Aström. *Computer-Controlled Systems, Theory and Design*. Prentice-Hall, New York, 1997.
- [4] K. J. Astrom, Tore Hagglund. *PID Controllers: Theory, Design and Tuning*. Internacional, 2007.
- [5] Cruz Tolentino J. Alberto, Jarillo Silva Alejandro, Ramos Velasco Luis E. and Domínguez Ramírez Omar A. (2012). *Wavelet PID and Wavenet PID: Theory and Applications, PID Controller Design Approaches - Theory, Tuning and Application to Frontier Areas*, Dr. Marialena Vagia (Ed.), ISBN: 978-953-51-0405-6, InTech.
- [6] Domínguez-Ramírez O. A. and V. Parra-Vega. *Active haptic exploration of deformable objects*. Chapter 16 in DAAAM International Scientific Book 2006, B. Katalinic (Ed), published by DAAAM international, pp. 177-190, 2006.
- [7] C. R. Domínguez Mayorga, M. A. Espejel Rivera, L. E. Ramos Velasco, J. C. Ramos Fernández y E. Escamilla Hernández, *Algoritmos wavenet con aplicaciones en la aproximación de señales: un estudio comparativo*, Revista Iberoamericana Automática e Informática (RIAI), 2012, ISSN:1697-7912, Vol. 09, pp.347-358, <http://dx.doi.org/10.1016/j.riai.2012.09.001>
- [8] F.A. Díaz López, *Control multiresolución wavenet para sistemas no lineales MIMO: aplicación en una interfaz háptica*, UPP 2013.

-
- [9] F.A. Díaz López, L.E. Ramos Velasco, O. A. Domínguez Ramírez and V. Parra Vega, *Multiresolution Wavenet PID Control for Global Regulation of Robots*, 9th Asian Control Conference (ASCC 2013), June 23-26, 2013 at Istanbul, Turkey.
- [10] Fausett L., *Fundamentals of neural networks: Architecture, algorithms and applications*. Prentice Hall, 1994.
- [11] Graps A., *An introduction to wavelets*. IEEE Computational Science and Engineering, Summer 1995, vol. 2, num. 2. 331-373, 1910.
- [12] 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.
- [13] S. Haykin. *Kalman Filtering and Neural Networks*. Wiley, 2001.
- [14] Hertz J., Krogh A. and Palmer R.G., *Introduction to the theory of neural computation*. Santa Fe Institute Studies in the Sciences of Complexity (vol. 1). Redwood City, CA: Addison-Wesley. 1991
- [15] 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.
- [16] Iwata H., *Pen-based Haptic Virtual Environment*, Proceedings of IEEE Virtual Reality Annual International Symposium, IEEE, New York, pp. 287-292, September, 1993.
- [17] B. Kuo. *Digital Control Systems*. Oxford University Press, USA, 1995.
- [18] A. Levin and K. Narendra. *Control of nonlinear dynamical systems using neural networks: Controllability and stabilization*. IEEE Transactions on Neural Networks, 4(2):192-206, March 1993.
- [19] Li H., Jin H., and Guo C., *PID Control Based on Wavelet Neural Network Identification and Tuning and Its Application to Fin Stabilizer*. Proceedings of the IEEE International Conference on Mechatronics and Automation, pp. 1907-1911, Niagara Falls, Canada, July 2005.

-
- [20] Lippmann R. P.. *An introduction to computing with neural nets*. IEEE ASSP Magazine, 422.1987
- [21] Massie T. and K. Salisbury, *The PHANTOM Haptic Interface A Device 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.
- [22] McCulloch W. and Pitts W.. *A Logical Calculus of Ideas Imminent in Nervous Activity*. Bull. Math. Biophys, Vol. 5, pp. 115-133, 1943.
- [23] M. Johnson, M. Moradi. *PID Control, New Identification and Design Methods*. Springer-Verlag. Reino Unido. 2005.
- [24] Nissho Electronics Co., *Haptic Master*, Company brochure, Tokyo, Japan, 2 pp. (in Japanese).
2004.
- [25] K. Ogata. *Discrete-Time Control Systems*. Prentice-Hall, New York, 1995.
- [26] K. Ogata. *Ingeniería de Control Moderna*. Prentice-Hall, New York, 1998.
- [27] Ordaz-Oliver M. Oscar., *Diseño e implementación de estrategias de control no lineal con propósitos de guiado hápticos*. ITP, México, 2009.
- [28] L. E. Ramos Velasco, J.C. Ramos Fernández, O. Islas-Gómez, J. García-Lamont, M.A. Espejel-Rivera, M.A. Márquez Vera, *Identificación y control wavenet de un motor de CA*, Revista Iberoamericana Automática e Inform(RIAI), Elsevier, 2013, ISSN:1697-7912.
- [29] Razi M.A. and Athappilly K.. *Expert Systems with Applications* 29 (2005)
- [30] Rumelhart D.E., Hinton G.E. and Williams R.J., *Learning representations by back-propagating error*. Nature, 323, 533-536. Reprinted in Anderson and Rosenfeld [1988], pp. 696-699. 1986.
- [31] Shankar Sastry and Marc Bodson, *Adaptive Control: Stability, Convergence, and Robustness*, Prentice-Hall, 1989-1994.

- [32] Sedighizadeh and Rezazadeh, *Adaptive PID Control of Wind Energy Conversion Systems Using RASP1 Mother Wavelet Basis Function Networks*. Proceedings of World Academy of Science, engineering and Technology, Vol. 37. 2008. 2010.
- [33] Y. Tong, Q. Dao, and F. Xu, *AC Motor Control Based on Wavelet Network*. Proceeding of the Third International Conference on Machine Learning and Cybernetics, pp. 861-865, Shangai, China, August 2004.
- [34] Yokoi H., J. Yamashita, Y. Fukui and M. Shimojo, *Development of the Virtual Shape Manipulating System*, Proceedings of the Fourth International Conference on Artificial Reality and Tele-Existence (ICAT'94), Tokyo, Japan, pp. 43-48, July 1994.
- [35] Daubechies I. *Ten lectures on wavelets*, SIAM, 1992.
- [36] Fu, M. J. and M. Cenk Cavusoglu: Human-Arm-and-Hand-Dynamic Model With Variability Analyses for a Stylus-Based Haptic Interface. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part B (Cybernetics), Vol. 42, pp. 1633 – 1644 (2012)
- [37] Haykin S.:Kalman Filtering and Neural Networks. Wiley (2001).
- [38] Jarillo-Silva, A., O. A. Domínguez-Ramírez, V. Parra-Vega and J. P. Ordaz-Oliver: Phantom Omni Haptic Device: Kinematic and Manipulability. IEEE, Electronics, Robotics and Automotive Mechanics Conference 2009, CERMA'09, pp. 193–198 (2016). 10.1109/CERMA.2009.55
- [39] Krebs, H. I., N. Hogan, M.L. Aisen and B.T. Volpe: Robot-Aided Neurorehabilitation. IEEE Transactions on Rehabilitation Engineering, Vol. 6, pp. 75-87 (1998)
- [40] Levin A. and K. Narendra: Control of Nonlinear Dynamical Systems Using Neural Networks: Controllability and Stabilization. IEEE Transactions on Neural Networks, Vol. 4, pp. 192–206 (1993)
- [41] Ramos-Velasco, L. E., O. A. Domínguez-Ramírez and V. Parra-Vega: Wavelet Fuzzy PID Controller for Nonlinear MIMO Systems: Experimental Validation on a High-end Haptic Robotic Interface. Applied Soft Computing, Vol. 40, pp.199-205 (2016)

-
- [42] Suleman, K., K. Andersson and J. Wikander: Dynamic based control strategy for haptic devices. IEEE, World Haptics Conference, pp. 131–136 (2011)
- [43] Mark W. Spong and M. Vidyasagar. *Robot Dynamics and Control*. Wiley, 1989.
- [44] Turijan-Rivera, J. A., F. J. Ruiz-Sánchez, O. A. Domínguez-Ramírez and V. Parra-Vega: Modular Platform for Haptic Guidance in Paediatric Rehabilitation of Upper Limb Neuromuscular Disabilities. Chapter in *Converging Clinical and Engineering Research on Neurorehabilitation*, pp. 923–928. Springer, Berlin, Heidelberg (2013)
- [45] Kelly R, Carelli R, 1988, Unified approach to adaptive control of robotic manipulators, Proceedings of the 27th IEEE Conference on Decision and Control, Austin, TX, Decembber, Vol. 1, pp.1598-1603.
- [46] Kelly R, Carelli R, 1989, Adaptive motion control design of robot manipulators: An input-output approach, International Journal of Control, Vol.50, No. 6, September, pp.2563-2581.
- [47] Sciavicco L. and B. Siciliano, *Modelling and Control of Robot Manipulators*, Springer-Verlag, Second Edition, 2000.
- [48] Moore, M. and J. Wilhelms, *Collision Detection and Response for Computer Animation*, Computer Graphics, Vol. 22, No. 4, pp. 369-374, 1988.
- [49] Hogan, N., *Controlling Impedance at the Man/Machine Interface*, Proceedings 1989, International Conference on Robotics and Automation, IEEE, New York, pp. 1626-1631, 1989.
- [50] 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.
- [51] 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.
- [52] 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.

- [53] Webster, M., *Websterss Ninth New Collegiate Dictionary*, Merriam-Webster Inc., Springfield, MA, 1985.
- [54] 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.
- [55] CyberEdge Journal, *The Virtual Lexicon*, Special Edition, No. 1, Sausalito, CA, pp. 4, 1993.
- [56] 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.