

Jornadas de Automática

Control de Fuerza basado en la Admitancia Mecánica para Masajes Robóticos

Cisnal, Ana^{a,*}, Oña-Simbaña, Edwin Daniel^b, Jardón-Huete, Alberto^b, Fraile, Juan Carlos^a, Pérez Turiel, Javier^a

^aInstituto de las Tecnologías Avanzadas de la Producción, Escuela de Ingenierías Industriales, Universidad de Valladolid, Paseo Prado de la Magdalena 3-5, 47011, Valladolid, España.

^bRobotics Lab, Dpto. de Ingeniería de Sistemas y Automática, Universidad Carlos III de Madrid, Avda. de la Universidad, 30, 28911, Leganés, España

To cite this article: Cisnal, Ana, Oña-Simbaña, Edwin D., Jardón-Huete, Alberto, Fraile, Juan Carlos, Pérez Turiel, Javier. 2025. Force Control Based on Mechanical Admittance for Robotic Massages. Jornadas de Automática, 46. <https://doi.org/10.17979/ja-cea.2025.46.12150>

Resumen

Este estudio presenta un sistema robótico de masaje basado en control de fuerza por admitancia mecánica, implementado en un robot colaborativo Elfin 5 con un sensor de fuerza/par. La arquitectura modular implementada en ROS 2 integra interpolación de trayectorias y control de fuerza, que ajusta dinámicamente la posición cartesiana del efector final para mantener constante la fuerza de contacto y calcula las posiciones articulares mediante cinemática inversa. Se realizaron tres pruebas experimentales con referencia de 4 N, logrando un seguimiento preciso de fuerza ($E_{medio} = 0,49N$), aunque con incrementos significativos al cambiar de sujeto ($E_{medio} = 0,79N$) y velocidad ($E_{medio} = 1,85N$). Los resultados demuestran el potencial del sistema para mantener la fuerza deseada en el eje Z, pero destacan la necesidad de incorporar modelos realistas de piel y algoritmos adaptativos, como el aprendizaje por refuerzo, para mejorar el rendimiento y personalizar los masajes. Este trabajo sienta las bases para sistemas robóticos de masaje avanzados y seguros, complementando la intervención humana en rehabilitación física.

Palabras clave: Control no lineal, Control por computadora, Diseño de control, Robótica, Sistemas biológicos y médicos, Sistemas hombre-máquina, Sistemas mecatrónicos.

Force Control Based on Mechanical Admittance for Robotic Massages

Abstract

This study presents a robotic massage system based on force control through mechanical admittance, implemented on an Elfin 5 collaborative robot with a force/torque sensor. The modular architecture implemented in ROS 2 integrates trajectory interpolation and force control, which dynamically adjusts the Cartesian position of the end-effector to maintain constant contact force and computes the joint positions via inverse kinematics. Three experimental tests were conducted with a reference force of 4 N, achieving precise force tracking ($E_{mean} = 0,49N$), though with significant increases when changing subjects ($E_{mean} = 0,79N$) and speed ($E_{mean} = 1,85N$). The results demonstrate the system's potential to maintain the desired force along the Z-axis, while highlighting the need to incorporate realistic skin models and adaptive algorithms, such as reinforcement learning, to improve performance and personalize massage therapy. This work lays the foundation for advanced and safe robotic massage systems, complementing human intervention in physical rehabilitation.

Keywords: Biological and Medical Systems, Computer for Control, Control Design, Human Machine Systems, Mechatronic Systems, Non-Linear Control Systems, Robotics.

*Autor para correspondencia: ana.cisnal@uva.es

1. Introducción

El masaje terapéutico es una práctica ancestral ampliamente reconocida por sus beneficios para la salud física y mental, especialmente en el alivio del dolor muscular, la mejora de la circulación y la reducción del estrés (Yang et al., 2024). Sin embargo, su aplicación tradicional depende de la disponibilidad de los terapeutas, lo que puede resultar en tratamientos inconsistentes y limitados (Kerautret et al., 2020). Para abordar estas limitaciones, los sistemas robóticos han emergido como una solución prometedora, capaces de ofrecer masajes repetibles, controlados y personalizados (Li et al., 2020).

El desarrollo de robots de masaje se ha acelerado en los últimos años, con avances en mecatrónica, sensorización y algoritmos de control que permiten replicar las técnicas de masaje humano (Tang et al., 2025; Dong et al., 2023). Estos robots ofrecen ventajas como la capacidad de aplicar fuerzas controladas con precisión, la personalización de las trayectorias de masaje y la integración con sistemas inteligentes para adaptarse a las necesidades específicas del paciente (Harada et al., 2023; Bao et al., 2025). Sin embargo, uno de los principales desafíos es garantizar una interacción segura y adaptable con el cuerpo humano, dadas las variaciones anatómicas y la compliance de los tejidos (Xiao et al., 2023).

Para resolver estos retos, se han desarrollado sistemas de control de fuerza, incluyendo el control de impedancia y admitancia (Villani and De Schutter, 2016). El control de impedancia establece un comportamiento dinámico del robot que reacciona a las fuerzas externas mediante la modulación de la rigidez y el amortiguamiento (Xiao et al., 2024b; Scherzinger et al., 2017). Por otro lado, el control de admitancia traduce las fuerzas de contacto medidas en comandos de movimiento, permitiendo que el robot ajuste su posición o velocidad para mantener la fuerza deseada (Tang et al., 2025; Ma et al., 2024). Estas estrategias han demostrado ser efectivas para mantener un contacto seguro y estable durante el masaje, incluso ante variaciones en la superficie corporal o movimientos del paciente (Harada et al., 2025; Dong et al., 2023).

Estudios recientes han explorado enfoques híbridos que integran control de posición y fuerza, inteligencia artificial y aprendizaje por refuerzo para optimizar la interacción humano-robot en tareas de masaje (Xiao et al., 2024a; Mahmood et al., 2018). Por ejemplo, sistemas basados en modelos de mezcla gaussiana y regresión (GMM/GMR) y algoritmos de aprendizaje profundo han permitido compensar errores de fuerza y mejorar la adaptación del robot al contacto (Xiao et al., 2024b). Otros trabajos han propuesto técnicas de control adaptativo y difuso para ajustar dinámicamente la rigidez del sistema en función de la respuesta del paciente (Dong et al., 2023; Bao et al., 2025). Además, la incorporación de sensores de fuerza y visión permite al robot mapear y seguir de forma interactiva la anatomía del paciente, mejorando la eficacia y seguridad del tratamiento (Xu et al., 2024).

Los robots colaborativos (cobots) y manipuladores con compliance mecánica, como los sistemas basados en actuación elástica en serie (SEA), han sido adoptados en plataformas robóticas de masaje para garantizar una interacción segura y eficiente (Dong et al., 2023). Estos dispositivos permiten mantener la fuerza de contacto dentro de rangos seguros, redu-

ciendo el riesgo de lesiones y mejorando la comodidad del paciente. Además, se han explorado entornos de realidad mixta y aumentada para mejorar la percepción del usuario y permitir una planificación intuitiva del masaje por parte del terapeuta (Bao et al., 2025).

A pesar de estos avances, persisten desafíos relacionados con la robustez del control, la capacidad de generalización a diferentes morfologías y la validación clínica de los sistemas de masaje robótico (Paul et al., 2021; Hao and Han, 2012). La integración de algoritmos de control avanzado, inteligencia artificial y hardware seguro y adaptable abre nuevas perspectivas para la aplicación efectiva de robots en la terapia física y la rehabilitación (Yang et al., 2024; Kerautret et al., 2020).

En esta comunicación se presenta la implementación de un sistema de control de fuerza basado en admitancia mecánica, el cual se erige como una estrategia fundamental para garantizar una interacción segura, estable y adaptativa entre el robot y la anatomía humana durante la ejecución de masajes terapéuticos. Dicho control ha sido desarrollado sobre ROS 2, haciendo uso del ecosistema `ros2_control` para la integración modular y la gestión eficiente de los recursos de hardware y software. La validación preliminar del sistema se ha llevado a cabo mediante pruebas experimentales en un robot colaborativo de 6 ejes Elfin 5 de Han's Robot, equipado con el sensor de fuerza/torque (F/T) HEX de seis ejes de OnRobot. No obstante, la arquitectura de control propuesta posee un alto grado de portabilidad y flexibilidad, lo que permitiría su despliegue en otras plataformas robóticas compatibles con ROS 2 sin modificaciones sustanciales. En esta fase inicial, se presentan resultados experimentales que demuestran la viabilidad y el rendimiento del control de admitancia mecánica implementado, estableciendo las bases para futuras mejoras y validaciones clínicas en aplicaciones de masaje robótico.

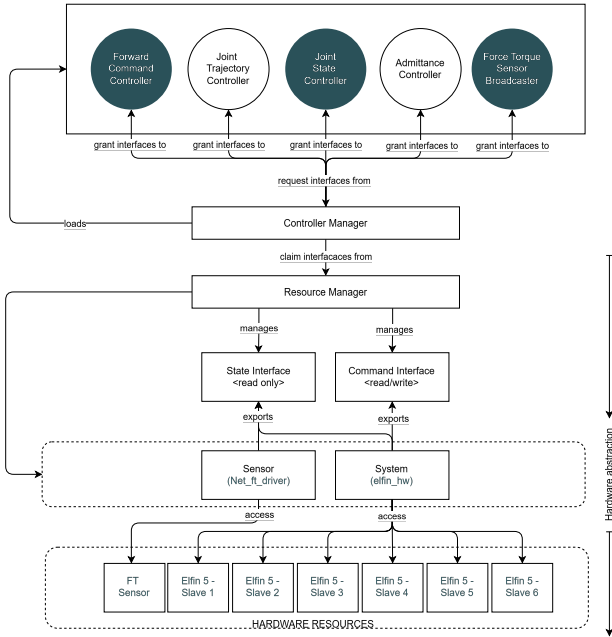
2. Arquitectura de control

2.1. ROS 2 (Robot Operating System)

La implementación del control en ROS 2 se hace sobre la arquitectura del framework `ros2_control`. Esta arquitectura particularizada para nuestra aplicación, es decir, estableciendo como recursos de hardware el robot Elfin 5 y el sensor de F/T HEX, se muestra en la Fig. 1.

El Controller Manager (CM) implementa un nodo sin ejecutor, que conecta los controladores y la abstracción de hardware. EL CM gestiona (carga, activa, desactiva...) los controladores y las interfaces que requieren. Además, tiene acceso a los componentes de hardware, es decir, a sus interfaces a través del Resource Manager. El gestor de controladores coteja las interfaces requeridas y las proporcionadas, concediendo a los controladores acceso al hardware cuando está habilitado, o informando de un error si existe un conflicto de acceso. La ejecución del bucle de control se gestiona mediante el método `update()` del CM. Lee datos de los componentes de hardware, actualiza las salidas de todos los controladores activos y escribe el resultado en los componentes. Todo esto se hace de manera automática, lo que facilita la gestión y control de todos los elementos hardware.

El esquema general de implementación del sistema de control en ROS 2 se muestra en la Fig. 2, e incluye los siguientes nodos funcionales:

Figura 1: Arquitectura del framework `ros2_control`.

- **Force Torque Sensor Broadcaster:** nodo encargado de la adquisición continua de datos provenientes del sensor de F/T, publicando los valores de fuerza y momento medidos en tiempo real en un tópico específico.
- **Joint State Broadcaster:** nodo que publica el estado actual de las articulaciones del robot, incluyendo posiciones, velocidades y esfuerzos articulares, facilitando la monitorización y la retroalimentación del sistema.
- **Way points publisher:** nodo dedicado a la definición y publicación de puntos de referencia en coordenadas cartesianas que describen la trayectoria deseada del efector final.
- **Linear Interpolator:** módulo que realiza la interpolación lineal entre los puntos de referencia definidos, generando trayectorias suaves y continuas que respetan los parámetros de velocidad y tiempo establecidos.
- **Force Control:** componente que implementa el control de fuerza basado en admitancia mecánica, ajustando dinámicamente los comandos de posición articular para regular la interacción del robot con su entorno, garantizando una fuerza de contacto controlada.
- **Forward Position Controller:** controlador de posición en lazo cerrado encargado de enviar comandos de movimiento a los motores del robot, garantizando que las articulaciones sigan las trayectorias generadas con precisión.

Es importante destacar que los nodos Force Torque Sensor Broadcaster, Joint State Broadcaster y Forward Position Controller son componentes estándar del framework `ros2_control`, mientras que los nodos Linear Interpolator y Force Control han sido desarrollados específicamente para esta aplicación. Estos nodos personalizados permiten una planificación precisa de

la trayectoria y una regulación efectiva de la fuerza aplicada, optimizando la seguridad y la adaptabilidad del sistema. La velocidad cartesiana objetivo en el plano XY y la fuerza deseada en el eje Z pueden configurarse dinámicamente mediante servicios expuestos, lo que permite adaptar los parámetros de control a diferentes condiciones de operación.

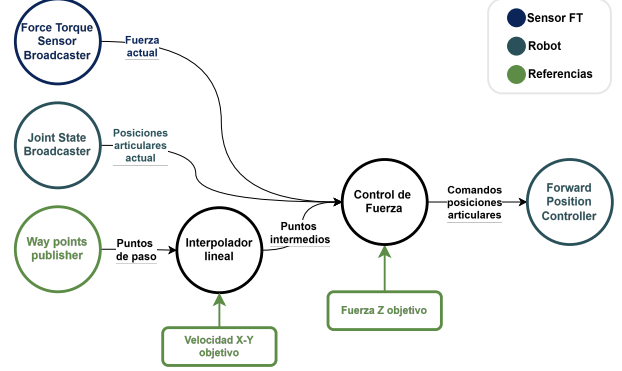


Figura 2: Esquema general de nodos y topics en ROS 2.

2.2. Interpolador lineal

Consideremos una trayectoria compuesta por una secuencia ordenada de poses de paso WP_i para $i = 1, 2, \dots, N$, que define la referencia completa a lo largo del tiempo. Cada WP está caracterizado por una posición $\mathbf{p}(x, y, z)$ y una orientación expresada en cuaterniones $\mathbf{q}(q_x, q_y, q_z, q_w)$. El interpolador lineal genera poses intermedias entre dos poses consecutivas WP_i y WP_{i+1} , considerando una velocidad de referencia constante v_{ref} en el plano XY y una frecuencia de control F_c .

La distancia euclidiana proyectada en el plano XY entre WP_i y WP_{i+1} se calcula como:

$$d_{XY,i} = \sqrt{(x_{i+1} - x_i)^2 + (y_{i+1} - y_i)^2} \quad (1)$$

El tiempo total de desplazamiento entre estas dos poses a la velocidad v_{ref} es:

$$t_{move,i} = \frac{d_{XY,i}}{v_{ref}} \quad (2)$$

El número total de interpolaciones discretas n_i requeridas para respetar el periodo de control t_c ($1/F_c$) se determina mediante:

$$n_i = \left\lfloor \frac{t_{move,i}}{t_c} \right\rfloor \quad (3)$$

donde $\lfloor \cdot \rfloor$ denota el redondeo hacia abajo, garantizando que la trayectoria generada no exceda el tiempo de desplazamiento previsto $t_{move,i}$.

Dado que los puntos de paso están cercanos y la velocidad es baja, se emplea una interpolación lineal (en lugar de un perfil trapezoidal o S-suave). Para cada interpolación $j = 1, 2, \dots, n_i$, se define el coeficiente de interpolación:

$$\alpha_{j,i} = \frac{j}{n_i + 1} \quad (4)$$

Utilizando el coeficiente de interpolación $\alpha_{j,i}$, se calcula la posición intermedia interpolada como una combinación lineal de los puntos de paso:

$$\mathbf{p}_{j,i} = (1 - \alpha_{j,i})\mathbf{p}_i + \alpha_{j,i}\mathbf{p}_{i+1} \quad (5)$$

Para la interpolación de la orientación, expresada en cuaterniones, se evalúa primero el coseno del ángulo entre ambos cuaterniones (θ_i). Si el valor absoluto de este coseno es menor que 1, se aplica la interpolación esférica (SLERP), garantizando una transición suave en la rotación.

$$\mathbf{q}_{i,j} = \frac{\sin(1 - \alpha_{j,i}) \theta_i}{\sin(\theta_i)} \mathbf{q}_i + \frac{\sin(\alpha_{j,i} \theta_i)}{\sin(\theta_i)} \mathbf{q}_{i+1} \quad (6)$$

En caso contrario, si los cuaterniones están muy próximos, se emplea la interpolación lineal simple (LERP) por eficiencia computacional:

$$\mathbf{q}_{i,j} = (1 - \alpha_{j,i}) \mathbf{q}_i + \alpha_{j,i} \mathbf{q}_{i+1} \quad (7)$$

Finalmente, los pares de valores $\{\mathbf{p}_{j,i} | \mathbf{q}_{j,i}\}$ obtenidos en cada iteración se almacenan en una lista de poses interpoladas. Este procedimiento permite obtener una trayectoria continua y suavizada entre los puntos de paso, asegurando una transición gradual tanto en la posición como en la orientación.

Algorithm 1 Interpolador lineal con velocidad de referencia

Input: $WP_i, WP_{i+1}, v_{ref}, t_c$

Output: Lista de poses interpolados

- 1 Calcular $d_{XY,i}$ según (1)
 - 2 Calcular $t_{move,i}$ según (2)
 - 3 Calcular n_i según (3)
 - 4 **for** $j = 1$ **to** n_i **do**
 - 5 Calcular $\mathbf{p}_{j,i}$ según (5)
 - 6 Calcular $\alpha_{j,i}$ según (4)
 - 7 **if** $|\cos(\theta_i)| < 1$ **then**
 - 8 Calcular $\mathbf{q}_{j,i}$ utilizando SLERP (6)
 - 9 **else**
 - 10 Calcular $\mathbf{q}_{j,i}$ utilizando LERP (7)
 - 11 Insertar $\{\mathbf{p}_{j,i} | \mathbf{q}_{j,i}\}$ en la lista de poses
 - 12 **return** Lista de poses interpoladas
-

2.3. Control de fuerza

La Fig. 3 ilustra el esquema del control de fuerza. Este controlador recibe del interpolador lineal las poses intermedias de referencia en el espacio cartesiano, expresados en el sistema de coordenadas de la base del robot $\{B\}$:

$$\mathbf{X}_{ref,\{B\}} = \begin{bmatrix} \mathbf{R}_{ref} & \mathbf{p}_{ref} \\ \mathbf{0} & 1 \end{bmatrix}_{\{B\}} \quad (8)$$

donde $\mathbf{p}_{ref,\{B\}} = [x, y, z]_{\{B\}}^T$ es el vector de posición, y $\mathbf{R}_{ref,\{B\}}$ es la matriz de rotación que deriva de los cuaterniones $\mathbf{q}_{ref,\{B\}}$.

En el contexto de masajes terapéuticos, el robot debe seguir la trayectoria de referencia en el plano XY, mientras regula la fuerza de contacto con la piel para alcanzar la fuerza especificada $F_{Z,ref}$. Para garantizar que la fuerza de contacto entre la piel y el end-effector del robot se ajusta al objetivo, se implementa un control de admitancia, que modela la interacción entre el end-effector y la piel como un sistema lineal de segundo orden. El análisis de la fuerza de contacto humano-robot se realiza a lo largo del eje Z. La diferencia entre la fuerza de contacto de referencia $F_{Z,ref}$ y la fuerza real medida F_Z se calcula como:

$$\Delta F_Z = F_{Z,ref} - F_Z = m\ddot{\Delta z} + b\dot{\Delta z} + k\Delta z \quad (9)$$

donde m es la masa virtual, b es el coeficiente de viscosidad, k es el coeficiente elástico, y Δz , $\dot{\Delta z}$ y $\ddot{\Delta z}$ son respectivamente los cambios en el desplazamiento, velocidad y aceleración a lo largo del eje Z.

La pose en el espacio cartesiano comandada $\mathbf{X}_{cmd,\{B\}}$ se obtiene como la suma de la pose objetivo $\mathbf{X}_{ref,\{B\}}$ y el desplazamiento adicional Δz derivado del modelo de admitancia:

$$\mathbf{X}_{cmd,\{B\}} = \begin{bmatrix} \mathbf{R}_{ref} & \mathbf{p}_{ref} \\ \mathbf{0} & 1 \end{bmatrix}_{\{B\}} + \begin{bmatrix} \mathbf{I} & \mathbf{p}_{imp} \\ \mathbf{0} & 1 \end{bmatrix}_{\{B\}} \quad (10)$$

donde $\mathbf{p}_{imp,\{B\}} = [0, 0, \Delta z]_{\{B\}}^T$ es el vector de desplazamiento adicional derivado de la dinámica de la admitancia.

A partir de las poses objetivo definidas en el espacio cartesiano, se aplica la cinemática inversa para calcular las posiciones objetivo correspondientes en el espacio articular, denotadas como \mathbf{q}_i . La cinemática inversa se resuelve mediante un algoritmo iterativo de Newton-Raphson, proporcionando una transformación precisa entre el sistema de coordenadas cartesiano y el articular. Una vez determinados las posiciones articulares \mathbf{q}_i para $i \in \{1, 2, \dots, m\}$, donde m representa el número de grados de libertad del robot, dichas configuraciones se transmiten al controlador del robot para su ejecución.

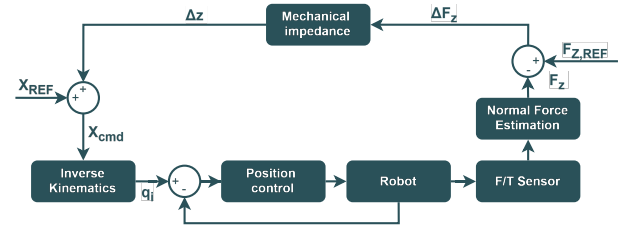


Figura 3: Esquema de control de fuerza basado en admitancia mecánica.

2.4. Métricas de rendimiento

A continuación se presentan las métricas utilizadas para evaluar el desempeño del sistema en el seguimiento de una fuerza de referencia. Estas métricas cuantifican las desviaciones absolutas y relativas respecto a la fuerza objetivo, así como la duración fuera del umbral de seguridad:

Error absoluto máximo (E_{max}): Desviación absoluta máxima de la señal de fuerza respecto a la referencia. Esta métrica cuantifica el error más alto durante la secuencia.

Error absoluto medio (E_{medio}): Promedio de las desviaciones absolutas respecto a la referencia. Proporciona un resumen de la precisión global.

Error relativo máximo ($E_{rel,max}$): Error absoluto máximo expresado como porcentaje de la fuerza de referencia, lo que ofrece una evaluación normalizada del error.

Porcentaje de tiempo fuera de la banda de seguridad ($T_{out-of-band}$): Proporción del tiempo total en que la señal de fuerza se encuentra fuera de un rango de seguridad especificado alrededor de la referencia.

Porcentaje de tiempo fuera de los umbrales superior e inferior ($T_{>Lsup}, T_{<Linf}$): Porcentaje del tiempo en que la fuerza excede un límite superior o cae por debajo de un límite inferior de seguridad.

Rango ($[f_{min}, f_{max}]$): Valores mínimo y máximo de la señal de fuerza observados a lo largo de la secuencia.

Percentil 95 del error absoluto ($E_{95\%}$): Magnitud del error por debajo de la cual se encuentran el 95 % de las desviaciones absolutas. Esta métrica proporciona una medida robusta de la consistencia del error.

3. Resultados

3.1. Montaje experimental

El sistema de masaje robótico propuesto se basa en el Elfin 5 (Han's Robots), un robot colaborativo de 6 ejes. Para permitir una interacción sensible a la fuerza, se ha montado un sensor HEX (OnRobot) de F/T de 6 ejes entre un cabezal de masaje compuesto por una bola impresa en 3D y el efector final del brazo robótico. El sensor de fuerza permite ajustar la fuerza en tiempo real para aplicar el masaje de forma segura y adaptable. El ordenador central funciona con Ubuntu 22.04 con ROS 2 Humble Hawksbill. El bucle de control opera a 500 Hz, asegurando un movimiento suave y una repuesta sensible a los cambios en el entorno. Los datos del sensor F/T se registran a 500 Hz (coincidente con la frecuencia del control), y se filtran mediante un filtro pasa bajo con una frecuencia de corte de 15 Hz. Además, una interfaz permite a los fisioterapeutas definir los puntos de paso, combinando la precisión robótica con la experiencia humana para una experiencia de masaje personalizada y eficaz.



Figura 4: Diagrama conceptual del sistema completo.

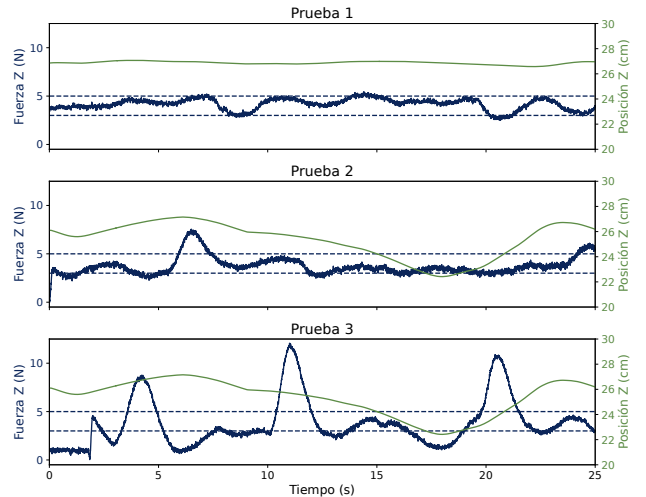
3.2. Resultados

Para este estudio, se establecieron dos puntos de paso situados en los extremos del antebrazo del sujeto (Fig. 5(a)), a lo largo de los cuales el robot realiza un desplazamiento repetitivo en un movimiento bidireccional. Se llevaron a cabo tres experimentos, todos ellos con una fuerza de referencia constante de 4 N. La fuerza en Z registrada y la posición en Z del efector final durante los tres experimentos se muestran en la Fig. 5(b). Los parámetros experimentales y los resultados obtenidos se resumen en la Tabla 1.

En la primera prueba (P1), realizada con el sujeto 1, se efectuó un ajuste fino de los parámetros de la admitancia mecánica (k , b , m), con el objetivo de optimizar el seguimiento de fuerza. Para las pruebas subsiguientes (P2 y P3), se utilizó un segundo sujeto, aplicando los parámetros de la admitancia previamente ajustados. En la prueba P2 se mantuvo la velocidad de 0.2 m/s establecida en P1, mientras que en la prueba P3 se incrementó la velocidad en el plano XY a 0.25 m/s.



(a)



(b)

Figura 5: (a) Robot masajeando el antebrazo de un sujeto con una trayectoria predefinida por dos puntos de paso (WP_1 y WP_2). (b) Fuerza de contacto (fuerza en el eje Z) registrada por el sensor de F/T y altura (posición en Z) del efector final durante las tres pruebas (P1, P2 y P3). Las líneas discontinuas indican las bandas de tolerancia de ± 1 N respecto a la referencia (4 N).

El análisis de las métricas de desempeño revela que en P1, el error máximo (E_{max}) fue de 1.51 N, con un error medio (E_{medio}) de 0.49 N y un error relativo máximo ($E_{rel,max}$) del 37.77 %. El tiempo fuera de banda ($T_{out-of-band}$) fue relativamente bajo (7.33 %), y los tiempos en los que la fuerza superó los 5 N ($T > 5N$) o descendió por debajo de 3 N ($T < 3N$) fueron también reducidos (3.38 % y 3.96 %, respectivamente). En P2, al cambiar de sujeto y mantener la velocidad, los errores aumentaron significativamente: E_{max} alcanzó 4.00 N y $E_{rel,max}$ subió a casi el 100 %, con incrementos notables en $T_{out-of-band}$ (26.28 %) y tiempos fuera del rango de fuerza. Finalmente, en P3, con el aumento de la velocidad a 0.25 m/s, se registraron errores aún mayores, con un E_{max} de 8.07 N, E_{medio} de 1.85 N, y un $E_{rel,max}$ que superó el 200 %. El tiempo fuera de banda y los periodos fuera del rango de fuerza se incrementaron sustancialmente, lo que indica que tanto el cambio de sujeto como el aumento de velocidad afectan significativamente el rendimiento del sistema.

4. Discusión y conclusiones

Este estudio preliminar ha demostrado resultados prometedores para la implementación de masajes robóticos. No obs-

Tabla 1: Parámetros experimentales (sujeto y velocidad de referencia en el plano XY) y métricas de rendimiento en el seguimiento de una fuerza de referencia de 4 N en el eje Z. La banda de seguridad utilizada para el cálculo de las métricas es de ± 1 N respecto a la fuerza de referencia, es decir, entre 3 N y 5 N.

	Sujeto	V_{XY} (N)	E_{max} (m/s)	E_{medio} (N)	$E_{rel,max}$ (%)	$T_{out-of-band}$ (%)	$T_{>5N}$ (%)	$T_{<3N}$ (%)	Rango [min, max] (N)	$E_{95\%}$ (N)
P1	S1	0.20	1.51	0.49	37.77	7.33	3.38	3.96	[2.49, 5.46]	1.07
P2	S2	0.20	4.00	0.76	99.94	26.28	9.09	17.19	[0.00, 7.55]	1.83
P3	S2	0.25	8.07	1.85	201.72	64.42	18.59	45.83	[0.03, 12.07]	5.64

tante, la existencia de diferencias en las propiedades mecánicas de los tejidos humanos (conectivo, epitelial, y muscular) que influyen en las condiciones del masaje, sugiere la necesidad de realizar un ajuste fino de los parámetros del modelo de admitancia mecánica para optimizar el rendimiento (minimizando los errores de fuerza) y adaptarlo a cada usuario.

En este sentido, líneas futuras de investigación deberían centrarse en el estudio y modelado de las propiedades elásticas de la piel humana, lo que permitiría ajustar de forma automática la admitancia mecánica del sistema y garantizar una interacción segura y eficaz. Asimismo, se plantea la posibilidad de integrar algoritmos inteligentes, como el reinforcement learning, para mejorar la capacidad adaptativa de los robots de masaje. Estos algoritmos podrían permitir que el sistema interactúe de manera segura y personalizada con el cuerpo humano, ajustándose dinámicamente a sus características individuales y ofreciendo tratamientos más eficaces que complementen la intervención manual.

En resumen, el control de fuerza basado en admitancia mecánica representa una estrategia clave para permitir que los robots de masaje interactúen de forma segura y adaptativa con los pacientes. La combinación de técnicas avanzadas de control, sensorización precisa y algoritmos de inteligencia artificial promete revolucionar el campo de la terapia de masaje, proporcionando tratamientos personalizados y efectivos que complementen la labor del terapeuta humano.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido financiado por el Ministerio de Ciencia, Innovación y Universidades de España a través del proyecto PID2022-138206OB-C33, y del proyecto “iREHAB: AI-powered Robotic Personalized Rehabilitation”, (DTS22/00105), financiado por el Instituto de Salud Carlos III (ISCIII) y cofinanciado con fondos FEDER de la UE.

Referencias

Bao, Y., Weng, D., Chen, J., Gao, N., Dongye, X., Su, M., 6 2025. Relaxmr: a mixed reality-based semi-physical high-fidelity digital human massage system. *Virtual Reality* 29 (2), 1–16.
DOI: 10.1007/s10055-025-01133-0

Dong, H., Feng, Y., Qiu, C., Chen, I. M., 2 2023. Construction of Interaction Parallel Manipulator: Towards Rehabilitation Massage. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics* 28 (1), 372–384.
DOI: 10.1109/TMECH.2022.3202694

Hao, C., Han, F., 2012. Review of acupoints positioning and tracking technology for chinese massage robot. *Advanced Materials Research* 542–543, 741–744.
DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.542-543.741

Harada, N., Akiduki, T., Kitazaki, M., Tasaki, R., 2023. Control Design and Implementation of Robotic Massage Based on Finger Pressing Motion Analysis. In: 2023 8th International Conference on Control and Robotics

Engineering, ICCRE 2023. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., pp. 250–253.
DOI: 10.1109/ICCRE57112.2023.10155612

Harada, N., Kitazaki, M., Tasaki, R., 2025. Physical therapy massage robot system with human motion tracking and finger-pressing force control. *Advanced Robotics* 39 (5), 223–242.
DOI: 10.1080/01691864.2025.2469695

Kerautret, Y., Di Rienzo, F., Eyssautier, C., Guillot, A., 12 2020. Selective Effects of Manual Massage and Foam Rolling on Perceived Recovery and Performance: Current Knowledge and Future Directions Toward Robotic Massages. *Frontiers in Physiology* 11 (598898), 1–38.
DOI: 10.3389/fphys.2020.598898

Li, C., Fahmy, A., Li, S., Sienz, J., 6 2020. An Enhanced Robot Massage System in Smart Homes Using Force Sensing and a Dynamic Movement Primitive. *Frontiers in Neurorobotics* 14 (30), 1–12.
DOI: 10.3389/fnbot.2020.00030

Ma, Z., Geng, Y., Nie, S., Yin, F., Ji, H., 1 2024. Research on Chinese Scraping Automation Based on Sensor-Fusion Method. *IEEE Sensors Journal* 24 (2), 1751–1759.
DOI: 10.1109/JSEN.2023.3336220

Mahmood, A. R., Korenkevych, D., Komer, B. J., Bergstra, J., 2018. Setting up a Reinforcement Learning Task with a Real-World Robot. In: 2018 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS). pp. 4635–4640.
DOI: 10.1109/IROS.2018.8593894

Paul, A., Usman, J., Ahmad, M. Y., Hamidreza, M., Maryam, H., Ong, Z. C., Hasikin, K., Lai, K. W., 12 2021. Health efficacy of electrically operated automated massage on muscle properties, peripheral circulation, and physio-psychological variables: a narrative review.
DOI: 10.1186/s13634-021-00788-6

Scherzinger, S., Roennau, A., Dillmann, R., 9 2017. Forward Dynamics Compliance Control (FDCC): A New Approach to Cartesian Compliance for Robotic Manipulators. In: IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS). IEEE, Vancouver, BC, Canada, pp. 4568–4575.
DOI: 10.1109/IROS.2017.8206325

Tang, X., Shi, P., Luo, Z., Yu, H., 3 2025. A Novel 6-DOF Multi-Technique Abdominal Massage Robot System: A New Solution for Relieving Constipation and an Exploration of Standardization. *Electronics* 14 (6), 1–29.
DOI: 10.3390/electronics14061123

Villani, L., De Schutter, J., 2016. Force Control. In: Springer Handbook of Robotics. Ch. Force Control, pp. 195–219.
DOI: 10.1007/978-3-319-32552-1

Xiao, M., Zhang, T., Zou, Y., Chen, S., Wu, W., 2024a. Research on Robot Massage Force Control Based on Residual Reinforcement Learning. *IEEE Access* 12, 18270–18279.
DOI: 10.1109/ACCESS.2023.3347416

Xiao, M., Zhang, T., Zou, Y., Yan, X., Wu, W., 9 2023. Study on force control for robot massage with a model-based reinforcement learning algorithm. *Intelligent Service Robotics* 16 (4), 509–519.
DOI: 10.1007/s11370-023-00474-6

Xiao, M., Zhang, X., Zhang, T., Chen, S., Zou, Y., Wu, W., 2024b. A study on robot force control based on the GMM/GMR algorithm fusing different compensation strategies. *Frontiers in Neurorobotics* 18.
DOI: 10.3389/fnbot.2024.1290853

Xu, Q., Deng, Z., Zeng, C., Li, Z., He, B., Zhang, J., 6 2024. Toward automatic robotic massage based on interactive trajectory planning and control. *Complex and Intelligent Systems* 10 (3), 4397–4407.
DOI: 10.1007/s40747-024-01384-5

Yang, J., Lim, K. H., Mohabbat, A. B., Fokken, S. C., Johnson, D. E., Calva, J. J., Do, A., Mueller, M. R., Chon, T. Y., Bauer, B. A., 1 2024. Robotics in Massage: A Systematic Review. *Health Services Research and Managerial Epidemiology* 11, 1–13.
DOI: 10.1177/23333928241230948