Resumen

El presente trabajo aborda la repotenciación de un prototipo mecatrónico para rehabilitación de rodilla, partiendo de un dispositivo de Movimiento Pasivo Continuo (CPM) de un grado de libertad. A este se lo transformó en un dispositivo de rehabilitación que incluyó telemetría, control difuso, clasificador con Inteligencia Artificial (IA) y tres modos de operación: pasivo, activo-asistido y resistivo-asistido. El dispositivo se basa en una arquitectura distribuida: una Raspberry Pi 5 como unidad de control de alto nivel y un microcontrolador ESP32 como capa de control de bajo nivel, comunicados entre sí mediante protocolo serial. Para medir la interacción física del paciente con el dispositivo se incorporó una celda de carga tipo S y un sensor de electromiografía de superficie. Para el modo pasivo, se modula la velocidad del motor según el error de posición y la fuerza resistiva del paciente a través del controlador de lógica difusa tipo Mamdani; en código se verificó su equivalencia exacta con el diseño original de Matlab comparando sus veintisiete reglas y funciones de membresía. En el modo activo-asistido se detecta la intención de movimiento por umbrales de fuerza, que completa el recorrido según el esfuerzo aplicado; en cambio, en el modo resistivo-asistido se opone tres niveles de resistencia mecánica configurables. Para la detección de espasmos musculares se entrenó un clasificador de Random Forest (RF) con once características derivadas de las señales de electromiografía, ángulo y fuerza, con el que se alcanzó 91.83% de exactitud en la validación cruzada offline; sin embargo, en tiempo real la exactitud cayó a 57.7%, una brecha documentada como limitación del prototipo. Las pruebas en hardware confirmaron un error de posicionamiento promedio de 2 grados en el modo pasivo y una variación cuantitativa real entre los tres niveles resistivos; ante un evento de espasmo, la parada de emergencia respondió en aproximadamente 32 milisegundos, dentro del diseño de 50 milisegundos.

Palabras clave: exoesqueleto de rodilla, control difuso, Random Forest, electromiografía, rehabilitación asistida.

Abstract

This paper addresses the retrofitting of a mechatronic prototype for knee rehabilitation, based on a single-degree-of-freedom Continuous Passive Motion (CPM) device. This was transformed into a rehabilitation device that included telemetry, fuzzy control, an Artificial Intelligence (AI) classifier, and three operating modes: passive, active-assisted, and resistive-assisted. The device is based on a distributed architecture: a Raspberry Pi 5 as the high-level control unit and an ESP32 microcontroller as the low-level control layer, communicating with each other via a serial protocol. To measure the patient's physical interaction with the device, an S-type load cell and a surface electromyography sensor were incorporated. For passive mode, the motor speed is modulated based on the position error and the patient's resistive force via a Mamdani-type fuzzy logic controller; its exact equivalence to the original MATLAB design was verified in code by comparing its twenty-seven rules and membership functions. In active-assisted mode, movement intent is detected via force thresholds, and the device completes the movement based on the applied effort; in contrast, in resistive-assisted mode, three configurable levels of mechanical resistance are applied. To detect muscle spasms, a Random Forest (RF) classifier was trained using eleven features derived from electromyography signals, angle, and force, achieving 91.83% accuracy in offline cross-validation; however, in real time, accuracy dropped to 57.7%, a gap documented as a limitation of the prototype. Hardware testing confirmed an average positioning error of 2 degrees in passive mode and a measurable quantitative difference among the three resistance levels; in response to a spasm event, the emergency stop activated in approximately 32 milliseconds, within the 50-millisecond design specification.

Keywords: knee exoskeleton, fuzzy control, Random Forest, electromyography, assisted rehabilitation.