Diseño conceptual de una Arquitectura Electrónica Bioinspirada para el control de sistemas de asistencia a la Locomoción

Delgado-Oleas, Gabriel[ac], Sorozabal, P.[a], Palomino-Díaz, Verónica[a], Lora-Millán, Julio[ad], Gutiérrez, Álvaro[b], Martín, Carlos[e], Martínez, Ignacio[e], Rocon, Eduardo[a]
[a] Centro de Automática y Robótica (CAR), CSIC-UPM, Madrid, España, gabriel.delgado@csic.es
[b] ETSI Telecomunicación, Universidad Politécnica de Madrid, Madrid, España
[c] Universidad del Azuay, Cuenca, Ecuador
[d] Departamento de Tecnología Electrónica, Universidad Rey Juan Carlos, Madrid, España.
[e] Hospital Infantil Universitario Niños Jesús, Madrid, España

Resumen

Este artículo se centra en el estudio para el diseño conceptual de un sistema electrónico de asistencia a la locomoción capaz de "emular" el funcionamiento del sistema nervioso humano. Esta propuesta biomimetica se basa en tres niveles jerárquicos: 1) "Nivel Alto", encargado de realizar los procesos para la percepción del entorno y del control voluntario de la marcha; 2) "Nivel Medio", que recoge estos estímulos iniciales y los transforma en patrones de movimiento, y 3) "Nivel Bajo" que se encarga de ejecutar los sistemas de control de movimiento. La arquitectura propuesta será implementada en el control de una plataforma robótica de rehabilitación.

Palabras clave: sistema nervioso, control jerárquico, generador de patrones centrales, control locomotor.

1 INTRODUCCIÓN

El ser humano con el paso de los tiempos ha ido evolucionando su condición de caminar; ver y estudiar éste desarrollo permite encontrar nuevos paradigmas y a su vez poder sistematizarlos. Este trabajo se centra en la síntesis y plantenamiento de un modelo conceptual de una arquitectura bioinspirada para el control de sistemas robóticos de asistencia a la locomoción, el cual deberá interactuar con el ser humano.

En una primera sección se presenta el sistema nervioso humano, su principal funcionalidad en cuanto a la locomoción. De este modo se realizará una subdivisión en niveles jerárquicos según su grado de complejidad y autonomía. Luego se presenta la arquitectura propuesta, en la cual se hace énfasis en los niveles jerárquicos y sus funciones específicas. Cada nivel tendría un sistema de control independiente, pero a su vez adaptables entre sí mediante un mismo medio de comunicación.

2 SISTEMA NERVIOSO HUMANO

Caminar es un comportamiento complejo que necesita de la integración funcional de un enorme grupo de neuronas sensoriales y motoras. Inconscientemente, el cerebro necesita mucha información para equilibrar el cuerpo a medida que cambia de postura. Dicho estímulo puede ser visual, táctil o de otros sentidos que emitan una alerta de caída o traspié. Para entenderlo de mejor manera, se ha dividido el sistema nervioso según el grado de complejidad y de independencia para realizar tareas.

En orden jerárquico, el nivel más bajo es el sistema sensoriomotor, el funcionamiento muscular de forma adecuada es fundamental para la caminata por lo que las contracciones y estiramientos musculares juegan un papel indispensable, el reflejo miotático o reflejo de estiramiento es el responsable de la acción motora. Este nivel es el responsable de manejar el sistema musculoesquelético de las personas.

El siguiente nivel jerárquico del sistema nervioso locomotor es el Generador de Patrones Centrales (CPG), éste es un conjunto de neuronas espinales que controlan en gran medida el caminar, este sistema fue inicialmente estudiado por Charles Sherrington y Thomas Graham, [1], [2]. Posteriormente, se descubrió que el CPG se localiza en su mayor parte entre los segmentos lumbares de la médula espinal, [3].

La modulación de los patrones de movimiento ocurre en el nivel jerárquico superior, en la corteza motora y premotora, el cerebelo y el tronco encefálico. Este último regula tanto el generador de patrón central como el mecanismo de reflejo miotático. Asimismo, en el nivel supraespinal se obtiene información de los sistemas vestibular y visual, que ayuda a mantener el equilibrio y la orientación. Los patrones de movimiento también están regulados por los husos musculares, los órganos tendinosos de Golgi que

miden la tensión de los tendones, y la retroalimentación aferente que proviene de los mecanorreceptores cutáneos. [4], [5],[6]

3 ARQUITECTURA PROPUESTA

En la Figura 1 se presenta el marco generalizado propuesto en este trabajo con tres niveles jerárquicos de control para un sistema locomotor [7]. La arquitectura bioinspirada propuesta en este trabajo se divide en tres niveles y cada nivel emula lo que realiza el sistema nervioso humano. De esta forma buscamos que nuestro sistema electrónico pueda interactuar con el sistema nervioso.

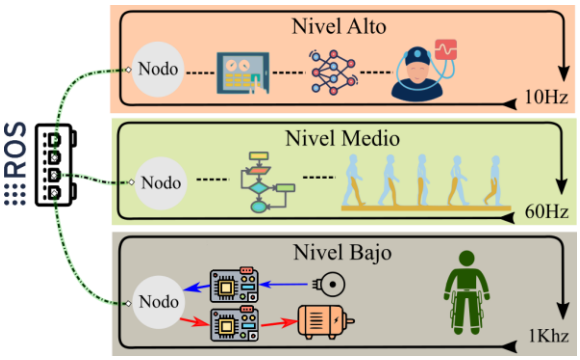

Figura 1: Marco Generalizado para la conceptualización de la arquitectura electrónica propuesta.

En el nivel alto de la arquitectura, "Percepción – Intención" el controlador debe percibir la intención de movimiento del usuario, lo que permite al usuario manipular el sistema, el tipo de movimiento y sus parámetros. Por lo general, los exoesqueletos pueden cambiar entre varios modos de funcionamiento, según el tipo de actividad deseada y el entorno. Las entradas del nivel pueden ser eventos disparadores, entradas de tipo booleano, ya sea por una interfaz gráfica o botones físicos pero además podría llegar a ser algoritmos de inteligencia artificial capaces de predecir la intencionalidad del usuario [7], [8]. En éste nivel el parámetro del tiempo de ejecución del controlador no es crítico, se sabe que el tiempo de reacción del ser humano en un estímulo auditivo está entre los 140-160ms, de un estímulo visual entre los 180-200ms mientras que el del tacto es de 155ms. [9]–[11]. Por lo que tomando el tiempo más bajo y el más alto, el sistema electrónico de alto nivel debería oscilar entre los 140ms y 200ms.

En el control de nivel medio, "Generador de Patrones Central", la finalidad es usar las intenciones del usuario para calcular datos objetivos que sean alcanzados por el nivel bajo, ya sean comandos de posición o par. En este nivel, el sistema puede poseer uno o mas sistemas de control, los cuales pueden realizar seguimientos de marcha, en los que cada uno posee las cadenas cinemáticas necesarias para que el sistema global funcione correctamente interactuando con el humano. El control de nivel medio también coordina el movimiento de múltiples articulaciones motorizadas o entre múltiples dispositivos.
En este nivel, el sistema se relaciona directamente con el generador de patrones central, por lo que el análisis de la frecuencia necesaria para la actualización de los datos enviados al nivel bajo se realiza con los valores, tanto de velocidad de conducción nerviosa (NVC), como de tiempo de reacción de un arco reflejo. Según las mediciones hechas por Letz and Gerr de las velocidades de NCV en el nervio motor peroneo puede llegar a una velocidad de 46.46m/s, y el nervio motor tibial 41m/s, Además varios estudios realizados en mediciones de NCV se estiman que las velocidades en los miembros inferiores oscilan entre 40 y 45 m/s [9][12].
El principal punto de partida para el análisis de este nivel es la frecuencia de funcionamiento de los lazos de control. Teniendo en cuenta la longitud de los nervios, la media estimada se encuentra alrededor de los 70cm,[14] por lo que se concluye que la frecuencia mínima para una correcta interacción con movimientos sanos del ser humano, rondaría entre los 57.14 y 64.28 Hz.
Aquí se ejecutarán los algoritmos para la modulación y generación de la marcha. Dichos algoritmos deberán trabajar de manera simultánea, por lo que se propone utilizar sistemas de microprocesadores multinúcleo con capacidad de soportar ejecuciones multihilo. Además, deberán poseer sistemas de comunicaciones estándar de altas prestaciones.

El nivel bajo, "Ejecución", es el encargado de controlar cada uno de los dispositivos actuadores con el fin de minimizar errores de movimientos, Los *setpoints* que le llegan a este nivel son los enviados por el nivel medio. Cada actuador o sistema de actuadores tendrá su propio controlador sintonizado para realizar una tarea específica, por lo que el controlador deberá tener en cuenta las propiedades cinemáticas y dinámicas del mismo. A su vez, cada actuador puede estar sujeto a la medición de varios sensores, ya sean *encoders* o sistemas para la medición del par aplicado, que proporcionarán información al usuario para logar un control absoluto.
En este nivel, el tiempo para realizar el control a lazo cerrado es importante ya que este debe ser lo más estable posible para realizar un control óptimo. Por ello, se plantea aplicar una frecuencia de 1Khz, para poder observar y realizar cambios repentinos en el control del ciclo de la marcha.
Para los sistemas de control dependería del actuador que se emplee, en el caso de los motores deberá ser un sistema de microcontroladores que manejen tanto la corriente como la posición de cada motor, y así

poder controlar velocidades, pares y posiciones. Cabe señalar que para que esto ocurra deberán tener sensores que cierren el lazo de control.

Para interconectar cada uno de los niveles de control jerárquicos presentados, se propone hacer uso de un agente intermedio. Se trata de un software que gestiona los datos, mensajerías, autenticación, indistintamente del hardware, software o sistemas operativos utilizados. De esta manera se simplificaría la sincronización, y mejoraría la calidad del servicio. Este sistema se abstrae de la complejidad y heterogeneidad de las redes de comunicaciones inferiores dentro de cada nivel jerárquico, logrando así un medio de comunicación modular, [13]. Para sistemas robóticos se usa comúnmente ROS (Robot Operating System) el cual proporciona abstracción del hardware, control de dispositivos de bajo nivel, manejo de mensajes y tópicos. Está basado en una arquitectura de grafos donde el procesamiento se lo realiza en nodos que pueden recibir, mandar y multiplexar mensajes de sensores, control, estados, planificaciones y actuadores, a diferentes frecuencias mediante una red Ethernet.

4 CONCLUSIONES.

En este estudio logramos conceptualizar una arquitectura electrónica para un sistema que emule al sistema nervioso y pueda interactuar con él en los diferentes niveles propuestos. Como se presenta en la Figura 1, éste modelo posee una frecuencia de refrescamiento en cada nivel. Estas frecuencias serían las mínimas necesarias para que cada nivel pueda responder de manera óptima a algún suceso en el sistema nervioso. Además se ha estudiado la implementación de ROS2 como el agente intermedio que ayude en la abstracción de las comunicaciones entre niveles, logrando modularidad y paralelismo en el funcionamiento del sistema. Cabe señalar que este estudio es un punto de partida importante, ya que se lo está adoptando en la plataforma robótica Discover2Walk y estudiando de mejor manera su comportamiento para su validación.

Agradecimientos

Este trabajo pertenece al proyecto Discover2Walk "Desarrollo de una plataforma robótica para ayudar a niños con Parálisis Cerebral a descubrir cómo caminar", financiado por el Ministerio de Ciencia e Innovación (Ref. PID2019-105110RB-C31).

English summary

Conceptualization of an Electronic Architecture for Locomotion assistance systems inspired by the Nervous System.

Abstract

This article focuses on studying the conceptual design of an electronic locomotion assistance system capable of "emulating" the functioning of the human nervous system. This biomimicry proposal is based on three hierarchical levels: 1) "High Level", in charge of performing the processes for the perception of the environment and voluntary gait control; 2) "Medium Level", which collects these initial stimuli and transforms them into movement patterns, and 3) "Low Level", which is in charge of executing the motion control systems. The proposed architecture will be implemented under the control of a robotic rehabilitation platform.

Keywords: nervous system, hierarchical control, central pattern generator, locomotor control.

Referencias

[1] G. E. Loeb, "Neural Control of Locomotion H o w d o all the data fit together ?," *Animals*, vol. 39, no. 11, pp. 800–804, 2008.

[2] H. W. A. A. Van De Crommert, T. Mulder, and J. Duysens, "Neural control of locomotion: Sensory control of the central pattern generator and its relation to treadmill training," *Gait Posture*, vol. 7, no. 3, pp. 251–263, 1998, doi: 10.1016/S0966-6362(98)00010-1.

[3] M. R. Dimitrijevic, Y. Gerasimenko, and M. M. Pinter, "Evidence for a spinal central pattern generator in humans," *Ann. N. Y. Acad. Sci.*, vol. 860, pp. 360–376, 1998, doi: 10.1111/J.1749-6632.1998.TB09062.X.

[4] V. Dietz, "Proprioception and locomotor disorders," *Nat. Rev. Neurosci.*, vol. 3, no. 10, pp. 781–790, 2002, doi: 10.1038/NRN939.

[5] A. Frigon and S. Rossignol, "Experiments and models of sensorimotor interactions during locomotion," *Biol. Cybern.*, vol. 95, no. 6, pp. 607–627, Dec. 2006, doi: 10.1007/s00422-006-0129-x.

[6] A. Prochazka, V. Gritsenko, and S. Yakovenko, "Sensory control of locomotion: reflexes versus higher-level control," *Adv. Exp. Med. Biol.*, vol. 508, pp. 357–367, 2002, doi: 10.1007/978-1-4615-0713-0_41.

[7] M. R. Tucker *et al.*, "Control strategies for active lower extremity prosthetics and orthotics: A review," *J. Neuroeng. Rehabil.*, vol. 12, no. 1, 2015, doi: 10.1186/1743-0003-12-1.

[8] R. Baud, A. R. Manzoori, A. Ijspeert, and M.

Bouri, “Review of control strategies for lower-limb exoskeletons to assist gait,” *J. Neuroeng. Rehabil.*, vol. 18, no. 1, pp. 1–34, 2021, doi: 10.1186/s12984-021-00906-3.

[9] P. A. Vernon and M. Mori, “Intelligence, reaction times, and peripheral nerve conduction velocity,” *Intelligence*, vol. 16, no. 3–4, pp. 273–288, 1992, doi: 10.1016/0160-2896(92)90010-O.

[10] R. J. Kosinski, “A Literature Review on Reaction Time,” *Retrieved httpbiaeclemsonedubpcbpLab110reactionhtm 06042010*, vol. 10, no. August, p. 2006, 2010, [Online]. Available: http://biology.clemson.edu/bpc/bp/Lab/110/reaction.htm.

[11] D. L. Woods, J. M. Wyma, E. W. Yund, T. J. Herron, and B. Reed, “Factors influencing the latency of simple reaction time,” *Front. Hum. Neurosci.*, vol. 9, no. MAR, pp. 1–12, 2015, doi: 10.3389/fnhum.2015.00131.

[12] R. Letz and F. Gerr, “Covariates of human peripheral nerve function: I. Nerve conduction velocity and amplitude,” *Neurotoxicol. Teratol.*, vol. 16, no. 1, pp. 95–104, 1994, doi: 10.1016/0892-0362(94)90014-0.

[13] T. Bishop and R. Karne, “A survey of middleware,” *Proc. ISCA 18th Int. Conf. Comput. Their Appl. Honolulu, Hawaii, USA, March 26-28, 2003*, pp. 254–258, 2003, [Online]. Available: http://triton.towson.edu/~karne/research/middlew/surveym.pdf.

[14] W. G. Elbarrany and F. M. Altaf, “The Tibial Nerve and Its Vasculature: An Anatomical Evaluation,” *Int. J. Morphol.*, vol. 35, no. 3, pp. 812–819, 2017, doi: 10.4067/s0717-95022017000300004.

© 2019 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution CC BY-NC-SA 4.0 license (https://creativecommons.org/licenses/by-ncsa/4.0/deed.es).