



# Efecto agudo del ejercicio de sentadilla con control voluntario cibernético asistido por HAL (miembro híbrido asistido) sobre la velocidad de saque en tenis

Bumpei Sato<sup>1</sup>, Shuhei Sato<sup>2</sup>, Hiroki Yamaguchi<sup>3</sup>, Yoshihiro Yasunaga<sup>4</sup> y Masayuki Sato<sup>5</sup>

<sup>1</sup>Universidad de Meiji, Japón. <sup>2</sup>Universidad de Sendai, Japón. <sup>3</sup>Universidad de Doshisha, Japón. <sup>4</sup>Universidad de Tsukuba, Japón. <sup>5</sup>Universidad de Senshu, Japón.

## RESUMEN

El saque más rápido en el US Open de Tenis de 2022 fue de 141 mph (226,9 km/h, Alexander Bublik, KAZ) y 128 mph (205,9 km/h, Coco Gauff, USA) para hombres y mujeres, respectivamente. Se espera que esta velocidad aumente en el futuro. La mayoría de los estudios centrados en la mejora del rendimiento del saque se han realizado en los campos de la biomecánica deportiva y la fisiología del ejercicio. No existen estudios centrados en el control voluntario del cerebro, la médula espinal, los nervios motores, el sistema musculoesquelético y el rendimiento del saque. Recientemente, se ha utilizado un ciborg vestible, Hybrid Assistive Limb (HAL) o miembro híbrido asistido, como dispositivo de rehabilitación en pacientes con ictus, parálisis cerebral y lesión medular. Nuestro objetivo fue determinar el efecto agudo de los ejercicios de sentadilla de control cibernético voluntario utilizando el HAL sobre la velocidad de saque. Se incluyeron en el estudio cuatro entrenadores de tenis masculinos con amplia experiencia docente (edad media: 32,5 ± 0,6 años, experiencia docente: 10,5 ± 0,6 años). Los resultados mostraron un aumento de aproximadamente el 7% en la velocidad de saque después de la sentadilla asistida por HAL. Esto se atribuyó al biofeedback interactivo entre el HAL y los participantes, que pudo haber producido el efecto inmediato. El uso del HAL podría maximizar las funciones físicas de los tenistas y guiar los ejercicios de rehabilitación tras una lesión.

**Palabras clave:** Aprendizaje motor, rehabilitación, biorretroalimentación interactiva.

**Recibido:** 24 Febrero 2023

**Aceptado:** 14 Mayo 2023

**Autor de correspondencia:** Bumpei Sato. Email: bsato@meiji.ac.jp

## INTRODUCCIÓN

El saque más rápido en el US Open Tennis 2022 fue de 141 mph (226,9 km/h; Alexander Bublik, KAZ) y 128 mph (205,9 km/h; Coco Gauff, USA) entre los hombres y las mujeres, respectivamente. Se espera que esta velocidad siga aumentando en el futuro (Tablas 1 y 2) (USTA, 2022).

Hasta ahora, la mayoría de los estudios sobre la mejora del rendimiento en el saque procedían de los campos de la biomecánica deportiva y la fisiología del ejercicio. Ningún estudio se ha centrado en la vía voluntaria cerebro → médula espinal → nervio motor → sistema musculoesquelético en el campo de la neurociencia. Recientemente, se ha utilizado el Hybrid Assistive Limb® (HAL) (Kawamoto et al., 2010), un cyborg vestible desarrollado por Sankai et al. (2014), que resulta eficaz como dispositivo de rehabilitación en pacientes con ictus, parálisis cerebral y lesión medular (Nakajima, 2011). Yasunaga et al. (2022) que evaluaron los cambios inmediatos en el dolor lumbar y la flexibilidad de la cadera y los eventos adversos después de la fisioterapia de biorretroalimentación utilizando HAL, informaron de cambios positivos significativos. Sin embargo, el uso potencial del HAL

en el deporte sigue siendo desconocido. Además, es necesario comprobar su utilidad para mejorar el rendimiento y guiar los ejercicios. Nuestro objetivo fue determinar el efecto de los ejercicios de sentadilla de Control Voluntario Cibernético (CVC) utilizando un HAL sobre la velocidad de saque.

**Tabla 1**

*Clasificación de los saques más rápidos entre los hombres en el US Open de Tenis de 2022 (USTA, 2022).*

Saques más rápidos en el US Open 2022   Masculino			
Rango	Partidos	Jugador	Velocidad de saque más rápido
1	2	A. Bublik	141 mph
2	3	T. Paul	139 mph
2	1	B. Shelton	139 mph
4	2	B. Van de Zandschulp	138 mph
4	5	F. Tiafoe	138 mph
4	1	J. Sock	138 mph

4	5	M. Berrettini	138 mph
8	5	N. Kyrgios	136 mph
8	2	G. Dimitrov	136 mph
8	1	F. Verdasco	136 mph
8	1	J. Munar	136 mph
8	2	J. Thompson	136 mph
8	3	J. Draper	136 mph
8	2	A. Popyrin	136 mph

**Tabla 2**

Clasificación de los saques más rápidos entre los hombres en el US Open de Tenis de 2022 (USTA, 2022).

Saques más rápidos en el US Open 2022   Femenino			
Rango	Partidos	Jugadora	Velocidad de saque más rápido
1	5	C. Gauff	128 mph
2	4	L. Samsonova	123 mph
3	2	B. Haddad Maia	120 mph
3	3	P. Martić	120 mph
5	3	S. Williams	119 mph
5	3	X. Wang	119 mph
7	3	M. Keys	118 mph
7	1	V. Williams	118 mph
7	5	C. Garcia	118 mph
7	1	O. Dodin	118 mph

**Tabla 3**

Características físicas e historial docente de los participantes.

	Edad (años)	Altura (cm)	Peso corporal (kg)	IMC	Experiencia docente (años)
Sujeto A	32	165	64.4	23.5	10
Sujeto B	32	173	70.2	23.4	10
Sujeto C	33	179	73.5	22.8	11
Sujeto D	33	176	75	24.2	11
Media ±SD	32.5 ± 0.6	173.25 ± 6.0	70.8 ± 4.7	23.5 ± 0.6	10.5 ± 0.6

MÉTODOS Y PROCEDIMIENTOS

Muestra

Se incluyeron en el estudio cuatro entrenadores de tenis experimentados (edad media: 32,5 ± 0,6 años), con una experiencia docente de 10,5 ± 0,6 años. Las características físicas y el historial docente de los participantes se muestran en la Tabla 3. Estos entrenadores fueron seleccionados para el estudio porque la curva de aprendizaje de sus habilidades de saque ya se había estabilizado.

Procedimiento

Antes del experimento, se realizó una entrevista semiestructurada para obtener el historial de entrenamiento (por ejemplo, lesiones). Posteriormente, se dejó un tiempo de calentamiento suficiente antes de realizar el experimento. Las velocidades de saque y los puntos de impacto se midieron utilizando un sensor de tenis HEAD (EE. UU.) acoplado a una raqueta especial. Keaney & Reid (2018) confirmaron que el volumen y la intensidad del golpe captados por los sensores de tenis HEAD son tan fiables y válidos como los captados por los sistemas de captura de movimiento. Se utilizó la pelota de tenis DUNLOP Fort (DUNLOP). Se pidió a los participantes que golpearan 10 saques planos con la mayor intensidad posible a una diana colocada frente a ellos. Tras completar cada experimento, se dejó un periodo de descanso suficiente para evitar que la curva de aprendizaje se viera afectada.



Figura 1. Sensor de análisis de movimiento montado en la raqueta de tenis (HEAD Tennis Sensor; ZEPP).

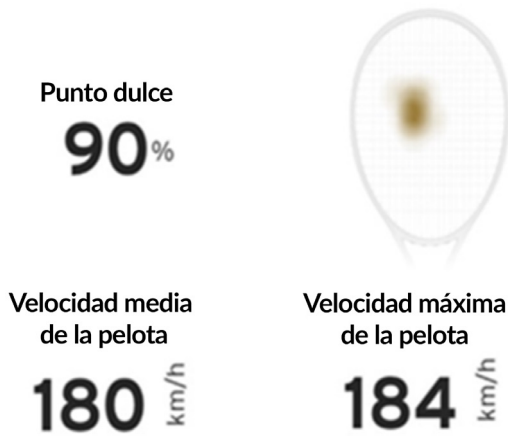


Figura 2. Velocidad media y máxima de la pelota y puntos de golpeo calculados con HEAD Tennis Sensor.

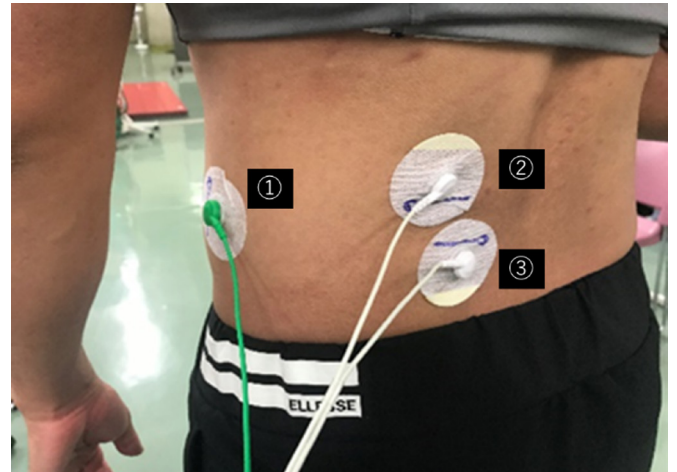


Figura 4. Posiciones de los electrodos sobre la espalda. 1: Conexión a tierra. 2 y 3: Músculo erector de la columna.

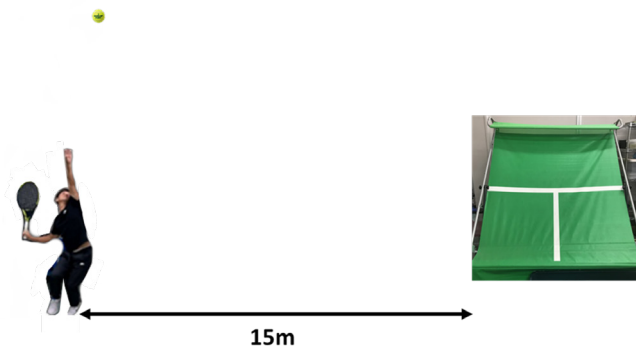


Figura 3. Montaje experimental.



Figura 5. Ejercicio de sentadilla CVC con el miembro híbrido de asistencia®.

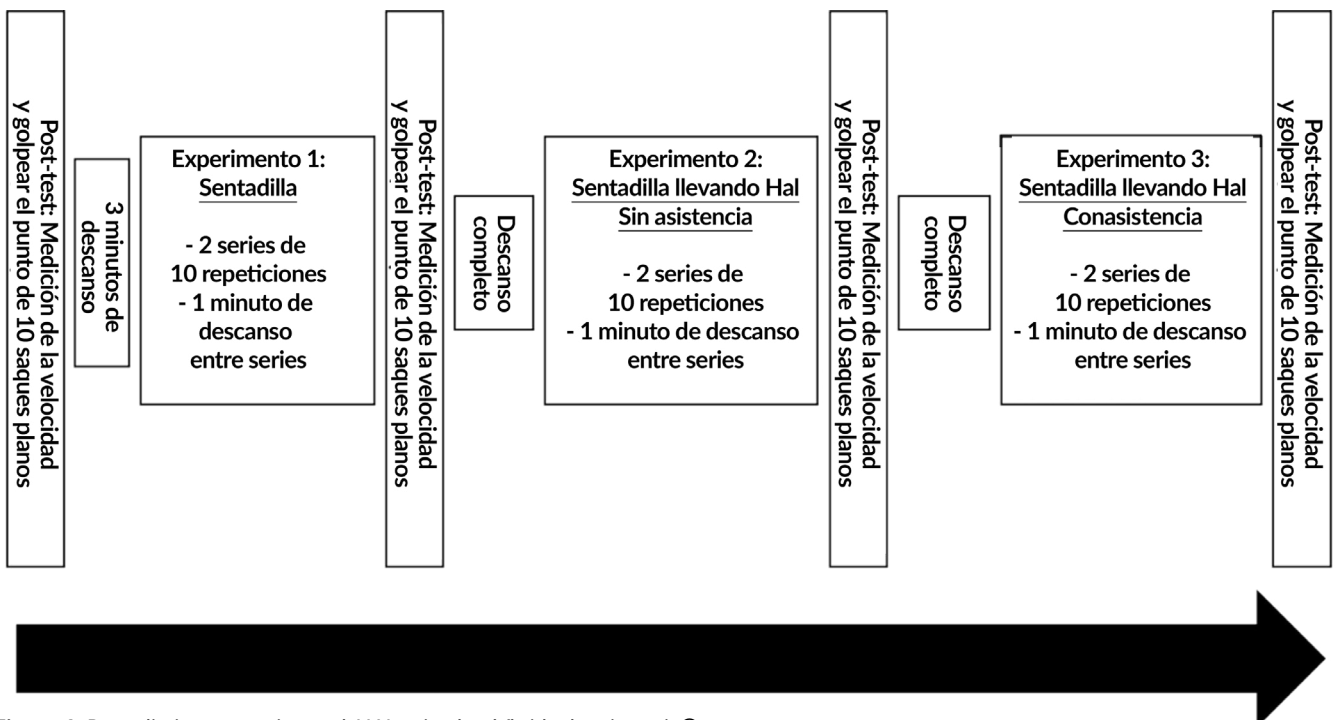


Figura 6. Procedimiento experimental. HAL: miembro híbrido de asistencia®.

**Análisis estadístico**

Las velocidades de saque tras (1) sentadilla, (2) sentadilla con HAL y (3) sentadilla con HAL en el modo CVC se compararon con la velocidad de saque preexperimental (comparaciones de dos grupos). Para la comparación se utilizó la prueba de rangos con signo de Wilcoxon. Se utilizó el paquete SPSS (versión 28.0; IBM Japón, Tokio, Japón) para todos los análisis estadísticos. La significación estadística se fijó en  $p < 0,05$ .

**Consideraciones éticas**

Este estudio fue aprobado por el Comité de Revisión Ética de la Universidad Meiji (n° 557). Los participantes recibieron información escrita y verbal sobre la finalidad y el contenido del estudio. Se les explicó que los resultados sólo se utilizarían para este estudio y que la participación era voluntaria. Además, se explicó que no habría ninguna desventaja por no participar en este estudio. Por último, los participantes podían abandonar durante el estudio.

**RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

La velocidad media de saque de los cuatro participantes fue de  $166,9 \pm 12,3$  km/h,  $170,1 \pm 12,4$  km/h,  $171,9 \pm 11,6$  km/h y  $179,1 \pm 7,0$  km/h en las condiciones de pre-test, sentadilla con peso corporal, sentadilla sin asistencia HAL y sentadilla con asistencia HAL (modo CVC), respectivamente. La velocidad aumentó significativamente en todas las condiciones de prueba en comparación con los valores previos a la prueba (Experimento 1:  $p = 0,003$ , Experimento 2:  $p < 0,001$ , Experimento 3:  $p < 0,001$ ).

Se observó un aumento del 2%, 3% y 7% en la velocidad en las condiciones de sentadilla con peso corporal, sentadilla sin asistencia HAL y sentadilla con asistencia HAL (modo CVC), respectivamente (Figura 7).

Kovacs y Ellenbecker (2011a) distinguieron ocho fases en todo servicio desde el inicio hasta la finalización: (A) inicio, (B) liberación, (C) carga, (D) amortiguamiento, (E) aceleración, (F) impacto, (G) desaceleración y (H) finalización. La fase de carga es importante porque el impulso de las extremidades inferiores genera una gran fuerza de reacción sobre el suelo. La importancia de la impulsión de las piernas para transferir eficazmente la potencia de los miembros inferiores con el fin de aumentar la velocidad del saque se ha comprobado mediante diversos métodos, incluidas las técnicas de apoyo de los miembros inferiores. Sus desventajas y ventajas también han sido comentadas por varios entrenadores e investigadores (Bahamonde & Knudson, 2001; Elliott & Wood, 1983; Martin et al. 2012). La velocidad del saque está relacionada con la cantidad de fuerza muscular ejercida por un potente impulso de las piernas durante la fase de carga (Bahamonde, 1997). Además, los jugadores de élite ejercen una mayor fuerza horizontal y utilizan el movimiento de empuje del cuerpo para crear una serie de movimientos de atrás hacia adelante para realizar un saque rápido (Girard et al., 2005). Las sentadillas y las estocadas frontales y laterales utilizando el peso corporal son ejercicios eficaces, y los ejercicios realizados en una tabla de equilibrio inestable mejoran el rendimiento del saque (Kovacs & Ellenbecker, 2011b).

El HAL puede detectar "señales de potencial bioeléctrico" débiles generadas por la superficie corporal de un individuo mediante sensores y puede ayudar en la actividad muscular. El par motor generado por las señales biopotenciales de los músculos erectores de la columna vertebral del usuario se transmite al tronco y a las extremidades inferiores a través de ambas correas fijas (Abe et al., 2018). Posteriormente, el cerebro y el sistema nervioso (cerebro → médula espinal → nervios motores → sistema musculoesquelético → HAL → sistema musculoesquelético → nervios motores → médula espinal → cerebro) y la biorretroalimentación interactiva

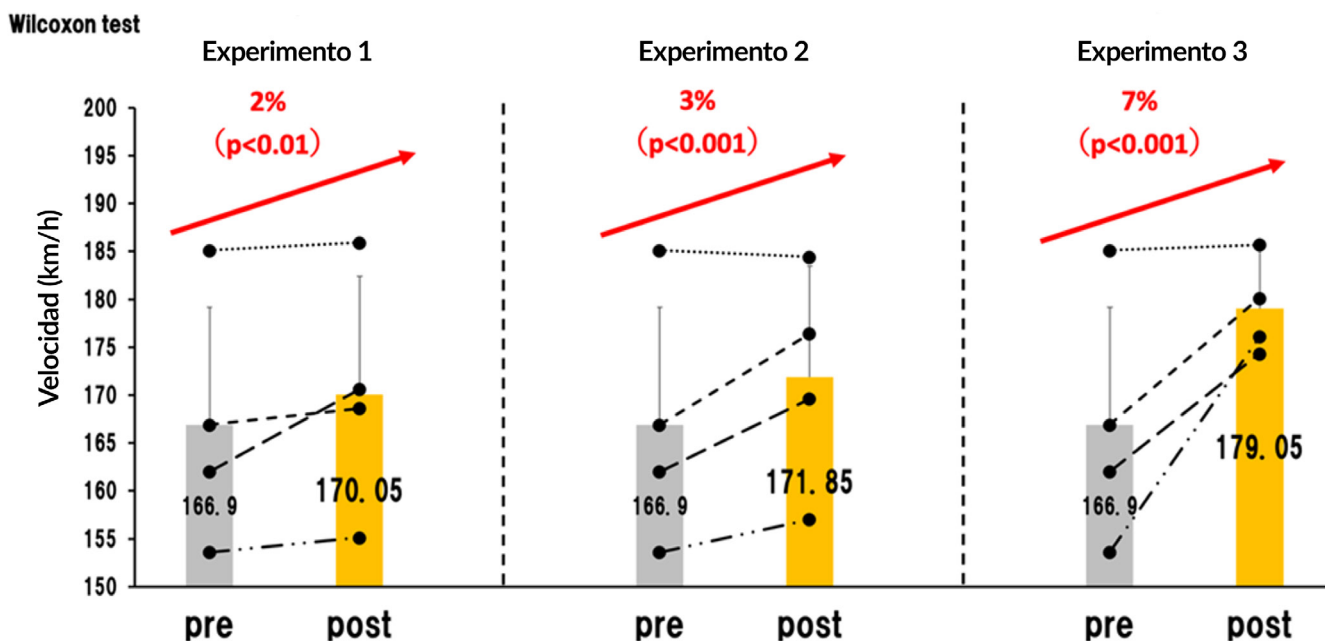


Figura 7. Cambio en la velocidad de saque de la condición pre-test a la post-test.

entre el cerebro/sistema nervioso, el cuerpo y el HAL (cerebro → médula espinal → nervios motores → sistema musculoesquelético → HAL → sistema musculoesquelético → nervios motores → médula espinal → cerebro) refuerzan y ajustan las interconexiones y mejoran su funcionamiento (Grüneberg et al, 2018; Nakajima et al., 2021; Sankai, 2014; Sankai y Sakurai, 2018).

La sentadilla con HAL es un ejercicio CVC que proporciona asistencia voluntaria basada en señales bioeléctricas, lo que supone una evolución de la sentadilla basada en el peso corporal que se practica habitualmente. La sentadilla asistida con HAL estimula y moviliza los músculos y nervios de las extremidades inferiores que no se han utilizado hasta el momento, estableciendo un aprendizaje interactivo de biorretroalimentación eficaz y posiblemente aumentando la velocidad de saque.

### Limitaciones e investigaciones futuras

Dado que en este estudio se utilizó un aparato experimental especial (HAL), sólo se incluyeron cuatro participantes en el estudio. Serán necesarios futuros estudios con un tamaño de muestra mayor y otros métodos, como distintas configuraciones de la muestra para la medición. Además, en este experimento no se analizó el "impulso de las piernas", que se considera un factor importante para aumentar la velocidad del saque, utilizando placas de fuerza y un dispositivo de análisis tridimensional del movimiento. Nos gustaría realizar más estudios teniendo en cuenta estos factores.

### CONCLUSIÓN

Este estudio tenía como objetivo determinar los efectos de los ejercicios de sentadilla CVC asistidos por HAL sobre la velocidad de saque. Se observó un aumento del 2%, 3% y 7% en la velocidad en las condiciones de sentadilla con peso corporal, sentadilla sin asistencia HAL y sentadilla con asistencia HAL (modo CVC), respectivamente. El uso de HAL podría ayudar a los tenistas a reconocer y utilizar sus capacidades físicas y funciones motoras latentes. Además, podría maximizar sus funciones físicas y proporcionar orientación durante la rehabilitación posterior a la lesión.

### CONFLICTO DE INTERESES Y FINANCIACIÓN

Los autores declaran que no tienen ningún conflicto de intereses y que no han recibido ninguna financiación para llevar a cabo la investigación.

### REFERENCIAS

- Abe, T., Miura, K., Kadone, H. (2018) Effect of lumbar load reduction using the lumbar-type Hybrid Assistive Limb® (HAL®). *JOURNAL OF JOINT SURGERY*, 37(5), 537-545 <https://doi.org/10.18885/J00282.2018235811>
- Bahamonde, R.E. (1997) Joint power production during flat and slice tennis serves ISBS-Conference Proceedings Archive
- Bahamonde, R.E. & Knudson, D. (2001) Ground reaction forces of two types of stances and tennis serves. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 33(5), 5102
- Elliott, B.C. & Wood, G.A. (1983) The biomechanics of the foot-up and foot-back tennis service techniques. *Aust J Sports Sci*, 3(2), 3-6
- Girard, O., Micallef, J.P., & Millet, G.P. (2005) Lower-limb activity during the power serve in tennis: effects of performance level. *Medicine and science in sports and exercise*, 37(6), 1021-1029
- Grüneberg, P., Kadone, H., Kuramoto, N., Ueno, T., Hada, Y., Yamazaki, M., Sankai, Y., & Suzuki, K. (2018) Robot-assisted voluntary initiation reduces control-related difficulties of initiating joint movement: A phenomenal questionnaire study on shaping and compensation of forward gait. *PLoS one*, 13(3), e0194214
- Kawamoto, H., Taal, S., Niniss, H., Hayashi, T., Kamibayashi, K., Eguchi, K., & Sankai, Y. (2010) Voluntary motion support control of Robot Suit HAL triggered by bioelectrical signal for hemiplegia 2010 Annual international conference of the IEEE engineering in medicine and biology; IEEE, pp. 462-466
- Keaney, M.E & Reid M. (2018) Quantifying hitting activity in tennis with racket sensors: new dawn or false dawn?. *Sports Biomechanics*, 19(6), 831-839. <https://doi.org/10.1080/14763141.2018.1535619>
- Kovacs, M.S. & Ellenbecker, T.S. (2011a) An 8-stage model for evaluating the tennis serve: implications for performance enhancement and injury prevention. *Sports Health*, 3(6), 504-513. <https://doi.org/10.1177/1941738111414175>
- Kovacs, M.S. & Ellenbecker, T.S. (2011b) A performance evaluation of the tennis serve: implications for strength, speed, power, and flexibility training. *Strength & Conditioning Journal*, 33(4), 22-30
- Martin, C., Bideau, B., Nicolas, G., DelaMarzoe, P., & Kulpa, R. (2012) How does the tennis serve technique influence the serve-and-volley? *Journal of sports sciences*, 30(11), 1149-1156
- Nakajima, T., Sankai, Y., Takata, S., Kobayashi, Y., Ando, Y., Nakagawa, M., Saito, T., Saito, K., Ishida, C., & Tamaoka, A. (2021) Cybernetic treatment with wearable cyborg Hybrid Assistive Limb (HAL) improves ambulatory function in patients with slowly progressive rare neuromuscular diseases: a multicentre, randomised, controlled crossover trial for efficacy and safety (NCY-3001). *Orphanet journal of rare diseases*, 16(1), 1-18
- Nakajima, T. (2011) Clinical trial of robot suit HAL technology for neuromuscular intracranial rare diseases. *Journal of the National Institute of Public Health*, 60, 130-137
- Sankai, Y. (2014) *Cybernetics: fusion of human, machine and information systems*; Springer
- Sankai, Y. & Sakurai, T. (2018) Exoskeletal cyborg-type robot. *Science Robotics*, 3(17), eaat3912
- USTA (2022) Event Statistics Fastest Serve Speed. [https://www.usopen.org/en\\_US/scores/extrastats/index.html?promo=subnav](https://www.usopen.org/en_US/scores/extrastats/index.html?promo=subnav) (Accessed 0101, 2023)
- Yasunaga, Y., Koizumi, R., Toyoda, T., Koda, M., Mamizuka, N., Sankai, Y., Yamazaki, M., & Miura, K. (2022) Biofeedback Physical Therapy With the Hybrid Assistive Limb (HAL) Lumbar Type for Chronic Low Back Pain: A Pilot Study. *Cureus*, 14(3)

Copyright © 2023 Bumpei Sato, Shuhei Sato, Hiroki Yamaguchi, Yoshihiro Yasunaga y Masayuki Sato



Esta obra está bajo una licencia internacional [Creative Commons Atribución 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

Usted es libre para compartir, copiar y redistribuir el material en cualquier medio o formato y adaptar el documento, remezclar, transformar y crear a partir del material para cualquier propósito, incluso para fines comerciales, siempre que cumpla la condición de:

Atribución: Usted debe dar crédito a la obra original de manera adecuada, proporcionar un enlace a la licencia, e indicar si se han realizado cambios. Puede hacerlo en cualquier forma razonable, pero no de forma tal que sugiera que tiene el apoyo del licenciante o lo recibe por el uso que hace de la obra.

[CC BY 4.0 Resumen de licencia](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/). [CC BY 4.0 Texto completo de la licencia](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

[CONTENIDO RECOMENDADO DE LA ITF ACADEMY \(CLICK AQUÍ\)](#)

