

LA CONNEXIÓ MÀQUINA-HUMÀ

UN REPÀS A LES INTERFÍCIES CERVELL-COMPUTADORA

JOSÉ DEL R. MILLÁN

Aquest article introdueix una disciplina molt recent: la de les interfícies cervell-computadora (ICC), que permeten controlar dispositius sense generar cap acció motora, només mitjançant la descodificació directa dels senyals cerebrals de l'usuari. Repassarem la situació actual de les ICC, analitzarem els components principals d'aquestes interfícies i mostrarem els avanços en investigació i els prototips que ja permeten controlar una gran varietat de dispositius, des de la comunicació mitjançant teclats virtuals fins a sistemes robòtics destinats a substituir funcions motores i fins i tot a ajudar a rehabilitar aquestes funcions després d'un accident cerebrovascular. El text conclou amb algunes idees sobre el futur de les ICC.

Paraules clau: interfícies cervell-computadora, processament d'ones cerebrals, aprenentatge automàtic, robòtica, rehabilitació.

■ INTRODUCCIÓ

En una interfície cervell-computadora (ICC), els senyals neuronals registrats en el cervell s'integren en un algoritme que els tradueix perquè les persones amb discapacitats físiques els puguin utilitzar per a controlar una sèrie de dispositius, com ara teclats virtuals (Birbaumer et al., 1999; Sellers, Ryan i Hauser, 2014; Vansteensel et al., 2016), jocs (Perdikis, Tonin, Saeedi, Schneider i Millán, 2018), braços i mans robòtiques (Collinger et al., 2013; Hochberg et al., 2012), robots mòbils (Leeb et al., 2015) i cadires de rodes (Carlsón i Millán, 2013; Ron-Angevin et al., 2017). Per exemple, la Figura 1 mostra una cadira de rodes controlada amb la ment. L'usuari rep la informació de la resposta de la pròtesi mitjançant les vies sensorials normals o directament a través d'estimulació cerebral, amb la qual cosa s'estableix un bucle de control tancat. La tecnologia d'ICC ofereix una forma natural d'augmentar les capacitats humanes ja que proporciona un nou mitjà d'interacció amb el món exterior. En aquest sentit, és particularment interessant com a ajuda per als pacients amb discapacitats neuromusculars severes, encara que també obre noves

possibilitats per a la interacció humà-màquina de persones sense discapacitats.

El principi central d'una ICC és la capacitat de distingir diferents patrons d'activitat cerebral associats a intencions o ordres mentals concretes. Per tant, l'adaptació és un component clau d'una ICC, ja que, d'una banda, els usuaris han d'aprendre a modular les seues ones cerebrals per generar patrons cerebrals diferents, mentre que, d'una altra, les tècniques d'aprenentatge

automàtic haurien de descobrir els patrons cerebrals individuals que caracteritzen les tasques mentals executades per l'usuari. En essència, una ICC és un sistema amb dos aprenents que entaulen un procés d'adaptació mútua (Carmena, 2013; Perdikis et al., 2018). Aquest procés comença amb la selecció de característiques discriminants i estables –components cerebrals de cada

usuari que maximitzen la diferenciació entre ordres mentals i que, a causa de la naturalesa no estacionària dels senyals cerebrals, són estables en el temps– per a construir models òptims que descodifiquen la intenció de l'usuari. Alguns exemples dels components cerebrals específics de cada usuari que s'introdueixen en els descodificadors personalitzats són la potència

**«LA TECNOLOGIA DE LES
INTERFÍCIES CERVELL-
COMPUTADORA OFEREIX
UNA MANERA NATURAL
D'AUGMENTAR LES
CAPACITATS HUMANES»**

d'alguns components de freqüència o l'amplitud de senyals filtrats de passabanda¹ en determinades zones del cervell. Aquestes característiques inicials representen els components cerebrals que l'usuari pot modular de manera natural i aprendre a controlar voluntàriament gràcies a la informació rebuda en l'entrenament en connexió amb la ICC.

Com a exemple d'aquest enfocament d'aprenentatge mutu de les ICC, un estudi recent va investigar la hipòtesi que l'aprenentatge mutu és un factor crític per aconseguir que les ICC puguin funcionar de manera fiable en aplicacions fora del laboratori (Perdikis et al., 2018). A diferència de la tendència més habitual a centrar-se de manera quasi exclusiva en els aspectes d'aprenentatge automàtic de les ICC, un enfocament holístic de l'aprenentatge mutu basat simètricament en els tres pilars (màquina, subjecte i aplicació) va resultar ser el sistema d'entrenament òptim per a preparar dos usuaris que van participar en 2016 en la cursa Cybathlon, la primera competició internacional d'ICC en la qual usuaris amb discapacitats greus operen un dispositiu. Concretament es va entrenar dos participants amb greus problemes derivats de lesions medul·lars cròniques perquè controlaren el seu avatar en un joc de curses virtuals amb ICC. Els resultats de la competició van mostrar l'efectivitat de l'aprenentatge mutu: un d'ells va guanyar la medalla d'or i els dos van marcar els tres millors temps (Figura 2). El que és més important, es van poder extraure correlats d'aprenentatge a tots els nivells de la interfície –aplicació, resultats de la ICC i neuroimatge EEG– d'ambdós usuaris, amb una avaluació prou llarga i, a més, en condicions reals i fins i tot adverses com les del dia de la cursa.

■ COM ENREGISTRAR LES ONES CEREBRALS PER A LES ICC

Quin tipus d'ones cerebrals podem utilitzar per a controlar dispositius directament? L'activitat elèctrica és la candidata natural gràcies a l'excel·lent resolució temporal que ofereix (es pot realitzar un seguiment dels canvis en l'activitat cerebral en el rang dels mil·lisegons). Podem enregistrar l'activitat elèctrica del cervell tant de manera invasiva com no invasiva (Figura 3). La primera d'aquestes tècniques fa servir

una matriu de microelèctrodes implantada en el cervell per a enregistrar l'activitat de neurones individuals –o de petites poblacions neuronals que donen lloc a potencials de camp local–. L'activitat conjunta general de les poblacions neuronals també es pot enregistrar de manera invasiva mitjançant elèctrodes ubicats en la superfície del cervell, és el que es coneix com electrocorticografia. Les ICC no invasives utilitzen principalment activitat electroencefalogràfica enregistrada mitjançant elèctrodes ubicats en el cuir cabellut per mesurar l'activitat sincrònica de milions de neurones corticals. La naturalesa dels senyals dels potencials de camp local, l'electrocorticografia i l'electroencefalografia, és semblant, però ocorren a diferents escales espacials –microscòpica, mesoscòpica i macroscòpica, respectivament.

Els enfocaments invasius donen informació molt detallada sobre les accions planejades dels usuaris, però danyen el teixit cerebral i proporcionen una cobertura limitada, mentre que els processos motors i de decisió impliquen grans àrees cerebrals. Per als humans, però, els enfocaments no invasius són ideals, ja que permeten acostar la tecnologia d'ICC a una gran població. L'electroencefalografia també cobreix

grans àrees corticals, però els seus senyals tenen una resolució espacial reduïda i contenen més soroll perquè els mesuraments es prenen en el cuir cabellut. En resum, enregistrar l'activitat cerebral als tres nivells ofereix avantatges complementaris, i caldria combinar tecnologies per a aconseguir la meta última de controlar neuropròtesis que puguin reproduir qualsevol tipus de moviment

corporal amb la mateixa facilitat amb què les persones sense discapacitat controlen els seus membres naturals (Millán i Carmena, 2010).

■ ACTIVITAT VOLUNTÀRIA VERSUS POTENCIALS EVOCATS

Una ICC pot aprofitar dos tipus de fenomen cerebral. Un d'aquests està relacionat amb senyals associats a l'estimulació sensorial externa –com les llampades

«LES INTERFÍCIES CERVELL-COMPUTADORA ENDÒGENES S'ADAPTEN NATURALMENT A APLICACIONS COM EL CONTROL DE DISPOSITIUS ROBÒTICS»

¹ Un filtre passabanda és aquell que deixa passar un rang de freqüències electròniques determinades i impedeix el pas de la resta. El senyal resultant es coneix com a senyal passabanda.



Figura 1. Mitjançant una interfície cervell-computadora (ICC), els usuaris poden conduir una cadira de rodes modulant voluntàriament les seues ones cerebrals enregistrades a nivell micro, meso i macroscòpic (la figura mostra un exemple d'aquest últim, un electroencefalograma). Una ICC descodifica els patrons individuals d'activitat cerebral associats a diferents ordres mentals. Aquestes ordres es transformen en accions fiables i segures de la cadira de rodes mitjançant tècniques de control compartit que incorporen informació contextual (informació externa, a més de l'estat intern de la cadira de rodes). Aquesta cadira de rodes il·lustra el futur dels dispositius intel·ligents controlats amb la ment que, com la nostra medul·la espinal i sistema musculoesquelètic, treballen conjuntament amb ordres motores descodificades de l'escorça cerebral de l'usuari. Això alleuja els usuaris de la necessitat de proporcionar continuament paràmetres de control de baix nivell i, per tant, es redueix la càrrega cognitiva.

**«ELS USUARIS D'UNA INTERFÍCIE
CERVEL·L-COMPUTADORA HAN
D'APRENDRE A MODULAR LES SEUES
ONES CEREBRALS PER A GENERAR
PATRONS CEREBRALS DIFERENTS»**

visuals o els tons auditiu—, mentre que l'altre es connecta amb processos de decisió voluntaris endògens —com ara la imaginació de moviments—. En el primer cas, el cervell reacciona davant els anomenats «potencials evocats». Un d'aquests potencials evocats és el P300 (Sellers et al., 2014), produït per un succés infreqüent però esperat que apareix en les àrees centroparietals al llarg de la línia mitjana del cuir cabellut, independentment de la modalitat d'estimulació sensorial. Com el seu nom indica, és una ona positiva que assoleix el màxim uns 300 milisegons després d'un estímul rellevant. L'amplitud del P300 depèn de la freqüència de l'estímul —els estímuls menys freqüents produeixen major resposta— i la rellevància de la tasca. En principi, els potencials evocats són fàcils d'adquirir. No obstant això, la necessitat d'estimulació externa limita seriosament la utilitat dels potencials evocats per a tasques que requereixen control continu, com ocorre en robòtica.

En el cas de les ICC endògenes, els usuaris poden modular voluntàriament l'activitat cerebral en diferents freqüències (o ritmes). Les poblacions de neurones poden formar xarxes complexes amb bucles de retroalimentació i donar lloc a una activitat oscil·latòria. En general, la freqüència d'aquestes oscil·lacions es torna més lenta com major és la grandària del grup de neurones sincronitzades. Es pot registrar un ritme particularment rellevant en la regió central del cuir cabellut, sobre l'escorça sensorimotora, durant la imaginació de moviments. Es poden registrar correlats de moviments imaginaris a qualsevol escala: microscòpica (activitat de neurones individuals i potencials de camp local), mesoscòpica (electrocorticografia) i macroscòpica (electroencefalografia). A part dels diferents nivells de resolució espacial, els senyals microscòpics i mesoscòpics també tenen un amplada de banda més àmplia (de fins a 300–500 Hz) que els senyals macroscòpics (normalment inferiors als 100 Hz). Les ICC endògenes s'adapten naturalment a aplicacions com el control de dispositius robòtics i la rehabilitació motora.

■ LES ICC EN FUNCIONAMENT

Els investigadors amplien les ICC, especialment les que es basen en l'electroencefalografia, mitjançant uns pocs principis que faciliten un control fiable dels dispositius. El més important és el «control compartit» o incorpo-

ració d'informació contextual, demostrat en una gran varietat de dispositius com ara robots mòbils, cadires de rodes, robots de telepresència, exoesquelets muntats sobre cames, teclats virtuals i jocs. En un marc de control compartit, les respostes de la ICC es combinen amb informació sobre l'entorn (per exemple, els obstacles percebuts pels sensors del robot en el cas d'una cadira de rodes o les lletres escrites en el cas d'un teclat virtual) i sobre el robot en si mateix (posició i velocitat) per a estimar millor la intenció de l'usuari o fins i tot ignorar els comandaments mentals en situacions crítiques (Carlsón i Millán, 2013). El control compartit no sols és una solució d'enginyeria eficient; a més, es basa en el fet que el control motor humà és el resultat de l'activitat combinada de l'escorça cerebral, les àrees subcorticals i la medul·la espinal. De fet, molts elements dels moviments específics, des de manipular objectes a caminar, es gestionen principalment en el tronc encefàlic i la medul·la espinal, mentre que les àrees corticals proporcionen sobretot una abstracció de l'ordre desitjada. Aquesta organització abona la hipòtesi que es pot aconseguir realitzar tasques complexes utilitzant els comandaments de baixa resolució d'una ICC, sempre que es combine amb un dispositiu robòtic intel·ligent que execute la seqüència detallada d'ordres de baix nivell imitant els nivells subcortical i medul·lar del control motor humà. Com a resultat, el control compartit també redueix la càrrega cognitiva dels usuaris.

Una cadira de rodes controlada amb la ment (Carlsón i Millán, 2013; Ron-Angevin et al., 2017) (Figura 1) il·lustra el futur de les neuropròtesis intel·ligents: dispositius que, com la nostra medul·la espinal i sistema musculoesquelètic, treballen conjuntament amb ordres motores descodificades de l'escorça cerebral de l'usuari. Els usuaris poden conduir-la de manera fiable i segura durant llargs períodes de temps gràcies a la incorporació de tècniques de control compartit. Aquestes alleugen els usuaris de la necessitat de proporcionar contínuament paràmetres de control de baix nivell, per la qual cosa es redueix la càrrega cognitiva i es fa més fàcil dividir l'atenció entre diferents tasques com conduir la cadira i observar l'ambient.



ETH Zürich / Alessandro Della Bella

Figura 2. Una interfície cervell-computadora (ICC) és un sistema amb dos aprenents que s'enfronten a un procés d'adaptació mútua. L'usuari ha d'aprendre a modular les seues ones cerebrals per a generar patrons cerebrals diferents, mentre que les tècniques d'aprenentatge automàtic de la interfície haurien de descobrir els patrons cerebrals individuals que caracteritzen les tasques mentals executades per l'usuari. Un enfocament holístic que va tenir en compte aquest aprenentatge mutu va resultar ser el sistema d'entrenament òptim per a preparar dos usuaris que van participar en 2016 en la cursa Cybathlon, la primera competició internacional d'ICC en la qual usuaris amb discapacitats greus operen un dispositiu. Ambdós participants (en les imatges), membres de l'equip Brain Tweakers, tenien greus lesions medul·lars cròniques i es van entrenar per a controlar el seu avatar en un joc de curses virtuals amb ICC. Els dos van marcar els tres millors temps de la competició d'ICC i un d'ells va guanyar la medalla d'or.

R. Alex Durbin / Forces Aèries dels Estats Units



ETH Zurich / Nicola Pitaro

Un altre principi utilitzat per a augmentar la solidesa d'una ICC és descodificar (i integrar en el bucle de control neuroprostètic) correlats dels «processos cognitius perceptius» de l'usuari, que s'originen durant l'avaluació de les accions executades pel dispositiu controlat amb la ICC i són crucials per a la interacció volitiva. Un exemple important d'aquests correlats és ser conscient dels errors comesos per la ICC quan descodifica la intenció de l'usuari (Chavarriaga, Sobolewski i Millán, 2014). La detecció d'aquests potencials d'error (indicant quan percep l'usuari errors en la ICC) es pot utilitzar per a corregir i millorar el rendiment del sistema.

Un altre component que facilita el control intuïtiu i natural de les neuropròtesis motores és la incorporació d'abundant retroalimentació multimodal i de correlats neuronals dels processos perceptius que en resulten. Una retroalimentació sensorial realista necessita comunicar infor-

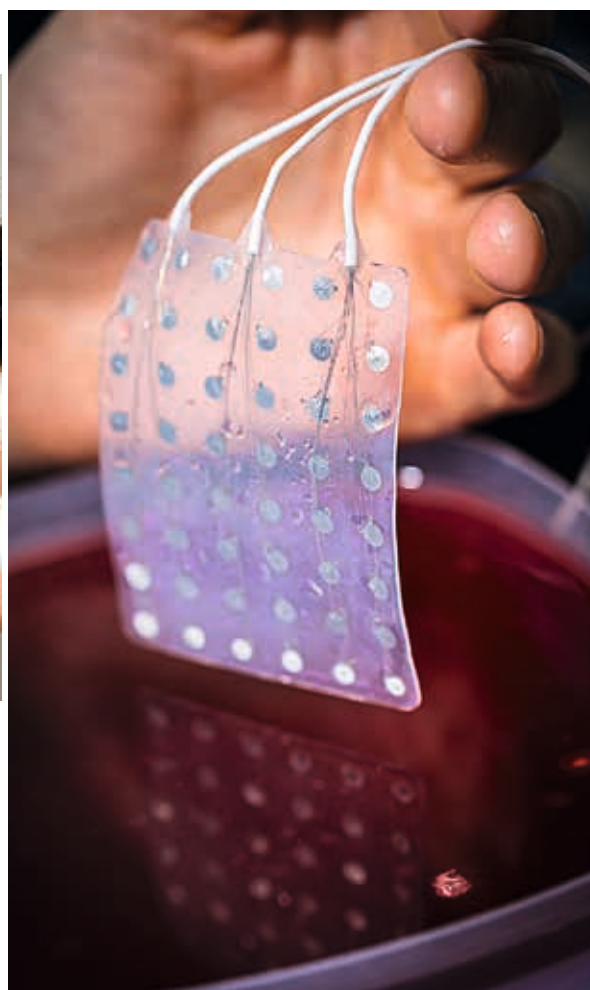
mació tàtil i propioceptiva (és a dir, la posició i el moviment) artificial de la neuropròtesi. Aquest tipus d'informació sensorial té potencial per a millorar de manera significativa el control de les pròtesis ja que permet a l'usuari sentir l'entorn en casos en què els aferents sensorials naturals estan afectats, ja siga mitjançant altres sentits o estimulants el cos o fins i tot el sistema nerviós per a recuperar la sensació perduda (Raspopovic et al., 2014). A més, és essencial disposar d'una abundant retroalimentació multimodal per a augmentar la capacitat de maniobra de l'usuari i el control sobre la pròtesi.

■ ICC PER A LA REHABILITACIÓ MOTORA DESPRÉS D'UN ACCIDENT CEREBROVASCULAR

A més de la substitució motriu, en què una ICC permet controlar una neuropròtesi i així superar una lesió del sistema nerviós central, la tecnologia ICC també pot facilitar la rehabilitació motora (Figura 4). Aquesta és una àrea emergent d'investigació i aplicacions, especí-



Figura 3. L'activitat elèctrica del cervell es pot enregistrar de manera invasiva o no invasiva. Les interfícies cervell-computadora no invasives solen utilitzar l'electroencefalografia, que enregistra l'activitat sincrònica de milions de neurones corticals mitjançant elèctrodes ubicats en el cuir cabellut, com es pot veure a l'imatge superior. D'altra banda, una de les tècniques del mètode invasiu és l'electrocorticografia, que implica una operació quirúrgica per a ubicar una sèrie d'elèctrodes com els de la imatge de la dreta en la superfície del cervell.



Mark Stone / Universitat de Washington

alment després d'un accident cerebrovascular. La justificació de la rehabilitació motora basada en ICC té dues parts. La primera (i tal vegada més pragmàtica) és que, al contrari que la majoria de paradigmes de rehabilitació existents, que necessiten un cert grau de mobilitat residual, la tecnologia ICC pot ajudar pacients d'un accident cerebrovascular fins i tot quan no presenten activitat motora residual. En segon lloc, i el més important, pot augmentar la neuroplasticitat perquè les funcions perdudes després de l'accident cerebrovascular es puguin re-codificar en les àrees corticals pròximes a la lesió.

Una ICC pot augmentar la plasticitat funcional dependent d'activitat sempre que proporcione abundant retroalimentació somatosensorial i propioceptiva contingent a l'activitat motora relacionada amb l'intent de moviment d'una extremitat paràlitzada. Un estudi recent mostra que, utilitzada juntament amb estimulació elèctrica funcional (EEF), una ICC produeix una rehabilitació motora significativa, clínicament rellevant i duradora de les funcions de mans i braços de supervivents d'accident cerebrovascular més efectiva que la teràpia d'EEF placebo (Biasiucci et al., 2018). Aquesta recuperació està associada amb marques quantitatives de neuroplasticitat funcional. Els pacients del grup tractat amb ICC mostraven una recuperació funcional notable després de la intervenció que persistia entre sis i dotze mesos després de finalitzar la teràpia. Com a exemple, dos pacients del grup d'ICC patien una paràlisi completa de la mà i un d'ells es va sotmetre a la teràpia d'ICC-EEF quinze anys després d'un accident cerebrovascular (val a dir que, per a un pacient d'aquestes característiques, recuperar l'activitat de la mà és excepcional). Ambdós pacients van recuperar la contracció muscular voluntària, pogueren estendre el canell i van mostrar indicis d'extensió dels dits. Al contrari, cap dels pacients del grup tractat amb EEF placebo van donar mostres de recuperació.

A més, l'anàlisi d'electroencefalografies va identificar diferències significatives a favor del grup d'ICC, principalment un increment en la connectivitat funcional entre àrees motores de l'hemisferi afectat. Aquest increment estava correlacionat significativament amb la millora funcional. En conjunt, aquests resultats il·lustren que una teràpia d'ICC-EEF pot produir una millora funcional significativa i augmentar la plasticitat



Fondazione Santa Lucia

Figura 4. La tecnologia de les interfícies cervell-computadora també pot facilitar la rehabilitació motora. Aquesta és una àrea emergent d'investigació i aplicacions, especialment després d'un accident cerebrovascular. En la imatge, un pacient és tractat en l'hospital de la Fundació Santa Lucia de Roma amb tècniques de neurorehabilitació després de patir un ictus.

**«LES INTERFÍCIES CERVELL-
COMPUTADORA PODEN AJUDAR PACIENTS
D'UN ACCIDENT CEREBROVASCULAR
FINS I TOT QUAN NO PRESENTEN
ACTIVITAT MOTORA RESIDUAL»**



gràcies a l'activació contingent de les vies eferents (activitat cerebral relacionada amb les funcions motores) i aferents (retroalimentació somatosensorial i propioceptiva) naturals del pacient.

■ CONCLUSIONS

La tecnologia ICC actual, en particular la que es basa en electroencefalografies, permet que el cervell opere dispositius relativament simples. Sens dubte, això representa una fita important per a les persones amb discapacitats motores. No obstant això, la interacció cerebral fiable i natural amb dispositius més complexos continua sent un repte important. Un objectiu relacionat és demostrar el benefici de la tecnologia ICC per a les persones discapacitades fora de les condicions de laboratori. Fins al moment només s'han realitzat uns pocs estudis (Perdikis et al., 2018; Vansteensel et al., 2016). Paral·lelament, a mesura que les ICC van entrant en una fase de desenvolupament més madura, és el

moment idoni per a dissenyar noves modalitats d'interacció per a les persones sense discapacitats. La idea no és controlar un dispositiu directament amb una ICC, sinó millorar la interacció predient les accions que realitzarà l'usuari (o que no realitzarà), així com descodificar el seu estat cognitiu. Això permetrà al dispositiu intel·ligent ajudar l'usuari de la manera més convenient fins a aconseguir una interacció personalitzada perfecta. L'ús d'ICC per a millorar la conducció d'automòbils és un exemple d'aquesta línia d'investigació (Chavarriaga et al., 2018).

Finalment, aquests sistemes ICC futurs requeriran millors tecnologies destinades a enregistrar l'activitat cerebral, tant de manera invasiva com no invasiva. En el primer cas, una línia activa d'investigació és la que correspon al disseny d'interfícies biofísiques segures que, a més, consumisquen poca energia i funcionen sense fil. Quant al segon, alguns exemples de noves tecnologies en aquest camp són els elèctrodes secs que no necessiten gel i es poden integrar en cascos més estètics, a més de sensors en la pell que romanen operatius durant mesos. ☺

«LA INTERACCIÓ CEREBRAL FIABLE I NATURAL AMB DISPOSITIUS MÉS COMPLEXOS CONTINUA SENT UN REPTE IMPORTANT»

REFERÈNCIES

- Biasucci, A., Leeb, R., Iturrate, I., Perdikis, S., Al-Khodairy, A., Corbet, T. A., ... Millán, J. d. R. (2018). Brain-actuated functional electrical stimulation elicits lasting arm motor recovery after stroke. *Nature Communications*, 9, 2421. doi: 10.1038/s41467-018-04673-z
- Birbaumer, N., Ghanayim, N., Hinterberger, T., Iversen, I., Kotchoubey, B., Kübler, A., ... Flor, H. (1999). A spelling device for the paralysed. *Nature*, 398(6725), 297–298. doi: 10.1038/18581
- Carlson, T., & Millán, J. d. R. (2013). Brain-controlled wheelchairs: A robotic architecture. *IEEE Robotics and Automation Magazine*, 20(1), 65–73. doi: 10.1109/MRA.2012.2229936
- Carmena, J. M. (2013). Advances in neuroprosthetic learning and control. *PLOS Biology*, 11(5), e1001561. doi: 10.1371/journal.pbio.1001561
- Chavarriaga, R., Sobolewski, A., & Millán, J. d. R. (2014). Errare machinale est: The use of error-related potentials in brain-machine interfaces. *Frontiers in Neuroscience*, 8, 208. doi: 10.3389/fnins.2014.00208
- Chavarriaga, R., Ušćumlić, M., Zhang, H., Khalilardali, Z., Aydarkhanov, R., Saeedi, S., ... Millán, J. d. R. (2018). Decoding neural correlates of cognitive states to enhance driving experience. *IEEE Transactions on Emerging Topics in Computational Intelligence*, 2(4), 288–297. doi: 10.1109/TETCI.2018.2848289
- Collinger, J. L., Wodlinger, B., Downey, J. E., Wang, W., Tyler-Kabara, E. C., Weber, D. J., ... Schwartz, A. B. (2013). High-performance neuroprosthetic control by an individual with tetraplegia. *Lancet*, 381, 557–564. doi: 10.1016/S0140-6736(12)61816-9
- Hochberg, L. R., Bacher, D., Jarosiewicz, B., Masse, N. Y., Simeral, J. D., Vogel, J., & Donoghue, J. P. (2012). Reach and grasp by people with tetraplegia using a neurally controlled robotic arm. *Nature*, 485, 372–375. doi: 10.1038/nature11076
- Leeb, R., Tonin, L., Rohm, M., Desideri, L., Carlson, T., & Millán, J. d. R. (2015). Towards independence: A BCI telepresence robot for people with severe motor disabilities. *Proceedings of the IEEE*, 103(6), 969–982. doi: 10.1109/JPROC.2015.2419736
- Millán, J. d. R., & Carmena, J. M. (2010). Invasive or noninvasive: Understanding brain-machine interface technology. *IEEE Engineering in Medicine and Biology Magazine*, 29(1), 16–22. doi: 10.1109/EMMB.2009.935475
- Perdikis, S., Tonin, L., Saeedi, S., Schneider, C., & Millán, J. d. R. (2018). The Cybathlon BCI race: Successful longitudinal mutual learning with two tetraplegic users. *PLOS Biology*, 16(25), e2003787. doi: 10.1371/journal.pbio.2003787
- Raspopovic, S., Capogrosso, M., Petrini, F. M., Bonizzato, M., Rigosa, J., Di Pino, G., ... Micera, S. (2014). Restoring natural sensory feedback in real-time bidirectional hand prostheses. *Science Translational Medicine*, 6(222), 222ra19. doi: 10.1126/scitranslmed.3006820
- Ron-Angevin, R., Velasco-Álvarez, F., Fernández-Rodríguez, A., Díaz-Estrella, A., Blanca-Mena, M. J., & Vizcaíno-Martín, F. J. (2017). Brain-computer interface application: Auditory serial interface to control a two-class motor-imagery-based wheelchair. *Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation*, 14(1), 49. doi: 10.1186/s12984-017-0261-y
- Sellers, E. W., Ryan, D. B., & Hauser, C. K. (2014). Noninvasive brain-computer interface enables communication after brainstem stroke. *Science Translational Medicine*, 6(257), 257re7. doi: 10.1126/scitranslmed.3007801
- Vansteensel, M. J., Pels, E. G. M., Bleichner, M. G., Branco, M. P., Denison, T., Freudenburg, Z. V. ... Ramsey, N. F. (2016). Fully implanted brain-computer interface in a locked-in patient with ALS. *New England Journal of Medicine*, 375, 2060–2066. doi: 10.1056/NEJMoa1608085

José del R. Millán. Càtedra Defitech en Interfícies Cerebell-Computadora (CNBI) en el Centre de Neuropròtesis de l'Escola Politècnica Federal de Lausana (Suïssa), on també treballa com a professor associat. Les interfícies cervell-computadora, les neuropròtesis i la robòtica adaptativa figuren entre els seus camps d'investigació. El seu treball actual pretén acostar les ICC i la robòtica intel·ligent adaptativa. ✉ jose.millan@epfl.ch