

NUOVI SCENARI E PROSPETTIVE DELLA BRAIN COMPUTER INTERFACE (BCI)

ALESSANDRO SIMONETTA*

SOMMARIO

1. Introduzione. - 2. Brain Computer Interface. - 3. Sistemi dipendenti dal controllo cosciente. - 4. Sistemi indipendenti dal controllo cosciente. - 5. Lo studio dell'usabilità delle BCI. - 6. Conclusioni.

1. Introduzione

La ricerca negli ultimi anni si è rivolta verso nuove tipologie di interfacce per il colloquio uomo-macchina fino a realizzare dispositivi sempre più innovativi e sofisticati. Nel presente articolo viene descritto un sistema per l'inserimento dati attraverso l'utilizzo di segnali cerebrali che caratterizzano un processo cognitivo. Questo genere di dispositivi oltre a costituire un sistema alternativo per un individuo normodotato, può essere l'unico mezzo di dialogo per persone che soffrono di quei disordini neurologici che portano ad una totale o parziale paralisi motoria, come ad esempio nel caso della sclerosi amiotrofica laterale (*Amyotrophic Lateral Sclerosis*, ALS) o dell'infarto del tronco encefalico. Questi pazienti perdono, nel corso del tempo, la capacità di usufruire dei sistemi di comunicazione classici, per i quali sono solitamente necessari l'uso della parola o l'uso dei muscoli (utilizzati per la pressione sui tasti). In questi casi i soggetti non sono più in grado di comunicare i loro bisogni e pensieri con l'ambiente circostante e per questo vengono definiti "rinchiusi" (dall'espressione inglese *locked-in*), che sta ad indicare una condizione di paralisi dei muscoli volontari¹. Questa condizione imprigiona le persone in un corpo che non reagisce più agli impulsi nervosi spesso ancora presenti nel cervello.

* Consulenza per l'Innovazione Tecnologica - Direzione Generale INAIL.

¹ BIRBAUMER N.: *Breaking the silence: Brain-computer interfaces (BCI) for communication and motor control*, in *Psychophysiology*, 2006, 43(6), 517-32.

Per certe patologie, se da un lato si cercano soluzioni di natura microbiologica che permettono la ricostruzione del tessuto del midollo spinale², dall'altro si esplorano soluzioni e tecnologie che tentano di abilitare la comunicazione diretta tra il cervello e un dispositivo esterno senza il coinvolgimento di processi motori. Quest'ultimo campo di studio è denominato Brain Computer Interface (BCI) e comprende la scienza e le tecnologie dei dispositivi e dei sistemi che rispondono ai processi cognitivi o a quelli neurali atti a generare movimenti.

I settori di applicazione e i benefici associati all'impiego di una tecnologia di tipo BCI sono numerosi e comprendono soluzioni che partono da applicazioni per la scrittura e l'interazione tra pazienti locked-in sino ad arrivare allo sviluppo di neuroprotesi, ossia di sistemi capaci di stabilire un collegamento artificiale il più possibile simile a quello naturale mancante o deteriorato.

Questi studi sono interessanti perché propongono delle soluzioni applicabili anche agli anziani che, a causa dell'età avanzata, possono presentare capacità motorie e sensoriali ridotte.

Sebbene le BCI siano state studiate per molti anni dal punto di vista medico e tecnologico, pochi studi evidenziano gli aspetti legati alla loro usabilità ed ergonomia.

2. Brain Computer Interface (BCI)

Le interfacce BCI sono in grado di individuare e misurare determinate caratteristiche dell'attività cerebrale riuscendo a riconoscere l'intenzione del soggetto di compiere una particolare azione e a tradurre questa intenzione in segnali per il controllo di dispositivi elettronici.

Le soluzioni utilizzanti BCI possono essere più o meno invasive a seconda della tipologia di rilevamento dei processi cerebrali coinvolti nel controllo del dispositivo elettronico.

Le interfacce invasive interagiscono con il soggetto in maniera diretta, per esempio attraverso l'inserimento di sensori a livello corticale e l'utilizzo di algoritmi necessari ad estrarre le informazioni. Una volta decodificati i segnali neurali diviene possibile comandare un'interfaccia quale:

- un personal computer (mouse e keyboard),
- un sistema robotico,
- un'interfaccia biologica (muscoli, nervo periferico, midollo spinale).

Un esempio di sistema di questo tipo è rappresentato dal Brain Gate 2 Neural Interface System³, sviluppato da un team di ricercatori statunitensi.

² Spaghetti junction bridges gaps in broken spines, in *New Scientist*, 2011 Feb.

³ MALIK W.Q., TRUCCOLO W., BROWN E.N., HOCHBERG L.R.: *Efficient Decoding With Steady-State Kalman Filter in Neural Interface Systems*, IEEE Transaction on Neural Systems and Rehabilitation Engineering, 2011 Feb.

Le interfacce non invasive, invece, prelevano i segnali utili attraverso lo scalpo e si appoggiano a tecnologie quali:

- Elettroencefalogramma (EEG),
- magnetoencefalografia (MEG),
- Risonanza magnetica funzionale (fMRI),
- Spettroscopia nel range dell'infrarosso (NIRS).

Le soluzioni non invasive che adottano la prima tecnologia (EEG) sono le più diffuse in quanto hanno ancora oggi un costo di realizzazione più basso rispetto alle altre (MEG, fMRI e NIRS) che, inoltre, vanno a monitorare delle caratteristiche variabili lentamente nel tempo e, pertanto, non possono essere impiegate in applicazioni che richiedono comunicazioni rapide.

L'elettroencefalografia è una misura dell'attività elettrica avente origine dai neuroni presenti nella corteccia cerebrale che viene registrata per via non invasiva attraverso elettrodi applicati sullo scalpo. L'attività cerebrale include sia quella elettrica spontanea della rete neurale, sia le risposte della corteccia ad eventi esterni ed interni⁴. Attraverso una serie di operazioni, non oggetto di questo articolo, è possibile circoscrivere e discriminare l'attività EEG sincronizzata con un determinato stimolo; questo processo è alla base del funzionamento delle interfacce BCI.

Data l'eterogeneità dell'attività del cervello umano, sono stati utilizzati differenti schemi elettroencefalografici per varie soluzioni di BCI proposte. Quelli più diffusi secondo alcuni autori⁵ sono i seguenti:

- potenziali corticali lenti (Slow Cortical Potentials o SCP),
- ritmi β e μ ,
- potenziali evocati visivi (Visual Evoked Potentials o VEP),
- la componente P300 dei potenziali evocati.

Ognuno di essi utilizza delle componenti cognitive e sensoriali differenti che si caratterizzano fondamentalmente per il fatto di avere o meno dipendenza dal canale di comunicazione dei muscoli e dei nervi periferici. In tale ottica i primi due schemi (SCP e ritmi β e μ) trovano applicazione in interfacce BCI di tipo dipendente, in cui cioè si cerca di individuare i segnali inviati dal cervello attraverso processi motori; gli ultimi due (VEP e P300) si applicano ad interfacce BCI di tipo indipendente, nelle quali l'informazione è generata dai circuiti cerebrali indipendentemente dai muscoli.

⁴ WOLPAW J.R., BIRBAUMER N., KUBLER A., KOTCHOUBEY B., KAISER J.: *Brain-Computer Communications: Unlocking the Locked In*. 2001.

⁵ BEVERINA F., PALMAS G., SILVONI S., PICCIONE F., & GIOVE, S.: *User adaptive BCIs: SSVEP and P300 based interfaces*, in *PsychNology Journal*, 1(4), 331-54, 2003.

Questi sistemi possono essere controllati dall'utente in modo cosciente o involontario (sistemi indipendenti dal controllo cosciente): rientrano nella prima categoria i sistemi in cui gli utenti controllano intenzionalmente alcuni aspetti della propria attività EEG, prevedono un apprendimento volontario attraverso procedure di biofeedback per regolare gli aspetti dei segnali cerebrali⁶.

Nella seconda categoria rientrano i sistemi che utilizzano informazioni dell'attività elettrica cerebrale riconosciute in tempo reale attraverso algoritmi sofisticati e non prevedono una fase di apprendimento da parte dell'utente.

3. Sistemi dipendenti dal controllo cosciente

È questo il caso delle interfacce che utilizzano i potenziali corticali lenti (SCP) - ovvero polarizzazioni sinaptiche negative o positive dell'EEG o cambiamenti nei campi magnetici nel caso di un magnetoencefalogramma (MEG) - che possono essere regolate intenzionalmente dai pazienti. Queste variazioni hanno una durata che va da un minimo di 300 ms ad un massimo di diversi secondi. È stato evidenziato che le persone possono imparare a regolare volontariamente questi potenziali per mezzo di un apprendimento che faccia uso di feedback immediati usati come rinforzo positivo⁷.

Un esempio di interfaccia dipendente da controllo cosciente, denominata *Thought Translation Device* (TTD), è stata realizzata da Birbaumer. Questo dispositivo è in grado di classificare e filtrare le diverse componenti delle onde elettroencefalografiche e, in base al valore della tensione misurata, permette all'utente di spostare un cursore su uno schermo. Una volta che l'utente acquisisce un'accuratezza nell'utilizzo dello strumento di circa il 75%, può passare alla fase successiva che prevede l'utilizzo del programma *Language Support Program* (LSP). Con questo programma l'utente riesce a sfruttare l'attività cerebrale per comporre sequenze di caratteri utilizzando insiemi dicotomici di lettere.

Nonostante la velocità di scrittura, come del resto la velocità di apprendimento, non sia rapida, è da considerarsi un passo importante nello sviluppo di un sistema di comunicazione che permetta ad utenti affetti da patologie come l'ALS di interagire con l'ambiente.

I gruppi di lavoro di Wolpaw al Wadsworth Center (Albany, USA) e di Pfurtscheller a Graz (Austria) hanno dimostrato, con una serie di esperimenti, che soggetti sani e pazienti paralizzati possono raggiungere il controllo volontario del ritmo cerebrale senso-motorio (*Sensory Motor Rhythm*, SMR). Tale con-

6 JONES K.S., MIDDENDORF M., MCMILLAN G.R., CALHOUN G., & WARM J.: *Comparing mouse and steady-state visual evoked response-based control. Interacting with Computers*, 15(4), 603-21, 2003.

7 BIRBAUMER N., SLOW CORTICAL POTENTIALS: *Plasticity, Operant Control, and Behavioral Effects. The Neuroscientist*, 5(2), 74-78, 1999.

trollo avviene in entrambi gli emisferi e può essere sviluppato tramite l'immaginazione dei movimenti.

Registrando l'attività cerebrale su soggetti adulti in stato di veglia è possibile rintracciare un'attività corticale proveniente dalle aree sensoriali o motorie.

Il sistema BCI2000 che utilizza i ritmi β e μ , presenti nelle aree motorie ed attivati con l'immaginazione dei movimenti è stato sviluppato da un team di ricercatori⁸ con lo scopo di permettere all'utente di spostare il cursore su uno schermo nelle due dimensioni.

Questa interfaccia è caratterizzata da semplicità di apprendimento, circa 2-3 settimane, e accuratezza stimata intorno al 95%.

4. Sistemi indipendenti dal controllo cosciente

Le BCI che utilizzano i potenziali visivi evocati (VEP), registrati sullo scalpo all'altezza della corteccia visiva, permettono di valutare la stimolazione sensoriale nel campo visivo dell'utente.

Un sistema in grado di determinare la direzione dello sguardo dell'utente è stato realizzato nell'Air Force Research Laboratory di Dayton. Il sistema utilizza uno schermo di un computer in cui vengono presentati diversi pulsanti virtuali, ognuno dei quali emana una luce ad una frequenza di lampeggiamento diversa dall'altro. Quando l'utente guarda uno di questi pulsanti, il sistema è in grado di determinare il pulsante individuato dall'utente attraverso la misura della frequenza prelevata dalla corteccia visiva.

La componente P300 è invece il potenziale evento-correlato provocato da eventi rari o significativi posti in mezzo a stimoli di routine. La latenza del potenziale varia da 300 ms a 1 secondo e in corrispondenza dei 300 ms ha un valore di picco che coincide con l'elaborazione di uno stimolo semplice, mentre la sua maggiore latenza sembra riflettere il tempo necessario a prendere una decisione sullo stimolo.

La prima interfaccia BCI di questo tipo è stata utilizzata da Donchin ed è denominata "P300 Speller" (FARWELL & DONCHIN, 1988; DONCHIN *et al.*, 2000; SELLERS & DONCHIN, 2006). Al paziente viene sottoposta una matrice di caratteri 6×6 le cui righe e colonne lampeggiano a ciclo continuo, con intervallo regolare ed in modo casuale (senza che si verificano ripetizioni in ogni ciclo). L'utente comunica la scelta del carattere selezionando successivamente riga e colonna, o viceversa colonna e riga, che lo contiene. Durante la prova viene registrato l'EEG parietale e, successivamente, viene calcolata la risposta media a ciascuna riga e colonna rilevando l'ampiezza della P300 per ognuna delle possibili scelte.

⁸ WOLPAW J.R., MCFARLAND D.J., NEAT G.W., & FORNERIS C.A.: *An EEGbased brain-computer interface for cursor control*, in *Electroencephalography & Clinical Neurophysiology*, 78(3), 252-59, 1991.

In generale gli studi condotti su differenti sistemi di BCI hanno portato gli scienziati a concludere che la facilità di riconoscimento da parte del computer dell'attività cerebrale di un paziente è direttamente proporzionale alla concentrazione che il paziente stesso pone nell'utilizzo dell'interfaccia. Ciò ha indotto a considerare con più attenzione il valore che assume il lato utente dell'interfaccia relativamente all'usabilità della stessa: interfacce più accattivanti e semplici permettono di ottenere risultati migliori in quanto percepite con maggiore soddisfazione e partecipazione dell'utente.

5. Lo studio dell'usabilità delle BCI non invasive

Con il termine usabilità si intende il grado in cui un prodotto può essere usato da specifici utenti per raggiungere specifici obiettivi con efficacia, efficienza e soddisfazione in uno specifico contesto d'uso⁹. In pratica l'usabilità definisce il grado di facilità e soddisfazione con cui avviene l'interazione uomo-strumento. Generalmente l'argomento BCI è stato affrontato da un punto di vista medico-scientifico senza tenere conto delle caratteristiche di accessibilità e di usabilità delle soluzioni adottate che dipendono da fattori psico-sociali.

Secondo un nuovo modello che si sta diffondendo in questi ultimi anni le tecnologie assistive non si occupano semplicemente di compensare un deficit di un individuo ma anche di migliorarne la qualità della vita e le interazioni sociali.

Uno studio recente¹⁰ sulle due interfacce *Language Support System (LSP)* e *P300 Speller* ne ha valutato l'usabilità secondo i canoni della norma ISO.

L'analisi dell'usabilità è stata effettuata mediante la realizzazione di un ambiente software di simulazione delle due interfacce che ha permesso di registrare i progressi e gli errori degli utenti. Nella progettazione di tale ambiente sono stati considerati i seguenti requisiti:

- portabilità - il sistema doveva funzionare indipendentemente dalla piattaforma;
- semplicità di installazione - non doveva esistere preclusioni causate dalla difficoltà nell'operazione di installazione;
- modificabilità - il sistema doveva essere aperto a modifiche, migliorie e personalizzazioni da parte della Comunità scientifica;
- possibilità di modificare la lingua e la terminologia - massima configurabilità dell'ambiente in modo da favorire la semplicità di utilizzo.

⁹ International Standard Organization ISO 9241-11:1998 "Ergonomic requirements for office work with visual display terminals (VdTs) - Part 11: Guidance on usability. Geneva:ISO 1998

¹⁰ E. PASQUALOTTO, A. SIMONETTA, S. FEDERICI, M. OLIVETTI BELARDINELLI: *Usability Evaluation of BCIs "Association for the Advancement of Assistive Technology in Europe (AAATE 2009), Assistive Technology research series, Volume 25, Florence, Italy, Aug 31- Sep 02, 2009.*

Il linguaggio di programmazione scelto in virtù delle caratteristiche di portabilità e semplicità di installazione è Java, che, grazie all'esistenza della Java Virtual Machine (JVM), permette a qualsiasi codice *bytecode*¹¹ di girare su ogni macchina; l'installazione di un'applicazione si traduce così nella semplice copia del programma; infine, Java è un linguaggio aperto e ampiamente diffuso.

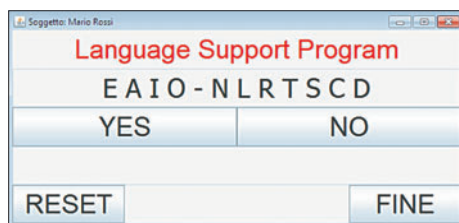


Fig. 1: Quadro video nell'inserimento con LSP.

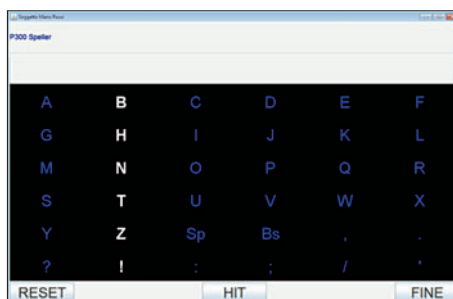


Fig. 2: Quadro video nell'inserimento con P300.

Lo studio dell'usabilità delle due interfacce BCI (LSP e P300 Speller) ha misurato:

- l'efficacia, considerata come la misura in cui gli obiettivi d'uso prefissati vengono raggiunti, valutando quindi il tempo impiegato per eseguire un compito;
- l'efficienza, considerata come la quantità di sforzo mentale necessaria per raggiungere gli obiettivi di efficacia, valutando il numero di errori commessi nell'esecuzione di un compito;
- la soddisfazione, considerata come la misura in cui gli utenti trovano il sistema globalmente accettabile e piacevole, valutando le reazioni dell'utente.

Gli obiettivi di usabilità possono essere orientati alla valutazione di due parametri differenti: la facilità di apprendimento e quella d'uso. La facilità di apprendimento si concentra sull'esperienza necessaria agli utenti novizi e a coloro che usano il prodotto con scarsa frequenza.

La facilità d'uso si focalizza sull'uso del prodotto da parte di utenti esperti: viene definita anche dalla velocità potenziale e dall'efficienza che un'interfaccia offre all'utente esperto.

Dal punto di vista della semplicità di apprendimento lo studio ha evidenziato come l'interfaccia LSP sia inizialmente più intuitiva rispetto a quella del P300 Speller.

¹¹ Il bytecode è il linguaggio di una macchina virtuale chiamata Java Virtual Machine.

Per valutare il grado di soddisfazione dell'utente è stato utilizzato il questionario SUS (*System Usability Scale*), mentre per determinare il tipo di tecnologia più idonea al paziente è stato utilizzato il questionario Sotu-C (*Survey of Technology Use*). Dal punto di vista della soddisfazione d'uso, tutti gli utenti hanno esplicitamente dichiarato che l'LSP è più intuitivo.

I risultati riguardo la facilità di utilizzo hanno evidenziato una differenza a favore dell'interfaccia P300 Speller denotando il fatto che, sebbene essa risulti meno intuitiva nella fase di apprendimento, venga comunque preferita in quanto permette un maggior controllo dello stato del sistema.

Infine, è stato condotto un ultimo test il cui intento era di valutare l'influenza di altri fattori sull'usabilità delle due interfacce, come ad esempio il carico di lavoro necessario ad utilizzarle. Anche in questo caso sono stati compilati questionari di tipo SUS, stavolta in concomitanza ad uno strumento specifico per la misurazione del carico di lavoro, il NASA *Task Load index* (TLX)¹². Quest'ultimo è utilizzato da tempo per valutare lo sforzo mentale, fisico, temporale, prestazionale, nonché l'impegno e la frustrazione degli astronauti nell'utilizzo di interfacce presenti nelle navicelle aerospaziali.

L'analisi ha sottolineato come il genere e l'esperienza pregressa nell'uso del computer non influenzino l'usabilità delle interfacce, mentre ha ribaltato il risultato del test precedente riguardo l'accuratezza nei risultati in quanto l'interfaccia LSP è stata preferita a quella P300 Speller. Lo studio ha messo in evidenza come le differenze nella modalità di presentazione possano far cambiare la prospettiva degli utenti rispetto all'usabilità dell'interfaccia stessa e quindi possano essere determinanti nell'adozione o nell'abbandono da parte dell'utilizzatore finale.

6. Conclusioni

Lo studio delle interfacce BCI si è intensificato in questi ultimi anni sebbene i primi esperimenti legati al tentativo di sfruttare l'attività elettrica del cervello per permettere la comunicazione tra l'uomo e una macchina elettronica risalgono a circa trenta anni fa. L'impulso accelerativo è stato impresso principalmente dall'evoluzione degli algoritmi per la classificazione dell'EEG, dalle ricerche legate al significato profondo dei segnali cerebrali scandagliati attraverso nuove tecnologie magnetiche (fMRI¹³ e MEG), dall'innovazione tecnologica che ha contribuito alla miniaturizzazione dei dispositivi legati in particolare a soluzioni di tipo invasivo.

¹² <http://human-factors.arc.nasa.gov/groups/TLX/>

¹³ A. LONDEI, A. SIMONETTA, M. OLIVETTI BELARDINELLI: *A software package for application of ICA and Granger Causality to fMRI data*. *Human Brain Mapping* (HBM 2007), Proc. of 13th Annual Meeting of the Organization for Chicago, USA, June 10-14, 2007.

Sicuramente le BCI continueranno ad evolversi sia in una direzione prettamente tecnico-scientifica sia in quella introdotta nel presente articolo, che evidenzia implicazioni psicologiche e sociali legate a questo tipo di tecnologia.

L'INAIL, da sempre attento e sensibile a tematiche legate alla salute del lavoratore/infortunato, è presente anche in questo campo di studio attraverso una prolifera collaborazione con l'Università "Sapienza" di Roma, l'Università di Perugia, l'Università di Tübingen ed il centro ECONA (Interuniversity Centre for Research on Cognitive Processing in Natural and Artificial Systems). In questo ambito, l'Istituto si propone come parte attiva tanto per le tematiche di tipo assistivo quanto per le soluzioni tecnologiche atte al miglioramento dell'accessibilità e dell'usabilità delle BCI.

RIASSUNTO

Questo articolo riassume l'esperienza relativa ad una tecnologia denominata Brain Computer Interface (BCI) che l'INAIL ha maturato negli ultimi anni in collaborazione con l'Università "Sapienza" di Roma, l'Università di Perugia, l'Università di Tübingen ed il centro ECONA (Interuniversity Centre for Research on Cognitive Processing in Natural and Artificial Systems). Le interfacce BCI rappresentano una prospettiva di grande valore soprattutto per soggetti che soffrono di quei disordini neurologici che portano ad una totale o parziale paralisi motoria con la conseguente impossibilità di comunicare con il mondo esterno, e pertanto definiti "rinchiusi" (dall'espressione inglese *locked-in*).

Nel presente articolo si descrive lo stato dell'arte delle BCI evidenziando i progressi nonché le problematiche affrontate nello sviluppo di questa tecnologia innovativa che ha visto una notevole accelerazione negli ultimi anni.

Sebbene le BCI siano state studiate e sviluppate dal punto di vista medico e tecnologico, pochi studi evidenziano gli aspetti legati alla loro usabilità ed ergonomia.

SUMMARY

This paper summarizes the experience on Brain Computer Interface technology that INAIL developed in the last few years together with the University of Rome "Sapienza", the University of Perugia, the University of Tübingen and the "ECONA" Centre (Interuniversity Centre for Research on Cognitive Processing in Natural and Artificial Systems). BCIs are a very attractive perspective in terms of help and support for patients, so-called "*locked-in*", affected by neurological diseases, which cause total or partial motor paralysis and, as consequence, difficulties in communication skills with the external world.

The present article describes BCI showing both progress and problems encoun-

tered while developing this innovative technology that has been improved in the few recent years. Although BCI has been studied and developed in the medical and technological fields, few studies highlight aspects concerning their usability and ergonomics.

BIBLIOGRAFIA

MALIK W.Q., TRUCCOLO W., BROWN E.N., AND HOCHBERG, L.R.: *Efficient Decoding With Steady-State Kalman Filter in Neural Interface Systems*, IEEE Transaction on Neural Systems and Rehabilitation Engineering, 2011 Feb.

E. PASQUALOTTO, A. SIMONETTA, S. FEDERICI, M. OLIVETTI BELARDINELLI: *Usability Evaluation of BCIs*, Association for the Advancement of Assistive Technology in Europe (AAATE 2009), Assistive Technology research series, Volume 25, Florence, Italy, Aug 31- Sep 02, 2009.

A. LONDEI, A. SIMONETTA, M. OLIVETTI BELARDINELLI: *A software package for application of ICA and Granger Causality to fMRI data*, Human Brain Mapping (HBM 2007), Proc. of 13th Annual Meeting of the Organization for Chicago, USA, June 10-14, 2007.

BIRBAUMER N.: *Breaking the silence: Brain-computer interfaces (BCI) for communication and motor control*, in *Psychophysiology*, 2006, 43(6), 517-32.

SELLERS E.W., & DONCHIN E.: *A P300-based brain-computer interface: Initial tests by ALS patients*, in *Clinical Neurophysiology*, 2006, 117(3), 538-48.

WOLPAW J.R., BIRBAUMER N., KUBLER A., KOTCHOUBEY B., KAISER J.: *Brain-Computer Communications: Unlocking the Locked In*, 2001.

INTERNATIONAL STANDARD ORGANIZATION ISO 9241-11:1998: *Ergonomic requirements for office work with visual display terminals (VdTs)*, Part 11: Guidance on usability. Geneva:ISO, 1998.

LEGGE 9 GENNAIO 2004, N. 4: nota come *Legge Stanca*.

WOLPAW J.R., BIRBAUMER N., MCFARLAND D.J., PFURTSCHELLER G., VAUGHAN T.M.: *Brain-computer interfaces for communication and control*, in *Clinical Neurophysiology*, 2002.

BROOKE J.: *SUS: a 'quick and dirty' usability scale*, in P.W. JORDAN, B. THOMAS,

B.A. WEERDMEESTER, A.L. MCCLELLAND (eds.) *Usability Evaluation in Industry* London: Taylor and Francis, 1996.

SCHERER M.J.: *Living in the State of Stuck: How technology impacts the lives of people with disabilities*, Cambridge: Brookline Books, 2000.

ERICSSON K., SIMON H.: *Verbal reports as data*, in *Psychological Review*, 1980, 87(3), 215-51.

OBERMAIER B., MÜLLER G.R., PFURTSCHELLER G.: *Virtual keyboard controlled by spontaneous EEG activity*, *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*, 2003, 11(4), 422-26.

WOLPAW J.R., MCFARLAND D.J., VAUGHAN T.M., SCHALK G.: *The Wadsworth Center brain-computer interface (BCI) research and development program*, *IEEE transactions on neural systems and rehabilitation engineering*, 2003, 11(2), 204-07.

JONES K.S., MIDDENDORF M., MCMILLAN G.R., CALHOUN G., WARM J.: *Comparing mouse and steady-state visual evoked response-based control. Interacting with Computers*, 2003, 15(4), 603-21.

DONCHIN E., SPENCER K.M., WIJESINGHE R.: *The mental prosthesis: assessing the speed of a P300-based brain-computer interface*, *IEEE transactions on rehabilitation engineering*, 2000, 8(2), 174-79.

RIEMER-REISS M., WACKER R.: *Assistive technology use and abandonment among college students with disabilities*, *International Electronic Journal for Leadership in Learning*, 1999, 3, 23.

BIRBAUMER N.: *Slow Cortical Potentials: Plasticity, Operant Control, and Behavioral Effects*, in *The Neuroscientist*, 1999, 5(2), 74-78.

WOLPAW J.R., MCFARLAND D.J., NEAT G.W., FORNERIS C.A.: *An EEGbased brain-computer interface for cursor control*, in *Electroencephalography & Clinical Neurophysiology*, 1991, 78(3), 252-59.

FARWELL L.A., DONCHIN E.: *Talking off the top of your head: Toward a mental prosthesis utilizing event-related brain potentials*, in *Electroencephalography & Clinical Neurophysiology*, 1988, 70(6), 510-23.