

## ***Dottorato in Bioingegneria XIX ciclo***

---

*Relazione Attività di Ricerca  
dell'Anno 2004*

# **SISTEMI A BIOFEEDBACK E REALTA' VIRTUALE PER LA RIABILITAZIONE MOTORIA**

Dottorando: **Marco Dozza**

*Supervisore:* Prof. Angelo Cappello

*Co-supervisori:* Prof. Lorenzo Chiari  
Prof.ssa Fay B. Horak

*Co-supervisori:* Prof. Carlo Marchesi

### ***Sommario delle attività svolte:***

L'attività di ricerca nell'anno 2004 è stata principalmente orientata alla sperimentazione su soggetti sani e vestibolari del sistema di audio-biofeedback (ABF) sviluppato durante la tesi di laurea e alla stesura di tre articoli, due dei quali già accettati per la pubblicazione da riviste internazionali (si veda elenco allegato). Queste attività sono state in parte svolte presso il Balance Disorders Laboratory all'Oregon Health and Science University di Portland (OR) sotto la supervisione della Prof. Fay Horak. Il periodo di ricerca negli Stati Uniti è andato da Febbraio a Settembre 2004.

In parallelo a queste attività è stato sviluppato un nuovo sistema di biofeedback visivo per il controllo posturale che è stato usato inizialmente come strumento didattico in varie manifestazioni scientifiche (si veda elenco nell'ultima pagina) e, in seguito, come strumento di ricerca nel laboratorio di Fay Horak.

Una parte molto interessante della attività di questo primo anno di dottorato ha inoltre visto la collaborazione alla stesura di progetti di ricerca e trasferimento tecnologico orientati alla richiesta di finanziamenti presso il National Institutes of Health (NIH) e la Comunità Europea.

Infine, durante la permanenza negli Stati Uniti, ho collaborato con l'Ing. Robert Peterka e il Prof. Conrad Wall; con entrambi ho svolto attività sperimentali e nuovi esperimenti pilota per l'acquisizione di dati le cui analisi sono tuttora in corso.

Nel seguito di questa relazione sono presentati:

- 1) risultati del sistema ABF su soggetti normali sani (Accettato su *IEEE Trans. Biomed. Eng.*);
- 2) risultati del sistema ABF su soggetti vestibolari bilaterali (In stampa su *Arch. Phys. Med. Rehab.*);
- 3) sviluppo di un nuovo sistema di biofeedback visivo teso allo svolgimento di progetti educativi in ambito scientifico e di ricerca;
- 4) alcuni esperimenti pilota, nati dalla collaborazione con Fay Horak, Robert Peterka, Conrad Wall, Frantisek Hlavacka, Jim Frank, Diane Wrisley, che rappresentano il futuro più prossimo di questo studio.

## Sperimentazione dell'audio-biofeedback: risultati su soggetti normali

(Questi risultati sono presentati nel lavoro "An accelerometry-based system for balance improvement using audio-biofeedback" accettato e in fase di revisione per IEEE Trans. Biomed. Eng.)

### Metodologia:

Il sistema di biofeedback audio utilizzato è composto di: un sensore accelerometrico biassiale (ADXL 203, Analog Device), un computer portatile con scheda di acquisizione (DAQcard 6024E) e un paio di cuffie (Fig. 1). Il sistema è in grado di codificare le accelerazioni rilevate dal sensore in un suono stereo modulato in frequenza, volume e bilanciamento fra i due canali (Fig. 2). Ci si è inoltre serviti di una pedana di forza (AMTI OR6-6) (Fig. 1) per l'acquisizione dello spostamento del centro di pressione.

Nove soggetti si sono sottoposti all'esperimento mantenendo una postura ortostatica in diverse condizioni di limitazione sensoriale. Il sistema di audio biofeedback forniva una rappresentazione delle accelerazioni del tronco rilevate all'altezza della quinta vertebra lombare.

L'analisi si è concentrata su alcuni parametri di pedana quali, root mean square distance (RMS), mean velocity (MV), la frequenza comprendente il 95 % della potenza del segnale (F95%), frequency dispersion (FD), e scostamento della direzione di massima oscillazione da un'oscillazione puramente antero posteriore  $|90\text{-Mdir}|$ .

### Principali risultati e discussione:

L'uso del sistema di audio-biofeedback ha avuto un effetto stabilizzante sui soggetti specie in condizione di limitata informazione visiva e somatosensoriale (Fig. 3). In particolare, la diminuzione statisticamente significativa di RMS rappresenta la capacità dei soggetti di rimanere più lontani dal loro limite di stabilità e, di conseguenza, diminuire il rischio di caduta. L'incremento della MV e della F95% usando il sistema di audio-biofeedback suggeriscono invece un aumento dell'attività di controllo posturale. I parametri FD e  $|90\text{-Mdir}|$  non sono invece stati influenzati significativamente dalla disponibilità dell'audio-biofeedback.

Questo aumento di controllo posturale indotto dal sistema di audio biofeedback e avente come risultato un miglioramento della stabilità è un risultato importante che ci ha spronato alla stesura di progetti di ricerca aventi come tema lo sviluppo di un dispositivo in grado di aiutare la riabilitazione motoria e il training sportivo basato sull'audio-biofeedback.

Inoltre è stata eseguita una analisi di coerenza fra il segnale di pedana, ovvero il movimento del COP, e il segnale accelerometrico. La coerenza si è mostrata prossima a 1 nell'intervallo compreso fra 0 e 1 Hz. Questo fatto ci permette di ipotizzare che un sistema di valutazione e misura dell'equilibrio e della postura basato su accelerometri possa dare informazioni simili a quelle normalmente ricavate con una pedana dinamometrica. Sviluppare un dispositivo di questo genere basato su accelerometri avrebbe numerosi vantaggi in termini di dimensioni e peso ridotti, portabilità e costi contenuti.

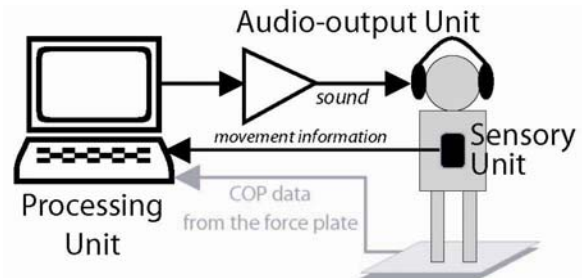


Fig 1. Schema generale del sistema di audio-biofeedback e protocollo sperimentale

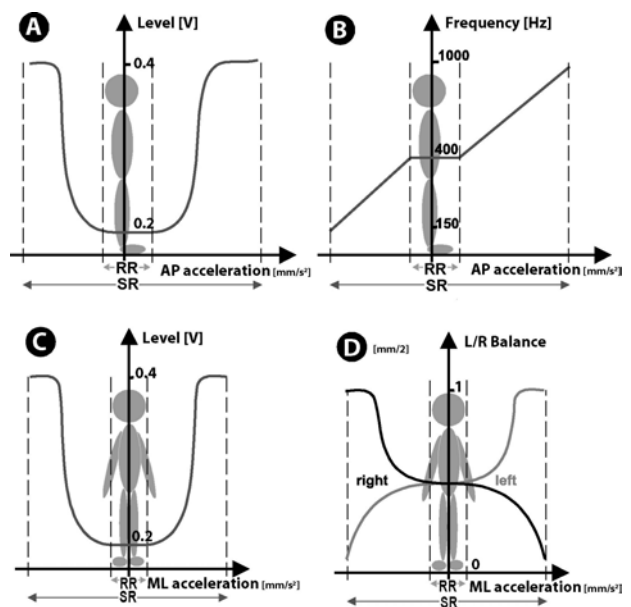


Fig 2. Funzioni che codificano le accelerazioni antero posteriore e medio laterale nel suono stereo di audio-biofeedback

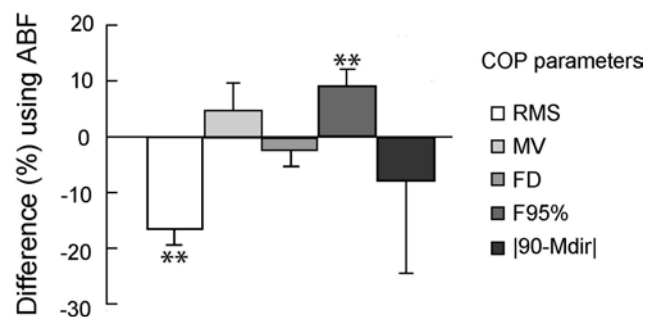


Fig 3. Effetto (in percentuale) dell'uso del sistema di biofeedback sui parametri ricavati dal movimento del COP. \*\* indica una significatività statistica con  $p < 0.01$

## Sperimentazione dell'audio-biofeedback: risultati su soggetti vestibolari

(In stampa col titolo "Audio-biofeedback improves balance in patients with bilateral vestibular loss" su Arch Physical Med Rehab.)

Metodologia:

Ci si è serviti delle stesse apparecchiature già descritte nella pagina precedente (Fig. 1).

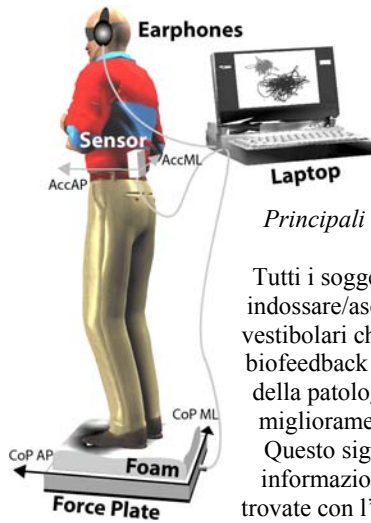
Nove soggetti con patologia vestibolare bilaterale e nove soggetti normali (Tab. 1) si sono sottoposti all'esperimento mantenendo una postura ortostatica eretta con occhi chiusi su 4' Temper<sup>TM</sup> foam. Un protocollo di massima è rappresentato in Fig. 4. Il sistema di audio biofeedback forniva una rappresentazione delle

|             | Control          | Vestibular       |
|-------------|------------------|------------------|
| Age [yrs]   | 55<br>(33-71)    | 55<br>(38-73)    |
| Height [cm] | 167<br>(151-180) | 171<br>(160-193) |
| Weight [Kg] | 73<br>(65-86)    | 71<br>(51-115)   |

Tab 1. Caratteristiche dei soggetti vestibolari e di controllo

accelerazioni del tronco rilevate all'altezza della quinta vertebra lombare.

L'analisi si è concentrata su alcuni parametri di pedana quali, root mean square distance (RMS), e frequenza comprendente il 95 % della potenza del segnale (F95%), nonché su parametri ricavati dal segnale accelerometrico. Un'analisi ANOVA è stata eseguita sui dati per individuare gli effetti semplici e combinati di ABF e di patologia vestibolare e le relative significatività statistiche sui parametri appena menzionati.



Principali risultati e discussione:

Tutti i soggetti hanno trovato il sistema di audio-biofeedback semplice da usare e confortevole da indossare/ascoltare. L'uso del sistema di audio-biofeedback ha avuto un effetto stabilizzante sia sui soggetti vestibolari che su quelli di controllo. I soggetti vestibolari sono riusciti ad avvantaggiarsi del sistema di biofeedback maggiormente di quelli di controllo. Inoltre è stata trovata una correlazione ( $r=0.6$ ) fra severità della patologia quantificata in funzione del guadagno del riflesso oculo vestibolare a 0.05 Hz e miglioramento della stabilità in termini di riduzione del parametro RMS e aumento del parametro F95%.

Questo significa che l'effetto stabilizzante del sistema di ABF è stato proporzionale alla limitazione di informazione vestibolare. La tabella 2 mostra i valori dei risultati ottenuti e le significatività statistiche trovate con l'analisi ANOVA. Dalla tabella si evince come i soggetti vestibolari bilaterali presentino una maggiore variabilità intersoggettiva e come la loro postura sia influenzata maggiormente dal sistema di ABF rispetto a quella dei soggetti normali. Si evince inoltre come il sistema di ABF influenzi i parametri ricavati in entrambi gli assi antero posteriore e medio laterale essenzialmente nello stesso modo.

Fig 4. Protocollo sperimentale

|                 | Means of the parameters extracted during quiet stance on foam |                                | Percentage changes in postural parameters with versus without ABF |                | Statistics, 2-way ANOVA |       |                       |
|-----------------|---|--------------------------------|---|----------------|-------------------------|-------|-----------------------|
|                 | CONTROL SUBJECTS  | BVL SUBJECTS                   | CONTROL SUBJECTS  | BVL SUBJECTS   | Significance (p)        |       |                       |
|                 | Mean (SD) [units of measure]                                  | Mean (SD) [units of measure]   | % change (SEM)  | % change (SEM) | Vestibular Pathology    | ABF   | 2 Factors Interaction |
| RMS             | 14.8 (3.9) [mm]   | 24.3 (8.7) [mm]                | -15.9 (3.4)   | -23.0 (4.9)    | 0.013                   | 0.000 | 0.000                 |
| RMS AP          | 11.9 (2.7) [mm]   | 18.8 (7.5) [mm]                | -15.4 (4.4)   | -22.2 (4.4)    | 0.015                   | 0.000 | 0.019                 |
| RMS ML          | 8.5 (3.4) [mm]  | 15.2 (4.8) [mm]                | -15.0 (2.9)   | -23.6 (6.1)    | 0.010                   | 0.000 | 0.000                 |
| F95             | 1.58 (0.18) [Hz]  | 2.28 (0.81) [Hz]               | 9.3 (3.4)   | 8.4 (5.6)      | 0.000                   | 0.060 | 0.830                 |
| RMS-Acc         | 65.2 (26) [mm/s <sup>2</sup> ]                                | 115 (81) [mm/s <sup>2</sup> ]  | -32.1 (10.3)  | -46.2 (5.7)    | 0.002                   | 0.000 | 0.005                 |
| RMS-Acc AP      | 54.6 (22) [mm/s <sup>2</sup> ]                                | 100 (52) [mm/s <sup>2</sup> ]  | -38.2 (10.9)  | -49.8 (5.0)    | 0.042                   | 0.000 | 0.002                 |
| RMS-Acc ML      | 32.9 (16) [mm/s <sup>2</sup> ]                                | 52.6 (16) [mm/s <sup>2</sup> ] | -29.8 (10.8)  | -35.5 (7.2)    | 0.060                   | 0.001 | 0.030                 |
| Mean-Acc        | 40.9 (14) [mm/s <sup>2</sup> ]                                | 69.9 (29) [mm/s <sup>2</sup> ] | -16.0 (5.9)   | -25.3 (7.5)    | 0.001                   | 0.053 | 0.387                 |
| Time-in-Thresh. | 3.18 (2.82) [s]   | 1.91 (1.23) [s]                | 653.2 (336.9)   | 195.3 (20.1)   | 0.076                   | 0.001 | 0.549                 |

Tab 2. Effetto dell'uso del biofeedback per soggetti vestibolari e di controllo su alcuni parametri derivati dall'andamento del COP e della accelerazione rilevata all'altezza della quinta lombare. In tabella sono mostrati: i valori medi dei parametri nelle prove senza audio-biofeedback, il cambiamento in percentuale dei parametri nelle prove con audio-biofeedback e, infine, i valori statistici ricavati dall'analisi di varianza. Per i parametri RMS e RMS-Acc sono stati riportati pure i valori sugli assi antero posteriore e medio laterale.

## Sviluppo di un nuovo sistema di visual-biofeedback per il controllo posturale



*Fig. 6 – Protocollo sperimentale per esperimenti con video-biofeedback*

approfondire lo studio di come la strategia di correzione posturale cambi a seconda che l'informazione resa disponibile dal sistema di biofeedback sia di tipo audio o video. Inoltre con questi sistemi sarà possibile capire se le frequenze di oscillazione a cui avvengono le correzioni posturali sono le stesse per entrambi i modi di somministrazione del biofeedback o se un canale sensoriale privilegia alcune frequenze, per esempio le basse, rispetto all'altro. Molto interessante sarà anche lo studio dei tempi di ritardo nelle correzioni indotti dalle due rappresentazioni del feedback. In pratica gli esperimenti con questo nuovo sistema di biofeedback mirano a un'indagine della modalità con cui il cervello si avvale di diverse informazioni posturali al fine di elaborare una unica strategia di attivazione muscolare piuttosto che allo sviluppo di un dispositivo da introdurre sul mercato. Di conseguenza l'uso di questo sistema pare più interessante per la ricerca di base che non per un fine di sviluppo e trasferimento tecnologico. Ecco perché gli esperimenti che si basano su questo sistema stanno avvenendo principalmente presso il Balance Disorders Laboratory della prof.ssa Fay Horak.

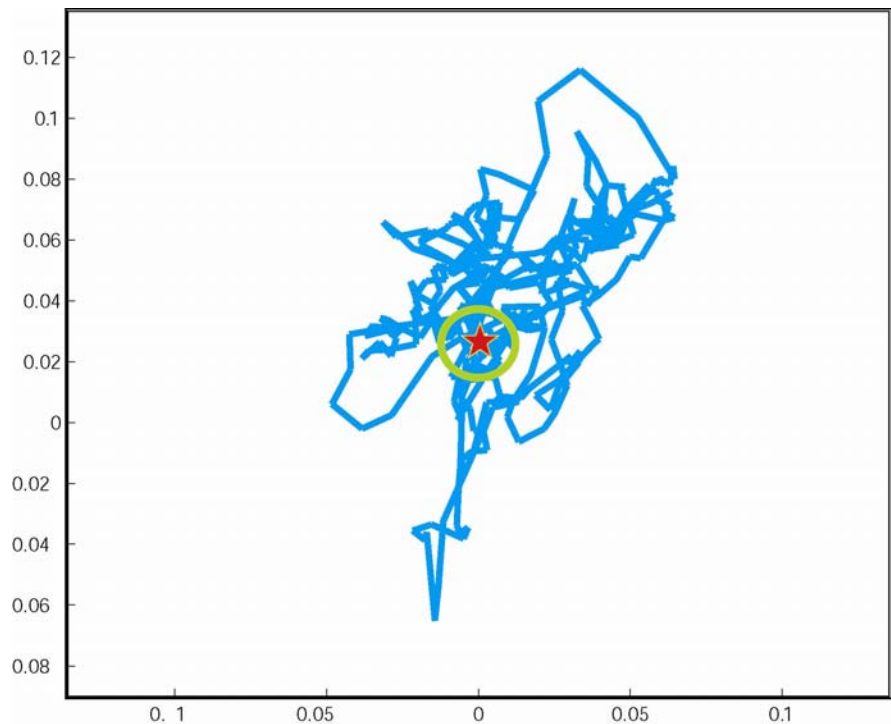
Durante la permanenza negli Stati Uniti è stato sviluppato un sistema di video-biofeedback per il controllo posturale. Il sistema è stato inizialmente creato per attività divulgative ed educative che sono state svolte a diverse manifestazioni scientifiche (si veda allegato).

Nonostante la prima implementazione non ne presupponesse l'impiego sperimentale, questo nuovo dispositivo si è rivelato davvero utile anche in laboratorio. Esperimenti sono tuttora in corso e mirano ad evidenziare le differenze fra la risposta dei soggetti al biofeedback di tipo audio e di tipo video.

Il sistema di video-biofeedback si basa sullo stesso hardware del sistema audio già implementato, con la sola aggiunta di un monitor (o sistema di proiezione). Il software di controllo e generazione del segnale video è stato scritto in Matlab © avvalendosi del Matlab Data Acquisition Toolbox.

Grazie a questo sistema il soggetto, che indossa il medesimo sensore già utilizzato per l'audio-biofeedback, vede la rappresentazione dei segnali accelerometrici acquisiti dal sensore su uno schermo (Fig. 6). In particolare, una stella di colore rosso indica la posizione del soggetto. La stella si muove lasciando una traccia blu sullo schermo. Un ovale verde viene inoltre rappresentato sullo schermo per dare un riferimento al soggetto che viene istruito a mantenere la stella all'interno dell'ovale (Fig. 7).

A parte l'aspetto educativo e ludico della cosa (alcune manifestazioni scientifiche nelle quali è stato presentato questo sistema erano orientate a bambini fra i 3 e i 12 anni) questo sistema ci sta permettendo di acquisire dati interessanti che rendono possibile il paragone fra il sistema di audio-biofeedback già descritto e questo nuovo sistema biofeedback di tipo video ma basato sullo stesso principio. Alcuni risultati preliminari dimostrano come, con il feedback di tipo video, si possano ottenere risultati simili a quelli già ottenuti con il feedback audio. Gli esperimenti in corso mirano a comprendere la natura delle differenze che si sono riscontrate finora nella risposta dei soggetti ai due sistemi. In particolare, risulta molto interessante



*Fig. 7 – Video-biofeedback screen*

## Sperimentazione dell'audio biofeedback: esperimenti pilota

### Uso di audio-biofeedback durante la camminata

Due soggetti hanno camminato lentamente (la frequenza dei passi è stata 0.5 Hz) per 40 secondi a occhi chiusi toccando, ad ogni passo, con il tallone del piede ancora in movimento, la punta del piede fermo. La prova è stata ripetuta con e senza il sistema di audio-biofeedback. Il software del sistema di biofeedback è stato modificato generalizzandolo in modo da essere in grado, con una sola implementazione, di fornire in modo automatico feedback sia per una postura ortostatica eretta che per questo tipo di camminata.

I risultati, figura 8, mostrano l'effetto dell'ABF sulla camminata in termini di diminuzione dell'oscillazione medio laterale. Poiché, seguendo Winter et al. 1996, l'oscillazione medio laterale è quella più critica da controllare durante il cammino, questo risultato pare ancora più interessante perché dimostra come, utilizzando il sistema di ABF, i soggetti siano in grado di aumentare il controllo dell'oscillazione medio laterale e ridurre l'entità.

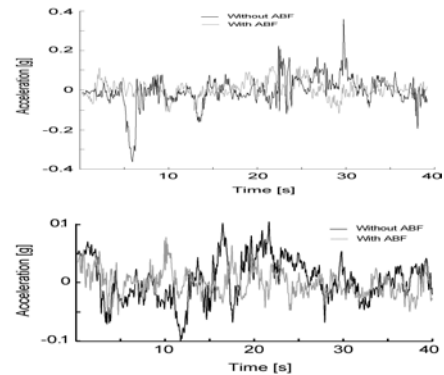


Fig. 8 – Accelerazioni laterali durante la camminata con e senza audio-biofeedback

### Analisi dell'effetto del sistema di audio-biofeedback sulle frequenze dell'oscillazione posturale

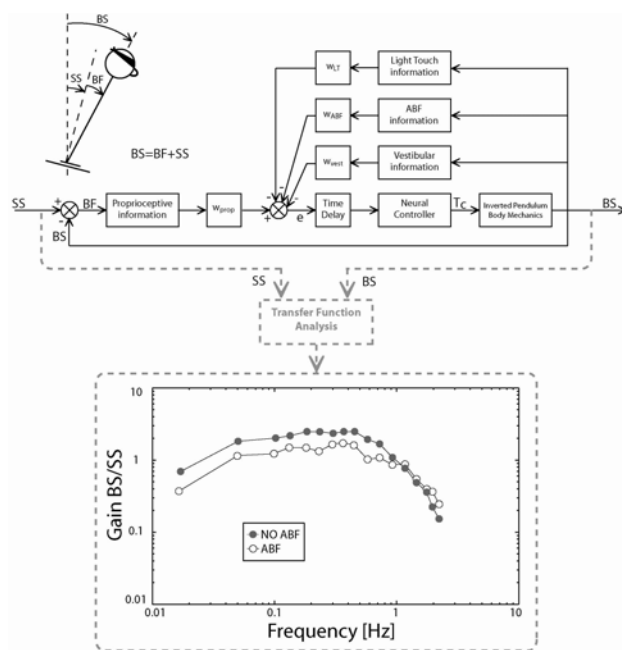


Fig. 9 – Effetto del sistema di audio-biofeedback sull'allineamento posturale del soggetto durante prove su piattaforma rotante.

pendenza del tronco rispetto al vettore gravità, attraverso una matrice di vibratori che viene applicata sul tronco del soggetto. 3 soggetti, due vestibolari unilaterali e uno bilaterale hanno cercato di mantenere il proprio equilibrio su una piattaforma rotante. La piattaforma è stata fatta ruotare a diverse velocità nelle due direzioni. I soggetti hanno fatto pratica con questo protocollo per due giorni fino a raggiungere una pratica ottima per queste rotazioni. A questo punto è stato ripetuto il protocollo rendendo disponibile ai soggetti il feedback tattile. L'effetto benefico del feedback riscontrato in soggetti che non avevano fatto pratica precedente col protocollo (simile a quello trovato col sistema audio-biofeedback da noi sviluppato) non è stato ritrovato su soggetti che avevano fatto pratica consistentemente col protocollo. In altre parole, dopo un periodo sufficientemente lungo di training su piattaforma rotante, i soggetti hanno migliorato il loro equilibrio al punto da rendere inutile l'uso del biofeedback che, prima del training, si era invece rivelato utile. I soggetti vestibolari unilaterali hanno mostrato una capacità di apprendimento molto maggiore di quella mostrata dal soggetto vestibolare bilaterale. La prossima ipotesi da testare è che l'uso dei sistemi di biofeedback possa accorciare il tempo di apprendimento di un generico compito motorio, quale la risposta alla perturbazione di pedana analizzata in questi esperimenti pilota.

Il laboratorio dell'Ing. Perterka presso l'OHSU di Portland (OR) permette di perturbare un soggetto, in piedi su una pedana rotante, con oscillazioni sinusoidali pseudorandom superimposte di varia frequenza (da 0.02 a 4 Hz). L'ampiezza di questo stimolo è regolabile. Il software messo a punto da Peterka permette poi di ricavare una funzione di trasferimento che rappresenta il comportamento del soggetto durante la prova su piattaforma rotante. Un guadagno unitario di questa funzione di trasferimento rappresenta un allineamento del soggetto alla superficie rotante mentre un guadagno minore di uno rappresenta un allineamento più vicino alla verticale terrestre e quindi più stabile e sicuro. Un soggetto sano ha eseguito due prove, una con audio-biofeedback e una senza, sulla piattaforma rotante di Peterka. I risultati mostrati in figura 9 mostrano come le correzioni posturali indotte dal sistema ABF abbiano un effetto a larga banda (da 0.02 Hz a 0.8 Hz) sulla riduzione delle oscillazioni posturali. Il modello mostrato in figura 9 è teso a descrivere il diverso allineamento del soggetto durante le prove in termini di re-weighting fra i diversi canali sensoriali. Al modello storicamente usato da Peterka è stato aggiunto un nuovo blocco rappresentante l'informazione ABF. Le analisi tese alla descrizione dei risultati nei termini usati da questo modello sono tuttora in corso.

### Effetto della pratica su più giorni con un sistema di biofeedback vibro-tattile

Il dott. Wall ha messo a punto un sistema biofeedback in grado di rappresentare un'informazione unidimensionale relativa alla



#### **Partecipazione a conferenze internazionali e nazionali:**

- 26th IEEE EMBS Annual International Conference 1-4 Settembre, 2004 - San Francisco (CA)
- XXVI American Society of Biomechanics, Annual Meeting, 8-11 Settembre, 2004 – Portland (OR)
- Conferenza della Società Italiana per l'Analisi del Movimento in Clinica (SIAMOC), 3-5 Ottobre 2004 - Loano (SV).

#### **Conferenze e seminari didattici:**

- *How to write scientific papers*, seminario tenuto dalla Prof.ssa Sandra Oster, 5 Maggio 2004, presso OGI Beaverton (OR)
- *Grant writing*, seminario tenuto dalla Prof.ssa Sandra Oster, 1 luglio 2004, presso OGI Beaverton (OR)
- XXIII Scuola Annuale di Bioingegneria, Bressanone, 20-23 settembre 2004
- *Analisi della postura e del cammino nell'emplegico*, Precorso della conferenza SIAMOC, 1 Ottobre 2004, Loano (SV)

#### **Attività educativa a esposizioni scientifiche nazionali e internazionali tenutesi negli Stati Uniti:**

- OMSI Brain Awareness 2004 – Marzo 12-19, 2004, Portland (OR)
- Brain Fair 2004 – Aprile 17, 2004, Pendleton (OR)
- Intel International Science and Engineering Fair ISEF 2004 – Maggio 9-15, 2004, Portland (OR)

#### **Collaborazione alla stesura di progetti orientati alla richiesta di fondi:**

- Collaborazione alla stesura del progetto STABIT, STABILITY Biofeedback Trainer, per la richiesta di fondi alla Comunità Europea. Oggetto: trasferimento tecnologico di sistemi a biofeedback per la riabilitazione motoria e il training sportivo.
- Collaborazione alla stesura del grant "Sensory Biofeedback for Balance Rehabilitation" per la richiesta di fondi al National Institutes of Health - NIH. Oggetto: sperimentazione del biofeedback posturale su soggetti neuropatici e vestibolari

#### **Pubblicazioni su atti di conferenze nazionali e internazionali:**

- **Dozza M.**, Cappello A., Horak F.B., Chiari L., "How Audio-biofeedback of Trunk Acceleration Affects Feed-forward and Feed-back Control of Posture", *Gait & Posture*, vol. 20(Suppl.2) pp. S123-124, 2004
- Horak F.B., **Dozza M.**, Peterka R., and Chiari L., "What do subjects learn from audio-biofeedback for postural verticality?", *Proc. Neural Control of Movement*, Barcelona, March 2004
- **Dozza M.**, Chiari L., Horak F.B., "A Portable Audio-biofeedback System to Improve Postural Control", *Proc. 26th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society*, San Francisco, September 1-5, 2004
- **Dozza M.**, Horak F.B., Chiari L., "Audio Biofeedback of trunk acceleration improves balance in subjects with bilateral vestibular loss", *Proc. 28th Annual Meeting of the American Society of Biomechanics*, Portland, September 8-11, 2004.  
<http://www.x-cd.com/biomech04/pdfs/368.pdf>
- Chiari L., **Dozza M.**, Cappello A., and Horak F.B., "Influence of audio feedback on structural properties of postural sway", *Proc. XVth Congress of the International Society of Electrophysiology & Kinesiology*, Boston, June 18-21, 2004, p.246.

#### **Pubblicazioni su riviste internazionali:**

- **Dozza M.**, Chiari L. and Horak F.B. Audio-biofeedback improves balance in patients with bilateral vestibular loss. *Arch Phys Med Rehab.* (In stampa).
- Chiari L., **Dozza M.**, Cappello A., Horak F.B., Macellari V., and Giansanti D. An accelerometry-based system for balance improvement using audio-biofeedback. *IEEE Trans of Biomed Eng.* (Accettato).
- **Dozza M.**, Horak F. and Chiari L. Auditory biofeedback substitutes for loss of sensory information. *Exp Brain Res.* (In preparazione).