

# PROGETTAZIONE E REALIZZAZIONE DI UN AUDITORY DISPLAY PER LA RIABILITAZIONE MOTORIA

**Alberto Boem**

Università degli Studi di Udine  
boem.alberto@gmail.com

**Sergio Canazza Targon**

Università degli Studi di Padova  
canaazza@dei.unipd.it

**Antonio Rodà**

Università degli Studi di Udine  
antonio.roda@uniud.it

## ABSTRACT

I sistemi di riabilitazione motoria tecnologicamente assistita integrano sempre più spesso dispositivi robotici con ambienti multimediali, al fine di migliorare l'efficacia della terapia grazie all'uso coordinato di più canali sensoriali. In questi sistemi, l'audio viene spesso utilizzato per aumentare il realismo all'interno di scenari 3-D di *virtual reality*, mentre ancora poco sfruttate sono le sue potenzialità in termini di *auditory display*. Questo lavoro presenta la progettazione e lo sviluppo in versione prototipale di un *auditory display* finalizzato alla riabilitazione tecnologicamente assistita di pazienti affetti da deficit motorio in seguito a danni di tipo neurologico. In particolare, l'*auditory display* è stato progettato per l'integrazione in un sistema robotico di assistenza della camminata e fornisce al paziente un segnale sonoro semplice e intuitivo, basato sui timbri vocalici della lingua italiana. Una prima valutazione dell'*auditory display* è stata effettuata sonorizzando alcune traiettorie misurate per mezzo del sistema di riabilitazione per arti inferiori ARTHuR.

## 1. INTRODUZIONE

Negli ultimi anni sono stati sperimentati sistemi di riabilitazione tecnologicamente assistita [1] basati sull'integrazione di dispositivi robotici con ambienti multimediali, al fine di migliorare l'efficacia della terapia motoria attraverso l'utilizzo coordinato di più canali sensoriali. All'interno di questi sistemi, l'audio viene per lo più impiegato per aumentare il realismo di scenari 3-D di *virtual reality*. Ancora poco sfruttate, invece, sono le potenzialità in termini di *auditory display* [2], ossia per fornire all'utente un feedback acustico che sia rappresentativo dello stato del sistema e di come questo varia in funzione delle proprie azioni. L'utilizzo del suono nei dispositivi orientati alla riabilitazione motoria tecnologicamente assistita può avere varie finalità ([3], [4]), tra cui:

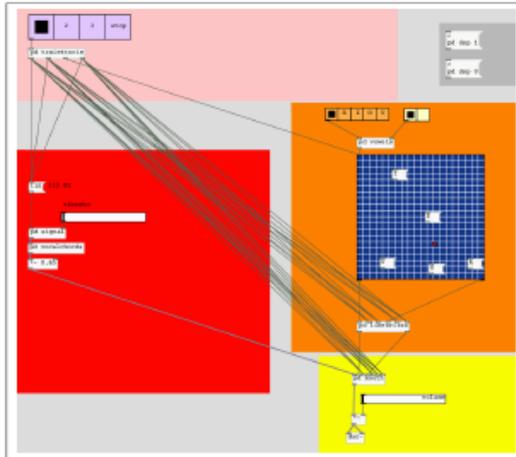
- permettere un maggior coinvolgimento del paziente nel processo riabilitativo;
- permettere al paziente una maggiore comprensione della qualità dei propri movimenti, correlandoli a eventi sonori opportunamente prodotti.

Copyright: ©2010 Alberto Boem et al. This is an open-access article distributed under the terms of the [Creative Commons Attribution License 3.0 Unported](http://creativecommons.org/licenses/by/3.0/), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original author and source are credited.

Grazie al feedback acustico, i pazienti possiedono un ausilio in più per svolgere i compiti e le azioni richieste e, al tempo stesso, i terapisti possono avere una migliore comprensione delle caratteristiche dei movimenti effettuati dal paziente. Inoltre, l'impiego di un feedback uditivo favorisce l'uso di questo dispositivo anche a soggetti ipovedenti e a pazienti che si trovano nella fase acuta successiva ad un evento traumatico oppure ad un ictus. In questo caso, infatti, i pazienti trovano spesso difficoltà a mantenere l'attenzione su uno schermo, mentre mantengono la capacità di percepire stimoli sonori.

In un recente studio, Avanzini et al. [4] hanno analizzato l'impiego del suono in numerosi dispositivi orientati alla riabilitazione motoria, da cui risulta che quasi mai il suono viene utilizzato come guida all'esecuzione di un compito di tipo motorio, preferendo impiegarlo per aumentare il realismo di scene di *virtual reality*. L'obiettivo del nostro progetto, invece, è la generazione di un segnale sonoro che evidenzia gli eventuali errori, anche minimi, compiuti dal paziente durante l'esecuzione dei compiti richiesti dalla terapia. Questo viene effettuato attraverso il continuo confronto tra la traiettoria corretta (prodotta dal dispositivo robotico che, agganciato al piede, mostra al paziente il movimento esatto) con quella prodotta in tempo reale dal paziente durante gli esercizi di riabilitazione (agganciato al robot, ma in maniera passiva) tramite la sintesi in tempo reale delle vocali. Il suono può quindi divenire utile al paziente che, in seguito al trauma, perde o diminuisce la propria capacità propriocettiva: attraverso la produzione di sequenze sonore egli può "ascoltare" il proprio movimento, che viene rappresentato attraverso un passaggio graduale tra timbri vocalici. La traduzione del movimento in suono, inoltre, permette di sviluppare una componente ludica nel processo di riabilitazione (quasi come imparare a suonare uno strumento musicale), aspetto non trascurabile data la costanza e la fatica richiesta nelle lunghe sessioni di riabilitazione. La scelta di usare timbri vocalici è dovuta alla riconosciuta capacità dell'orecchio umano di riconoscere ed identificare questi timbri [5], che sono alla base del linguaggio parlato. Diversi studi [6], inoltre, hanno sottolineato come la capacità del sistema umano di riconoscere ed identificare questa tipologia di suoni può essere d'aiuto per la rappresentazione di tipi complessi di dati.

Per valutare il funzionamento dell'*auditory display*, abbiamo utilizzato i risultati di un test condotto sul robot orientato alla riabilitazione della camminata denominato ARTHuR (Ambulation-Assisting Robotic Tool for Human Rehabilitation), una cui descrizione è esposta in Emken et



**Figure 1.** Screenshot della patch principale, sviluppata in Pure Data.

al. [7]. Oltre alla descrizione del robot, questo articolo riporta le variazioni nei pattern di movimento di un gruppo test di pazienti in seguito ad una fase di terapia motoria effettuata con l'ausilio di ARTHuR.

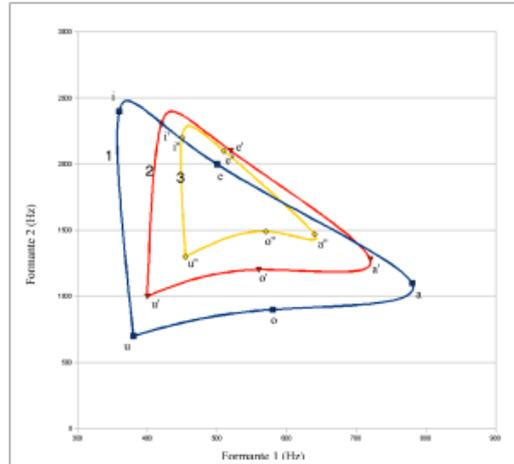
## 2. AUDITORY DISPLAY PER LA RIABILITAZIONE MOTORIA

L'*auditory display* consiste in un'applicazione software che permette la traduzione dei movimenti del piede - effettuati da un soggetto sottoposto ad un processo di riabilitazione della camminata con l'ausilio di un dispositivo robotico - in un segnale sonoro, sintetizzato in tempo reale, che associa timbri vocalici al movimento. Il prototipo è stato implementato in ambiente Pure Data, per la sua versatilità e portabilità. La Figure 1 mostra la schermata principale della patch che implementa l'*auditory display*.

Oltre alla patch principale, il sistema comprende alcune subpatch e sezioni relative ai differenti processi di analisi del movimento e di sintesi del suono. La patch riceve in ingresso le coordinate  $x$  e  $y$  che rappresentano la posizione del piede nel tempo. Questi valori vengono opportunamente scalati e mappati all'interno dello spazio delle vocali i cui assi corrispondono al primo (F1) e al secondo (F2) formante spettrale.

Per la generazione del suono in tempo reale è stata scelta una sintesi per formanti [8]. Questo metodo, infatti, permette di generare, con continuità, anche i timbri di transizione tra una vocale e l'altra. Inoltre, ha un costo computazionale ridotto, che consente la sonificazione in tempo reale. Un treno di impulsi è stato utilizzato come sorgente, successivamente elaborata attraverso una serie di filtri risonanti (come minimo due) in parallelo, con caratteristiche tali da simulare i formanti vocalici.

Come si può vedere in Figure 1, l'asse  $x$  è stato dimensionato in modo da variare tra 250 e 750Hz, l'asse  $y$  tra 800 e 2300Hz. Questi valori rispecchiano il range di valori



**Figure 2.** Le tre traiettorie utilizzate per testare il sistema mappate nello spazio delle vocali.

corrispondenti alla posizione dei primi due formanti delle vocali italiane. I due filtri formantici sono definiti tramite i parametri caratteristici: frequenza centrale, guadagno e larghezza di banda. In questa prima versione del sistema, il guadagno e la larghezza di banda dei filtri vengono fissati in fase di inizializzazione, e solo il parametro frequenza centrale viene modificato in tempo reale tramite i valori di ingresso. I valori di inizializzazione sono stati scelti seguendo le linee guida per la sintesi per formanti che possiamo trovare in [6, 8].

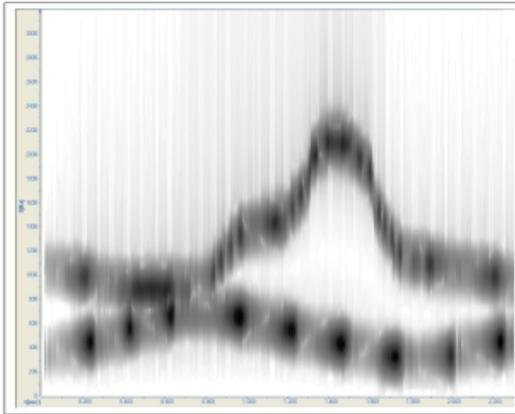
## 3. RISULTATI

Per verificare se l'*auditory display* è in grado di rendere percepibili, nel dominio sonoro, le differenti caratteristiche delle traiettorie motorie, sono state prese in esame tre traiettorie registrate nel corso di una sessione di riabilitazione motoria dal robot ARTHuR. La Figure 2 mostra le tre traiettorie mappate nello spazio delle vocali. La traiettoria di colore blu (1) è la traiettoria *target*, ottenuta mediante l'intervento dell'operatore; le traiettorie di colore arancio (2) e giallo (3) sono due traiettorie errate, prodotte dal paziente nel cercare di riprodurre la traiettoria *target*.

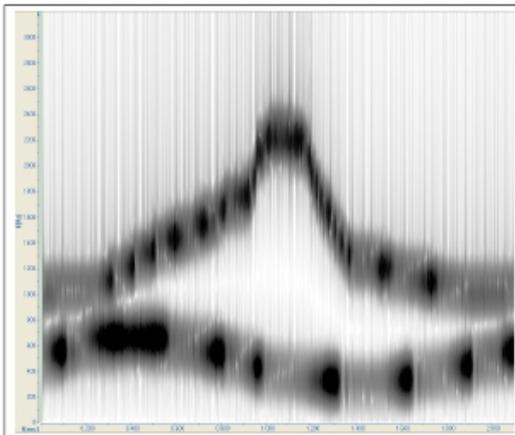
Le Figure 3, Figure 4 e Figure 5 mostrano i sonogrammi del segnale audio generato a partire da quelle traiettorie. Si può notare il passaggio tra le diverse formanti vocaliche. In particolare, rispetto al suono prodotto dalla traiettoria 3 (Figure 5), quello relativo alla traiettoria 2 (Figure 4) è più simile a quello relativo alla traiettoria *target* (Figure 3), essendo minore l'errore motorio commesso dal paziente.

## 4. CONCLUSIONI E LAVORI FUTURI

Questo studio ha presentato una proposta di feedback uditivo integrato ai sistemi robotici di riabilitazione motoria. Si tratta di uno studio preliminare alla realizzazione di un più complesso *auditory display*, che andrà sperimentato col-



**Figure 3.** Sonogramma corrispondente alla sonificazione della traiettoria *target*

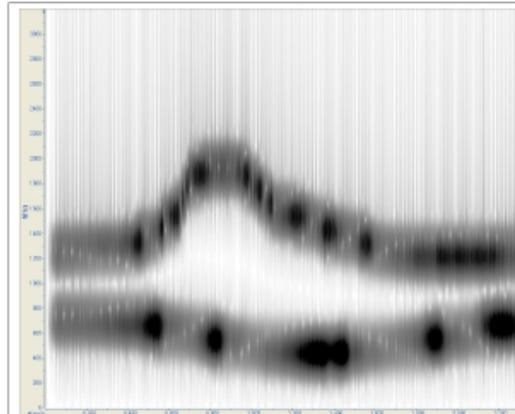


**Figure 4.** Sonogramma corrispondente alla sonificazione della traiettoria 2.

gandolo con un robot reale e valutandone l'effetto su alcuni casi clinici. Verranno inoltre sperimentate sia l'impiego di tecniche di mapping che prendono in considerazione parametri cinematici come velocità e accelerazione, che un modello di sintesi dei suoni vocalici più completo.

## 5. REFERENCES

- [1] H. I. Krebs and N. Hogan, "Therapeutic robotics: A technology push," in *Proceedings of the IEEE*, 94 (9), pp. 1727–1738, 2006.
- [2] G. Kramer, *Auditory Display : Sonification, Audification, and Auditory Interfaces*. Addison Wesley, 1994.
- [3] W. Harwin, J. Patton, and V. R. Edgerton, "Challenges and opportunities for robot-mediated neuro-



**Figure 5.** Sonogramma corrispondente alla sonificazione della traiettoria 3.

rehabilitation," in *Proceedings of the IEE*, 94 (9), pp. 1717–1726, 2008.

- [4] F. Avanzini, A. D. Götzcn, A. Spagnol, and A. Rodà, "Integrating auditory feedback in motor rehabilitation system," in *Proceedings of International Conference on Multimodal Interfaces for Skills Transfer (SKILLS09), Bilbao*, pp. 1717–1726, 2009.
- [5] R. J. Cassidy, J. Berger, K. Lcc, M. Maggioni, and R. R. Coifman, "Auditory display of hyperspectral colon tissue image using vocal synthesis model," in *Proceedings of 10th International Conference on Auditory Display, Sydney*, pp. 1717–1726, 2004.
- [6] M. Kleiman-Weiner and J. Berger, "The sound of one arm swinging: A model for multidimensional auditory display of physical motion," in *Proceedings of the 12th International Conference on Auditory Display, London, Uk*, pp. 278–280, 2006.
- [7] J. L. Emken, S. J. Harkema, J. A. Beres-Jones, C. K. Ferreira, and D. J. Reinkensmeyer, "Feasibility of manual teach-and-replay and continuous impedance shaping for robotic locomotor training follow spinal cord injury," in *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, 55 (1), pp. 322–334, 2008.
- [8] C. Roads, *The Computer Music Tutorial*. Cambridge, MA: The MIT Press, 1996.