

Fabrizio Sors, Tiziano Agostini, Walter Gerbino

Suono e prestazione motoria nella riabilitazione e nello sport

(doi: 10.1421/83640)

Giornale italiano di psicologia (ISSN 0390-5349)

Fascicolo 1-2, marzo-maggio 2016

Copyright © by Società editrice il Mulino, Bologna. Tutti i diritti sono riservati.

Per altre informazioni si veda <https://www.rivisteweb.it>

Licenza d'uso

L'articolo è messo a disposizione dell'utente in licenza per uso esclusivamente privato e personale, senza scopo di lucro e senza fini direttamente o indirettamente commerciali. Salvo quanto espressamente previsto dalla licenza d'uso Rivisteweb, è fatto divieto di riprodurre, trasmettere, distribuire o altrimenti utilizzare l'articolo, per qualsiasi scopo o fine. Tutti i diritti sono riservati.

SUONO E PRESTAZIONE MOTORIA NELLA RIABILITAZIONE E NELLO SPORT

FABRIZIO SORS, TIZIANO AGOSTINI E WALTER GERBINO

Università di Trieste

Riassunto. Un crescente corpo di ricerche riguarda l'influenza degli stimoli acustici sull'azione motoria. La presente rassegna richiama la rilevanza per gli ambiti riabilitativo e sportivo di due prospettive teoriche, quella relativa al sistema dei neuroni specchio e quella relativa alla *Theory of Event Coding*; descrive poi gli studi di laboratorio che hanno evidenziato l'efficacia degli stimoli acustici nel miglioramento della prestazione in semplici compiti motori, nonché le ricerche applicative sull'efficacia degli interventi ritmico-acustici nella facilitazione della camminata e nel miglioramento di varie prestazioni sportive. Nelle conclusioni vengono indicati alcuni potenziali sviluppi della ricerca sugli effetti del suono in ambito riabilitativo e sportivo.

1. INTRODUZIONE

Il forte legame naturale tra suono e movimento del corpo è avvalorato da evidenze derivabili sia dall'osservazione quotidiana sia dall'analisi scientifica, in particolare quella riferita alle prestazioni di alto livello in ambito sportivo e artistico (prima fra tutte, l'esecuzione musicale). Il principale fondamento di tale legame è di tipo ecologico: nell'ambiente terrestre, il corpo in movimento produce eventi acustici che concorrono alla chiusura di uno specifico circuito sensomotorio (*sensorimotor loop*), quello in cui la locomozione, la respirazione e altre azioni corporee producono suoni ritmici la cui registrazione sensoriale ne sostiene e regolarizza la programmazione e l'esecuzione (Hunt, McGrath e Stergiou, 2014; Larsson, 2014; Santoro *et al.*, 2015).

Al fondamento ecologico del legame tra suono e azione motoria fanno riferimento varie ipotesi e fonti di evidenza: l'idea, già formulata da C. Lloyd Morgan (1893), che lo sviluppo della musica sia ricollegabile alla specializzazione umana (non presente in altri primati) del circuito uditivo-motorio connesso alla locomozione (Trainor, 2015); la dimostrazione che la percezione uditiva coinvolge l'attivazione delle aree motorie del cervello (Chen, Penhune e Zatorre, 2008); l'osservazione che la sordità compromette lo sviluppo della lallazione (Oller e Eilers, 1988). Percezione uditiva e produzione motoria sono strettamente legate nell'abilità, presente nella specie umana

e in poche altre, a «tenere il tempo», dando luogo alla prestazione definita «sincronizzazione sensomotoria» (Repp, 2005; Repp e Su, 2013) o «trascinamento ritmico» (*rhythmic entrainment*; Hickok, Farahbod e Saberi, 2015; Merker, Madison e Eckerdal, 2009; Schachner, 2013; Thaut, McIntosh e Hoemberg, 2015); come anche nell'ipotesi che la percezione della musica sia mediata dalla simulazione di azioni motorie (Patel e Iversen, 2014).

In tale contesto, la presente rassegna riguarda gli effetti di ottimizzazione della prestazione motoria prodotti da stimoli acustici (in particolare, da sequenze ritmiche presentate in modalità uditiva). La rassegna include: la definizione dei concetti rilevanti; alcune prospettive teoriche; la descrizione delle ricerche che hanno evidenziato l'efficacia delle informazioni acustiche nel migliorare l'esecuzione di semplici compiti motori; la discussione della superiorità dei modelli uditivi sui modelli visivi; l'analisi degli effetti positivi derivanti da interventi basati su stimoli acustici in ambito riabilitativo e sportivo; l'indicazione dei potenziali sviluppi di tale ambito di ricerca.

2. DEFINIZIONI

Nell'apprendimento, affinamento e riabilitazione di un particolare schema di azione motoria vanno tenuti in considerazione almeno due concetti fondamentali: il feedback aumentato e il modellamento (Magill, 2010).

Il feedback aumentato è definibile come un segnale amplificato, relativo a un effetto dell'azione motoria, che si aggiunge a quello intrinseco, consistente nell'input sensoriale normalmente associato all'azione (per esempio, sentire il rumore prodotto dal proprio passo). In modo più specifico, Sigrist, Rauter, Rieger e Wolf (2013) definiscono il feedback aumentato come l'informazione proveniente da una fonte esterna, cioè da un allenatore o da appositi dispositivi. Tali dispositivi consentono la presentazione di stimoli in modalità visiva, mediante schermi o proiettori, o in modalità uditiva, mediante cuffie o casse (Schmidt e Wrisberg, 2008; Utley e Astill, 2008). Il feedback aumentato può fornire informazioni o sullo stato attuale della prestazione motoria (cioè su cosa si sta facendo) oppure sulle discrepanze tra lo stato attuale e quello desiderato (cioè su cosa manca per raggiungere tale stato).

Il modellamento è definibile come una forma di dimostrazione, ossia un modo per fornire istruzioni analogiche sull'esecuzione di determinate azioni. Più nello specifico, VandenBos (2007) definisce il modellamento come un processo generale in cui le persone servono da modello per gli altri, esibendo il comportamento da imitare. Tale con-

retto è estendibile ai casi in cui la persona che funge da modello e, in un secondo momento, da osservatore sia la stessa: a questo proposito, Dowrick (1999) definisce l'automodellamento come una procedura di intervento basata sull'osservazione di se stessi mediante filmati, mentre si è impegnati in un comportamento adattivo. Come il feedback aumentato, anche il modellamento non si limita alla modalità visiva: vedremo che molto efficaci sono i modelli uditivi, consistenti in sequenze di suoni in grado di rappresentare vari aspetti di un determinato movimento (la forza espressa, la durata, la scansione temporale) fornendo informazioni sulla sua esecuzione (Sors, Gerbino e Agostini, 2014).

In prima approssimazione, la distinzione tra feedback aumentato e modellamento corrisponde alla distinzione tra due diverse fasi in cui l'informazione sensoriale viene utilizzata per controllare o modificare il movimento. Nel feedback aumentato l'utilizzo dell'informazione sensoriale è un processo *online*, cioè concomitante con l'esecuzione del movimento; nel modellamento l'utilizzo dell'informazione sensoriale è un processo *offline*, in cui la programmazione ed esecuzione del movimento sono successive all'acquisizione e analisi dell'informazione sensoriale. Tuttavia, l'utilizzo del feedback aumentato può coinvolgere anche processi *offline*, consistenti nel modellamento dell'azione da eseguire nel ciclo successivo (Khan *et al.*, 2006).

I suoni utilizzati come stimoli saranno descritti nel dettaglio in riferimento agli studi specifici. È comunque utile distinguere tra stimoli sintetici e stimoli ecologici. I primi sono generati artificialmente e consistono in sequenze di suoni semplici o complessi, di cui vengono controllate l'altezza e l'intensità. Gli stimoli ecologici, invece, consistono nella registrazione (e nell'eventuale manipolazione) dei suoni naturalmente prodotti dall'esecuzione di un determinato gesto/movimento.

Nella presente rassegna utilizzeremo l'espressione «interventi ritmico-acustici» in riferimento sia al feedback aumentato sia al modellamento, per indicare l'utilizzo pianificato di stimoli acustici finalizzati al miglioramento dell'esecuzione di uno specifico movimento. Gli interventi ritmico-acustici possono consistere nell'aggiunta di informazione sensoriale all'interno di un'unica sessione, con effetti immediati, oppure in sessioni multiple distribuite su un periodo prolungato di tempo, con effetti immediati e a lungo termine.

3. L'EFFICACIA DEGLI INTERVENTI RITMICO-ACUSTICI: FONDAMENTI EMPIRICI E PROSPETTIVE TEORICHE

Premesso che la presente rassegna ha per oggetto gli studi sugli interventi ritmico-acustici in ambito riabilitativo e sportivo, appare utile illustrarne i fondamenti empirici e le prospettive teoriche più rilevanti.

Un fondamento empirico molto generale è costituito dalle ricerche sulla stretta connessione tra i meccanismi sottostanti, rispettivamente, la percezione acustica e la produzione motoria (Bengtsson *et al.*, 2009; Fujioka, Trainor, Large e Ross, 2012; Grahn e Brett, 2007; Schubotz, Friederici e von Cramon, 2000, Van Vugt, 2103). Tra queste, di particolare rilevanza è quella di Chen, Penhune e Zatorre (2008): nel primo esperimento i partecipanti dovevano ascoltare delle sequenze ritmiche sapendo di doverle poi riprodurre tamburellando su una superficie con un dito o con una mano; nel secondo esperimento un diverso gruppo di partecipanti ascoltava le stesse sequenze ritmiche del primo esperimento, senza però sapere di doverle poi riprodurre. Gli autori hanno utilizzato la risonanza magnetica funzionale (*functional Magnetic Resonance Imaging*, fMRI) per confrontare l'attività cerebrale a riposo con quella derivante dall'essere impegnati nei compiti sopra descritti. In entrambi gli esperimenti si assisteva, in fase di ascolto, a un significativo incremento dell'attivazione non solo nelle aree deputate alla percezione ma anche nell'area supplementare motoria, nella corteccia premotoria mediale e nel cervelletto. In sostanza, l'ascolto di sequenze ritmiche attiva anche le aree motorie del cervello, indipendentemente dalla consapevolezza di dover poi eseguire un compito relativo a tali sequenze.

Altri studi hanno messo in evidenza che le aree motorie vengono attivate non soltanto dalle sequenze ritmiche, ma anche da stimoli acustici più complessi, come quelli derivanti dalla sonificazione del movimento. Tale tecnica consiste nell'applicazione alla prestazione motoria dei principi generali della sonificazione (Hermann, Hunt e Neuhoff, 2011), mediante conversione di alcuni parametri fisici del movimento del corpo ritenuti rilevanti (per esempio forza, velocità, accelerazione) in parametri di un suono sintetico, in modo da veicolare informazioni significative sull'evento di interesse (Dubus e Bresin, 2013; Effenberg, 1996, 2005). Schmitz *et al.* (2013) hanno applicato tale tecnica al nuoto, sonificando alcuni parametri cinematici del modello tridimensionale di un nuotatore. I partecipanti venivano esposti a filmati nei quali il suono combaciava con il movimento osservato (condizione congruente) oppure no (condizione incongruente). I risultati della fMRI hanno evidenziato una maggiore attivazione di aree premotorie e motorie nella condizione congruente rispetto alla condizione incongruente. L'effetto in questione non si ottiene soltanto con suoni sintetici, ma anche con quelli ecologici. A questo proposito, Pizzamiglio *et al.* (2005) hanno osservato che i suoni prodotti durante l'esecuzione di gesti attivano aree premotorie e motorie, mentre ciò non accade per suoni di altra natura, come il rumore e diversi suoni ambientali.

Tali risultati sono confermati da varie ricerche (Aziz-Zadeh, Iacoboni, Zaidel, Wilson e Mazziotta, 2004; Gazzola, Aziz-Zadeh e

Keysers, 2006), una delle quali merita particolare attenzione in quanto i suoni utilizzati derivano dalla pratica sportiva. La ricerca in questione è quella di Woods, Hernandez, Wagner e Beilock (2014), nella quale è stata utilizzata la fMRI per monitorare l'attività cerebrale di atleti esperti e inesperti in risposta a suoni che potevano essere familiari o non familiari e, al contempo, relativi o meno allo sport. I partecipanti giocavano a basket o a tennis nella squadra universitaria (esperti) oppure a livello ricreativo. I suoni relativi allo sport erano cinque varianti di un pallone da basket che rimbalzava e cinque varianti di una pallina da tennis colpita da una racchetta; i suoni non relativi allo sport consistevano in suoni comuni come lo stropiccio della carta e lo sciacquone. La familiarità dei suoni relativi allo sport dipendeva dalla pratica dai partecipanti, mentre quella dei suoni non relativi allo sport si basava sulla loro identificabilità. I risultati non solo hanno confermato l'attivazione di aree premotorie e motorie, ma hanno anche evidenziato un effetto dell'esperienza: nell'ascolto dei suoni relativi allo sport familiare, infatti, gli atleti esperti hanno fatto registrare un'attivazione maggiore rispetto a quelli non esperti.

Il legame tra percezione acustica e produzione motoria è stato confermato anche da Pazzaglia, Pizzamiglio, Pes e Aglioti (2008), i quali hanno osservato che i pazienti affetti da aprassia hanno difficoltà a riconoscere i suoni derivanti da determinati gesti. In particolare, i pazienti affetti da aprassia degli arti mostravano difficoltà nel riconoscere suoni derivanti da gesti eseguiti con braccia/mani e gambe/piedi, mentre quelli affetti da aprassia bucco-facciale mostravano difficoltà nel riconoscere suoni derivanti da gesti eseguiti con la bocca. Tali difficoltà erano riflesse anche nei diversi profili di attivazione cerebrale osservati nei due tipi di pazienti in risposta agli stimoli acustici. Di particolare interesse l'ipotesi che l'accoppiamento percezione-azione svolga anche una funzione inter-individuale, contribuendo a facilitare l'esecuzione coordinata di complesse sequenze motorie da parte di più agenti (Novembre e Keller, 2014).

Una prima interpretazione delle evidenze qui descritte rimanda al sistema dei neuroni specchio. Inizialmente l'attivazione di tali neuroni era stata osservata in rapporto all'esecuzione di azioni e all'esposizione a eventi visivi (Buccino *et al.*, 2004; Rizzolatti, Fadiga, Gallese e Fogatti, 1996). In seguito si è scoperto che essi sono sensibili anche a stimoli acustici; il sistema dei neuroni specchio, infatti, si attiverebbe non soltanto quando un'azione è eseguita oppure è vista, ma anche quando vengono presentati i suoni da essa derivanti (Keysers *et al.*, 2003; Kohler *et al.*, 2002; Lahav, Saltzman e Schlaug, 2007).

Un'altra interpretazione rimanda alla *Theory of Event Coding* (Hommel, Müsseler, Aschersleben e Prinz, 2001; Prinz, 1990; Zmigrod e Hommel, 2009), la quale postula che percezione e azione con-

dividano un sistema di rappresentazione comune. Secondo tale teoria, la corrispondenza tra l'esperienza percettiva e quella motoria è l'elemento chiave che determina gli effetti dei processi percettivi su quelli motori e viceversa. La percezione degli effetti di una determinata azione, infatti, ne evocherebbe la rappresentazione, che dovrebbe essere rafforzata dall'esperienza motoria precedente relativa all'azione stessa. L'attivazione sinergica delle rappresentazioni derivanti dai sistemi sensoriali e dall'esperienza motoria determinerebbe una maggiore probabilità che gli individui eseguano un'azione con caratteristiche simili a quelle percepite nello stimolo derivante dall'azione stessa. Stimoli non derivanti da una determinata azione, invece, non troverebbero corrispondenza con l'esperienza motoria e, di conseguenza, avrebbero minore influenza sull'esecuzione dell'azione.

Per un approfondimento delle prospettive teoriche qui richiamate si rinvia al dibattito sul sistema dei neuroni specchio (Caramazza, Anzellotti, Strnad e Lingnau, 2014; Lingnau, Gesierich e Caramazza, 2009; Hickok, 2009) e sulla *Theory of Event Coding* (Hommel, 2015a, 2015b).

4. RITMO ACUSTICO E MOVIMENTI SEMPLICI

L'efficacia del ritmo acustico nel promuovere l'acquisizione e la corretta riproduzione di semplici sequenze di movimenti è ben dimostrata in letteratura, in riferimento alla sincronizzazione sensomotoria coinvolta nel classico compito in cui il partecipante deve battere con un effettore (ad esempio un dito) in modo da tenere il tempo scandito da un evento sonoro ciclico. Repp (2005) concludeva la propria rassegna individuando due processi, uno automatico e uno controllato, responsabili degli errori di sincronizzazione sensomotoria.

Tanto nella produzione quanto nella percezione un aspetto fondamentale è il *timing*, cioè la distribuzione temporale degli eventi. L'ipotesi che il *timing* motorio e quello percettivo condividano gli stessi meccanismi venne corroborata da Keele, Pokorny, Corcos e Ivry (1985). Il *timing* motorio veniva misurato chiedendo al partecipante di battere su un pulsante sincronizzando il proprio ritmo di battuta con una sequenza regolare di suoni e di continuare a battere il pulsante con lo stesso ritmo quando, dopo un tempo definito, la sequenza di suoni si interrompeva: la misura di interesse era la deviazione standard degli intervalli tra battute successive dopo l'interruzione della sequenza acustica. Il *timing* percettivo veniva invece misurato chiedendo al partecipante di giudicare se un intervallo tra due toni successivi era più lungo o più corto rispetto a un intervallo di riferimento ascoltato un secondo prima: la misura di interesse era

la differenza tra le soglie inferiori e superiori ottenute mediante una serie di tali giudizi. I risultati misero in evidenza che le due misure erano significativamente correlate, in accordo con l'esistenza di meccanismi comuni al *timing* motorio e percettivo.

Un'importante distinzione è quella fra *timing* assoluto e *timing* relativo (Lai, Shea e Little, 2000). Il *timing* assoluto riguarda la durata complessiva dell'evento percepito o prodotto; il *timing* relativo riguarda i rapporti tra le durate dei singoli segmenti dell'evento, indipendentemente dalla durata assoluta. Shea, Wulf, Park e Gaunt (2001) hanno isolato gli effetti dei modelli uditivi sul *timing* assoluto e su quello relativo. I soggetti erano assegnati casualmente a una delle due condizioni di acquisizione: con/senza modello uditivo. Un'altra variabile manipolata dagli autori riguardava la possibilità di cimentarsi attivamente nel compito ritmico o meno: nella fase di acquisizione (con/senza modello uditivo) i partecipanti venivano accoppiati in modo che un partecipante facesse concretamente pratica con il compito, mentre l'altro potesse soltanto osservare il compagno. Dopo 24 ore (periodo di ritenzione) tutti i partecipanti eseguivano il compito ritmico. I partecipanti esposti al modello uditivo in fase di acquisizione, indipendentemente dalla pratica con il compito, mostravano un *timing* relativo più accurato rispetto a quelli della condizione senza modello; il *timing* assoluto era più accurato nei partecipanti che si erano attivamente cimentati nel compito in fase di acquisizione, con un ulteriore vantaggio in quelli esposti al modello uditivo.

Un recente lavoro di van Vugt e Tillmann (2015), riguardante l'apprendimento motorio del *timing* in un compito di digitazione sequenziale, dimostra la superiorità del feedback uditivo temporalmente preciso rispetto a due altre condizioni: con feedback uditivo ritardato di 10-190 ms e senza feedback uditivo. Il vantaggio nell'apprendimento si manteneva anche nella seconda sessione di prove (senza feedback), svolta il giorno successivo.

Gli studi descritti, quindi, da un lato evidenziano come il *timing* motorio e quello percettivo condividano meccanismi comuni, dall'altro illustrano come tali meccanismi possano essere positivamente influenzati dai modelli uditivi.

5. MODELLI UDITIVI VS. MODELLI VISIVI

L'acquisizione e la riproduzione delle azioni motorie non vengono facilitate soltanto dai modelli uditivi. Alcune ricerche hanno dimostrato l'efficacia anche dei modelli visivi, rispetto a parametri del movimento sia temporali sia spaziali (Murgia, Forzini e Agostini, 2014; Ste-Marie *et al.*, 2012). Altre ricerche hanno cercato di valutare di

rettamente l'efficacia relativa dei modelli uditivi e visivi. Doody, Bird e Ross (1985) chiedevano ai partecipanti di far cadere delle barrette di legno poste su un tavolo, seguendo un ordine prestabilito ed entro un tempo definito, compito che produce un *pattern* acustico ben riconoscibile. Prima di eseguire il compito i partecipanti potevano essere esposti a un modello uditivo, visivo, audiovisivo oppure a nessun modello. In quest'ultima condizione di controllo i partecipanti completavano una sessione di pratica contenente solo 10 ripetizioni del compito richiesto. L'acquisizione della corretta sequenza motoria era migliore nei partecipanti esposti al modello uditivo, indipendentemente dalla presenza/assenza di quello visivo. McCullagh e Little (1989), oltre a confermare la superiorità dei modelli uditivo e audiovisivo su quello visivo, misero in evidenza il ruolo cruciale della conoscenza dei risultati (*knowledge of results*), ossia il fatto di venir informati verbalmente sulla correttezza o meno della propria prestazione.

Particolarmente importante è il lavoro di Glenberg e Jona (1991). Nel primo esperimento ogni prova consisteva nel riprodurre una sequenza di 9 stimoli, brevi (200 ms) e lunghi (600 ms), digitando una stringa di S (*short*) e L (*long*); tali sequenze erano costituite da stimoli di tipo acustico oppure visivo. Quando l'intervallo interstimolo (ISI) era costante e pari a 200 ms, gli stimoli erano raggruppabili in unità ritmiche di 800 ms (contenenti due stimoli brevi più i rispettivi ISI oppure uno stimolo lungo più il rispettivo ISI). Rispetto alle condizioni in cui l'ISI non era costante, i risultati evidenziarono la superiorità dei modelli uditivi su quelli visivi. Il secondo esperimento, in cui venivano utilizzate anche durate superiori (sia per gli stimoli che per gli ISI), dimostrò però che tale superiorità si otteneva solo se la durata di una battuta (corrispondente alla somma della durata di uno stimolo lungo e dell'ISI successivo) era inferiore ai 2000 ms. Secondo gli autori questi risultati sarebbero dovuti al fatto che – considerati i limiti della memoria ecoica (Darwin, Turvey e Crowder, 1972) – sono raggruppabili in unità ritmiche solo le sequenze con intervalli brevi.

Altre ricerche dimostrano come l'identificazione, la discriminazione, la memorizzazione e la riproduzione di movimenti semplici siano facilitate dall'esposizione al ritmo in modalità uditiva, più che in modalità visiva (Collier e Logan, 2000; Glenberg, Mann, Altman, Forman e Procise, 1989; Glenberg e Swanson, 1986; Grondin e McAuley, 2009; Han e Shea, 2008; Kohl e Shea, 1995; Lai, Shea, Bruechert e Little, 2002; Repp e Penel, 2002, 2004). Nel complesso, gli studi qui menzionati suggeriscono che il sistema uditivo sia più efficiente di quello visivo nell'identificare le caratteristiche ritmiche di movimenti semplici; ciò, a sua volta, favorisce l'accurata riproduzione dei movimenti stessi.

All'inizio degli anni novanta, Thaut e collaboratori sperimentarono con successo un innovativo metodo di riabilitazione della camminata basato sull'utilizzo di segnali acustici. In particolare, Thaut, McIntosh, Prassas e Rice (1993) testarono gli effetti dell'ascolto di una musica con una chiara struttura ritmica sulla camminata di pazienti che avevano subito un ictus. L'esperimento consisteva in tre sessioni distribuite in un periodo di cinque settimane. In ciascuna sessione il paziente doveva inizialmente camminare con il passo per lui più confortevole. La frequenza dei battiti al minuto costituiva il ritmo sul quale veniva regolato lo stimolo acustico che veniva presentato al paziente per un minuto, con la consegna di battere i piedi e/o le mani a tempo. Alla fine il paziente doveva camminare sincronizzandosi il più possibile con il ritmo acustico. I risultati evidenziarono significativi miglioramenti nella camminata dei pazienti, sia in termini temporali che di attivazione muscolare.

All'utilizzo dei segnali acustici – inseriti o meno in un contesto musicale – è stato dato il nome di *Rhythmic Auditory Stimulation* (RAS; Thaut, 2005). L'attenzione dei ricercatori si è concentrata principalmente sui pazienti affetti dalla malattia di Parkinson (deDreu, van der Wilk, Poppe, Kwakkel e van Wegen, 2012; McIntosh, Thaut, Rice e Miller, 1994; Miller, Thaut, McIntosh e Rice, 1996), nella cui sintomatologia i disturbi della camminata sono tra quelli maggiormente pervasivi e invalidanti. Thaut *et al.* (1996) avevano assegnato casualmente i pazienti a una di tre condizioni, caratterizzate rispettivamente da un addestramento basato sulla RAS, da un addestramento autoregolato (*self-paced*), oppure da nessun addestramento (condizione di controllo). I programmi di addestramento duravano tre settimane e consistevano in una seduta giornaliera di 30 minuti durante la quale venivano svolti esercizi di normale camminata, di salita/discesa di scalini e di sosta/ripartenza. I pazienti assegnati alla condizione RAS eseguivano gli esercizi ascoltando lo stimolo acustico a tre ritmi di frequenza crescente; tali ritmi venivano progressivamente velocizzati del 5-10% nella seconda settimana e di un ulteriore 5-10% nella terza settimana. I pazienti assegnati alla condizione di addestramento autoregolato eseguivano gli stessi esercizi senza la RAS, ma venivano comunque istruiti a esercitarsi a un ritmo crescente. Sia i pazienti assegnati alla condizione RAS sia quelli assegnati alla condizione di addestramento autoregolato hanno migliorato i parametri della propria camminata rispetto a quelli del gruppo di controllo. I miglioramenti nella condizione RAS erano maggiori rispetto a quelli nella condizione di addestramento autoregolato.

I risultati raggiunti da questi studi hanno stimolato la realizzazione di ulteriori ricerche sul tema, con lo scopo di approfondire i

meccanismi che stanno alla base della RAS. Alcune di queste ricerche hanno studiato gli effetti immediati della RAS, valutandoli dopo un'unica sessione (Arias e Cudeiro, 2008, 2010; Baker, Rochester e Nieuwboer 2007, 2008; Enzensberger e Fischer, 1996; Fernandez del Olmo e Cudeiro, 2003; Freedland *et al.*, 2002; Hausdorff *et al.*, 2007; Hove, Suzuki, Uchitomi, Orimo e Miyake, 2012; Howe, Lövgreen, Cody, Ashton e Oldham, 2003; Jiang e Norman, 2006; McIntosh, Brown, Rice e Thaut, 1997; Nanhoe-Mahabier *et al.*, 2012; Nieuwboer *et al.*, 2009; Rochester *et al.*, 2005; Rochester, Burn, Woods, Godwin e Nieuwboer, 2009; Suteerawattananon, Morris, Etnyre, Jankovic e Protas, 2004; Willems *et al.*, 2006, 2007; Zijlstra, Rutgers e Van Weerden, 1998). Altre ricerche hanno indagato gli effetti a medio e lungo termine di programmi di addestramento basati sulla RAS, variando diversi parametri come la durata complessiva dell'addestramento, il numero di sessioni settimanali, la durata delle sessioni, il tipo di stimoli, il tipo di esercizi, i ritmi somministrati e la gravità della malattia dei pazienti (Cubo, Leurgans e Goetz, 2004; Fernandez del Olmo e Cudeiro, 2005; Fernandez del Olmo, Arias, Furio, Pozo e Cudeiro, 2006; Ford, Malone, Nyikos, Yelisetty e Bickel, 2010; Frazzitta, Maestri, Uccellini, Bertotti e Abelli, 2009; Kadivar, Corcos, Foto e Hondzinski, 2011; Lim *et al.*, 2010; Marchese, Diverio, Zucchi, Lentino e Abruzzese, 2000; Nieuwboer *et al.*, 2007; Rochester *et al.*, 2007, 2010).

La maggioranza di queste ricerche ha evidenziato effetti positivi della RAS sia dopo una singola sessione sia dopo un addestramento prolungato; per entrambe le tipologie di interventi, infatti, si sono registrati dei miglioramenti nella camminata dal punto di vista sia spazio-temporale (velocità, ritmo, lunghezza del passo) sia muscolare (simmetria dell'attivazione muscolare), nonché un generale miglioramento della stabilità della camminata stessa (Nombela, Hughes, Owen e Grahn, 2013; Thaut e Abiru, 2010).

I segnali acustici utilizzati negli studi sin qui menzionati consistevano nel metronomo, nella musica o nella loro combinazione. Young, Rodger e Craig (2014) hanno indagato se anche il suono prodotto dai passi, definito dagli autori come un suono ecologicamente valido, possa essere efficace nel promuovere miglioramenti simili a quelli sopra descritti. Gli autori hanno confrontato gli effetti del metronomo, del suono dei passi e di suoni sintetici sulla camminata di pazienti affetti da Parkinson e su soggetti sani. Il suono dei passi era stato registrato mentre un soggetto sano camminava sulla ghiaia con diverse ampiezze del passo e a diversi ritmi. Nel primo esperimento i partecipanti dovevano sincronizzare il proprio passo con il ritmo specificato o dal metronomo o dal suono dei passi. Rispetto alla condizione di base, rappresentata da una misurazione effettuata senza somministrare

alcun segnale acustico, la variazione percentuale della lunghezza del passo è risultata equivalente per i due suoni. Tuttavia, nei pazienti la variabilità della lunghezza del passo era significativamente minore con il suono dei passi rispetto al metronomo; inoltre, rispetto ai soggetti sani, i pazienti hanno fatto registrare una riduzione significativa della variabilità della lunghezza del passo per effetto del suono dei passi. In altri termini, un suono ecologicamente valido come quello dei passi sarebbe più efficace del metronomo nel regolarizzare la camminata dei pazienti parkinsoniani.

Negli altri due esperimenti di Young *et al.* (2014) il suono dei passi è stato confrontato con suoni sintetici ottenuti a partire dall'interazione fisica tra i piedi del soggetto sano e la ghiaia. Nel secondo esperimento la procedura era la stessa del primo, a parte l'uso di suoni sintetici al posto del metronomo. I pazienti riducevano la variabilità del passo in tutte le condizioni, ma con i suoni sintetici non erano in grado di adattare la lunghezza del proprio passo a quella di riferimento, a meno che non venissero preventivamente ed esplicitamente informati su tale lunghezza; con il suono dei passi, invece, i partecipanti erano in grado di adattare accuratamente la lunghezza del proprio passo anche senza alcuna istruzione preventiva. Un simile confronto tra suoni ecologici e suoni sintetici, focalizzato però sull'atto respiratorio, è stato condotto da Murgia *et al.* (2015), che hanno evidenziato una maggior influenza dei primi rispetto ai secondi nel ridurre la variabilità dell'atto respiratorio: soltanto l'ascolto in cuffia della respirazione registrata di un soggetto sano produceva una riduzione di variabilità del respiro, mentre un suono sintetico con le stesse informazioni temporali non modificava tale variabilità in misura significativa. Nel terzo esperimento di Young *et al.* (2014), infine, gli autori hanno confrontato gli effetti dei suoni del passo e sintetici in combinazione con l'immaginazione. I risultati hanno confermato che i pazienti non erano in grado di adattare la lunghezza del proprio passo nella condizione con i suoni sintetici. È inoltre emerso che, rispetto ai soggetti sani, la variabilità della lunghezza del passo dei pazienti era significativamente minore con i suoni sintetici, ma in combinazione con l'immaginazione era invece maggiore; il suono dei passi, invece, favoriva sia l'adattamento sia la riduzione della variabilità del passo anche in combinazione con l'immaginazione.

Nel complesso, gli studi qui menzionati mettono in evidenza l'efficacia degli interventi ritmico-acustici in ambito riabilitativo, testimoniata dai significativi miglioramenti nella camminata di pazienti con malattia di Parkinson. Recenti risultati indicano che possono essere efficaci anche suoni ecologici, e non solamente quelli sintetici che caratterizzano la RAS. Ulteriori ricerche potranno approfondire le reali potenzialità e gli eventuali limiti di tale metodologia di intervento.

Poiché nello sport la modalità percettiva preponderante è quella visiva, è prassi comune concentrarsi su di essa anche durante l'allenamento. L'efficacia di alcune tecniche di allenamento basate sulla visione è stata oggetto di varie ricerche, con risultati positivi (Abernethy, Wood e Parks, 1999; Farrow e Abernethy, 2002; Hopwood, Mann, Farrow e Nielson 2011; Murgia *et al.*, 2014; Ste-Marie *et al.*, 2012). Nonostante l'importanza delle informazioni visive, non si può però ignorare la rilevanza che hanno anche altre componenti, come ad esempio quella acustica, tattile e propriocettiva, nel fornire preziose informazioni sull'esecuzione dei movimenti. Tra queste componenti, quella acustica sta ricevendo un'attenzione crescente da parte dei ricercatori, anche alla luce degli incoraggianti risultati ottenuti finora.

Le prime ricerche in questo ambito miravano a verificare l'efficacia del feedback aumentato basato su suoni sintetici, in particolare quelli ottenuti mediante la sonificazione del movimento. Come descritto in precedenza, tale tecnica consiste nella conversione di alcuni parametri fisici di un movimento in parametri di un suono artificiale, al fine di veicolare informazioni significative sull'esecuzione del movimento stesso (Dubus e Bresin, 2013; Effenberg, 1996, 2005). A questo proposito, il primo sport considerato è stato il nuoto, con ricerche che hanno dimostrato che vari tipi di sonificazione *online* promuovono miglioramenti significativi nel *crawl* (Chollet, Madani e Micallef, 1992; Chollet, Micallef e Rabischong, 1988). Successivamente sono stati presi in considerazione anche altri sport, come ad esempio il karate (Yamamoto, Shiraki, Takahata, Sakane e Takebayashi, 2004) e lo sci (Kirby, 2009); in questi casi, tuttavia, i ricercatori non hanno misurato la prestazione, ma valutato i giudizi soggettivi degli atleti sulla potenziale efficacia della sonificazione nel migliorare le loro prestazioni.

Uno sport che sta ricevendo particolare attenzione è il canottaggio, che è caratterizzato da un movimento complesso e ritmico vincolato al ciclo di voga. Due studi hanno mostrato che i canottieri sono in grado sia di riconoscere tale ciclo attraverso diversi tipi di sonificazione (Dubus, 2012) sia di identificare il proprio ciclo tra quelli di altri atleti (Schmitz e Effenberg, 2012). È stato dimostrato, inoltre, che i canottieri possono beneficiare di un intervento *online* in termini di miglioramento delle prestazioni. Schaffert, Mattes ed Effenberg (2011) hanno condotto uno studio utilizzando uno strumento che converte in diretta l'accelerazione della barca in un suono di altezza crescente in fase di accelerazione e decrescente in fase di decelerazione: lo strumento dà quindi ai canottieri la possibilità di monitorare in diretta l'efficacia del loro ciclo di voga. A parità di frequenza di

voga, la velocità delle barche era significativamente più alta quando lo strumento era acceso rispetto a quando era spento. In seguito sono stati ottenuti risultati positivi anche con atleti disabili (Schaffert e Mattes, 2012) e utilizzando diversi tipi di sonificazione (Schaffert e Gehret, 2013).

In un recente studio, infine, Kennel *et al.* (2015) hanno confrontato gli effetti di un feedback acustico ecologico in tempo reale, di uno ritardato di 180 ms e del suono bianco sulla prestazione nella corsa ad ostacoli. Il feedback acustico ritardato produceva un significativo peggioramento della prestazione; tra il feedback in tempo reale ed il suono bianco, invece, non è stata osservata alcuna differenza.

8. INTERVENTI RITMICO-ACUSTICI IN AMBITO SPORTIVO: IL MODELLAMENTO

In ambito sportivo, oltre che come feedback aumentato, gli stimoli acustici possono essere utilizzati secondo i principi del modellamento: un certo numero di studi ha infatti messo in evidenza l'efficacia di interventi basati sui modelli uditivi nel migliorare alcune prestazioni sportive.

Un'importante premessa è rappresentata dal fatto che le persone sono in grado di identificare un proprio gesto/movimento tra quelli di altre persone attraverso l'ascolto del suono da esso derivante. Ciò è valido sia per gesti semplici come il battere le mani (Flach, Knoblich e Prinz, 2004), sia per i movimenti complessi che caratterizzano la pratica sportiva: lo si è già detto a proposito della sonificazione (Schmitz e Effenberg, 2012), mentre altri studi lo hanno confermato anche per suoni registrati direttamente durante l'esecuzione di determinati gesti tecnici ed atletici, come nel golf (Murgia, Hohmann, Galmonte, Raab e Agostini, 2012) e nella corsa ad ostacoli (Kennel *et al.*, 2014; Kennel, Hohmann e Raab, 2014).

Il primo studio a noi noto che ha valutato gli effetti dei modelli uditivi sulla prestazione sportiva è quello di Agostini, Righi, Galmonte e Bruno (2004), riguardante un'applicazione dell'automodellamento al lancio del martello. Il primo giorno veniva chiesto ai partecipanti – lanciatori esperti – di eseguire due serie da dieci lanci ciascuna, il che ha consentito di escludere la presenza di un effetto deleterio della stanchezza sulle prestazioni. Il secondo giorno i partecipanti eseguivano nuovamente due serie da dieci lanci ciascuna. Nel corso della prima serie gli autori avevano registrato il suono prodotto dal martello durante la rotazione posizionando un microfono vicino alla testa del martello stesso; tale serie, inoltre, fungeva da condizione di base. La seconda serie costituiva invece la condizione sperimentale: il suono associato al lancio più lungo di ciascun atleta veniva usato come modello e fatto ascoltare per cinque volte prima di ogni nuovo

lancio. I risultati hanno evidenziato un duplice miglioramento della prestazione: rispetto ai lanci della condizione di base, infatti, quelli della condizione sperimentale erano significativamente più lunghi e la loro variabilità era significativamente minore. Simili standardizzazioni verso l'alto delle prestazioni sono state ottenute nel nuoto (Galmonte, Righi e Agostini, 2004) e nei calci di punizione (Prpic *et al.*, 2010), adattando la tecnica appena descritta alle specifiche caratteristiche dei due sport.

Altri esempi dell'efficacia dei modelli uditivi sono forniti da alcuni studi sul sollevamento pesi e sullo skateboard. Per quanto riguarda il sollevamento pesi Murgia *et al.* (2012) hanno creato degli stimoli acustici atti a guidare gli atleti durante l'esercizio di distensione su panca piana. Tali stimoli consistevano in un iniziale conto alla rovescia, seguito da un suono a bassa intensità, corrispondente alla fase discendente dell'esercizio, e poi da un suono ad alta intensità, corrispondente alla fase di spinta. I risultati hanno evidenziato che la potenza media espressa nella condizione sperimentale, con gli stimoli acustici, era significativamente maggiore rispetto a quella espressa nella condizione di controllo, senza stimoli acustici. Per quanto riguarda lo skateboard, invece, Cesari, Camponogara, Papetti, Rocchesso e Fontana (2014) hanno evidenziato che l'ascolto di suoni sintetici che riproducono la corsa di uno skateboard attiva i muscoli delle gambe. In particolare, gli autori hanno osservato che i pattern di attivazione muscolare di skater esperti assomigliavano a quelli realmente necessari per eseguire i vari movimenti tipici dello skateboard (accelerare/decelerare, saltare, ecc.) in maniera significativamente maggiore rispetto a quelli dei partecipanti inesperti.

Altri studi hanno messo a confronto l'efficacia di diversi tipi di modelli. Effenberg (2005), ad esempio, ha sonificato il salto sul posto utilizzando come parametro da convertire la forza espressa durante l'esecuzione del salto stesso. I partecipanti – studenti di scienze motorie – dovevano riprodurre nel modo più accurato possibile l'altezza di alcuni salti in due condizioni: dopo aver guardato un filmato muto oppure dopo averne guardato uno con l'aggiunta dello stimolo acustico. I risultati hanno evidenziato che i partecipanti erano significativamente più accurati in quest'ultima condizione. A questo proposito, un altro esempio è rappresentato dallo studio di Ramezanzade, Abdoli, Farsi e Sanjari (2014), nel quale il parametro convertito era la velocità angolare del gomito di un giocatore di basket mentre tirava a canestro. Anche in questo caso ai partecipanti veniva mostrato un filmato muto oppure uno con l'aggiunta dello stimolo acustico: come per lo studio precedente, la prestazione dei partecipanti che avevano potuto usufruire anche delle informazioni acustiche è stata significativamente migliore. Gli autori di entrambi gli studi attribuiscono il van-

taggio all'integrazione multisensoriale, ma l'assenza di una condizione con stimoli solo acustici non ha consentito loro di valutare il peso relativo della modalità uditiva rispetto a quella visiva.

Un possibile chiarimento al riguardo deriva dallo studio di Murgia, Bresolin, Righi, Galmonte e Agostini (2011) sul golf. Agli atleti veniva presentato un modello costituito da un loro *swing* particolarmente efficace eseguito in precedenza: il modello poteva essere uditivo (una sequenza registrata tramite un microfono posto vicino alla testa della mazza) oppure visivo (una ripresa frontale dell'atleta in movimento). I risultati hanno evidenziato la superiorità del modello uditivo su quello visivo nel migliorare la prestazione dei golfisti, misurata in base sia all'esito finale (distanza della pallina dalla buca) sia alla variabilità del gesto atletico (standardizzazione del *timing* assoluto e relativo dello *swing*). Ulteriori conferme della rilevanza degli stimoli acustici derivano dallo studio di Righi, Ferletic, Furlan, Pin e Gherzil (2007) sul servizio nel tennis. In questo studio, oltre ai modelli uditivi e visivi realizzati secondo le procedure sopra descritte (in questo caso il microfono era posto nel cosiddetto cuore della racchetta, ossia nello spazio tra il manico ed il piatto delle corde), venivano presentati anche dei modelli audiovisivi, in cui le tracce audio e video erano sincronizzate. Il miglioramento della prestazione, misurato in base al numero di servizi validi, era maggiore dopo la presentazione del modello uditivo, rispetto ai modelli visivo e audiovisivo.

Alcuni studi, infine, hanno indagato se la musica può produrre anche in ambito sportivo effetti analoghi a quelli descritti in ambito riabilitativo (deDreu *et al.*, 2012). In particolare, Bood, Nijssen, van der Kamp e Roerdink (2013) hanno cercato di valutare l'efficacia relativa di due componenti della stimolazione acustica spontaneamente utilizzata dagli atleti in allenamento e in gara, consistente in brani musicali scelti come particolarmente adatti a sostenere la prestazione. In riferimento alla corsa, hanno identificato almeno due fattori rilevanti: la presenza di un ritmo in grado di favorire una sincronizzazione sensomotoria vantaggiosa per la specifica prestazione e la valenza motivazionale del brano musicale. Per il fatto di aver considerato anche gli aspetti sensomotori, lo studio di Bood *et al.* (2013) rappresenta un'eccezione, in quanto la stragrande maggioranza degli altri studi che ha indagato il rapporto tra musica e sport si è soffermata principalmente su temi quali la motivazione, l'umore e l'*arousal* psicofisiologico (per una rassegna, vedi Karageorghis e Priest, 2012a, 2012b).

Nel complesso, gli studi menzionati nelle ultime due sezioni mettono in evidenza l'efficacia degli interventi ritmico-acustici in ambito sportivo, siano essi basati sul feedback aumentato o sul modellamento; tale efficacia è testimoniata dai significativi miglioramenti della prestazione da essi promossi in diverse discipline sportive.

La presente rassegna mette in evidenza come gli stimoli acustici possano influenzare significativamente il movimento umano. Nello specifico, la messa in atto di interventi basati sul suono risulta essere particolarmente efficace sia dal punto di vista riabilitativo, agevolando la camminata di pazienti affetti da disturbi che la alterano come l'ictus ed il Parkinson, sia dal punto di vista sportivo, migliorando la prestazione di atleti di diverse discipline. Tali risultati di tipo applicativo sono ragionevolmente supportati dalle evidenze neurofisiologiche e trovano riscontro nelle attuali teorie sul rapporto tra percezione e azione.

I risultati raggiunti finora su tali tematiche sono già importanti, ma dal momento che lo stato dell'arte attuale presenta numerosi limiti e spazi inesplorati, i potenziali sviluppi futuri sono ancora ampi. In ambito riabilitativo, ad esempio, i risultati ottenuti da Young *et al.* (2014) rappresentano un buon punto di partenza per approfondire gli effetti di suoni ecologici sulla camminata. Altre indicazioni interessanti al riguardo potrebbero derivare dall'utilizzo della sonificazione del movimento, visti i significativi miglioramenti ottenuti mediante tale tecnica in ambito sportivo. A tal proposito, uno dei principali limiti è rappresentato dalla mancanza di alcune indicazioni generali su come implementare al meglio tale tecnica; di conseguenza, sarebbe auspicabile che le ricerche future mettano a confronto l'efficacia di diversi tipi di sonificazione (Dubus e Bresin, 2013) al fine di identificare i parametri più rilevanti e il modo migliore per convertirli in suoni efficaci. Per quanto riguarda i suoni ecologici, si potrebbe approfondire la possibilità di utilizzarli negli interventi *online*, dal momento che su tale aspetto ci risulta pubblicato un unico studio (Kennel *et al.*, 2015). Sarebbe inoltre interessante verificare se anche in ambito sportivo, come in quello riabilitativo, interventi prolungati nel tempo possano promuovere miglioramenti duraturi nelle prestazioni.

In entrambi gli ambiti sarebbe interessante mettere a confronto il potenziale dei suoni sintetici ed ecologici, per individuare in quali condizioni gli uni siano più efficaci degli altri. Sarebbe anche utile sviluppare e testare l'efficacia di interventi «ibridi», basati cioè sulla combinazione di suoni sintetici ed ecologici, relativi a specifici parametri o fasi di un'azione motoria. Infine, va tenuta presente la necessità di valutare i potenziali effetti negativi di un feedback uditivo interferente, cui per esempio van Vugt, Ritter, Rollnik e Altenmüller (2014) hanno attribuito la superiorità – in ambito riabilitativo – del modellamento asincrono (mediante esposizione a sequenze musicali eseguite da un altro paziente in un turno precedente) su una condizione di feedback aumentato sincrono (consistente nell'esecuzione in coppia con un altro paziente).

Sempre a proposito del feedback, va rilevato che la prestazione degli esperti può dimostrarsi sorprendentemente indipendente dalla presenza del feedback naturale. Per esempio, i pianisti esperti sono in grado di rilevare gli errori di esecuzione prima di sentire la nota sbagliata da loro prodotta (Ruiz, Jabusch e Altenmüller, 2009). A questo proposito Candidi, Sacheli, Mega e Aglioti (2014) hanno dimostrato un'importante differenza tra esperti e non esperti nell'esecuzione al pianoforte: solo negli esperti il controllo del movimento era di natura anticipatoria e la rilevazione degli errori si basava su meccanismi simulativi (non sull'utilizzo del feedback visivo). Evidenze di questo tipo suggeriscono la possibilità che il feedback svolga una funzione diversa durante l'apprendimento o la riabilitazione, rispetto al caso delle prestazioni ottimali, fortemente automatizzate.

In generale, l'efficacia degli interventi ritmico-acustici nel produrre significativi miglioramenti in ambito riabilitativo e sportivo è stata dimostrata, ma il loro potenziale potrà rivelarsi ancora maggiore se in futuro la ricerca si orienterà nelle direzioni sopra menzionate.

BIBLIOGRAFIA

- ABERNETHY B., WOOD J.M., PARKS S. (1999). Can the anticipatory skills of experts be learned by novices? *Research Quarterly for Exercise and Sport*, 70 (3), 313-318.
- AGOSTINI T., RIGHI G., GALMONTE A., BRUNO P. (2004). The relevance of auditory information in optimizing hammer throwers performance. In P.B. Pascolo (ed.), *Biomechanics and sports*. Vienna: Springer, pp. 67-74.
- ARIAS P., CUDEIRO J. (2008). Effects of rhythmic sensory stimulation (auditory, visual) on gait in Parkinson's disease patients. *Experimental Brain Research*, 186 (4), 589-601.
- ARIAS P., CUDEIRO J. (2010). Effect of rhythmic auditory stimulation on gait in Parkinsonian patients with and without freezing of gait. *PLoS ONE*, 5 (3), e9675.
- AZIZ-ZADEH L., IACOBONI M., ZAIDEL E., WILSON S., MAZZIOTTA J. (2004). Left hemisphere motor facilitation in response to manual action sounds. *European Journal of Neuroscience*, 19 (9), 2609-2612.
- BAKER K., ROCHESTER L., NIEUWBOER A. (2007). The immediate effect of attentional, auditory, and a combined cue strategy on gait during single and dual tasks in Parkinson's disease. *Archives of Physical Medicine and Rehabilitation*, 88 (12), 1593-1600.
- BAKER K., ROCHESTER L., NIEUWBOER A. (2008). The effect of cues on gait variability—reducing the attentional cost of walking in people with Parkinson's disease. *Parkinsonism & Related Disorders*, 14 (4), 314-320.
- BENGTSSON S.L., ULLÉN F., EHRSOON H.H., HASHIMOTO T., KITO T., NAITO E., FORSSBERG H., SADATO N. (2009). Listening to rhythms activates motor and premotor cortices. *Cortex*, 45 (1), 62-71.
- BOOD R.J., NIJSSEN M., VAN DER KAMP J., ROERDINK M. (2013). The power of auditory-motor synchronization in sports: Enhancing running performance by coupling cadence with the right beats. *PLoS ONE* 8 (8), e70758.

- BUCCINO G., LUI F., CANESSA N., PATERI I., LAGRAVINESE G., BENUZZI F., PORRO C.A., RIZZOLATTI G. (2004). Neural circuits involved in the recognition of actions performed by nonconspecifics: An fMRI study. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 16 (1), 114-126.
- CANDIDI M., SACHELI L.M., MEGA I., AGLIOTTI S.M. (2014). Somatotopic mapping of piano fingering errors in sensorimotor experts: TMS studies in pianists and visually trained musically naïves. *Cerebral Cortex*, 24 (2), 435-443.
- CARAMAZZA A., ANZELLOTTI S., STRNAD L., LINGNAU A. (2014). Embodied cognition and mirror neurons: A critical assessment. *Annual Review of Neuroscience*, 37, 1-15.
- CESARI P., CAMPONOGARA I., PAPETTI S., ROCCHESO D., FONTANA F. (2014). Might as well jump: Sound affects muscle activation in skateboarding. *PLoS ONE*, 9 (3), e90156.
- CHEN J.L., PENHUNE V.B., ZATORRE R.J. (2008). Listening to musical rhythms recruits motor regions of the brain. *Cerebral Cortex*, 18, 2844-2854.
- CHOLLET D., MADANI M., MICALLEF J.P. (1992). Effects of two types of biomechanical bio-feedback on crawl performance. In D. MacLaren, T. Reilly, A. Lees (eds.), *Biomechanics and medicine in swimming. Swimming science VI*. London: E & FN Spon, pp. 57-62.
- CHOLLET D., MICALLEF J.P., RABISCHONG P. (1988). Biomechanical signals for external biofeedback to improve swimming techniques. In B.E. Ungerechts, K. Wilke, K. Reishle (eds.), *Swimming Science V*. Champaign, IL: Human Kinetics Books, pp. 389-396
- COLLIER G.L., LOGAN G. (2000). Modality differences in short-term memory for rhythms. *Memory and Cognition*, 28 (4), 529-538.
- CUBO E., LEURGANS S., GOETZ C.G. (2004). Short-term and practice effects of metronome pacing in Parkinson's disease patients with gait freezing while in the «on» state: Randomized single blind evaluation. *Parkinsonism & Related Disorders*, 10 (8), 507-510.
- DARWIN C.J., TURVEY M.T., CROWDER R.G. (1972). An auditory analogue of the Sperling partial report procedure: Evidence for brief auditory storage. *Cognitive Psychology*, 3, 255-267.
- DEDREU M.J., VAN DER WILK A.S., POPPE E., KWAKKEL G., VAN WEGEN E.E. (2012). Rehabilitation, exercise therapy and music in patients with Parkinson's disease: A meta-analysis of the effects of music-based movement therapy on walking ability, balance, and quality of life. *Parkinsonism & Related Disorders*, 18, 114-119.
- DOODY S.G., BIRD A.M., ROSS D. (1985). The effect of auditory and visual models on acquisition of a timing task. *Human Movement Science*, 4 (4), 271-281.
- DOWRICK P.W. (1999). A review of self modeling and related interventions. *Applied and Preventive Psychology*, 8 (1), 23-39.
- DUBUS G. (2012). Evaluation of four models for the sonification of elite rowing. *Journal on Multimodal User Interfaces*, 5 (3-4), 143-156.
- DUBUS G., BRESIN R. (2013). A systematic review of mapping strategies for the sonification of physical quantities. *PLoS ONE*, 8 (12), e82491.
- EFFENBERG A.O. (1996). *Sonification – Ein akustisches Informationskonzept zur menschlichen Bewegung*. Schorndorf: Hofmann.
- EFFENBERG A.O. (2005). Movement sonification: Effects on perception and action. *IEEE Multimedia*, 12 (2), 53-59.
- ENZENSBERGER W., FISCHER P.A. (1996). Metronome in Parkinson's disease. *Lancet*, 347 (9011), 1337.

- FARROW D., ABERNETHY B. (2002). Can anticipatory skills be learned through implicit video based perceptual training? *Journal of Sport Sciences*, 20 (6), 471-485.
- FERNANDEZ DEL OLMO M., ARIAS P., FURIO M.C., POZO M.A., CUDEIRO J. (2006). Evaluation of the effect of training using auditory stimulation on rhythmic movement in Parkinsonian patients – a combined motor and [¹⁸F]-FDG PET study. *Parkinsonism & Related Disorders*, 12 (3), 155-164.
- FERNANDEZ DEL OLMO M., CUDEIRO J. (2003). A simple procedure using auditory stimuli to improve movement in Parkinson's disease: A pilot study. *Neurology & Clinical Neurophysiology*, 25, 2003-2022.
- FERNANDEZ DEL OLMO M., CUDEIRO J. (2005). Temporal variability of gait in Parkinson disease: Effects of a rehabilitation programme based on rhythmic sound cues. *Parkinsonism & Related Disorders*, 11 (1), 25-33.
- FLACH R., KNOBLICH G., PRINZ W. (2004). Recognizing one's own clapping: The role of temporal cues. *Psychological Research*, 69 (1-2), 147-156.
- FORD M.P., MALONE L.A., NYIKOS I., YELISETTY R., BICKEL C.S. (2010). Gait training with progressive external auditory cueing in persons with Parkinson's disease. *Archives of Physical Medicine and Rehabilitation*, 91 (8), 1255-1261.
- FRAZZITTA G., MAESTRI R., UCCELLINI D., BERTOTTI G., ABELLI P. (2009). Rehabilitation treatment of gait in patients with Parkinson's disease with freezing: A comparison between two physical therapy protocols using visual and auditory cues with or without treadmill training. *Movement Disorders*, 24 (8), 1139-1143.
- FREEDLAND R.L., FESTA C., SEALY M., MCBEAN A., ELGHAZALY P., CAPAN A., BROZYCKI L., NELSON A.J., ROTHMAN J. (2002). The effects of pulsed auditory stimulation on various gait measurements in persons with Parkinson's disease. *NeuroRehabilitation*, 17 (1), 81-87.
- FUJIOKA T., TRAINOR L.J., LARGE E.W., ROSS B. (2012). Internalized timing of isochronous sounds is represented in neuromagnetic beta oscillations. *The Journal of Neuroscience*, 32 (5), 1791-1802.
- GALMONTE A., RIGHI G., AGOSTINI T. (2004). Stimoli acustici come nuovo elemento per il miglioramento della performance nel nuoto. *Movimento*, 20, 73-78.
- GAZZOLA V., AZIZ-ZADEH L., KEYSERS C. (2006). Empathy and the somatotopic auditory mirror system in humans. *Current Biology*, 16 (18), 1824-1829.
- GLENBERG A.M., JONA M. (1991). Temporal coding in rhythm tasks revealed by modality effects. *Memory & Cognition*, 19 (5), 514-522.
- GLENBERG A.M., MANN S., ALTMAN L., FORMAN T., PROCISE S. (1989). Modality effects in the coding and reproduction of rhythms. *Memory & Cognition*, 17, 373-383.
- GLENBERG A.M., SWANSON N.G. (1986). A temporal distinctiveness theory of recency and modality effects. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 12 (1), 3-15.
- GRAHN J.A., BRETT M. (2007). Rhythm and beat perception in motor areas of the brain. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 19 (5), 893-906.
- GRONDIN S., MCAULEY J.D. (2009). Duration discrimination in crossmodal sequences. *Perception*, 38, 1542-1559.
- HAN D.W., SHEA C.H. (2008). Auditory model: Effects on learning under blocked and random practice schedules. *Research Quarterly for Exercise and Sport*, 79 (4), 476-486.
- HAUSDORFF J.M., LOWENTHAL J., HERMAN T., GRUENDLINGER L., PERETZ C., GILADI N. (2007). Rhythmic auditory stimulation modulates gait variability in Parkinson's disease. *European Journal of Neuroscience*, 26 (8), 2369-2375.

- HERMANN T., HUNTY A., NEUHOFF J.G. (2011). *The sonification handbook*. Berlin: Logos.
- HICKOK G. (2009). Eight problems for the mirror neuron theory of action understanding in monkeys and humans. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 21 (7), 1229-1243.
- HICKOK G., FARAHDOD H., SABERI K. (2015). The rhythm of perception: Entrainment to acoustic rhythms induces subsequent perceptual oscillation. *Psychological Science*, 26 (7), 1006-1013.
- HOMMEL B. (2015a). Embodied cognition according to TEC. In Y. Coello, M. Fischer (eds.), *Foundations of embodied cognition*. New York: Psychology Press.
- HOMMEL B. (2015b). The theory of event coding (TEC) as embodied-cognition framework. *Frontiers in Psychology*, 6, 01318.
- HOMMEL B., MÜSSELER J., ASCHERSLEBEN G., PRINZ W. (2001). The Theory of Event Coding (TEC): A framework for perception and action planning. *Behavioral and Brain Sciences*, 24, 849-878.
- HOPWOOD M.J., MANN D.L., FARROW D., NIELSON T. (2011). Does visual-perceptual training augment the fielding performance of skilled cricketers? *International Journal of Sports Science and Coaching*, 6 (4), 523-535.
- HOVE M.J., SUZUKI K., UCHITOMI H., ORIMO S., MIYAKE Y. (2012). Interactive rhythmic auditory stimulation reinstates natural 1/f timing in gait of Parkinson's patients. *PLoS ONE*, 7 (3), e32600.
- HOWE T.E., LÖVGREEN B., CODY F.W.J., ASHTON V.J., OLDHAM J.A. (2003). Auditory cues can modify the gait of persons with early-stage Parkinson's disease: A method for enhancing parkinsonian walking performance? *Clinical Rehabilitation*, 17 (4), 363-367.
- HUNT N., MCGRATH D., STERGIU N. (2014). The influence of auditory-motor coupling on fractal dynamics in human gait. *Scientific Reports*, 4, 1-6.
- JIANG Y., NORMAN K.E. (2006). Effects of visual and auditory cues on gait initiation in people with Parkinson's disease. *Clinical Rehabilitation*, 20 (1), 36-45.
- KADIVAR Z., CORCOS D.M., FOTO J., HONDZINSKI J.M. (2011). Effect of step training and rhythmic auditory stimulation on functional performance in Parkinson patients. *Neurorehabilitation and Neural Repair*, 25 (7), 626-635.
- KARAGEORGHIS C.I., PRIEST D.-L. (2012a). Music in the exercise domain: A review and synthesis (Part I). *International Review of Sport and Exercise Psychology*, 5 (1), 44-66.
- KARAGEORGHIS C.I., PRIEST D.-L. (2012b). Music in the exercise domain: a review and synthesis (Part II). *International Review of Sport and Exercise Psychology*, 5 (1), 67-84.
- KHAN M.A., FRANKS I.M., ELLIOTT D., LAWRENCE G.P., CHUA R., BERNIER P.M., HANSEN S., WEEKS D. (2006). Inferring online and offline processing of visual feedback in target-directed movements from kinematic data. *Neuroscience and Biobehavioral Reviews*, 30, 1106-1121.
- KEELE S.W., POKORNY R.A., CORCOS D.M., IVRY R. (1985). Do perception and motor production share common timing mechanisms: A correlational analysis. *Acta Psychologica*, 60, 173-191.
- KENNEL C., HOHMANN T., RAAB M. (2014). Action perception via auditory information: Agent identification and discrimination with complex movement sounds. *Journal of Cognitive Psychology*, 26 (2), 157-165.
- KENNEL C., PIZZERA A., HOHMANN T., SCHUBOTZ R.I., MURGIA M., AGOSTINI T., RAAB M. (2014). The perception of natural and modulated movement sounds. *Perception*, 43 (8), 796.

- KENNEL C., STREESE L., PIZZERA A., JUSTEN C., HOHMANN T., RAAB M. (2015). Auditory reafferences: The influence of real-time feedback on movement control. *Frontiers in Psychology*, 6, 69.
- KEYSERS C., KOHLER E., UMILTÀ M.A., NANETTI L., FOGASSI L., GALLESE V. (2003). Audiovisual mirror neurons and action recognition. *Experimental Brain Research*, 153 (4), 628-636.
- KIRBY R. (2009). Development of a real-time performance measurement and feedback system for alpine skiers. *Sports Technology*, 2 (1-2), 43-52.
- KOHL R.M., SHEA C.H. (1995). Augmenting motor responses with auditory information: Guidance hypothesis implications. *Human Performance*, 8, 327-343.
- KOHLER E., KEYSERS C., UMILTÀ M.A., FOGASSI L., GALLESE V., RIZZOLATTI G. (2002). Hearing sounds, understanding actions: Action representation in mirror neurons. *Science*, 297, 846-848.
- LAHAV A., SALTZMAN E., SCHLAUG G. (2007). Action representation of sound: Audiomotor recognition network while listening to newly acquired actions. *Journal of Neuroscience*, 27 (2), 308-314.
- LAI Q., SHEA C.H., BRUECHERT L., LITTLE M. (2002). Auditory model enhances relative timing learning. *Journal of Motor Behavior*, 34, 299-308.
- LAI Q., SHEA C.H., LITTLE M. (2000). Effects of modeled auditory information on a sequential timing task. *Research Quarterly for Exercise and Sport*, 71 (4), 349-356.
- LARSSON M. (2014). Self-generated sounds of locomotion and ventilation and the evolution of human rhythmic abilities. *Animal Cognition*, 17, 1-14.
- LIM I., VAN WEGEN E., JONES D., ROCHESTER L., NIEUWBOER A., WILLEMS A.M., JONES D., BAKER K., HETHERINGTON V., KWAKKEL G. (2010). Does cueing training improve physical activity in patients with Parkinson's disease? *Neurorehabilitation and Neural Repair*, 24 (5), 469-477.
- LINGNAU A., GESIERICH B., CARAMAZZA A. (2009). Asymmetric fMRI adaptation reveals no evidence for mirror neurons in humans. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 106 (24), 9925-9930.
- MAGILL R. (2010). *Motor learning and control: Concepts and applications*. New York: McGraw-Hill.
- MARCHESE R., DIVERIO M., ZUCCHI F., LENTINO C., ABBRUZZESE G. (2000). The role of sensory cues in the rehabilitation of parkinsonian patients: A comparison of two physical therapy protocols. *Movement Disorders*, 15 (5), 879-883.
- McCULLAGH P., LITTLE W.S. (1989). A comparison of modalities in modeling. *Human Performance*, 2 (2), 101-111.
- McINTOSH G.C., BROWN S.H., RICE R.R., THAUT M.H. (1997). Rhythmic auditory-motor facilitation of gait patterns in patients with Parkinson's disease. *Journal of Neurology, Neurosurgery & Psychiatry*, 62 (1), 22-26.
- McINTOSH G.C., THAUT M.H., RICE R.R., MILLER R.A. (1994). Stride frequency-modulation in Parkinsonian gait using rhythmic auditory stimulation. *Annals of Neurology*, 36 (2), 316.
- MERKER B.H., MADISON G.S., ECKERDAL P. (2009). On the role and origin of isochrony in human rhythmic entrainment. *Cortex*, 45, 4-17.
- MILLER R.A., THAUT M.H., McINTOSH G.C., RICE R.R. (1996). Components of EMG symmetry and variability in parkinsonian and healthy elderly gait. *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology/Electromyography and Motor Control*, 101 (1), 1-7.
- MORGAN C.L. (1893) Primitive music: An enquiry into the origin and development of music, songs, instruments, dances, and pantomimes of savage races. *Nature*, 48, 290-291.

- MURGIA M., BRESOLIN G., RIGHI G., GALMONTE A., AGOSTINI T. (2011). The effect of visual and auditory models on golf swing. *Journal of Sport and Exercise Psychology*, 33 supplement, S91.
- MURGIA M., FORZINI F., AGOSTINI T. (2014). *Migliorare le prestazioni sportive. Superare il doping con la psicologia sperimentale applicata al movimento*. Milano: Franco Angeli.
- MURGIA M., HOHMANN T., GALMONTE A., RAAB M., AGOSTINI T. (2012). Recognising one's own motor actions through sound: the role of temporal factors. *Perception*, 41(8), 976–987.
- MURGIA M., SANTORO I., TAMBURINI G., PRPIC V., SORS F., GALMONTE A., AGOSTINI T. (2015). Ecological sounds affect breath duration more than artificial sounds. *Psychological Research*, epub ahead of print. doi:10.1007/s00426-015-0647-z.
- MURGIA M., SORS F., MURONI A.F., SANTORO I., PRPIC V., GALMONTE A., AGOSTINI T. (2014). Using perceptual home-training to improve anticipation skills of soccer goalkeepers. *Psychology of Sport and Exercise*, 15 (6), 642-648.
- MURGIA M., SORS F., VONO R., MURONI A.F., DELITALIA L., DI CORRADO D., AGOSTINI T. (2012). Using auditory stimulation to enhance athletes' strength: An experimental study in weightlifting. *Review of Psychology*, 19, 13-16.
- NANHOE-MAHABIER W., DELVAL A., SNIJDERS A.H., WEERDESTEYN V., OVEREEM S., BLOEM B.R. (2012). The possible price of auditory cueing: Influence on obstacle avoidance in Parkinson's disease. *Movement Disorders*, 27 (4), 574-578.
- NIEUWBOER A., BAKER K., WILLEMS A.M., JONES D., SPILDOOREN J., LIM I., KWAKKEL G., VAN WEGEN E., ROCHESTER L. (2009). The short-term effects of different cueing modalities on turn speed in people with Parkinson's disease. *Neurorehabilitation and Neural Repair*, 23(8), 831-836.
- NIEUWBOER A., KWAKKEL G., ROCHESTER L., JONES D., VAN WEGEN E., WILLEMS A.M., CHAVRET F., HETHERINGTON V., BAKER K., LIM I. (2007). Cueing training in the home improves gait-related mobility in Parkinson's disease: The RESCUE trial. *Journal of Neurology, Neurosurgery & Psychiatry*, 78 (2), 134-140.
- NOMBELA C., HUGHES L.E., OWEN A.M., GRAHN J.A. (2013). Into the groove: Can rhythm influence Parkinson's disease? *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*, 37 (10), 2564-2570.
- NOVEMBRE G., KELLER P.E. (2014). A conceptual review on action-perception coupling in the musicians' brain: What is it good for? *Frontiers in Human Neuroscience*, 8, 603.
- OLLER D.K., EILERS R.E. (1988). The role of audition in infant babbling. *Child Development*, 59, 441-449.
- PATEL A.D., IVERSEN J.R. (2014). The evolutionary neuroscience of musical beat perception: the Action Simulation for Auditory Prediction (ASAP) hypothesis. *Frontiers in Systems Neuroscience*, 8, 57.
- PAZZAGLIA M., PIZZAMIGLIO L., PES E., AGLIOTI S.M. (2008). The sound of actions in apraxia. *Current Biology*, 18(22), 1766-1772.
- PIZZAMIGLIO L., APRILE T., SPITONI G., PITZALIS S., BATES E., D'AMICO S., DI RUSSO F. (2005). Separate neural systems for processing action-or non-action-related sounds. *Neuroimage*, 24 (3), 852-861.
- PRINZ W. (1990). A common coding approach to perception and action. In O. Neumann, W. Prinz (eds.), *Relationship between perception and action*. Berlin: Springer-Verlag, pp. 167-201.

- PRPIC V., MURGIA M., FEDUZI S., BOLOGNINI A., ZAVAGNI M., RIGHI G., AGOSTINI T. (2010). Modelli acustici applicati ai calci di punizione nel gioco del calcio. *Movimento*, 26, 74-78.
- RAMEZANZADE H., ABDOLI B., FARSI A., SANJARI M.A. (2014). The impact of sonification modelling on perception and accuracy of performing jump shot basketball. *International Journal of Sport Studies*, 4 (11), 1388-1392.
- REPP B.H. (2005). Sensorimotor synchronization: A review of the tapping literature. *Psychonomic Bulletin & Review*, 12, 969-992.
- REPP B.H., PENEL A. (2002). Auditory dominance in temporal processing: New evidence from synchronization with simultaneous visual and auditory sequences. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 28 (5), 1085-1099.
- REPP B.H., PENEL A. (2004). Rhythmic movement is attracted more strongly to auditory than to visual rhythms. *Psychological Research*, 68 (4), 252-270.
- REPP B.H., SU Y.-H. (2013). Sensorimotor synchronization: A review of recent research (2006-2012). *Psychonomic Bulletin & Review*, 20 (3), 403-452.
- RIGHI G., FERLETIC E., FURLAN D., PIN A., GHERZIL A. (2007). Are visual models the best models to learn a specific task in sport training? *Perception* 36, *ECVP Abstract Supplement*, 179.
- RIZZOLATTI G., FADIGA L., GALLESE V., FOGASSI L. (1996). Premotor cortex and the recognition of motor actions. *Cognitive Brain Research*, 3, 131-141.
- ROCHESTER L., BAKER K., HETHERINGTON V., JONES D., WILLEMS A.M., KWAKKEL G., VAN WEGEN E., LIM I., NIEUWBOER A. (2010). Evidence for motor learning in Parkinson's disease: Acquisition, automaticity and retention of cued gait performance after training with external rhythmical cues. *Brain Research*, 1319, 103-111.
- ROCHESTER L., BURN D.J., WOODS G., GODWIN J., NIEUWBOER A. (2009). Does auditory rhythmical cueing improve gait in people with Parkinson's disease and cognitive impairment? A feasibility study. *Movement Disorders*, 24 (6), 839-845.
- ROCHESTER L., HETHERINGTON V., JONES D., NIEUWBOER A., WILLEMS A.M., KWAKKEL G., VAN WEGEN E. (2005). The effect of external rhythmical cues (auditory and visual) on walking during a functional task in homes of people with Parkinson's disease. *Archives of Physical Medicine and Rehabilitation*, 86 (5), 999-1006.
- ROCHESTER L., NIEUWBOER A., BAKER K., HETHERINGTON V., WILLEMS A.M., CHAVRET F., KWAKKEL E., VAN WEGEN E., JONES D. (2007). The attentional cost of external rhythmical cues and their impact on gait in Parkinson's disease: Effect of cue modality and task complexity. *Journal of Neural Transmission*, 114 (10), 1243-1248.
- RUIZ M.H., JABUSCH H.-C., ALTENMÜLLER E. (2009). Detecting wrong notes in advance: Neuronal correlates of error monitoring in pianists. *Cerebral Cortex*, 19 (11), 2625-2639.
- SANTORO I., MURGIA M., TAMBURINI G., PRPIC V., SORS F., GALMONTE A., AGOSTINI T. (2015). Panic disorder patients and healthy people differently identify their own heart frequency through sound. *Psibologija*, 48 (3), 279-287.
- SCHACHNER A. (2013). The origins of human and avian auditory-motor entrainment. *Nova Acta Leopoldina NF*, 111(380), 243-253.
- SCHAFFERT N., GEHRET R. (2013). Testing different versions of functional sonification as acoustic feedback for rowing. *Proceedings of the 19th International Conference on Auditory Display (ICAD 2013)*, 331-335.
- SCHAFFERT N., MATTES K. (2012). Acoustic feedback training in adaptive rowing. *Proceedings of the 18th International Conference on Auditory Display (ICAD 2012)*, 83-88.

- SCHAFFERT N., MATTES K., EFFENBERG A.O. (2011). An investigation of on-line acoustic information for elite rowers in on-water training conditions. *Journal of Human Sport and Exercise*, 6, 392-405.
- SCHMIDT R.A., WRISBERG C.A. (2008). *Motor learning and performance: A situation-based learning approach*. Champaign, IL: Human Kinetics.
- SCHMITZ G., EFFENBERG A.O. (2012). Perceptual effects of auditory information about own and other movements. *Proceedings of the 18th International Conference on Auditory Display (ICAD 2012)*, 89-94.
- SCHMITZ G., MOHAMMADI B., HAMMER A., HELDMANN M., SAMII A., MÜNTE T.F., EFFENBERG A.O. (2013). Observation of sonified movements engages a basal ganglia frontocortical network. *BMC Neuroscience*, 14 (1), 32.
- SCHUBOTZ R.I., FRIEDERICI A.D., VON CRAMON D.Y. (2000). Time perception and motor timing: A common cortical and subcortical basis revealed by fMRI. *Neuroimage*, 11 (1), 1-12.
- SHEA C.H., WULF G., PARK J.-H., GAUNT B. (2001). Effects of an auditory model on the learning of relative and absolute timing. *Journal of Motor Behavior*, 33 (2), 127-138.
- SIGRIST R., RAUTER G., RIENER R., WOLF P. (2013). Augmented visual, auditory, haptic, and multimodal feedback in motor learning: A review. *Psychonomic Bulletin & Review*, 20 (1), 21-53.
- SORS F., GERBINO W., AGOSTINI T. (2014). Auditory modeling in sport: Theoretical framework and practical applications. *TSPC2014 – Proceedings of the Trieste Symposium on Perception and Cognition*, 35-37.
- STE-MARIE D.M., LAW B., RYMAL A.M., JENNY O., HALL C., MCCULLAGH P. (2012). Observation interventions for motor skill learning and performance: An applied model for the use of observation. *International Review of Sport and Exercise Psychology*, 5, 145-176.
- SUTEERAWATTANANON M., MORRIS G.S., ETNYRE B.R., JANKOVIC J., PROTAS E.J. (2004). Effects of visual and auditory cues on gait in individuals with Parkinson's disease. *Journal of the Neurological Sciences*, 219 (1), 63-69.
- THAUT M.H. (2005). *Rhythm, music, and the brain: Scientific foundations and clinical applications*. New York: Routledge.
- THAUT M.H., ABIRU M. (2010). Rhythmic auditory stimulation in rehabilitation of movement disorders: A review of current research. *Music Perception*, 27 (4), 263-269.
- THAUT M.H., MCINTOSH G.C., PRASSAS S.G., RICE R.R. (1993). Effect of rhythmic auditory cuing on temporal stride parameters and EMG. Patterns in hemiparetic gait of stroke patients. *Neurorehabilitation and Neural Repair*, 7 (1), 9-16.
- THAUT M.H., MCINTOSH G.C., HOEMBERG V. (2015). Neurobiological foundations of neurologic music therapy: rhythmic entrainment and the motor system. *Frontiers in Psychology*, 5, 1185.
- THAUT M.H., MCINTOSH G.C., RICE R.R., MILLER R.A., RATHBUN J., BRAULT J.M. (1996). Rhythmic auditory stimulation in gait training for Parkinson's disease patients. *Movement Disorders*, 11 (2), 193-200.
- TRAINOR L.J. (2015). The origins of music in auditory scene analysis and the roles of evolution and culture in musical creation. *Philosophical Transactions of the Royal Society B*, 370, 20140089.
- UTLEY A., ASTILL S. (2008). *BIOS instant notes: Motor control, learning and development*. New York: Taylor & Francis.
- VANDENBOS G.R. (2007). *APA Dictionary of Psychology*. Washington, D.C.: American Psychological Association.

- VAN VUGT F.T. (2013). *Sounds on time: auditory feedback in motor learning, re-learning and over-learning of timing regularity*. Neuroscience. Université Claude Bernard – Lyon I, 2013.
- VAN VUGT F.T., RITTER J., ROLLNIK J.D., ALTENMUELLER E. (2014). Music-supported motor training after stroke reveals no superiority of synchronization in group therapy. *Frontiers in Human Neuroscience*, 8, 315.
- VAN VUGT F.T., TILLMANN B. (2015). Auditory feedback in error-based learning of motor regularity. *Brain Research*, 1606, 54-67.
- WILLEMS A.M., NIEUWBOER A., CHAVRET F., DESLOOVERE K., DOM R., ROCHESTER L., JONES D., KWAKKEL G., VAN WEGEN E. (2006). The use of rhythmic auditory cues to influence gait in patients with Parkinson's disease, the differential effect for freezers and non-freezers, an explorative study. *Disability & Rehabilitation*, 28 (11), 721-728.
- WILLEMS A.M., NIEUWBOER A., CHAVRET F., DESLOOVERE K., DOM R., ROCHESTER L., KWAKKEL G., VAN WEGEN E., JONES D. (2007). Turning in Parkinson's disease patients and controls: The effect of auditory cues. *Movement Disorders*, 22 (13), 1871-1878.
- WOODS E.A., HERNANDEZ A.E., WAGNER V.E., BELOCK S.L. (2014). Expert athletes activate somatosensory and motor planning regions of the brain when passively listening to familiar sports sounds. *Brain and Cognition*, 87, 122-133.
- YAMAMOTO G., SHIRAKI K., TAKAHATA M., SAKANE Y., TAKEBAYASHI Y. (2004). Multimodal knowledge for designing new sound environments. *Workshop on Mobile HCI and Sound*, 31-36.
- YOUNG W.R., RODGER M.W., CRAIG C.M. (2014). Auditory observation of stepping actions can cue both spatial and temporal components of gait in Parkinson's disease patients. *Neuropsychologia*, 57, 140-153.
- ZIJLSTRA W., RUTGERS A.W.F., VAN WEERDEN T.W. (1998). Voluntary and involuntary adaptation of gait in Parkinson's disease. *Gait & Posture*, 7 (1), 53-63.
- ZMIGROD S., HOMMEL B. (2009). Auditory event files: Integrating auditory perception and action planning. *Attention, Perception & Psychophysics*, 71, 352-362.

[Ricevuto il 5 giugno 2015]
[Accettato l'1 dicembre 2015]

Sound and motor performance in rehabilitation and sport

Summary. A growing body of research concerns the influence of auditory stimuli on motor action. The present review recalls the relevance of two theoretical frameworks (referring to the mirror neurons system and the *Theory of Event Coding*, respectively) for rehabilitation and sport. Then, it describes the laboratory studies showing the effectiveness of acoustic stimuli in improving performance in simple motor tasks, as well as applied research on the effectiveness of exposure to acoustic rhythms in facilitating gait and improving various sport performances. Potential developments of research on the effects of sound on rehabilitation and sport are indicated in the conclusions.

Keywords: Modeling, motor tasks, performance improvement, gait facilitation, acoustic rhythms.

La corrispondenza va inviata a Fabrizio Sors, Dipartimento di Scienze della Vita, Unità di Psicologia «Gaetano Kanizsa», Università di Trieste, Palazzina W – San Giovanni, via Weiss 21, 34128 Trieste. E-mail: fabrizio.sors@phd.units.it

