

Il ritmo come strumento riabilitativo

Rossella PAGANI¹, Camilla DEL BORRELLO¹, Marta GALANTINO¹, Fabrizio GERVASONI², Antonino Michele PREVITERA¹

¹ Dipartimento di Scienze della Salute, Università degli Studi di Milano, Polo San Paolo – Unità Operativa di Riabilitazione Specialistica – ASST Santi Paolo e Carlo, Milano

² Unità Operativa di Riabilitazione Specialistica – Ospedale “Luigi Sacco” – ASST Fatebenefratelli Sacco, Milano

Introduzione

Il termine “ritmo” (derivato dal greco *ρυθμός*, affine a *ρέω*, “scorrere”) rappresenta il succedersi ordinato nel tempo di un fenomeno.

Proprio per il suo definirsi nel tempo, il concetto di ritmo appare intimamente connesso a quello di movimento.

È esperienza comune che, in condizioni fisiologiche, l'applicazione di un ritmo possa apportare benefici in molti ambiti del movimento. La stimolazione ritmica è in grado di ottimizzare la performance motoria, mantenendo costante la cadenza e la frequenza del passo (1). La costanza dei parametri cinematici del passo (es. cadenza, tempo d'appoggio, ammortizzazione del piede alla superficie di contatto) aumenta la resistenza allo sforzo e previene le sindromi da *overuse* (2).

Inoltre, l'applicazione di una stimolazione ritmica può potenziare l'apprendimento motorio. La struttura temporale di un atto motorio, durante i compiti di sincronizzazione sensori-motoria, può essere dapprima presentata come una serie di suoni e, una volta memorizzata, può essere usata come modello ritmico del movimento. In pratica il ritmo ha un potenziale ruolo di input, di guida e di feedback per il movimento.

Le basi neurofisiologiche del “ritmo”

Due sono i network coinvolti nell'elaborazione del ritmo e associati al movimento ritmico: il *circuito gangli della base-talamo-corticale* (BGTC) e il *circuito cerebello-talamo-corticale* (CTC).

Il BGTC è costituito dal putamen post-commissurale, dal segmento in-

terno del globo pallido, dal talamo, dalle aree sensori-motorie (aree parietali) e prefrontali (area premotoria e supplementare motoria) e dalla corteccia prefrontale dorsolaterale (3). I gangli della base sono responsabili della programmazione e dell'inizio dei movimenti volontari già appresi. Agiscono come una sorta di “orologio interno” che prevede, monitora e mantiene la periodicità, grazie alla codifica del legame tra lo stimolo ritmico e l'azione. Sono responsabili della temporizzazione di intervalli superiori a un secondo e controllano la transizione tra le fasi del movimento (1, 4, 5, 6).

Il CTC è costituito dalla corteccia cerebellare e dal nucleo dentato, dal talamo, dalla corteccia premotoria e motoria secondaria e dalle regioni parietali (3). Tale via si attiva dopo l'inizio del movimento ed è coinvolta nel sincronismo, nella correzione degli errori e nel controllo predittivo del movimento mediante meccanismi *feed-forward*, attraverso i quali verifica la corrispondenza tra i movimenti e i segnali ritmici (7). Tali connessioni, tramite processi automatici, permettono la sincronizzazione del movimento con stimoli esterni e la codifica della struttura temporale di sequenze di eventi rilevanti per il compito. Il CTC è responsabile della temporizzazione di intervalli inferiori a un secondo (8).

Inizialmente si pensava che questi due circuiti fossero distinti e che le loro interazioni si verificassero solo a livello corticale. In realtà, la rilevazione delle caratteristiche temporali di una sequenza uditiva prevedibile, lo sviluppo di predizioni temporali e l'accoppiamento dell'azione agli eventi uditivi salienti richiedono in modo complementare l'integrità di

entrambe le vie (5). Queste due vie sono connesse sia in senso anatomico che funzionale.

L'area motoria supplementare (pre-SMA e SMA propriamente detta) è collegata al cervelletto. Il dominio non motorio del nucleo dentato proietta alla pre-SMA, mentre il suo dominio motorio è collegato alla SMA propriamente detta (9).

La pre-SMA è coinvolta soprattutto nella focalizzazione dell'attenzione nel tempo e nella codifica della relazione tra sequenze di eventi (“prima” e “dopo”). La SMA propriamente detta, invece, sulla base della struttura temporale fornita dalla pre-SMA, si occupa dell'inizio, dell'inibizione, della conservazione e della ripetizione del movimento ritmico. La SMA si mantiene attivata anche quando lo stimolo è rimosso, indipendentemente dalla regolarità di quest'ultimo. Quindi, si può affermare che la SMA ha un ruolo più generale nella temporizzazione motoria e, a differenza di altre aree, si attiva indipendentemente dal contesto (5, 10).

Oltre ai gangli della base, al cervelletto e alla SMA, altre strutture anatomiche sono coinvolte nell'elaborazione del ritmo.

La corteccia motoria prefrontale si attiva soprattutto per stimoli con intervalli lunghi e nell'ascolto dei ritmi complessi, quando sono associate a un compito motorio. Si ipotizza che l'attività di tale area corticale sia legata all'elaborazione delle informazioni di ordine superiore, come la struttura metrica, che coinvolgono il contributo della memoria di lavoro. Le connessioni con le aree sensoriale e uditiva regola la relazione temporale tra le azioni ed è coinvolta nei movimenti ritmici (5, 11).

La corteccia parietale posteriore rap-

presenta con il cervelletto un'unità funzionale nei compiti di sincronizzazione sensori-motoria, cioè quando è richiesta la coordinazione del movimento intrinsecamente ritmico con un ritmo esterno. Essa mantiene la temporizzazione cerebellare fino alla fine del compito ed è coinvolta nel rilevamento dell'errore (11).

L'ippocampo, grazie alla trasmissione di informazioni al cervelletto, collabora con la corteccia parietale nel trasformare la percezione uditiva della periodicità del tempo in motricità ritmica. Si pensa che l'ippocampo possa avere un ruolo prioritario nel misurare il tempo. Esso, infatti, è la prima tappa nel percorso uditivo ascendente, in cui sono stati segnalati neuroni sensibili alla durata, e il suo danneggiamento porta a una ridotta discriminazione degli intervalli temporali (12). Il sistema uditivo appare infatti fortemente coinvolto nella sincronizzazione del movimento con lo stimolo ritmico.

I gangli della base e la percezione del tempo

La percezione del tempo è determinata dall'integrazione degli stimoli associati ai processi cognitivi con quelli associati ai cambiamenti ambientali. La capacità dell'uomo di tenere traccia del tempo dipende da una sorta di orologio interno. Ci sono molte teorie al riguardo: una di queste, attualmente la più accreditata, è lo "striatal beat frequency model". Secondo questo modello i gangli della base sono al centro dell'elaborazione temporale. Il sistema dopaminergico segnala l'inizio di uno stimolo da cronometrare, inviando una raffica di dopamina allo striato o modificando le frequenze di oscillazione corticale. In particolare, l'intervallo temporale è codificato dall'attività coincidente dei neuroni corticali che vengono rilevati dai neuroni striatali e veicolati, attraverso il talamo, alla corteccia (13,14). Quindi, i neuroni corticali oscillano e, se si rileva un certo pattern tra gli oscillatori, i neuroni spinosi si attivano. Ciascun oscillatore ha la sua frequenza e in questo modo è possibile associare una certa oscillazione a una tempistica. Secondo questo modello, lo striato rappresenterebbe la struttura princi-

palmente coinvolta nella rilevazione dei pattern oscillatori corticali associati alla durata del segnale.

Poiché la dopamina regola i circuiti striato-talamo-corticali, si può dedurre che questo neurotrasmettitore abbia un ruolo nella modulazione della percezione del tempo. Quando c'è carenza di dopamina, c'è un'attenuazione dell'attività a livello di putamen e della SMA: questo perché la dopamina modula il timing attraverso la via nigro-striatale, di cui appunto fanno parte SMA e putamen (15).

Ulteriori considerazioni propongono la distinzione tra il tempo sensoriale e il tempo motorio. Ancora una volta emerge l'importanza dei gangli della base, coinvolti sia nell'aspetto sensitivo, sia nell'aspetto motorio del tempo (16).

Il coinvolgimento dei gangli della base nella temporizzazione ha implicazioni cliniche. Nei soggetti affetti da malattia di Parkinson si possono manifestare deficit nei compiti temporali, sia nell'esecuzione di movimenti ritmici (17), sia nella misura implicita del timing, ovvero nell'utilizzo delle informazioni temporali per prevedere la traiettoria di un oggetto in movimento (18). Nei soggetti affetti da malattia di Parkinson si verifica un'alterazione sia del tempo motorio, sia di quello sensoriale. Tuttavia, non sempre un danno ai gangli della base causa un deficit di temporizzazione e questo è espressione della "ridondanza" delle strutture alla base dell'elaborazione temporale (16).

Ritmo e riabilitazione

Una strategia per compensare la dispercezione temporale è quella di dare uno stimolo ritmico esterno (es. metronomo). La stimolazione uditiva ritmica indurrebbe la sincronizzazione sensori-motoria che faciliterebbe la preparazione e iniziazione motoria (19).

Numerose sono le evidenze relative all'utilizzo del ritmo nei pazienti affetti da malattia di Parkinson e, più in generale, da patologie del sistema extrapiramidale. La stimolazione uditiva ritmica nei pazienti parkinsoniani può migliorare in modo significativo i parametri dell'andatura come la velocità, la cadenza, la lunghezza, la sim-

metria spaziale e temporale e l'ampiezza del passo. Si è osservato un aumento ai punteggi ottenuti alla scala *Unified Parkinson's Disease Scale* (UPDRS)(3), una riduzione degli episodi di *freezing of gait* (FOG)(1, 20) e un miglioramento nei compiti di temporizzazione motoria e percettiva (3). In particolare, lo stimolo ritmico può ridurre la durata e la frequenza degli episodi di FOG quando è applicato in modalità feed-forward (ovvero prima che si presenti l'episodio), in assenza di gravi deficit cognitivi (20). Si è, inoltre, osservato che i pazienti che beneficiano maggiormente dell'intervento ritmico sono quelli che rispondono positivamente alla terapia con Levodopa (3).

Il ritmo può accompagnare metodi di trattamento alternativi. Associare la stimolazione ritmica alla marcia sul posto è un metodo di trattamento sovrapponibile ed efficace nei casi in cui lo spazio sia limitato, come nelle stanze di degenza dei reparti ospedalieri. L'utilizzo della stimolazione uditiva ritmica (RAS), tramite un metronomo a tempo fisso, presenta però alcuni limiti. Infatti, un metronomo a tempo fisso richiede che il paziente sincronizzi i propri passi con il ritmo uditivo. I ritmi dell'andatura raramente si sincronizzano spontaneamente, quando un individuo non è esplicitamente istruito a sincronizzarsi. Inoltre, l'allenamento a un tempo fisso, indotto dal metronomo, potrebbe diminuire la flessibilità dell'andatura, caratteristica necessaria per interagire con l'ambiente. L'utilizzo di metronomi interattivi, cioè in grado di sincronizzarsi spontaneamente con l'andatura del paziente, potrebbe ridurre i bisogni di attenzione, stabilizzare l'andatura e aumentare la motivazione. Analogamente, possono essere proposti stimoli classificati come "high groove", cioè con toni e frequenze basse, riconosciuti per essere percepiti ed elaborati più facilmente e, di conseguenza, avere una maggiore capacità di coinvolgere il sistema motorio, permettendo così una sincronizzazione del movimento più accurata, inducendo un movimento più naturale e una migliore coordinazione. Una strategia promettente potrebbe essere quella di variare parametricamente l'interazione del sistema adat-

tivo, iniziando con impostazioni che rendono facile la sincronizzazione, ma poi sfidando progressivamente il paziente a prepararsi per le incertezze e le perturbazioni che caratterizzano il mondo reale (21).

Val la pena, inoltre, di sottolineare l'impatto del segnale uditivo sull'andatura anche in altre malattie neurodegenerative che coinvolgono i gangli della base, come ad esempio nella malattia di Huntington. I pazienti affetti da malattia di Huntington sono incapaci di sincronizzare la loro andatura con un metronomo. Il *cue* uditivo, in questo caso, non migliora la performance motoria, probabilmente perché il deficit delle funzioni esecutive, tipico della malattia di Huntington, influenza negativamente la capacità di sincronizzazione sensori-motoria (1).

Conclusioni

Sono molteplici le strutture che si occupano della percezione del tempo, ma un ruolo determinante è svolto dai gangli della base.

Durante la valutazione di un paziente con un disordine extrapiramidale è fondamentale analizzare la componente di percezione temporale, essendo strettamente connessa ad aspetti motori e verbali.

La stimolazione ritmica può diventare parte integrante del trattamento riabilitativo nei pazienti affetti da patologie extrapiramidali, ma è necessario tenere in considerazione che gli effetti terapeutici sono variabili a seconda della modalità di presentazione e della struttura temporale degli stimoli ritmici. Per esempio, l'utilizzo di una stimolazione ritmica mediate un metronomo in grado di sincronizzarsi spontaneamente e in maniera interattiva con il ritmo proprio del paziente può essere un utile strumento nel training di deambulazione e negli esercizi di coordinazione.

La stimolazione ritmica può influire in modo positivo sui parametri dell'andatura solo se sono preservate le funzioni cognitive di base. Potrebbe essere utilizzata anche negli esercizi di dual task cognitivo-motorio, nel Motor Imagery e nell'Action Observation. Secondo il concetto di "integrazione multisensoriale", arricchire l'esercizio, utilizzando indizi senso-

riali (per esempio il *cue* uditivo), permette di migliorare la percezione e l'attenzione e quindi la performance motoria. I processi cerebrali attivati durante la percezione del ritmo possono essere generalizzati e trasferiti a funzioni "non ritmiche"; questo accade perché il ritmo coinvolge reti neurali ampiamente distribuite che sono condivise con diverse funzioni cognitive e oltre che motorie.

Bibliografia

- (1) Schaefer RS. Auditory rhythmic cueing in movement rehabilitation: Findings and possible mechanisms. *Philos Trans R Soc B Biol Sci.* 2014;369(1658). <http://dx.doi.org/10.1098/rstb.2013.0402>
- (2) Damm L, Varoqui D, De Cock VC, Dalla Bella S, Bardy B. Why do we move to the beat? A multi-scale approach, from physical principles to brain dynamics. *Neurosci Biobehav Rev.* 2020;112(December 2019):553–84. <https://doi.org/10.1016/j.neubiorev.2019.12.024>
- (3) Koshimori Y, Thaut MH. Future perspectives on neural mechanisms underlying rhythm and music based neurorehabilitation in Parkinson's disease. *Ageing Res Rev [Internet].* 2018;47(April):133–9. <https://doi.org/10.1016/j.arr.2018.07.001>
- (4) Dalla Bella S. The use of rhythm in rehabilitation for patients with movement disorders. *Music Aging Brain.* 2020;(June):383–406. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-817422-7.0015-8>
- (5) Damm L, Varoqui D, De Cock VC, Dalla Bella S, Bardy B. Why do we move to the beat? A multi-scale approach, from physical principles to brain dynamics. *Neurosci Biobehav Rev.* 2020;112(December 2019):553–84. <https://doi.org/10.1016/j.neubiorev.2019.12.024>
- (6) Avanzino L, Pelosin E, Vicario CM, Lagravinese G, Abbruzzese G, Martino D. Time processing and motor control in movement disorders. *Front Hum Neurosci.* 2016;10(DEC2016):1–8. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2016.00631>
- (7) Muller T, Nobre AC. Perceiving the passage of time: Neural possibilities. *Ann N Y Acad Sci.* 2014;1326(1):60–71. <https://doi.org/10.1111/nyas.12545>
- (8) Del Olmo MF, Cheeran B, Koch G, Rothwell JC. Role of the cerebellum in externally paced rhythmic finger movements. *J Neurophysiol.* 2007;98(1):145–52. <https://doi.org/10.1152/jn.01088.2006>
- (9) Caligiore D, Pezzulo G, Baldassarre G, Bostan AC, Strick PL, Doya K, et al. Consensus Paper: Towards a Systems-Level View of Cerebellar Function: the Interplay Between Cerebellum, Basal Ganglia, and Cortex. *Cerebellum.* 2017;16(1):203–29. <http://dx.doi.org/10.1007/s12311-016-0763-3>
- (10) Kotz SAE, Schwartze M. Differential input of the supplementary motor area to a dedicated temporal processing network: Functional and clinical implications. *Front Integr Neurosci.* 2011;5(DECEMBER):2007–10. <https://doi.org/10.3389/fnint.2011.00086>
- (11) Repp BH, Su YH. Sensorimotor synchronization: A review of recent research (2006-2012). *Psychon Bull Rev.* 2013 Jun;20(3):403–52. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/pros.lib.unimi.it/23397235>
- (12) Tierney A, Kraus N. The ability to move to a beat is linked to the consistency of neural responses to sound. *J Neurosci.* 2013;33(38):14981–8. <https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.0612-13.2013>
- (13) Tomasi D, Wang G-J, Studentsova Y, Volkow ND. Dissecting Neural Responses to Temporal Prediction, Attention, and Memory: Effects of Reward Learning and Interception on Time Perception. *Cereb Cortex.* 2015 Oct 1;25(10):3856. <https://doi.org/10.1093/cercor/bhu269>
- (14) Gorea A. Ticks per thought or thoughts per tick? A selective review of time perception with hints on future research. *J Physiol.* 2011 Dec 1;105(4–6):153–63. <https://doi.org/10.1016/j.jphysparis.2011.09.008>
- (15) Coull JT, Hwang HJ, Leyton M, Dagher A. Dopamine Precursor Depletion Impairs Timing in Healthy Volunteers by Attenuating Activity in Putamen and Supplementary Motor Area. *J Neurosci.* 2012 Nov 21;32(47):16704. <https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.1258-12.2012>
- (16) Paton JJ, Buonomano D V. The Neural Basis of Timing: Distributed Mechanisms for Diverse Functions. *Neuron.* 2018 May 16;98(4):687. <https://doi.org/10.1016/j.neuron.2018.03.045>
- (17) Grahn JA, Rowe JB. Feeling the beat: Premotor and striatal interactions in musicians and nonmusicians during beat perception. *J Neurosci.* 2009 Jun 10;29(23):7540–8. <https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.2018-08.2009>
- (18) Coull JT, Cheng RK, Meck WH. Neuroanatomical and neurochemical substrates of timing. *Neuropsychopharmacology.* 2011 Jan;36(1):3–25. <https://doi.org/10.1038/npp.2010.113>
- (19) Lad SS, Hurley RA, Taber KH. Temporal Processing: Neural Correlates and Clinical Relevance. 2020 Apr 13;32(2):104–8. <https://doi.org/10.1176/appi.neuropsych.19120342>
- (20) Plotnik M, Shema S, Dorfman M, Gazit E, Brozgol M, Giladi N, et al. A motor learning-based intervention to ameliorate freezing of gait in subjects with Parkinson's disease. *J Neurol.* 2014;261(7):1329–39. <https://doi.org/10.1007/s00415-014-7347-2>
- (21) Hove MJ, Keller PE. Impaired movement timing in neurological disorders: Rehabilitation and treatment strategies. *Ann N Y Acad Sci.* 2015;1337(1):111–7. <https://doi.org/10.1111/nyas.12615>