



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA

Dipartimento di psicologia generale

Corso di laurea in scienze psicologiche cognitive e psicobiologiche

Elaborato finale

Stimolazione elettrica transcranica a rumore casuale: effetti sul decorso temporale dell'apprendimento percettivo e sulla sua generalizzazione

Transcranial random noise stimulation: effect on the time course of perceptual learning and on its generalization

Relatore

Prof. Campana Gianluca

Laureando: Pauletto Matteo

Matricola: 2018359

Anno Accademico 2022-2023

INDICE

Abstract	5
Introduzione	6
Studio del VPL	6
Specificità e transfer	7
I meccanismi del VPL	9
Modello del doppio stadio	10
Stimolazione elettrica transcranica	10
Scopo della ricerca	12
Metodi	13
Soggetti	13
Task di discriminazione dell'orientamento	13
Esperimento principale	14
Tecnica di stimolazione: hf-tRNS	14
Procedura	15
Analisi dei dati	16
Risultati e discussione	17
Limiti e future direzioni	20
Bibliografia	21

Abstract

L'apprendimento visivo percettivo (Visual Perceptual Learning, VPL) è una forma di plasticità neuronale per la quale si assiste ad un miglioramento (a volte anche consistente) della performance allenando il partecipante nello svolgere un task. Studiare il VPL è interessante sia per capire sempre meglio come funziona la percezione, sia per fini applicativi, come per esempio per migliorare le funzioni visive. Dato che i meccanismi sottostanti il VPL non sono ancora del tutto chiari e che sono numerosi i fattori che influenzano questo fenomeno, è importante analizzare come interagiscono i vari fattori tra di loro per trovare quale combinazione risulta essere la più efficace.

Il presente studio pilota ha l'obiettivo di indagare gli effetti della stimolazione elettrica a rumore casuale ad alta frequenza (hf-tRNS) sul VPL e sulla sua generalizzazione. Sei partecipanti sono stati divisi in due gruppi, uno di controllo con stimolazione sham (fittizia) e l'altro stimolato con stimolazione reale. L'esperimento consisteva in un task di discriminazione dell'orientamento (ODT), che ogni soggetto ha svolto per 10 sessioni: un pre-test, 8 sessioni di training, un post-test.

Le ridotte dimensioni del campione e la grande variabilità dei dati non ci hanno permesso di svolgere un'analisi accurata. I soggetti sembrano essere leggermente migliorati nel corso del training e i test suggeriscono un transfer per gli stimoli con le differenze angolari maggiori. Non è chiaro il ruolo della stimolazione.

E' fondamentale raccogliere dati di qualità da un campione più grande per indagare a livello statistico il miglioramento durante il training, la generalizzazione dell'apprendimento, la possibile influenza della hf-tRNS.

Introduzione

L'apprendimento percettivo (Perceptual Learning, PL) consiste in un miglioramento (spesso anche considerevole) a lungo termine della performance a seguito della pratica o di un training. Da decenni questo fenomeno è oggetto di studio nella ricerca scientifica. Il PL può avvenire praticamente tramite qualsiasi senso (gusto, tatto, udito, multisensoriale (Sathian, 1998)) ma la forma più studiata è di sicuro quella visiva (Fertonani et al., 2011; Lu et al., 2011; Lu & Doshier, 2022). In questo caso, si parla di apprendimento percettivo visivo (Visual Perceptual Learning, VPL). Questo fenomeno è molto studiato in psicologia perché è considerato un ottimo esempio di plasticità, per cui si possono ricavare preziose informazioni sul funzionamento del nostro sistema nervoso.

Studio del VPL

Nella pratica, il VPL è un fenomeno con molte sfaccettature che può essere influenzato da numerosissimi fattori, come per esempio la stimolazione elettrica transcranica (Fertonani et al., 2011), la presenza o meno di rumore esterno nel compito, la posizione dello stimolo (B. A. Doshier & Lu, 1999). Studiare il VPL non è così semplice, tuttavia le numerose ricerche iniziano a fornire sempre più evidenze e informazioni in questo ambito.

Solitamente, gli studi utilizzano un forced-choice task (compito a scelta forzata) in cui vengono mostrate due o più opzioni al partecipante, il quale è obbligato a sceglierne una. Spesso la scelta è accompagnata da un feedback che indica se la risposta data è corretta o meno. Anche per il presente studio esplorativo è stato utilizzato un forced-choice task integrato a un feedback visivo. In altri studi (Fertonani et al., 2011) vengono usati con lo stesso scopo altri tipi di feedback, come quelli uditivi.

I principali paradigmi di ricerca sono la procedura a stimoli costanti (constant stimuli procedure) e la procedura di training adattativo (adaptive training procedure) (Lu & Doshier, 2022). Nel constant stimuli procedure, il partecipante

lavora con lo stesso identico set di stimoli durante tutto l'esperimento. La performance (solitamente l'accuratezza) viene misurata tra i blocchi (dozzine di trials) o le sessioni (centinaia di trials) e normalmente aumenta durante il training poiché il task diventa sempre più semplice man mano che il partecipante si allena. Al contrario, nell'adaptive training procedure il contrasto tra gli stimoli o la differenza tra gli stimoli viene modificata per tenere la performance del partecipante costante. Il task, quindi, diventa sempre più difficile man mano che il partecipante procede con il training. L'apprendimento viene valutato solitamente dopo ogni blocco o ogni sessione, in base alla soglia del contrasto o della differenza tra gli stimoli.

Gli stimoli utilizzati nel task possono variare: solitamente, si usano stimoli semplici come linee o Gabor in modo da studiare la cosiddetta visione di basso livello. Sono invece più rari gli studi che utilizzano pattern di più stimoli semplici (visione di medio livello) o addirittura oggetti o scene naturali (visione di alto livello) (Lu & Doshier, 2022). In moltissimi casi in tutti e tre i tipi di visione si è dimostrata la presenza del VPL. E' importante indagare stimoli di diversa complessità poiché non c'è ancora chiarezza sulle basi neurali in cui si verifica il VPL.

Attualmente, ci sono diversi campi di indagine nello studio del VPL (Lu & Doshier, 2022) nei quali si riscontrano talvolta risultati discordanti (Shibata et al., 2014). Numerosi studi indagano la specificità o la generalizzazione del VPL, altri si interessano del livello di processamento in cui avviene.

Specificità e transfer

Il transfer consiste nel generalizzare un apprendimento ad altri stimoli, condizioni o compiti. Quando il transfer non avviene, si parla di specificità del fenomeno. I tipi di transfer più studiati sono: la locazione nella retina o l'occhio (location transfer), il tipo di stimoli (stimulus transfer), il tipo di task (task transfer). Per verificare il location transfer in seguito ad un training è sufficiente fare un test con lo stesso compito e gli stessi stimoli, ma presentati in una diversa posizione retinica o dello spazio. Il location transfer può indicare che l'apprendimento è

avvenuto a livelli corticali in cui è ancora presente una rappresentazione retinotopica, o quanto meno spaziotopica. Per indagare lo stimulus transfer, invece, si utilizzano due stimoli con caratteristiche differenti (per esempio una Gabor orizzontale anziché verticale). Infine, il task transfer può essere analizzato chiedendo al partecipante di svolgere un task diverso da quello del training.

Nelle occasioni in cui non avviene il transfer si parla di specificità. Non bisogna tuttavia pensare in maniera dicotomica per cui o un task è specifico o si può generalizzare: salvo alcune eccezioni, si assiste solitamente ad una parziale specificità o transfer. Per esempio, in un compito di detezione del contrasto (Sowden et al., 2002) i partecipanti dovevano discriminare degli stimoli particolari chiamati Gabor. L'apprendimento a fine training è risultato essere specifico per la locazione nella retina, mentre si è generalizzato per quanto riguarda l'orientamento (ossia l'inclinazione) dello stimolo.

Ci sono molti fattori che influenzano la specificità e il transfer, come la difficoltà del task (Ahissar & Hochstein, 1997), l'estensione del training (Jeter et al., 2010) e l'attenzione (Donovan et al., 2015; Donovan & Carrasco, 2018). Per esempio, uno studio (Ahissar & Hochstein, 1997) ha dimostrato che il grado di specificità per la posizione retinica in un compito ODT dipende dalla precisione richiesta dal transfer task ma non dalla sua difficoltà. In particolare, se nel task di trasferimento è richiesta poca precisione, il fenomeno del transfer sarà maggiore. Questo non sorprende visto che i task ad alta precisione richiedono di distinguere tra loro stimoli molto simili, per cui il transfer diventa meno evidente. Anche la durata del training sembra influenzare questo fenomeno (Jeter et al., 2010): training più lunghi diminuiscono il transfer aumentando la specificità. Un obiettivo del presente studio pilota prevede di ottenere informazioni riguardo la generalizzazione (e quindi riguardo il transfer) del training ottenibile con l'uso della hf-tRNS simultaneo al training.

Riassumendo, pare il VPL sia un fenomeno particolarmente specifico, anche se in alcune situazioni si è potuto generalizzare il training.

I meccanismi del VPL

I meccanismi sottostanti il VPL non sono ancora chiariti. Il VPL consiste nel miglioramento del rapporto segnale/rumore che i neuroni riescono a elaborare. Per fare ciò, esistono due strategie che possono agire sia in maniera indipendente sia congiunte: sono la riduzione del rumore esterno e l'amplificazione del segnale.

Storicamente ci sono due modelli che provano a spiegare i meccanismi del VPL: il representation enhancement (il miglioramento della rappresentazione) e l'information o il selection reweighting (il riponderamento dell'informazione o selettivo) (B. A. Doshier & Lu, 1998, 2009; Sotiropoulos et al., 2011; Watanabe & Sasaki, 2015). Il primo sostiene che il miglioramento del rapporto segnale-rumore avvenga nelle aree corticali primarie, le quali modificano la rappresentazione modulando le risposte neuronali. Secondo il modello dell'information reweighting, invece, il miglioramento è frutto di decisioni di alto livello che scelgono che peso dare alle informazioni che giungono dalle aree corticali. I neuroni, secondo questo modello, diventano sempre più efficienti nel dare maggior peso alle informazioni rilevanti per il task e contemporaneamente nel trascurare il rumore.

L'informazione, quindi, non verrebbe necessariamente modificata ma piuttosto riponderata. Esiste un'importante differenza funzionale tra il representation enhancement e il selective reweighting: per il primo, i cambiamenti a livello delle aree visive primarie sono persistenti e possono quindi essere generalizzati a task diversi che usano però rappresentazioni simili. Al contrario, il selective reweighting è specifico per il singolo task o al massimo per task molto simili. Sebbene i due modelli non sono mutualmente esclusivi, le evidenze empiriche (B. A. Doshier et al., 2013; B. Doshier & Lu, 2020) mostrano una preponderanza per il fenomeno del selective reweighting piuttosto che del representation enhancement, il quale sembra abbia un ruolo secondario e viene ormai considerato come modello "storico".

Nonostante siano stati proposti più modelli (B. Doshier & Lu, 2017; Lu & Doshier, 2022; Shibata et al., 2014) che provano a spiegare il fenomeno, i meccanismi legati al VPL non sono ancora totalmente chiariti. C'è ancora un dibattito sul livello

in cui avviene, ossia se è dovuto a cambiamenti delle aree visive primarie o piuttosto a modifiche delle aree superiori.

Modello del doppio stadio

Alcuni ricercatori hanno ideato un modello che, nonostante non abbia ancora supporto empirico, è degno di nota poiché si propone di spiegare le divergenze che stanno caratterizzando il campo di studi del VPL: il modello del doppio stadio (Shibata et al., 2014). Esso si basa su assunzioni relativamente semplici: esistono due tipi di plasticità, una detta stimolo dipendente (plasticità basata sulle caratteristiche, feature based) e l'altra chiamata task dipendente (plasticità basata sul task, task-based).

La plasticità feature based migliora la rappresentazione delle informazioni visive. Avviene grazie alla semplice esposizione nelle aree visive primarie, dove le caratteristiche vengono elaborate. Per contro, la plasticità task-based riguarda il miglioramento del processamento relativo al task e avviene grazie al coinvolgimento attivo del partecipante. Si verifica quindi nelle aree cognitive di più alto livello.

Questo modello, se verrà supportato da evidenze empiriche, permetterà di chiarificare alcuni aspetti contraddittori nello studio del VPL, come per esempio il dibattito riguardo il brain locus del VPL. Secondo i ricercatori, i risultati controversi sorgono da una mancata distinzione tra i due tipi di plasticità e dal loro contributo. In certe situazioni, il miglioramento della performance dipende dalla plasticità feature-based in cui si assistono a cambiamenti nelle zone visive primarie. In altre condizioni, al contrario, la plasticità è task-based, che si traduce come cambiamenti nelle connessioni e nelle aree cognitive superiori ma non in quelle visive.

Stimolazione elettrica transcranica

Tra i vari fattori che influenzano il VPL, vi rientra anche la stimolazione elettrica transcranica non invasiva (transcranial Electric Stimulation, tES) (Fertonani et al.,

2011; Pirulli et al., 2013; Yang et al., 2022). In ricerca ci sono diversi protocolli di stimolazione, ognuno che produce risultati diversi (a volte anche opposti) a seconda dell'area stimolata. Principalmente, è possibile individuare due categorie di tES: stimolazione a corrente continua (transcranial Direct Current Stimulation, tDCS) e stimolazione a corrente alternata a rumore casuale (transcranial Random Noise Stimulation, tRNS). La tDCS consiste nell'applicazione di una leggera corrente continua nell'area interessata. Può essere anodica oppure catodica. La tDCS anodica (anodal tDCS, a-tDCS) solitamente eccita i neuroni stimolati, rendendoli più sensibili, mentre la tDCS catodica (cathodal tDCS, c-tDCS) sembrerebbe avere l'effetto opposto di inibire i neuroni. La tRNS, invece, è un tipo di stimolazione che prevede l'utilizzo di una leggera corrente alternata, la cui frequenza varia in maniera casuale. Si è soliti dividere la tRNS in due bande: a bassa frequenza, da 0.1 a 100 Hz (low frequencies tRNS, lf-tRNS) e ad alta frequenza, da 100 a 640 Hz (high frequencies tRNS, hf-tRNS). L'effetto della stimolazione dipende da numerosi fattori, primi tra tutti l'area di stimolazione: non sorprende infatti che diversi tipi di corteccie vengano influenzati in maniera diversa. Per esempio, pare che hf-tRNS e a-tDCS abbiano effetti simili sulla corteccia motoria (Moliadze et al., 2010; Nitsche et al., 2003; Terney et al., 2008), mentre sono state riscontrate delle differenze stimolando le aree visive primarie in un compito ODT (Fertonani et al., 2011): sebbene entrambe le stimolazioni migliorassero la performance, con la hf-tRNS si sono ottenuti effetti facilitatori significativamente più accentuati. Un altro fattore da tenere in considerazione è il timing: uno studio (Pirulli et al., 2013) ha dimostrato che stesse stimolazioni applicate con tempistiche diverse producono effetti diversi. In particolare, per quanto riguarda l'area visiva, pare che la a-tDCS prima del task (offline) produca risultati migliori di quella applicata durante il task (online). Al contrario, la hf-tRNS dà gli effetti più vistosi se applicata online piuttosto che offline. In ogni caso, gli effetti più consistenti sono stati ritrovati con la hf-tRNS online.

Non è ancora del tutto chiaro il motivo di queste differenze. Alcuni ricercatori (Pirulli et al., 2013) hanno ipotizzato che le due stimolazioni agiscano con meccanismi differenti. In particolare, la tDCS agisce depolarizzando i neuroni.

Tuttavia, il suo effetto di facilitazione iniziale è poi smorzato nel tempo dagli effetti omeostatici che contrastano l'aumento dell'eccitabilità corticale. Al contrario, la hf-tRNS sembra non risentire di questi effetti omeostatici. I ricercatori suggeriscono che questo tipo di stimolazione agisca facilitando il fenomeno della sommazione temporale degli stimoli fornendo tante piccole scariche sottosoglia. Così facendo, i neuroni diventano più sensibili ma solo se le scariche e gli altri stimoli sono abbastanza vicini nel tempo, quasi simultanei. Per questo, i miglioramenti si riscontrano solo se hf-tRNS viene applicata online, non offline.

Scopo della ricerca

Questo studio esplorativo nasce innanzitutto con l'idea di verificare e ampliare i risultati ottenuti dallo studio condotto da Fertonani et al. (2011) in merito all'utilizzo della hf-tRNS. Lo studio infatti ha dimostrato l'efficacia della hf-tRNS e la sua superiorità rispetto alle altre tecniche di tES in un compito ODT ma non ha fornito informazioni riguardo gli effetti della stimolazione in un training. Non si sa se il miglioramento dovuto dalla stimolazione è evidente anche dopo un training o se invece è comparabile con quello del gruppo di controllo con stimolazione sham. Lo studio di Fertonani, inoltre, non indaga la possibilità di generalizzazione del training. Per questo nel presente studio pilota i soggetti hanno svolto un test prima e uno dopo il training che misurava la performance in diverse condizioni. Miglioramenti in condizioni non allenate nel training suggerirebbero difatti un transfer.

Metodi

Soggetti

6 soggetti (M=5) hanno preso parte all'esperimento. Tutti i partecipanti erano destri con vista normale o corretta e hanno compilato il questionario di esclusione per l'elettrostimolazione, dimostrando di non aver avuto storie di traumi cranici, emicranie, epilessia o altri possibili criteri di esclusione. I partecipanti sono stati divisi in due gruppi da tre persone ciascuno, uno sperimentale e uno di controllo. Ognuno ha firmato e accettato il consenso informato e ricevuto un compenso di 25 euro al termine dell'esperimento. L'esperimento è stato valutato e approvato dal comitato etico della ricerca psicologia dell'Università degli studi di Padova.

Task di discriminazione dell'orientamento

Dato che lo studio è una parziale replica di quello di Fertonani (Fertonani et al., 2011), è stato scelto un compito di discriminazione dell'orientamento (Orientation Discrimination Task, ODT), un task molto studiato nell'ambito del VPL e che coinvolge aree di basso livello, stimulate nel gruppo sperimentale. Nel ODT task, ogni trial consisteva nella comparsa di due stimoli in sequenza. Il partecipante aveva il compito di decidere se il secondo stimolo era ruotato in senso orario o antiorario rispetto a quello precedente. Gli stimoli erano linee nere dalla lunghezza di 2° e dello spessore di $5'$. Per quanto riguarda l'orientamento, durante il training lo stimolo di riferimento veniva presentato nell'emipiano in alto a destra o in quello in basso a sinistra con un'inclinazione di 45° . Lo stimolo variabile, che compare in modo random prima o dopo quello di riferimento, aveva un angolo che variava in maniera casuale. Inizialmente, seguendo lo studio di Fertonani, la differenza angolare tra i due stimoli poteva essere di 1.1° , 1.21° , 1.33° , 1.46° . Gli angoli sono stati tuttavia settati a 0.1° , 0.4° , 0.7° , 1.1° , 1.3° , 1.6° , 1.9° , 2.2° per evitare che, con un training di più sessioni, si verificasse il floor effect per cui i partecipanti raggiungessero il massimo della performance rendendo difficile l'interpretazione dei dati. Nei due test, invece, le barre venivano presentate in tutti e 4 i quadranti, con orientamenti differenti. La procedura

dettagliata del test è spiegata nel paragrafo “Esperimento principale: procedura”. In ogni caso, tutti i parametri sperimentali sopra menzionati sono stati randomizzati e bilanciati tra i blocchi dell’esperimento e tra le varie sessioni del training. La struttura di ogni trial è descritta nella figura 1.

Ai partecipanti è stato chiesto di rispondere il più accuratamente possibile dopo che il secondo stimolo è comparso in senso orario o antiorario, premendo ‘L’ nel primo caso e ‘A’ nel secondo. In seguito, veniva dato un feedback visivo: il pallino di fissazione, nero di default, diventa verde in caso di risposta corretta e rosso altrimenti.

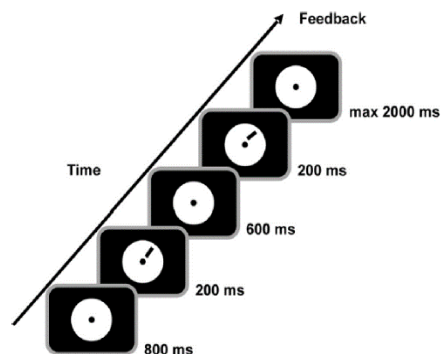


Figura 1: La struttura di ogni trial. Il partecipante osserva il punto di fissazione per 800ms, poi compare per 200 ms lo stimolo target. Seguono 600 ms e poi compare, per 200 ms, il secondo stimolo, ad un angolo variabile rispetto al primo. Il partecipante ha 2000 ms per rispondere, poi il programma fornisce il feedback e passa automaticamente al trial successivo (Fertonani et al., 2011).

Esperimento principale

Tecnica di stimolazione: hf-tRNS

La stimolazione è stata compiuta da un elettrostimolatore a batteria (modello BrainStim, EMS) attraverso due elettrodi immessi in spugnette imbevute di soluzione salina. La stimolazione consisteva in una corrente alternata di intensità di 1.5 mA e con un range di frequenza di 100-640 Hz. Nella situazione sperimentale, la stimolazione durava 25 minuti, mentre nella condizione di controllo (sham) la stimolazione si spegneva dopo 20s.

Gli elettrodi sono stati posizionati rispettando il sistema internazionale EEG 10-20. L’elettrodo attivo, con un’area di 16 cm², è stato posizionato in Oz secondo il sistema internazionale EEG 10-20, in modo da stimolare le aree visive precoci. L’elettrodo di riferimento, invece, dall’area di 60 cm² (un rettangolo 10cm X 6

cm), è stato posizionato su Cz. Gli elettrodi sono stati tenuti in posizione da bande elastiche.

Procedura

La ricerca consisteva in un disegno sperimentale tra i soggetti composto da 10 sessioni: 1 pre-test, 8 sessioni di training, 1 post-test.

Training

I soggetti hanno eseguito un training di 8 sessioni separate da 1 a 3 giorni l'una dall'altra. Ogni sessione era una parziale riproduzione dell'esperimento di Fertoni: i partecipanti sedevano a 57cm dallo schermo in una stanza buia e tranquilla, venivano montati gli elettrodi e, subito dopo che l'elettrostimolatore confermava il controllo per l'impedenza, i partecipanti iniziavano l'ODT. La durata dell'intera sessione teneva circa 45 minuti.

Test

I soggetti dovevano svolgere due test, uno prima e uno alla fine del compito. Il setting dei test era identico al training ma senza montaggio degli elettrodi - quindi senza stimolazione o placebo. I test, uguali per entrambi i gruppi, consistevano in 8 blocchi da 64 trial ciascuno.

In totale sono state sperimentate 4 situazioni diverse, come mostrato nella figura 2: stimoli negli emipiani in alto a destra e in basso a sinistra con stimolo di riferimento a 45° (condizione A, come nel training), stimoli negli emipiani in alto a sinistra e in basso a destra con gli stimoli orientati allo stesso modo (quindi a 45°, condizione B), stimoli nella stessa posizione del training (quindi emipiani in alto a destra e in basso a sinistra) ma orientati a 135° (condizione C) e infine stimoli negli emipiani in alto a destra e in basso a sinistra orientati in maniera diversa rispetto al training (a 135°, condizione D). Ogni situazione è stata testata in 2 blocchi per un totale di 8 blocchi. Sono state indagate 4 situazioni per verificare la possibilità, in seguito al training, di generalizzare il VPL.

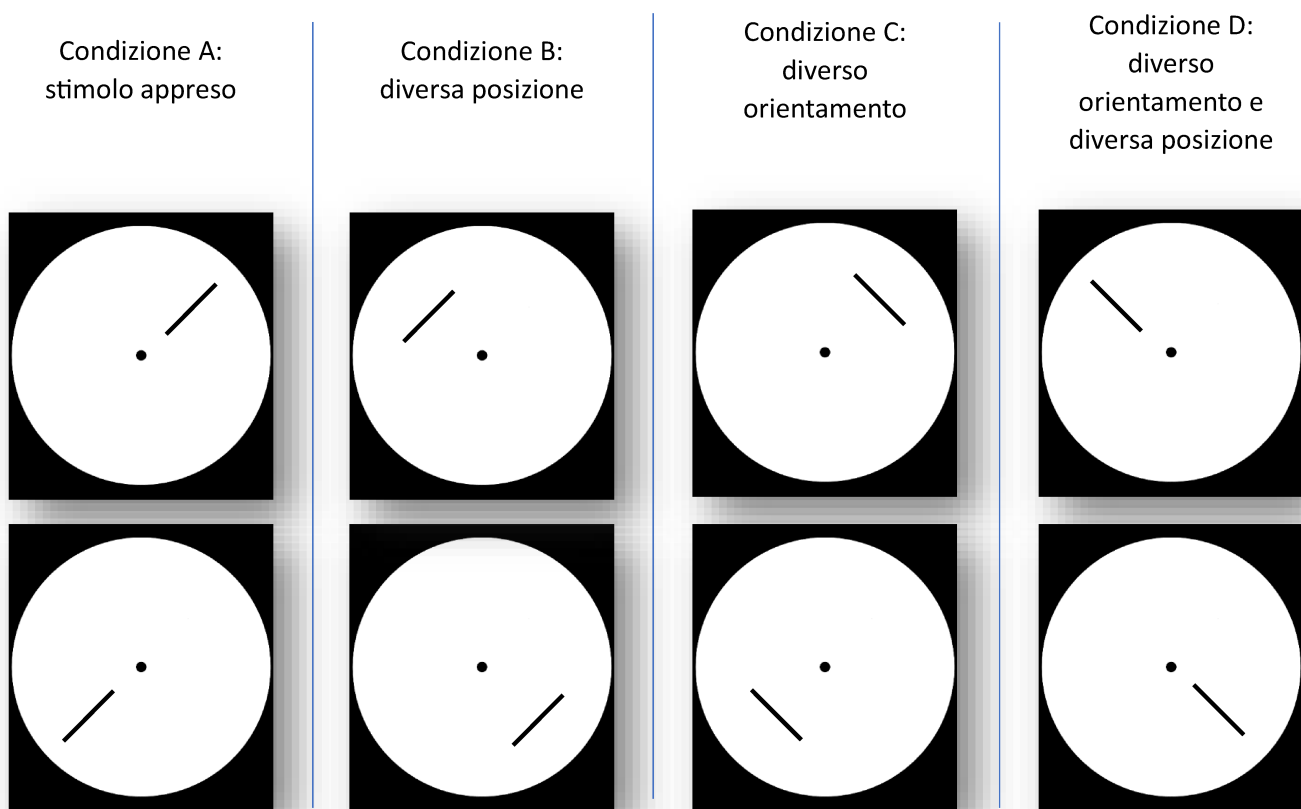


Figura 2: le quattro condizioni sperimentate nei test. La condizione A è la stessa del training.

Analisi dei dati

Per quanto riguarda l'analisi dei dati, è stato inizialmente calcolato lo slope, l'intercetta e la soglia per ogni soggetto, per ogni condizione e per ogni sessione. Dato che ogni test aveva 4 condizioni diverse e che il training presentava 8 sessioni diverse, abbiamo analizzato un totale di 16 condizioni per ogni partecipante. Per la soglia, è stato considerato un confidence level del 75%, vale a dire quel valore al quale il soggetto risponde correttamente al 75% dei casi. Purtroppo, l'esiguo numero di partecipanti unito alla grande variabilità dei dati ci ha costretto a praticare altri tipi di analisi. Sono stati presi in considerazione quindi solo i trial che presentavano le differenze angolari di 1.9° e 2.2° (le maggiori) ed è stata valutata l'entità della generalizzazione, confrontando le varie condizioni nel test iniziale rispetto a quello finale.

Risultati e discussione

In questo studio esplorativo, il campione è troppo piccolo e i dati ottenuti sono troppo variabili per poter effettuare delle analisi accurate, per cui si è compiuta una semplice indagine descrittiva. Alcuni soggetti non hanno svolto correttamente il test iniziale, rendendo alcuni dati poco utili. Nonostante ciò, sono stati osservati dei leggeri miglioramenti durante il training, come ci aspettavamo. I livelli di confidenza, ossia il valore dell'angolo per cui il soggetto risponde correttamente al 75% dei trial, sembrano diminuire, seppur molto leggermente, con il progredire delle sessioni (vedere la figura 3). Dall'analisi dello slope e dell'intercetta non sono emersi risultati apprezzabili. Si spera che, raccogliendo dati di migliore qualità da un numero maggiore di soggetti, si possa verificare se questi piccoli miglioramenti sono frutto del caso o del training. Si spera inoltre di chiarificare che ruolo abbia avuto la hf-tRNS.

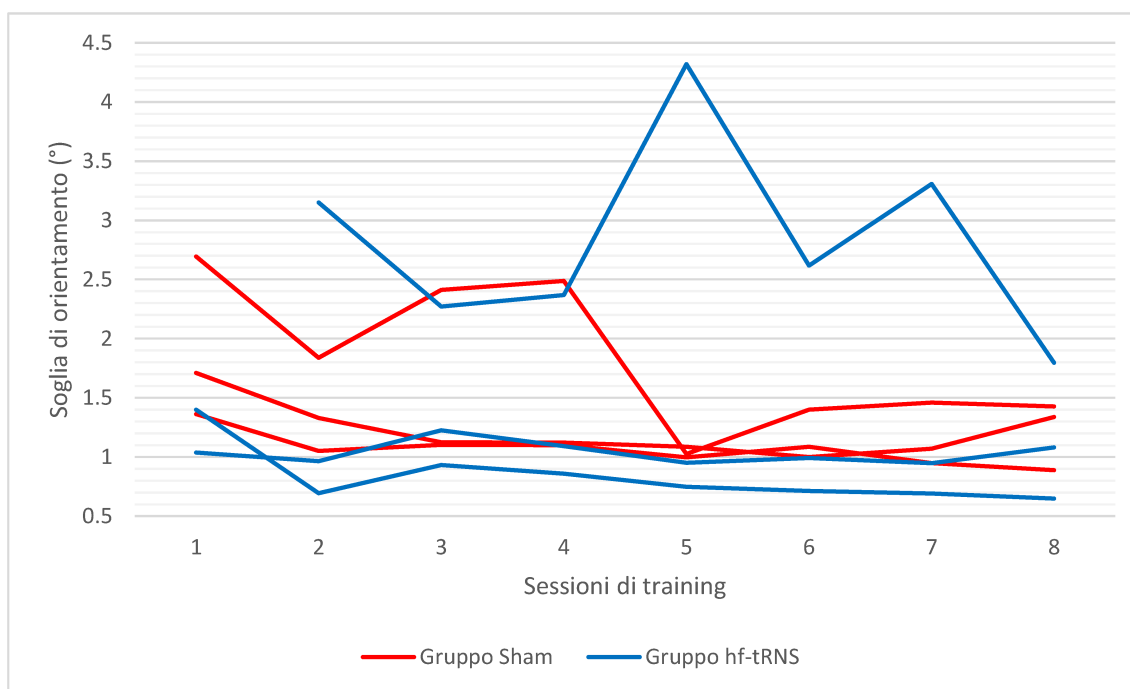


Figura 3 Il grafico mostra un lieve decremento della soglia di orientamento durante il training, che suggerisce un miglioramento delle performance.

Nota: i dati della prima sessione di un partecipante del gruppo stimolato sono stati omessi perché il confidence level era troppo elevato.

Per quanto riguarda l'ambito del transfer, i dati sembrano più promettenti. Si sono analizzate solo le differenze angolari maggiori (quindi 1.9° o 2.2°) poiché alcuni soggetti, purtroppo, non avevano compreso appieno il task durante il test iniziale e i dati forniti con gli angoli minori sono di scarsa utilità. Da questi dati, tuttavia, sembrerebbe emergere una possibile generalizzazione del training (vedere la figura 4). La performance dei partecipanti pare essere maggiore nel test finale in ogni condizione, non solo in quella allenata dal training. Infatti, durante l'esperimento i soggetti sono stati allenati a distinguere gli stimoli negli emisferi in alto a destra o in basso a sinistra inclinati a 45° . Il miglioramento della performance avvenuto anche negli altri emisferi e con stimoli inclinati a 135° suggerisce la possibilità di un transfer. Parte del miglioramento è probabilmente dovuto al fatto che alcuni soggetti non erano pienamente confidenti con il compito durante lo svolgimento del test iniziale, mentre lo erano nel test finale dopo il training. Questa spiegazione da sola non è tuttavia sufficiente a spiegare interamente i dati ottenuti: anche i soggetti che hanno svolto molto bene il compito fin da subito sembrano effettivamente migliorati in ogni condizione. E' necessario anche in questo caso quindi raccogliere altri dati sia per confermare e misurare l'entità del transfer sia per comprendere il ruolo della stimolazione in questo fenomeno.

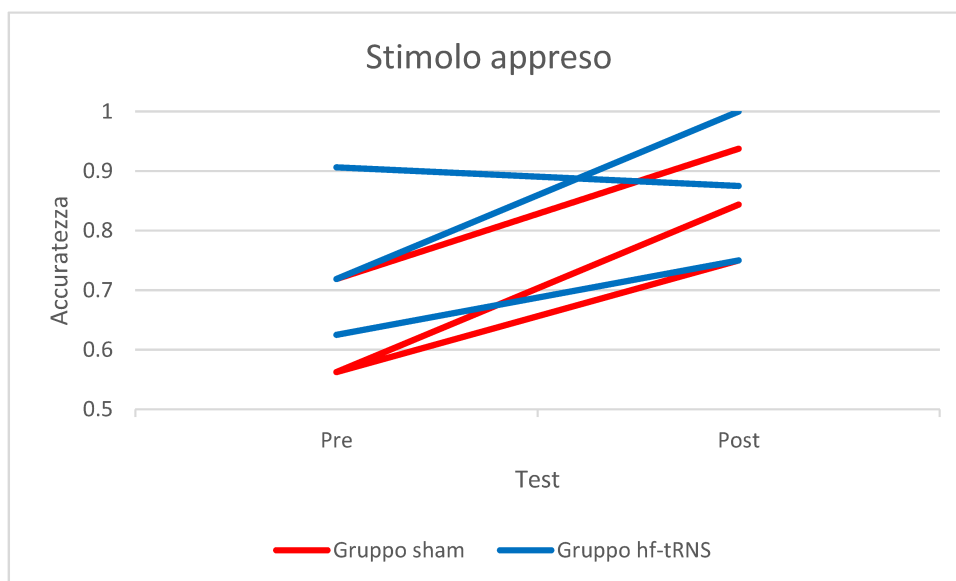
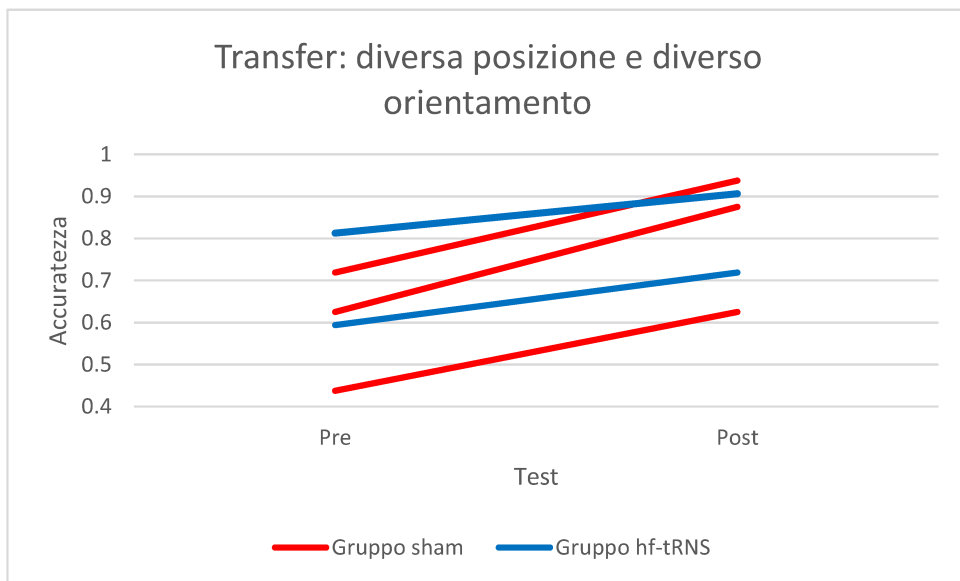
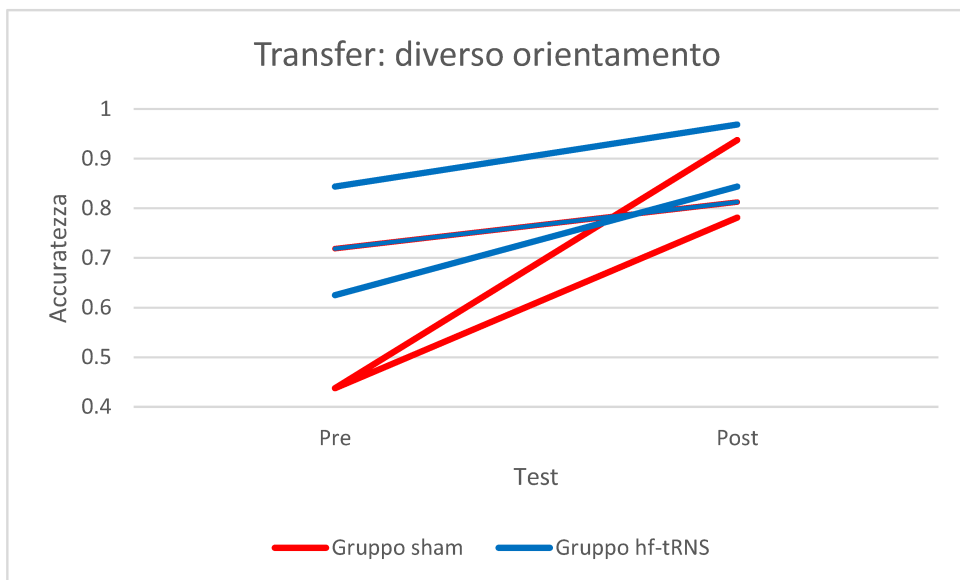
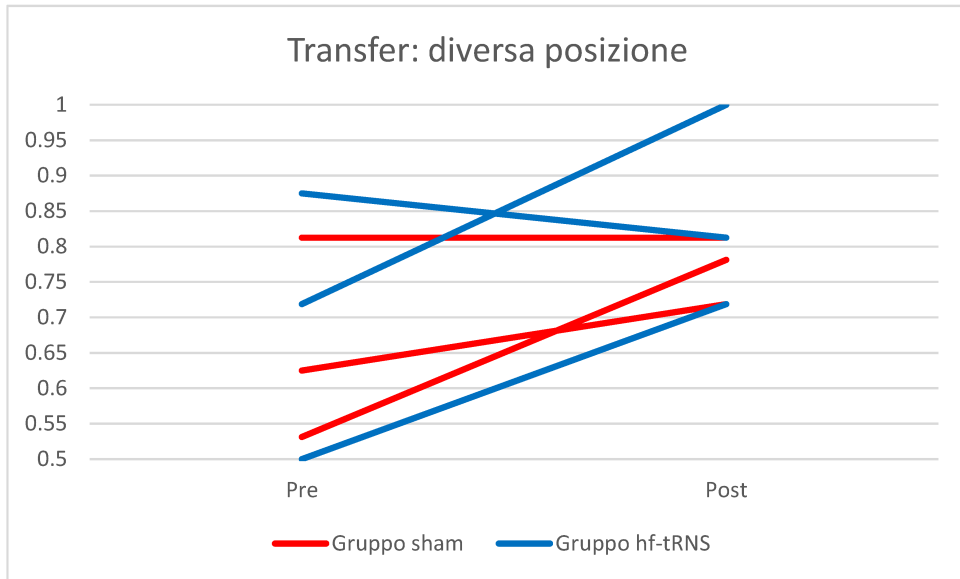


Figura 4: Questi 4 grafici mettono a confronto i risultati dei test prima e dopo il training per le 4 condizioni sperimentali. Si può notare come, tendenzialmente, l'accuratezza sia aumentata sia nella condizione allenata che nelle altre condizioni testate. Questo suggerisce la possibilità di un transfer.



Limiti e future direzioni

Come citato in precedenza, questo studio pilota è stato condotto con soli 6 soggetti, troppi pochi per ottenere dati apprezzabili. I dati raccolti, inoltre, mostrano una grande variabilità, il che rende la loro interpretazione più problematica. Alcuni soggetti hanno avuto bisogno di un'intera sessione prima di diventare pratici del task. I dati ottenuti da questi soggetti riguardanti le prime sessioni sono quindi da ritenersi poco affidabili.

In futuro, è necessario raccogliere altri dati da un campione decisamente più ampio. E' consigliabile valutare di introdurre una sessione di prova per i volontari che faticano a svolgere il task correttamente al primo tentativo. Con più dati e di maggiore qualità, sarà possibile analizzare i miglioramenti dovuti al training e il ruolo della hf-tRNS su più sessioni. Sarà inoltre possibile indagare la generalizzazione del training: il presente studio suggerisce la possibilità di transfer per le differenze angolari più accentuate, ma rimane da dimostrare statisticamente questo fenomeno, da valutare se avviene anche con differenze angolari minori, da capire se la stimolazione possa aiutare o meno.

Studiare il VPL ci aiuta a comprendere meglio come funziona il sistema nervoso e la plasticità neuronale, ma non è importante solo per fini teorici: questo fenomeno, infatti, trova ampio spazio anche in un livello pratico, in particolare per quanto riguarda la riabilitazione e il trattamento di alcuni difetti visivi come l'ambliopia (Levi, 2020; Levi & Li, 2009; Tsirlin et al., 2015) o la miopia (Camilleri et al., 2014; Yan et al., 2015). Alcuni studi (Camilleri et al., 2014; Levi & Li, 2009; Tsirlin et al., 2015) suggeriscono l'efficacia del VPL in questo ambito, tuttavia molta altra ricerca deve essere fatta.

Il VPL racchiude un ambito della psicologia della percezione estremamente vario e in continua evoluzione; studiarlo e indagare quali sono i fattori che lo influenzano è molto importante sia per capire meglio come funziona la plasticità sia per possibili scopi applicativi nella riabilitazione.

Bibliografia

Ahissar, M., & Hochstein, S. (1997). Task difficulty and the specificity of perceptual learning. *Nature*, 387(6631), Article 6631.
<https://doi.org/10.1038/387401a0>

Camilleri, R., Pavan, A., Ghin, F., Battaglini, L., & Campana, G. (2014). Improvement of uncorrected visual acuity and contrast sensitivity with perceptual learning and transcranial random noise stimulation in individuals with mild myopia. *Frontiers in Psychology*, 5.
<https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpsyg.2014.01234>

Donovan, I., & Carrasco, M. (2018). Endogenous spatial attention during perceptual learning facilitates location transfer. *Journal of Vision*, 18(11), 7.
<https://doi.org/10.1167/18.11.7>

Donovan, I., Szpiro, S., & Carrasco, M. (2015). Exogenous attention facilitates location transfer of perceptual learning. *Journal of Vision*, 15(10), 11.
<https://doi.org/10.1167/15.10.11>

Dosher, B. A., Jeter, P., Liu, J., & Lu, Z.-L. (2013). An integrated reweighting theory of perceptual learning. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 110(33), 13678–13683. <https://doi.org/10.1073/pnas.1312552110>

Dosher, B. A., & Lu, Z.-L. (1998). Perceptual learning reflects external noise filtering and internal noise reduction through channel reweighting. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 95(23), 13988–13993.
<https://doi.org/10.1073/pnas.95.23.13988>

Dosher, B. A., & Lu, Z.-L. (1999). Mechanisms of perceptual learning. *Vision Research*, 39(19), 3197–3221. [https://doi.org/10.1016/S0042-6989\(99\)00059-0](https://doi.org/10.1016/S0042-6989(99)00059-0)

Dosher, B. A., & Lu, Z.-L. (2009). Hebbian reweighting on stable representations in perceptual learning. *Learning & Perception*, 1(1), 37–58. <https://doi.org/10.1556/lp.1.2009.1.4>

Dosher, B., & Lu, Z.-L. (2017). Visual Perceptual Learning and Models. *Annual Review of Vision Science*, 3(1), 343–363. <https://doi.org/10.1146/annurev-vision-102016-061249>

Dosher, B., & Lu, Z.-L. (2020). *Perceptual Learning: How Experience Shapes Visual Perception*. MIT Press.

Fertonani, A., Pirulli, C., & Miniussi, C. (2011). Random Noise Stimulation Improves Neuroplasticity in Perceptual Learning. *The Journal of Neuroscience*, 31(43), 15416–15423. <https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.2002-11.2011>

Jeter, P. E., Dosher, B. A., Liu, S.-H., & Lu, Z.-L. (2010). Specificity of perceptual learning increases with increased training. *Vision Research*, 50(19), 1928–1940. <https://doi.org/10.1016/j.visres.2010.06.016>

Levi, D. M. (2020). Rethinking amblyopia 2020. *Vision Research*, 176, 118–129. <https://doi.org/10.1016/j.visres.2020.07.014>

Levi, D. M., & Li, R. W. (2009). Perceptual learning as a potential treatment for amblyopia: A mini-review. *Vision Research*, 49(21), 2535–2549. <https://doi.org/10.1016/j.visres.2009.02.010>

Lu, Z.-L., & Doshier, B. A. (2022). Current directions in visual perceptual learning. *Nature Reviews Psychology*, 1(11), 654–668. <https://doi.org/10.1038/s44159-022-00107-2>

Lu, Z.-L., Hua, T., Huang, C.-B., Zhou, Y., & Doshier, B. A. (2011). Visual perceptual learning. *Neurobiology of Learning and Memory*, 95(2), 145–151. <https://doi.org/10.1016/j.nlm.2010.09.010>

Moliadze, V., Antal, A., & Paulus, W. (2010). Electrode-distance dependent after-effects of transcranial direct and random noise stimulation with extracephalic reference electrodes. *Clinical Neurophysiology*, 121(12), 2165–2171. <https://doi.org/10.1016/j.clinph.2010.04.033>

Nitsche, M. A., Schauenburg, A., Lang, N., Liebetanz, D., Exner, C., Paulus, W., & Tergau, F. (2003). Facilitation of Implicit Motor Learning by Weak Transcranial Direct Current Stimulation of the Primary Motor Cortex in the Human. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 15(4), 619–626. <https://doi.org/10.1162/089892903321662994>

Pirulli, C., Fertonani, A., & Miniussi, C. (2013). The Role of Timing in the Induction of Neuromodulation in Perceptual Learning by Transcranial Electric Stimulation. *Brain Stimulation*, 6(4), 683–689. <https://doi.org/10.1016/j.brs.2012.12.005>

Sathian, K. (1998). Perceptual learning. *Current Science*, 75(5), 451–457.

Shibata, K., Sagi, D., & Watanabe, T. (2014). Two-stage model in perceptual learning: Toward a unified theory: Two-stage model in perceptual learning. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 1316(1), 18–28. <https://doi.org/10.1111/nyas.12419>

Sotiropoulos, G., Seitz, A. R., & Seriès, P. (2011). Perceptual learning in visual hyperacuity: A reweighting model. *Vision Research*, 51(6), 585–599. <https://doi.org/10.1016/j.visres.2011.02.004>

Sowden, P. T., Rose, D., & Davies, I. R. L. (2002). Perceptual learning of luminance contrast detection: Specific for spatial frequency and retinal location but not orientation. *Vision Research*, 42(10), 1249–1258. [https://doi.org/10.1016/S0042-6989\(02\)00019-6](https://doi.org/10.1016/S0042-6989(02)00019-6)

Terney, D., Chaieb, L., Moliadze, V., Antal, A., & Paulus, W. (2008). Increasing Human Brain Excitability by Transcranial High-Frequency Random Noise Stimulation. *The Journal of Neuroscience*, 28(52), 14147–14155. <https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.4248-08.2008>

Tsirlin, I., Colpa, L., Goltz, H. C., & Wong, A. M. F. (2015). Behavioral Training as New Treatment for Adult Amblyopia: A Meta-Analysis and Systematic Review. *Investigative Ophthalmology & Visual Science*, 56(6), 4061–4075. <https://doi.org/10.1167/iovs.15-16583>

Watanabe, T., & Sasaki, Y. (2015). Perceptual Learning: Toward a Comprehensive Theory. *Annual Review of Psychology*, 66(1), 197–221. <https://doi.org/10.1146/annurev-psych-010814-015214>

Yan, F.-F., Zhou, J., Zhao, W., Li, M., Xi, J., Lu, Z.-L., & Huang, C.-B. (2015). Perceptual learning improves neural processing in myopic vision. *Journal of Vision*, 15(10), 12. <https://doi.org/10.1167/15.10.12>

Yang, X.-Y., He, Q., & Fang, F. (2022). Transcranial direct current stimulation over the visual cortex facilitates awake consolidation of visual perceptual learning. *Brain Stimulation*, 15(2), 380–382. <https://doi.org/10.1016/j.brs.2022.01.019>