



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI  
PADOVA

**Dipartimento di PSICOLOGIA GENERALE**

Corso di laurea triennale in  
**SCIENZE PSICOLOGICHE COGNITIVE  
E PSICOBIOLOGICHE**

Tesi di laurea triennale

**Esplorazione delle Interferenze nell'Apprendimento  
Percettivo: uno Studio Sperimentale**

Exploring Interference in Perceptual Learning: an Experimental Study

RELATORE  
**Prof. Luca Battaglini**

LAUREANDA: **Paola Cigala**

MATRICOLA: **2047927**

Anno Accademico: 2023/2024



# INDICE

<b>ABSTRACT</b> .....	4
<b>INTRODUZIONE</b> .....	5
<b>CAPITOLO 1</b>	
1.1 L'apprendimento percettivo visivo - VPL.....	6
1.1.1 Specificità e transfer.....	7
1.1.2 Meccanismi dell'apprendimento percettivo visivo.....	9
1.1.3 Effetto delle pause nel VPL .....	12
1.2 Modelli dell'apprendimento percettivo visivo.....	14
1.3 Plasticità cerebrale e apprendimento percettivo.....	16
<b>CAPITOLO 2</b>	
2.1 Obiettivo e Ipotesi sperimentali.....	19
2.2 Metodo.....	20
2.2.1 Partecipanti.....	21
2.2.2 Strumenti e stimoli.....	21
2.2.3 Procedura sperimentale .....	22
2.3 Risultati.....	26
2.4 Discussione generale.....	32
<b>LIMITI E SVILUPPI FUTURI</b> .....	35
<b>BIBLIOGRAFIA</b> .....	39

## ABSTRACT

Questa tesi esplora le dinamiche dell'apprendimento percettivo, un processo che migliora le capacità di percezione e riconoscimento degli stimoli attraverso l'esperienza e la pratica. Tale miglioramento si traduce in una maggiore abilità del cervello nell'interpretare le informazioni sensoriali, incrementando la capacità di discriminare, identificare e categorizzare gli stimoli. È stato replicato in parte l'esperimento di Shibata et al. (2017), svolgendolo in due giorni consecutivi. Il presente studio coinvolge un soggetto sottoposto a due sessioni di apprendimento percettivo con stimoli e pause differenti.

Il paradigma sperimentale è entro i partecipanti, gli stimoli utilizzati sono stimoli Gabor patch con tre orientazioni diverse ( $10^\circ$ ,  $70^\circ$ ,  $130^\circ$ ). Le due condizioni previste sono una pausa di 15 minuti e una di 3,5 ore. Nel primo giorno, il soggetto affronta una fase di pre-training in cui vengono testate tutte e tre le orientazioni, seguita da una fase di training in cui due orientazioni vengono allenate entrambe tramite otto blocchi, separati da un intervallo di 15 minuti o 3,5 ore. Nel secondo giorno, il soggetto partecipa a una fase di post-training in cui vengono nuovamente testate tutte e tre le orientazioni.

Nella condizione con pausa di 3,5 ore, ci si aspetta che il cervello abbia il tempo necessario per consolidare l'apprendimento del primo allenamento, migliorando entrambe le orientazioni allenate senza interferenze, grazie ad una riduzione dello stato di plasticità del cervello presente nella condizione di allenamento e a una maggiore attività inibitoria che stabilizza le nuove competenze. Nella condizione con pausa di 15 minuti, si prevede un miglioramento solo per la seconda orientazione, poiché la prima subisce interferenze retroattive dalla seconda. Questo intervallo breve potrebbe causare interferenze, con effetti negativi sulle prestazioni.

In conclusione, esplorare l'interferenza retrograda è utile per comprendere il tempo necessario al consolidamento delle informazioni, determinare l'intervallo minimo tra le sessioni che evita interferenze e identificare possibili applicazioni cliniche.

## INTRODUZIONE

L'apprendimento percettivo si riferisce ai cambiamenti duraturi e sistematici nella capacità di percepire stimoli attraverso l'esperienza e la pratica. Questi cambiamenti non sono limitati ad un singolo senso, ma possono interessare diverse modalità sensoriali, tra cui la vista, l'udito, il tatto, e anche la percezione del gusto e dell'olfatto. Diversi studiosi si sono chiesti in che modo l'apprendimento percettivo si differenzia dalle altre tipologie di apprendimento, Gibson (1963) ha definito l'apprendimento percettivo come un cambiamento relativamente permanente e coerente nella percezione di un insieme di stimoli, derivante dalla pratica o dall'esperienza con tali stimoli. L'apprendimento percettivo è influenzato da vari fattori, tra cui la durata e la frequenza dell'esposizione agli stimoli, la natura degli stimoli stessi, e le caratteristiche individuali dei partecipanti. Numerosi studi hanno dimostrato che anche brevi periodi di training percettivo possono portare a miglioramenti significativi nelle prestazioni, evidenziando la plasticità del sistema percettivo umano. Dal punto di vista neurobiologico, l'apprendimento percettivo è associato a cambiamenti nella struttura e nella funzione del cervello. Le tecniche di neuroimaging, come la risonanza magnetica funzionale (fMRI) e l'elettroencefalografia (EEG), hanno permesso di osservare come l'attività cerebrale si modifichi in risposta al training percettivo. Questi studi hanno rivelato che l'apprendimento percettivo comporta non solo un aumento dell'efficienza nei processi neurali, ma anche una riorganizzazione delle reti neuronali coinvolte nella percezione (Gold & Watanabe 2010, Sagi 2011, Kourtzi & DiCarlo 2006, Schoups et al. 2001). L'apprendimento percettivo rappresenta un campo di ricerca dinamico e in continua evoluzione, con implicazioni significative per la comprensione dei meccanismi neurali alla base della percezione e dell'apprendimento. Comprendere come l'esperienza possa modellare e affinare le nostre capacità percettive offre non solo una finestra sui processi cognitivi fondamentali, ma anche potenziali applicazioni in ambiti quali la riabilitazione neuropsicologica. Quindi l'apprendimento percettivo non è limitato a un paradigma di ricerca di base, ma ha recentemente trovato applicazione anche al di fuori del contesto di laboratorio. È stato utilizzato per trattare clinicamente varie condizioni visive invalidanti come l'ambliopia (Levi & Li, 2009), la miopia (Tan & Fong, 2008) e la presbiopia (Polat, et al. 2012).

# CAPITOLO 1

## 1.1 L'apprendimento percettivo visivo -VPL

Il presente studio esplora in modo dettagliato i meccanismi dell'apprendimento percettivo visivo (Visual Perceptual Learning - VPL), una forma di plasticità neuronale che porta a un miglioramento significativo delle prestazioni attraverso l'allenamento del partecipante nell'esecuzione di un compito. Il VPL rappresenta un campo di ricerca cruciale nel comprendere come il cervello possa adattarsi e migliorare la propria efficienza nel trattare le informazioni visive, anche nell'età adulta. Il sistema visivo è una macchina complessa di elaborazione, composta da numerose aree e moduli che coordinano un intricato flusso di informazioni percettive (Van Essen et al. 1992). Questa complessità permette di elaborare informazioni visive in modo rapido e preciso, grazie alla cooperazione di diverse aree corticali, tra cui la corteccia visiva primaria (V1) e le aree visive associative. L'abilità di migliorare le prestazioni attraverso l'apprendimento percettivo suggerisce che il cervello mantiene una notevole plasticità anche in età adulta, sfidando l'idea che la maggior parte della plasticità neuronale sia confinata ai primi anni di vita. Negli adulti, la prestazione in molti compiti visivi spesso non è ottimale ma può essere notevolmente migliorata con il giusto tipo di allenamento o pratica (Lu et al. 2011). L'apprendimento percettivo visivo consente agli individui di aumentare la loro sensibilità a specifici stimoli visivi, migliorando così la loro capacità di discriminare tra differenti pattern visivi, riconoscere dettagli fini e rispondere più velocemente agli stimoli visivi. L'apprendimento percettivo di solito richiede molte prove pratiche distribuite su giorni o settimane (Doshier & Lu 1998); tuttavia, in alcuni casi, l'esposizione a stimoli semplici può accelerare il processo di apprendimento (Liu et al. 2012). In alcuni contesti, l'apprendimento iniziale può avvenire in poche decine di prove (Ramachandran & Braddick 1973), suggerendo che alcune forme di apprendimento possono avvenire rapidamente sotto le giuste condizioni. Alcuni studi hanno evidenziato che il sonno REM è cruciale per l'apprendimento percettivo, specialmente nella discriminazione delle texture (Karni & Sagi 1991). Il sonno non solo consolida l'apprendimento, ma può anche potenziare le connessioni neuronali coinvolte nel compito di apprendimento, facilitando la memorizzazione a lungo termine delle abilità apprese.

Gli effetti del training possono durare per anni, dimostrando la longevità delle modifiche indotte dall'apprendimento percettivo (Karni & Sagi, 1993). Questo suggerisce che il VPL non solo migliora le prestazioni a breve termine, ma può anche avere effetti duraturi sulla capacità percettiva dell'individuo.

### **1.1.1 Specificità e transfer**

La specificità del Visual Perceptual Learning (VPL), intesa come la perdita dei progressi ottenuti quando si modificano stimoli o compiti, è stata documentata rispetto a diverse caratteristiche come orientazione, frequenza spaziale, direzione del movimento, pattern e persino posizione nel campo visivo (Ball & Sekuler, 1982; Doshier & Lu, 1999; Fahle & Edelman, 1993; Fiorentini & Berardi, 1980; Karni & Sagi, 1991; Schoups et al., 1995). Il miglioramento ottenuto in una parte specifica del campo visivo è considerato particolarmente significativo, portando alcuni ricercatori a suggerire che il VPL sia connesso alla plasticità della corteccia visiva primaria (V1), la quale è caratterizzata da piccoli campi recettivi retinotopici. Anche se la letteratura ha sottolineato la specificità del VPL, questo fenomeno è spesso graduato, combinando specificità e transfer dei miglioramenti acquisiti a stimoli, compiti o posizioni diverse (Doshier & Lu, 2009). Il transfer implica la generalizzazione di un apprendimento a stimoli, condizioni o compiti differenti rispetto a quelli specifici dell'allenamento. Questo è particolarmente rilevante nelle applicazioni pratiche, come lo sviluppo di abilità o la riabilitazione, dove è l'obiettivo è quello di ottenere benefici che superino le condizioni iniziali di allenamento. Siamo a conoscenza che la specificità o il transfer dell'allenamento possono dipendere da vari fattori, tra cui il livello di elaborazione del compito allenato (Fine & Jacobs, 2002), la difficoltà del compito (Ahissar & Hochstein, 1993; Liu, 1999), la precisione del compito di transfer (Jeter et al., 2009), la quantità di allenamento (Jeter et al., 2010), lo stato di adattamento indotto dall'allenamento (Censor et al., 2006) e le modalità specifiche di allenamento e transfer (Hung & Seitz, 2014; Xiao et al., 2008). I compiti più difficili tendono a generare maggiore specificità. Una questione cruciale nel VPL è quanto sia specifico per il compito allenato. Se una persona viene allenata su un compito e poi valutata su un compito correlato, quanto di tale allenamento sarà trasferibile?

La risposta è variabile. Se le prestazioni nel secondo compito mostrano poco o nessun miglioramento, si considera che l'apprendimento sia specifico. Se invece l'allenamento migliora le prestazioni nel secondo compito, si parla di transfer dell'apprendimento. Non bisogna, però, pensare in termini assoluti, come se un compito fosse totalmente specifico o totalmente generalizzabile; di solito, si osserva una specificità parziale o un transfer limitato. Le prime ricerche sulla percezione suggerivano che il sistema visivo primario, altamente plastico durante l'infanzia, rimanesse relativamente stabile nell'età adulta (Held & Hein 1963, Blakemore & Cooper 1970, Banks et al. 1975). Tuttavia, se negli adulti l'apprendimento si dimostrava specifico per la posizione retinica, come indicato dagli studi, si poteva ragionevolmente concludere che V1, nota per i suoi piccoli campi recettivi, fosse molto più plastica di quanto si credesse. I tipi di transfer più studiati nel VPL includono il transfer della posizione nella retina o nell'occhio (location transfer), il transfer del tipo di stimoli (stimulus transfer) e il transfer del tipo di compito (task transfer). Il transfer di posizione (location transfer) si verifica quando, dopo un periodo di allenamento, i compiti e gli stimoli vengono testati in una diversa posizione retinica o spaziale rispetto a quella utilizzata durante l'allenamento. La presenza di location transfer può suggerire che l'apprendimento si è verificato a livelli corticali dove è ancora presente una rappresentazione retinotopica o spaziotopica. Ad esempio, un miglioramento in un compito di rilevamento del contrasto potrebbe non trasferirsi a una posizione diversa nella retina, suggerendo che l'apprendimento è stato specifico per la posizione allenata (Sowden et al., 2002). Per studiare il transfer di stimoli (stimulus transfer), si usano stimoli con caratteristiche diverse rispetto a quelli impiegati durante l'allenamento. Ad esempio, si può addestrare un partecipante con stimoli Gabor orientati orizzontalmente e poi testare il transfer con stimoli Gabor orientati verticalmente. Il successo o il fallimento di tale transfer può indicare a quale livello del sistema visivo si è verificato l'apprendimento. Se lo stimolo è specifico, si può concludere che l'apprendimento avviene in aree visive che trattano determinate caratteristiche degli stimoli, come l'orientazione. Il transfer di compito (task transfer) viene esaminato chiedendo ai partecipanti di eseguire un compito diverso da quello per cui sono stati allenati. Ad esempio, dopo un periodo di addestramento in un compito di discriminazione del contrasto, si potrebbe verificare il transfer facendo eseguire ai partecipanti un compito di rilevamento del movimento. La mancanza di task transfer indicherebbe un apprendimento



altamente specifico per il compito allenato, mentre un transfer positivo suggerirebbe la capacità di generalizzare l'apprendimento ad altri compiti. Secondo quanto affermato, specificità e transfer non sono concetti dicotomici; spesso si riscontra una specificità parziale o un transfer parziale. Ad esempio, nel compito di rilevamento del contrasto descritto da Sowden et al. (2002), i partecipanti hanno mostrato un apprendimento specifico per la posizione retinica, ma l'apprendimento si è generalizzato per quanto riguarda l'orientazione degli stimoli. Ciò indica che alcune caratteristiche del VPL possono essere trasferite a diverse condizioni, mentre altre rimangono specifiche alle condizioni di allenamento. In conclusione, il Visual Perceptual Learning (VPL) è generalmente un fenomeno altamente specifico, ma in certe circostanze l'effetto dell'allenamento può essere generalizzato.

### **1.1.2 Meccanismi dell'apprendimento percettivo visivo**

L'apprendimento percettivo è un esempio di plasticità cerebrale, che dimostra la capacità del cervello di riorganizzarsi per ottimizzare le prestazioni percettive. Questo processo comporta cambiamenti nelle connessioni sinaptiche e l'ottimizzazione delle reti neurali, spesso localizzate nelle aree corticali sensoriali primarie e associative. Nonostante i meccanismi alla base dell'apprendimento percettivo visivo (VPL) non siano completamente compresi, si ritiene che coinvolgano l'incremento del rapporto segnale-rumore, la riduzione del rumore intrinseco e il miglioramento dell'efficacia delle rappresentazioni neurali degli stimoli sensoriali. L'apprendimento percettivo è spesso specifico per determinate caratteristiche dello stimolo, come l'orientazione o la frequenza spaziale, e mostra una limitata generalizzazione a compiti o contesti diversi. Questo suggerisce che si basi su modifiche precise nei canali sensoriali e nei circuiti neurali coinvolti nel processamento degli stimoli. L'analisi della corteccia visiva, complessa per natura, è limitata dal rapporto segnale-rumore (Lu & Doshier 2008). Ogni atto di rilevamento, discriminazione o identificazione visiva è influenzato dalla capacità di estrarre segnali significativi dal rumore, che può essere intrinseco, ovvero variabilità nelle risposte neurali a uno stimolo, o estrinseco, cioè variabilità negli stimoli stessi.

Il rapporto segnale-rumore determina l'accuratezza e la velocità della risposta in compiti di identificazione o scelta. Pertanto, l'apprendimento percettivo mira a migliorare questo rapporto sia attraverso l'estrazione di segnali più precisi che attraverso la riduzione del rumore. Le modalità attraverso cui l'apprendimento percettivo incrementa le prestazioni possono essere analizzate mediante la Signal Detection Theory (SDT) e modelli correlati (Ahissar & Hochstein 2004, Petrov et al. 2005, Lu & Doshier 2008, Eckstein 2011). Queste analisi valutano la capacità dell'osservatore di distinguere un segnale target da due tipi di rumore: intrinseco, derivante dai processi neurali, ed estrinseco, causato da stimoli concorrenti. Per ottenere una discriminazione efficace, i segnali devono essere estratti dal rumore ambientale (esterno) e dalla variabilità intrinseca (interna). In sintesi, il VPL migliora il rapporto segnale-rumore (signal to noise ratio - SNR), che limita le prestazioni percettive, mediante il filtraggio del rumore esterno, l'amplificazione del segnale rispetto al rumore e il cambiamento del guadagno del sistema (Watanabe & Sasaki 2015, Lu & Doshier 2008, Schoups et al. 2001, Li et al. 2004). Qualunque sia il compito percettivo, l'apprendimento utilizza uno o più di questi meccanismi. Attraverso tecniche di neuroimaging e studi comportamentali, i ricercatori continuano a esplorare come i meccanismi dell'apprendimento percettivo possano essere sfruttati per sviluppare interventi terapeutici e migliorare abilità sensoriali in vari contesti (Sasaki et al. 2010, Levi & Li 2009, Polat 2009, Seitz & Dinse 2007). L'esplorazione di questi meccanismi ci permette non solo di comprendere meglio le capacità adattive del cervello umano, ma anche di applicare queste conoscenze in diversi ambiti. Negli ultimi anni sono emersi vari modelli teorici, tra cui il Modello del Template Percettivo (Perceptual template model - PTM), considerato tra i più efficaci nel chiarire come le persone affinano la loro capacità di discriminare e identificare stimoli tramite l'esperienza e l'allenamento. Questo modello, proposto da Lu & Doshier (1998), è stato sviluppato per comprendere come il cervello filtra il rumore e migliora la sensibilità nella percezione degli stimoli.

Il PTM si basa su alcuni concetti fondamentali che spiegano il processo di apprendimento percettivo:

1. Template Percettivo: nel PTM, il template rappresenta un filtro cognitivo utilizzato dal cervello per elaborare informazioni sensoriali. Attraverso l'allenamento, questo template viene ottimizzato per migliorare la rilevazione e la discriminazione dei segnali rilevanti rispetto al rumore.

Secondo Goldstone (1998) “L'apprendimento percettivo comporta modifiche nei processi cognitivi che affinano i filtri sensoriali, migliorando così la discriminazione e l'identificazione degli stimoli”.

2. Rumore Intrinseco ed Estrinseco: il modello considera il rumore intrinseco, generato all'interno del sistema neurale, e il rumore estrinseco, proveniente dall'ambiente. La capacità del template percettivo di distinguere tra questi rumori è essenziale per migliorare le prestazioni percettive. Doshier e Lu (1999) affermano che “Il rumore intrinseco ed estrinseco rappresentano due sfide principali per la percezione accurata, e l'allenamento percettivo aiuta a migliorare la capacità del sistema neurale di filtrare il rumore irrilevante”.
3. Miglioramento del Rapporto Segnale-Rumore: un obiettivo chiave del PTM è potenziare il rapporto segnale-rumore. L'allenamento rende il template percettivo più efficiente nel filtrare il rumore e amplificare il segnale nei compiti visivi, portando a una percezione più precisa. Lu et al. (2004) hanno dimostrato che “attraverso l'allenamento, gli individui possono apprendere a sopprimere il rumore, migliorando così il rapporto segnale-rumore e l'accuratezza percettiva”.
4. Adattamento e Plasticità Neurale: il modello suggerisce che l'apprendimento percettivo deriva da cambiamenti plastici nel cervello che modificano il template percettivo per ottimizzare la discriminazione degli stimoli visivi. Questo adattamento è specifico per il compito e le caratteristiche dello stimolo allenato. Fahle e Poggio (2002) discutono la “plasticità neurale come meccanismo centrale dell'apprendimento percettivo, evidenziando come le connessioni sinaptiche siano riorganizzate per migliorare la discriminazione degli stimoli visivi”.

Diverse ricerche empiriche supportano l'efficacia del PTM nel descrivere il miglioramento percettivo. Esperimenti con stimoli visivi, ad esempio, dimostrano che l'allenamento mirato può ridurre il rumore e accrescere la sensibilità ai dettagli visivi. Inoltre, studi sulla plasticità neurale indicano che l'apprendimento percettivo comporta modifiche nelle connessioni sinaptiche del cervello.

### **1.1.3 Effetto delle pause nel VPL**

Il ruolo delle pause nei compiti di apprendimento percettivo visivo è fondamentale per il consolidamento delle informazioni e per prevenire le interferenze che possono compromettere l'efficacia dell'apprendimento. Durante l'apprendimento percettivo visivo, l'interruzione strategica delle sessioni di training consente al sistema neurale di rielaborare e stabilizzare le informazioni senza la pressione continua di nuovi stimoli, migliorando così il processo di consolidamento. Doshier e Lu (1998) hanno evidenziato che le pause tra le sessioni di training migliorano il consolidamento delle memorie percettive riducendo la probabilità di interferenza retroattiva. Questa interferenza si verifica quando nuovi stimoli o compiti, presentati subito dopo l'apprendimento, alterano o sovrascrivono le informazioni appena acquisite. Un intervallo temporale tra le sessioni di training permette al cervello di rafforzare le connessioni neuronali legate all'apprendimento senza l'ulteriore sovraccarico di nuovi dati (Korman et al. 2003). L'effetto delle pause è particolarmente evidente nel miglioramento delle prestazioni nel riconoscimento e nella discriminazione degli stimoli visivi. Nello studio condotto da Karni e Sagi (1993), i risultati mostrano che, nel compito di discriminazione visiva, i partecipanti non migliorano significativamente durante le sessioni di allenamento, ma registrano notevoli progressi circa 8 ore dopo l'ultima sessione, in una fase latente. Ciò suggerisce che i cambiamenti neurali avvengono in ritardo rispetto all'allenamento. Una volta acquisiti, i miglioramenti sono duraturi, con le abilità mantenute per almeno 2-3 anni senza perdite significative di prestazione. Karni e Sagi (1991) hanno dimostrato che le pause, specialmente durante il sonno, contribuiscono significativamente al miglioramento delle abilità di discriminazione delle texture visive, suggerendo che la pausa aiuta a consolidare e a stabilizzare le informazioni apprese. Al contrario, la mancanza di pause o la presenza di compiti concorrenti senza adeguati intervalli di riposo possono portare a un'elevata interferenza e a un rallentamento del progresso, come indicato da studi su training intensivo (Censor et al., 2006). L'importanza delle pause è ulteriormente supportata dai risultati di Seitz et al. (2005), che hanno dimostrato che brevi pause durante il training visivo permettono al sistema neurale di elaborare e integrare le informazioni acquisite, conducendo a un miglioramento delle prestazioni nei compiti di discriminazione visiva. Inoltre, studi sul ruolo del sonno, che rappresenta una forma estesa di pausa, hanno evidenziato la sua importanza per l'apprendimento percettivo

visivo (VPL). Mednick et al. (2003) hanno osservato che un breve pisolino può essere efficace quanto una notte intera di sonno nel migliorare le prestazioni percettive, suggerendo che il sonno facilita il trasferimento delle informazioni dalla memoria a breve termine a quella a lungo termine. Song et al. (2021) hanno indagato la quantità ottimale di allenamento quotidiano necessaria per migliorare le caratteristiche percettive addestrate e favorire il trasferimento di apprendimento a caratteristiche non addestrate. Hanno scoperto che 40 prove giornaliere sono sufficienti per innescare un miglioramento significativo nelle abilità addestrate. Pertanto, se l'obiettivo è ottimizzare l'apprendimento di una specifica caratteristica, questo numero di prove è l'ideale. Lo studio sottolinea che "gli effetti di apprendimento ottenuti dalle singole sessioni di allenamento si trasformano da memoria a breve termine a memoria a lungo termine attraverso un processo chiamato consolidamento" (Song, Chen, & Fang, 2021, p.6). Tuttavia, un allenamento eccessivo, definito come overtraining, potrebbe ostacolare l'apprendimento percettivo e ridurre il trasferimento delle abilità acquisite. Ciò accade perché un'eccessiva quantità di allenamento può sovra-adattare il sistema, causando un deterioramento percettivo, in cui ulteriori prove non solo non migliorano la performance, ma la peggiorano, limitando la capacità di trasferire l'apprendimento a nuove situazioni (Ahissar & Hochstein 1997, Jiang & Leung 2005, Seitz & Watanabe 2005, Shibata et al. 2009). Il concetto di iperstabilizzazione si riferisce all'idea che l'apprendimento diventa più stabile e resistente alle interferenze quando si supera una soglia critica di allenamento. Fino a un certo punto, un aumento della quantità di allenamento può migliorare la stabilità della memoria e delle competenze, riducendo la suscettibilità a fattori esterni. Tuttavia, oltre una certa soglia, i benefici dell'allenamento prolungato possono essere superati dagli effetti negativi dell'overtraining, che può portare a un deterioramento percettivo a causa del sovraccarico. Inoltre, recenti studi hanno evidenziato come la stabilizzazione e il trasferimento dell'apprendimento percettivo siano mediati dall'acido  $\gamma$ -aminobutirrico (GABA), un neurotrasmettitore inibitorio. L'allenamento prolungato aumenta l'attività gabaergica, il che contribuisce alla stabilizzazione delle abilità apprese, proteggendole dalle interferenze esterne. Tuttavia, un'elevata concentrazione di GABA, che implica una maggiore inibizione, può contrastare il trasferimento delle abilità, mentre una riduzione della concentrazione di GABA può incrementare il trasferimento delle abilità apprese. Nonostante l'evidente importanza delle pause, la durata e la frequenza ottimali rimangono

oggetto di dibattito. Alcuni studi suggeriscono che pause più brevi e frequenti possono facilitare un migliore consolidamento, mentre altri evidenziano che pause più lunghe, come quelle fornite dal sonno notturno, sono essenziali per massimizzare il VPL (Korman et al., 2007). Pertanto, per ottimizzare l'apprendimento percettivo visivo, è importante considerare la natura specifica del compito e la complessità degli stimoli quando si progettano gli intervalli in un compito visivo. Adattando la durata e la frequenza delle pause in base a questi fattori, è possibile migliorare l'efficacia del training e il consolidamento delle abilità visive apprese. Riconoscere l'importanza delle pause e del riposo come componenti integrali del processo di apprendimento percettivo potrebbe portare a strategie di training più efficienti e personalizzate, migliorando così le capacità percettive nei contesti clinici.

## **1.2 Modelli dell'apprendimento percettivo visivo**

Negli ultimi decenni, sono stati sviluppati numerosi modelli per spiegare i meccanismi alla base dell'apprendimento percettivo visivo (VPL). I modelli classici di apprendimento percettivo sono stati progettati per descrivere come avviene l'apprendimento in diversi compiti percettivi. Tra i primi modelli proposti ci sono il modello della funzione di base iperbolica (HBF - hyper basis function) di Poggio et al. (1992) e la teoria della plasticità corticale primaria di Karni e Sagi (1991). Successivamente, sono emersi altri modelli, tra cui il modello della ri-pesatura (reweighting model) di Doshier e Lu (1998), la teoria della gerarchia inversa di Ahissar e Hochstein (2004), e la teoria dell'apprendimento supervisionato e non supervisionato di Herzog e Fahle (1999). Quest'ultima ha portato allo sviluppo di modelli più avanzati come l'AHRM (Augmented Hebbian Reweighting Model) di Petrov et al. (2005, 2006). Infine, il modello della doppia plasticità è stato introdotto da Watanabe e Sasaki (2015). Il modello del doppio stadio, proposto da Shibata et al. (2014), introduce una nuova prospettiva sui meccanismi dell'apprendimento percettivo visivo (VPL). Secondo questo modello, l'apprendimento avviene in due fasi distinte ma interconnesse. La prima fase, definita a basso livello, è direttamente guidata dagli stimoli. In questa fase, l'elaborazione sensoriale reagisce alle caratteristiche fisiche degli stimoli stessi, favorendo l'acquisizione di abilità percettive di base attraverso

l'esposizione ripetuta. La seconda fase è di livello superiore e guidata dalle richieste specifiche del compito. A questo livello, l'attenzione e le strategie cognitive svolgono un ruolo cruciale nel perfezionare e adattare le abilità acquisite, integrando il contesto e gli obiettivi del compito. Questo stadio consente di applicare in modo flessibile le abilità percettive a situazioni nuove o variabili, migliorando l'efficacia del VPL. Il modello prevede l'esistenza di due tipi di plasticità: la plasticità basata sulla caratteristica (feature based) e quella basata sul compito (task based), che si manifestano in diverse fasi dell'elaborazione visiva. La plasticità feature based dipende dallo stimolo e riguarda il miglioramento della rappresentazione delle caratteristiche visive a cui si è esposti durante l'allenamento, indipendentemente dalla loro rilevanza per il compito. Questo tipo di plasticità avviene nelle aree visive primarie responsabili dell'elaborazione delle caratteristiche visive. La plasticità task based, invece, si riferisce al miglioramento del processamento relativo al compito. Questa plasticità si manifesta in aree cognitive di livello superiore che regolano il processamento delle informazioni legate al compito stesso e implica il coinvolgimento attivo in un compito specifico durante l'allenamento. Questi tipi di plasticità possono verificarsi in ordine o simultaneamente, a seconda del compito e dello stimolo. Sebbene il modello del doppio stadio non abbia ancora ricevuto un ampio supporto empirico, rappresenta un tentativo significativo di unificare i risultati spesso divergenti nel campo dell'apprendimento percettivo visivo (VPL). Questo include aspetti come il locus cerebrale del VPL, la specificità rispetto alla generalizzazione del VPL, e la rilevanza o irrilevanza dei compiti per il VPL. Il modello propone una struttura che spiega come vari fattori, dagli stimoli di base alla complessità delle richieste cognitive, interagiscono per modellare l'apprendimento percettivo. Questo approccio integrato potrebbe fornire una base teorica per future ricerche sulla plasticità e suggerire interventi per migliorare le malattie che colpiscono la visione.

### **1.3 Plasticità cerebrale e apprendimento percettivo**

L'apprendimento percettivo altera l'elaborazione per migliorare le prestazioni nei compiti visivi. La plasticità del sistema visivo, ovvero la capacità di apprendere e adattarsi in risposta all'esperienza, è generalmente considerata un vantaggio per migliorare la performance. Tuttavia, questa plasticità deve essere bilanciata dalla stabilità, che è essenziale per mantenere le conoscenze e le abilità già acquisite, permettendo così di ottimizzare il comportamento in diversi compiti e ambienti. Un eccesso di plasticità può portare all'oblio completo di competenze o stimoli precedentemente appresi a causa di un addestramento su nuovi compiti (Grossberg, 1987), rendendo difficile gestire simultaneamente più attività. Il cervello deve quindi trovare un equilibrio tra l'apprendimento, l'adattamento alle nuove esperienze e la conservazione delle informazioni già acquisite (Seitz & Watanabe 2005). Se il cervello fosse troppo plastico, rischieremo di dimenticare tutto ciò che abbiamo imparato; al contrario, se fosse eccessivamente stabile, non saremmo in grado di acquisire nuove competenze (Sasaki & Watanabe 2010). Il giusto equilibrio tra plasticità e stabilità è fondamentale per il funzionamento ottimale del nostro cervello, come affermato da Gilbert et al. 2009 “Il successo dell'apprendimento percettivo visivo dipende dal mantenimento di un equilibrio ottimale tra i cambiamenti plastici che facilitano l'apprendimento e la stabilità necessaria per preservare le funzioni visive esistenti”. L'apprendimento percettivo rappresenta un esempio fondamentale della plasticità cerebrale. Le ricerche recenti hanno ampliato la nostra comprensione su come questo processo adattivo coinvolga non solo le strutture corticali, ma anche quelle subcorticali del sistema nervoso. In passato, l'apprendimento percettivo era considerato principalmente una manifestazione della plasticità nella corteccia visiva primaria. Oggi, tuttavia, è più comunemente visto come un miglioramento delle funzioni delle reti cerebrali che integrano vari processi, tra cui le rappresentazioni sensoriali, la decisione, l'attenzione e la ricompensa (Doshier and Lu, 2017). Un aspetto fondamentale del VPL è la capacità di rilevare segnali visivi deboli o di basso contrasto, anche in presenza di rumore visivo. Questo miglioramento si ottiene attraverso modifiche nella rappresentazione neurale che ottimizzano il rapporto segnale-rumore, permettendo al sistema visivo di discriminare meglio tra segnali e rumore. La detenzione del contrasto in condizioni di rumore è quindi un parametro cruciale per comprendere come il VPL influenzi e migliori l'efficienza dell'elaborazione visiva.



In questo contesto, alcuni studi si sono rivelati particolarmente significativi. Tra questi, lo studio di Yu et al. (2016) esplora l'ipotesi che il nucleo genicolato laterale (LGN), una struttura subcorticale del talamo coinvolta nell'elaborazione visiva, possa subire cambiamenti plastici legati all'apprendimento percettivo, che è tradizionalmente associato alla corteccia visiva. Nello studio, i partecipanti hanno preso parte a sessioni prolungate di addestramento per la detenzione del contrasto visivo, durante le quali dovevano individuare stimoli visivi a diversi livelli di contrasto. I risultati hanno mostrato che questo addestramento ha prodotto cambiamenti significativi nell'attività del nucleo genicolato laterale (LGN), suggerendo che l'apprendimento percettivo induce plasticità non solo nella corteccia visiva, ma anche in aree subcorticali. Dopo l'addestramento, i partecipanti hanno migliorato la loro capacità di rilevare stimoli a basso contrasto, indicando un'ottimizzazione dell'elaborazione sensoriale a livello subcorticale. I cambiamenti osservati nel LGN suggeriscono un miglioramento del rapporto segnale-rumore, rendendolo più efficace nel discriminare stimoli di contrasto variabile. La partecipazione del LGN all'apprendimento percettivo evidenzia il ruolo delle strutture subcorticali nel miglioramento delle funzioni sensoriali, dimostrando che la plasticità non è limitata alla corteccia visiva. Questi risultati aprono nuove prospettive per utilizzare l'apprendimento percettivo come strumento per migliorare la funzione visiva in persone con deficit, sfruttando la plasticità del LGN per recuperare o migliorare la sensibilità al contrasto. Come discusso in precedenza, il modello del doppio stadio proposto da Shibata et al. (2014) ipotizza l'esistenza di due tipi di plasticità: la plasticità basata sulle caratteristiche (feature-based) e quella basata sul compito (task-based). Nel successivo studio di Shibata et al. (2016), è stato esaminato il ruolo di questi due tipi di plasticità nell'apprendimento percettivo visivo rilevante per il compito (TR-VPL), attraverso un compito di rilevamento del movimento. I risultati hanno dimostrato che l'area V3A è coinvolta nella plasticità feature based, affinando la rappresentazione sensoriale del movimento, mentre le aree V1 e il solco intraparietale (IPS) sono coinvolte nella plasticità task based, migliorando l'elaborazione specifica legata al compito. Inoltre, è emerso che esiste una certa cooperazione tra queste aree cerebrali. Questi risultati supportano il modello del doppio stadio e dimostrano che il TR-VPL del movimento globale deriva da due tipi distinti di plasticità, ciascuno mediato da aree cerebrali diverse. La corteccia visiva mantiene la plasticità dipendente dall'esperienza anche in età adulta, fondamentale

per l'apprendimento percettivo e il recupero funzionale dopo lesioni. Questa plasticità può comportare modifiche nella rappresentazione visiva e coinvolgere diverse aree del percorso visivo, inclusa la corteccia visiva primaria. Le proprietà funzionali corticali si adattano in base al compito, suggerendo che ogni area corticale funge da processore adattivo. I cambiamenti associati all'apprendimento percettivo riflettono un meccanismo che integra connessioni di feedback e circuiti corticali locali, permettendo una selezione e un uso mirati degli input in base agli stimoli (Gilbert et al. 2009). Maniglia e Seitz (2018) sostengono che sia necessario sviluppare nuovi modelli per spiegare come l'apprendimento sia il risultato della plasticità di più sistemi cerebrali. Essi evidenziano che la distribuzione dell'apprendimento attraverso questi sistemi è probabilmente influenzata da diverse condizioni di allenamento e moderata dalle caratteristiche individuali dei partecipanti allenati. In conclusione, la plasticità cerebrale, sia a livello corticale che subcorticale, è fondamentale per l'adattamento e l'ottimizzazione delle funzioni sensoriali in risposta all'esperienza. L'apprendimento percettivo, che implica modifiche nelle rappresentazioni sensoriali e nell'efficienza delle reti neurali, dimostra come il cervello non solo si adatta alle nuove informazioni ma anche migliora la sua capacità di elaborare stimoli specifici attraverso cambiamenti strutturali e funzionali. L'importanza della plasticità cerebrale non si limita al miglioramento delle prestazioni in compiti specifici, ma ha anche implicazioni significative per la riabilitazione e il recupero dopo lesioni cerebrali. Comprendere i meccanismi della plasticità offre nuove prospettive per lo sviluppo di interventi mirati che sfruttano queste capacità adattive, ottimizzando il recupero funzionale e migliorando la qualità della vita dei pazienti.

## CAPITOLO 2

### 2.1 Obiettivo e ipotesi sperimentale

L'obiettivo di questo studio è verificare ed espandere i risultati di Shibata et al. (2017) sugli effetti dell'overlearning nel consolidamento dell'apprendimento percettivo visivo (VPL). Lo studio dimostra che l'overlearning crea uno stato di "iperstabilizzazione" che rende il primo apprendimento molto stabile e resistente all'interferenza, tuttavia, questo stato può ostacolare il consolidamento di un nuovo apprendimento, portando a un fenomeno noto come interferenza anterograda. Senza overlearning, si osserva invece un'interferenza retrograda, dove il secondo apprendimento compromette il consolidamento del primo, non ancora stabilizzato. In entrambi i casi, il primo e il secondo addestramento erano separati da un intervallo di 30 minuti. Tuttavia, aumentando l'intervallo a 3,5 ore, sia con che senza overlearning, si ottiene una stabilizzazione tipica. Questo tempo aggiuntivo consente un consolidamento efficace di entrambi gli apprendimenti, prevenendo le interferenze e assicurando che il primo apprendimento non venga disturbato dal secondo. Il presente studio è parzialmente una replica di quello di Shibata et al. (2017) in quanto si concentra sul concetto di interferenza retrograda tralasciando l'overlearning. L'interferenza retrograda si verifica quando l'acquisizione di nuove informazioni interferisce con il processo di consolidamento di informazioni precedentemente apprese. Nel contesto del VPL, ciò può influenzare l'efficacia del consolidamento dell'apprendimento percettivo dopo l'addestramento percettivo in cui le informazioni apprese necessitano di tempo per consolidarsi nella memoria a lungo termine. Questo processo può essere vulnerabile alle interferenze, specialmente se un nuovo compito viene introdotto subito dopo il training. L'interferenza retrograda è spesso influenzata dal tempo che intercorre tra i due compiti, un intervallo più lungo tra il primo apprendimento e il nuovo compito può ridurre l'interferenza, permettendo un miglior consolidamento. In questa ricerca, l'intervallo di 30 minuti utilizzato nello studio originale di Shibata è stato ridotto a 15 minuti per indagare come un intervallo più breve influisca sull'interferenza retrograda e sul consolidamento dell'apprendimento percettivo. Nello specifico, nella condizione con un intervallo di 15 minuti, ci si aspetta di osservare un miglioramento solo nella seconda orientazione, poiché

la prima subisce interferenza retrograda dalla seconda. Questo breve intervallo potrebbe causare interferenze con effetti negativi sulle prestazioni. Al contrario, nella condizione con un intervallo di 3,5 ore, si prevede, in accordo con i risultati di Shibata e colleghi (2017), che il cervello abbia il tempo necessario per consolidare l'apprendimento della prima orientazione allenata, consentendo il miglioramento di entrambe le orientazioni senza interferenze. L'ipotesi nulla di partenza ( $H_0$ ) assume che non vi sia alcun miglioramento significativo nelle prestazioni per la prima orientazione rispetto alla seconda quando l'intervallo di tempo tra le sessioni è di 15 minuti, indicando che un intervallo così breve non permette un consolidamento sufficiente e che le prestazioni siano simili tra le due orientazioni, indipendentemente dall'interferenza retrograda. Inoltre, sostiene che un intervallo lungo di 3,5 ore non apporti alcun miglioramento significativo nel consolidamento dell'apprendimento percettivo visivo, rispetto a un intervallo più breve. L'ipotesi alternativa ( $H_1$ ) invece assume che vi sia un miglioramento significativo delle prestazioni per la seconda orientazione rispetto alla prima, quando l'intervallo tra le sessioni di addestramento è di 15 minuti, suggerendo che l'interferenza retrograda compromette il consolidamento della prima orientazione. Inoltre, con un intervallo di 3,5 ore, ci si aspetta un miglioramento significativo delle prestazioni per entrambe le orientazioni allenate, il che indicherebbe che un intervallo così lungo permette un adeguato consolidamento dell'apprendimento percettivo visivo senza interferenze tra le due sessioni di addestramento. Pertanto, l'ipotesi nulla sostiene che non vi siano differenze significative tra le condizioni sperimentali, andando quindi contro i risultati attesi dalla replica. Al contrario, l'ipotesi alternativa supporta la replica, prevedendo differenze significative tra le condizioni sperimentali, in linea con le conclusioni dello studio originale.

## **2.2 METODO**

Il disegno sperimentale è un disegno fattoriale misto 2 (GRUPPO: Interference, No interference) x 3 (ORIENTATION: First, Second, Untrained) con il fattore GRUPPO tra i partecipanti ed il fattore ORIENTATION entro i partecipanti.

### **2.2.1 Partecipanti**

Hanno preso parte all'esperimento 48 partecipanti, di età compresa tra i 20 e i 59 anni. Un partecipante è stato escluso dall'analisi poiché considerato un outlier, con una performance estremamente diversa dalla media ( $\pm 2,5$  SD) per l'orientazione di  $70^\circ$  allenata per seconda. Di conseguenza, lo studio ha analizzato i dati di 47 partecipanti di cui 24 nella condizione Interference (15 minuti tra i due training) e 23 nella condizione No interference (3.5 h tra i due training). I partecipanti non erano a conoscenza delle ipotesi sperimentali.

### **2.2.2 Strumenti e stimoli**

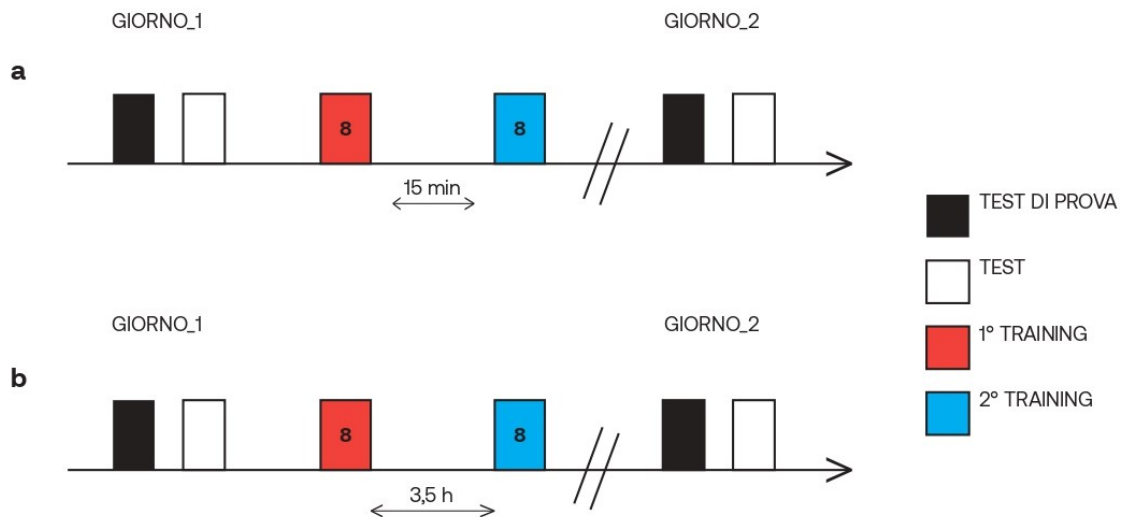
Gli stimoli visivi sono stati presentati su un display con una risoluzione 1920 x 1080. La luminanza dello schermo è stata ridotta al minimo valore di  $6\text{cd/m}^2$  e mantenuta costante a tale valore durante tutto l'esperimento. Per la programmazione dell'esperimento sono stati utilizzati MATLAB e Psychtoolbox. Gli stimoli visivi utilizzati sono patch di Gabor, un tipo di griglia sinusoidale modulata da una funzione gaussiana. Questi stimoli appaiono come onde sinusoidali di contrasto variabile all'interno di un'area circolare o ellittica, con bordi sfumati grazie alla funzione gaussiana. Le patch di Gabor sono ideali per studiare la percezione visiva poiché i neuroni della corteccia visiva primaria (V1) rispondono preferenzialmente a questi stimoli, permettendo di investigare le basi neurali della percezione visiva. Le patch di Gabor utilizzate nell'esperimento sono orientate con una frequenza spaziale di 1 ciclo/grado, un contrasto del 100%, un sigma del filtro gaussiano di 2.5 gradi e una fase spaziale casuale. Queste patch sono state presentate all'interno di un anello che copriva un'area da 0.75 a 5 gradi dal centro dello schermo grigio. Le patch di Gabor sono state mascherate da un pattern di rumore, creato tramite un metodo di sostituzione dei pixel. I campi di rumore sono stati generati utilizzando una distribuzione di luminanza sinusoidale a un dato rapporto segnale-rumore (S/N). L'orientazione delle patch di Gabor era di 10, 70 o 130 gradi, con una differenza di  $\pm 60$  gradi. Gli stadi di pre-test, training e post-test hanno misurato la soglia del rapporto segnale-rumore (S/N) per ciascuna orientazione. C'erano diverse combinazioni possibili per determinare quale orientazione fosse testata in ciascuno dei blocchi di ciascuna fase di test (pre-test, training e post-test). Ciascun

partecipante è stato assegnato casualmente a una delle possibili combinazioni. La soglia del rapporto S/N per ciascuna orientazione è stata determinata utilizzando una procedura a scala in modalità bloccata. Inizialmente, il rapporto S/N è stato impostato al 25%. La soglia del rapporto S/N per un determinato blocco è stata calcolata come la media geometrica delle ultime sei inversioni. I miglioramenti delle prestazioni dopo la fase di addestramento sono stati calcolati come percentuale di riduzione nella soglia del rapporto S/N misurata durante la fase di post-test rispetto alla fase di pre-test per ciascun soggetto. Il miglioramento delle prestazioni è stato calcolato per ciascuna delle tre orientazioni.

### **2.2.3 Procedura sperimentale**

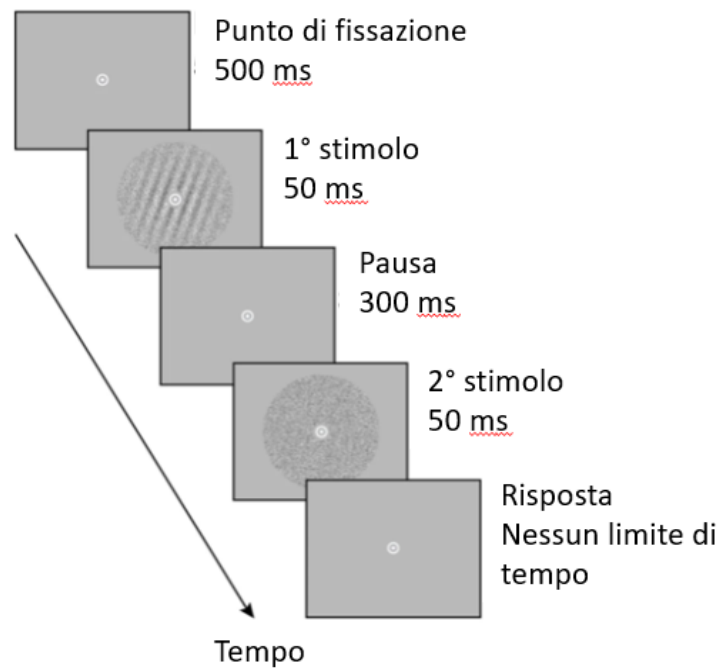
La procedura sperimentale seguita è stata la stessa per entrambi i gruppi, con la differenza principale, come già riportato, nel tempo che intercorre tra i due training: 15 minuti per il gruppo Interference e 3,5 ore per il gruppo No Interference. I dati sono stati raccolti da quattro sperimentatori diversi, perciò la stanza in cui è stato svolto l'esperimento varia a seconda del partecipante. L'esperimento è costituito da tre fasi che si sono svolte in due giorni consecutivi: fase pre-test, fase di training e fase post-test. Le fasi di pre-test e training sono state eseguite nel primo giorno, mentre la fase di post-test si è tenuta nel secondo giorno. Shibata et al. 2017 hanno condotto uno studio preliminare per determinare la quantità di addestramento necessaria per raggiungere la saturazione nei miglioramenti delle prestazioni nei compiti di rilevamento dell'orientazione. Hanno osservato che il miglioramento si stabilizzava intorno all'ottavo blocco. Pertanto, nella fase di training, sono stati utilizzati 8 blocchi per ciascuna orientazione allenata. Durante le fasi di pre-test (giorno 1) e post-test (giorno 2), entrambi i gruppi sono stati valutati per tutte e tre le orientazioni, attraverso due blocchi per ciascuna orientazione. Queste fasi sono state introdotte da una fase preliminare di prova, composta da due blocchi che testavano l'orientazione a 90 gradi. La fase di training è stata strutturata in due parti: la prima e la seconda orientazione allenata, con una pausa di 15 minuti tra le due per il gruppo "Interference" e di 3,5 ore per il gruppo "No interference". I partecipanti di entrambi i gruppi, nella prima fase di training hanno eseguito il compito di rilevamento dell'orientazione per una specifica orientazione (first-trained orientation) per 8 blocchi e

nella seconda fase di training hanno eseguito il compito con un'altra orientazione (second-trained orientation) per 8 blocchi [Figura 1].



**Figura 1** Procedura dell'esperimento. **(a)** Procedura del gruppo Interference (N=24). Le box nere rappresentano i test di prova. Le box bianche rappresentano le fasi di pre-test e post-test. I box rossi rappresentano l'orientazione allenata per prima e le box azzurre rappresentano l'orientazione allenata per seconda, durante la fase di training. Il numero di blocchi di allenamento è indicato in ciascuna casella. **(b)** Procedura del gruppo No interference (N=23).

Le due orientazioni allenate durante le prime e seconde fasi di training sono state selezionate tra le tre orientazioni ( $10^\circ$ ,  $70^\circ$  e  $130^\circ$ ) e bilanciate tra i partecipanti. L'orientazione non inclusa nel training è considerata come orientazione non allenata (untrained orientation). I partecipanti hanno eseguito un compito di rilevamento dell'orientazione con due intervalli a scelta forzata. Durante il compito, uno degli intervalli presentava una patch di Gabor con un definito rapporto segnale/rumore (S/N), mentre l'altro conteneva solo rumore (rapporto S/N a 0%) [Figura 2].

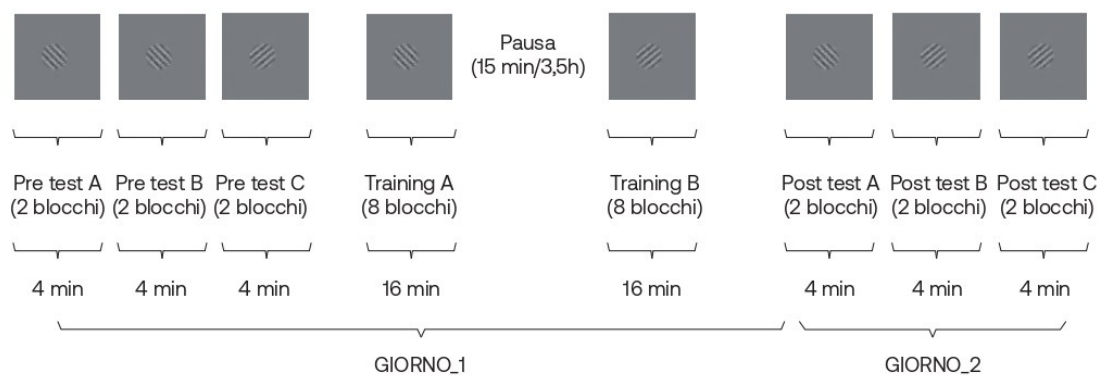


**Figura 2** Compito di rilevamento dell'orientazione a due intervalli a scelta forzata. I partecipanti sono stati esposti a due stimoli visivi. Il processo inizia con un periodo di fissazione di 500 ms, seguito dal primo stimolo visivo della durata di 50 ms. Dopo un intervallo inter-stimoli (ISI) di 300 ms, viene presentato un secondo stimolo per 50 ms. La risposta del soggetto è registrata senza limiti di tempo.

Nella fase iniziale, veniva richiesto ai partecipanti di premere un tasto qualsiasi sulla tastiera per avviare l'esperimento. In seguito, una croce di fissazione compariva al centro dello schermo, e i partecipanti dovevano posizionare il cursore su uno stimolo bianco di forma circolare e allinearla in corrispondenza della croce. Successivamente, veniva richiesto di identificare l'intervallo di stimolo contenente la patch di Gabor, premendo il tasto "A" quando appariva la patch di Gabor sul display e il tasto "B" quando appariva lo stimolo contenente solo rumore. I partecipanti sono stati istruiti a fissare un punto di fissazione di forma di circolare bianco presentato su un disco grigio (raggio di 0.75 gradi) per tutta la durata della prova. La prova successiva iniziava immediatamente dopo la risposta del soggetto. Non veniva fornito alcun feedback sull'accuratezza delle risposte. Ogni blocco si è concluso dopo aver raggiunto 10 inversioni della scala ("reversal"), tipicamente circa 40 prove, della durata approssimativa di 2 minuti. Una breve pausa è stata fornita dopo ogni blocco su richiesta del partecipante. La durata totale della sessione varia a seconda del partecipante.



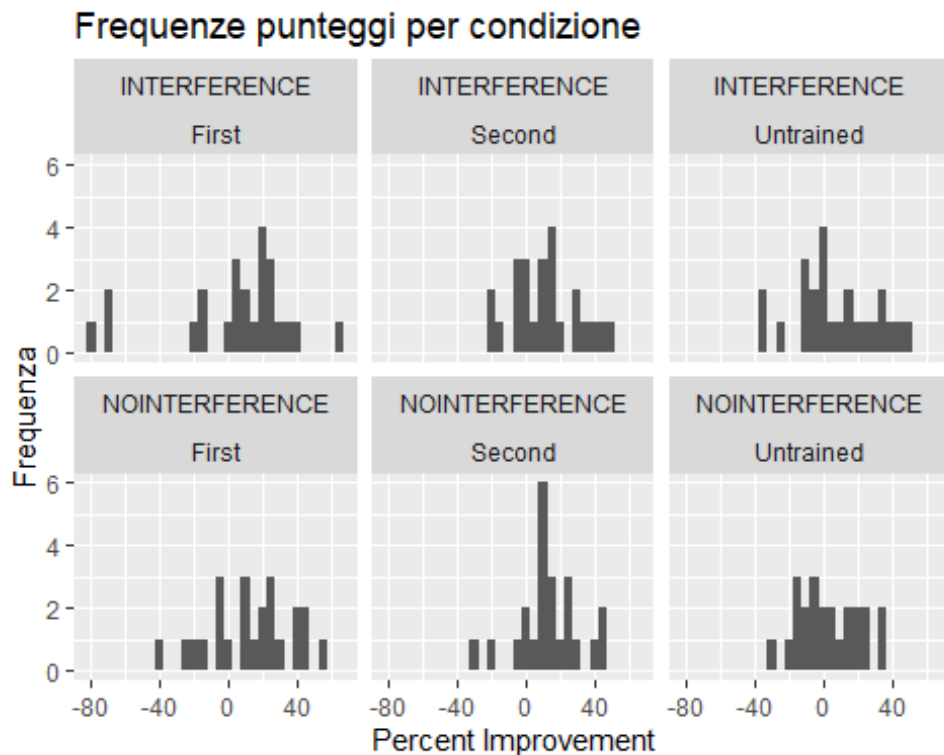
I tempi elencati nella [Figura 3] risultano generalmente più brevi rispetto alla realtà, poiché non includono intervalli per spiegare le istruzioni, avviare l'esperimento o ripetere i blocchi in caso di errori. Tipicamente, durante il primo giorno le fasi di trial test, pre-test e la prima sessione di allenamento durano complessivamente circa 45 minuti, mentre la sessione di training per la seconda orientazione richiede tra i 15 e i 20 minuti. Il secondo giorno, comprensivo di trial test e post-test, si estende per circa 15 minuti.



**Figura 3** Sequenza delle fasi sperimentali distribuite su due giorni. Il primo giorno, comprende tre blocchi di test preliminari (Pre test A, B, C) della durata di 4 minuti ciascuno, seguiti da due sessioni di addestramento (Training A e B) da 8 blocchi ciascuna, della durata di 16 minuti, separate da un periodo di riposo variabile di 15 minuti o 3,5 ore. Il secondo giorno inizia con ulteriori test post-addestramento (Post test A, B, C), anch'essi suddivisi in blocchi di 4 minuti. I trial di prova, costituiti da due blocchi e con una durata di 4 minuti ciascuno, che precedono i test dei giorni 1 e 2, non sono rappresentati in questa figura.

## 2.3 RISULTATI

Il disegno sperimentale 2 x 3 produce sei condizioni sperimentali distinte. Per ciascuna di queste condizioni, la variabile dipendente è calcolata come la differenza percentuale tra le prestazioni pre-training e post-training. I punteggi analizzati per ogni soggetto rappresentano la variazione percentuale delle prestazioni dal pre al post-training [Figura 4].



**Figura 4** Studio della distribuzione della variabile dipendente nelle diverse condizioni sperimentali.

Il test di Shapiro-Wilk è stato utilizzato per verificare la normalità ovvero se le distribuzioni grafiche (Fig. 4) si approssimano a una normale. Dall'analisi grafica e dal test di Shapiro Wilk, si osserva che quasi tutte le distribuzioni si approssimano ad una normale ( $H_0$ ,  $p.value < 0,05$ ), ad eccezione di quella relativa alla variabile dipendente per la prima orientazione allenata nel gruppo Interference, che non mostra una distribuzione normale ( $H_1$ ,  $p.value > 0,05$ ). In aggiunta, i valori delle medie ottenuti sono stati sottoposti a un'analisi statistica per assicurarsi della loro significatività.

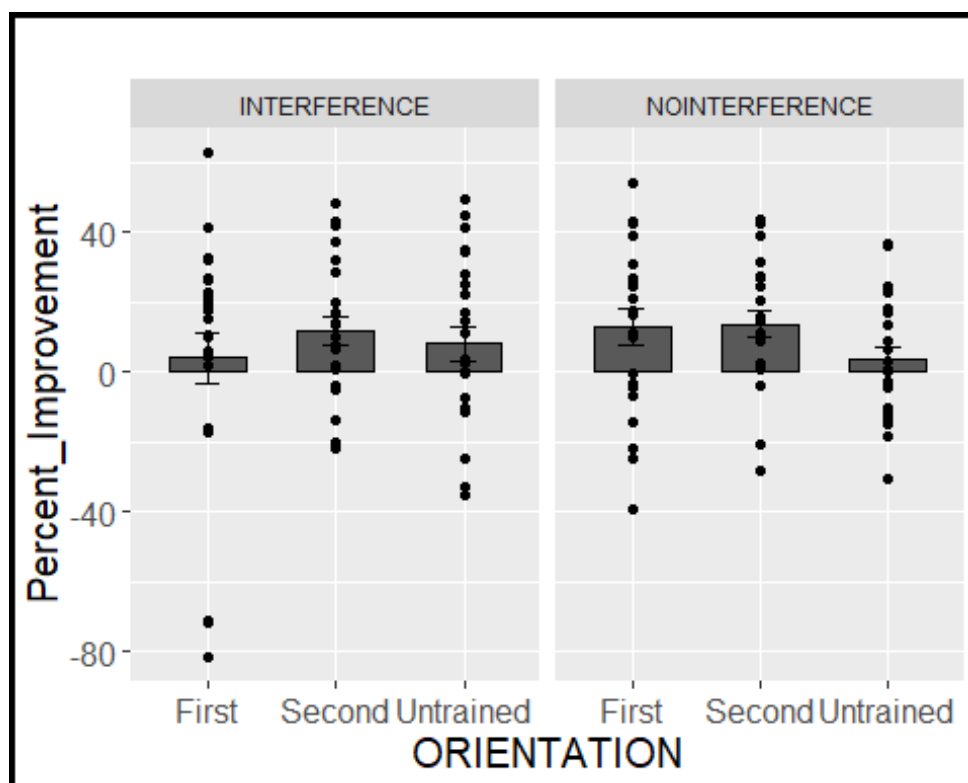
La tabella riassume le statistiche descrittive (minimo, primo quartile, mediana, media, terzo quartile e massimo) per le tre orientazioni (First, Second, Untrained) nei due gruppi (Interference, No Interference), nonché l'errore standard associato [Tab.1].

Condizione	Gruppo	Minimo	1° Quartile	Mediana	Media	3° Quartile	Massimo	Errore Standard
First	Interference	-81.289	-2.428	12.869	4.026	23.435	62.496	7.212158
Second	Interference	-21.7424	-0.5536	9.9306	11.4869	21.8022	48.3969	3.959945
Untrained	Interference	-35.315	-7.266	2.919	7.919	25.721	49.499	4.828185
First	No Interference	-39.379	-4.004	16.251	12.958	28.695	53.911	5.100796
Second	No Interference	-28.059	5.632	11.296	13.561	25.525	43.361	3.703667
Untrained	No Interference	-30.3966	-11.0519	0.7129	3.5259	17.2951	36.6752	3.681488

**Tab. 1** Statistiche descrittive della variabile dipendente nelle diverse condizioni sperimentali. La colonna “Condizione” si riferisce all'orientazione (Prima, Seconda, Non Addestrata) utilizzato durante il compito, mentre la colonna “Gruppo” distingue tra il gruppo "Interference" e "No Interference". Le colonne “Minimo” e “Massimo” indicano l'intervallo dei dati, mostrando il cambiamento minimo e massimo delle performance. Le colonne “1° Quartile” e “3° Quartile” forniscono informazioni sulla dispersione del 50% centrale dei dati, evidenziando la variabilità. La “Mediana” rappresenta la performance che si trova al centro della distribuzione dei dati. La “Media” dei cambiamenti di performance, invece, fornisce un'indicazione generale della performance media, con valori più alti che tipicamente indicano un maggiore miglioramento. “L'Errore Standard” riflette la precisione della stima della media.

Un punteggio medio più alto corrisponde a un maggiore miglioramento delle prestazioni dal pre-addestramento al post-addestramento. Il gruppo "Interference" mostra un miglioramento inferiore nella prima condizione rispetto alla seconda, suggerendo che l'interferenza abbia ostacolato l'apprendimento della prima orientazione. Il gruppo "No Interference" mostra miglioramenti significativi in entrambe le condizioni addestrate, suggerendo che più tempo tra le sessioni abbia favorito l'apprendimento. Entrambi i gruppi mostrano un miglioramento minore nella condizione non addestrata, ma il gruppo "No Interference" evidenzia comunque un miglioramento, sebbene inferiore rispetto alle condizioni addestrate. Nel complesso, il gruppo "No Interference" ha prestazioni migliori rispetto al gruppo "Interference", specialmente nelle prime due condizioni, suggerendo che l'interferenza può ostacolare l'apprendimento. Le statistiche descrittive mostrano delle tendenze, ma da sole non sono sufficienti per dimostrare significatività statistica nel campione analizzato. Pertanto, è necessario interpretarle con cautela e cercare conferma attraverso analisi statistiche inferenziali, come l'ANOVA.

Normalmente, quando si verifica un miglioramento, si osserva una diminuzione della soglia sensoriale: più bassa è la soglia, migliore è la performance del soggetto. Tuttavia, poiché i punteggi delle prestazioni sono stati calcolati come la differenza tra le misurazioni pre e post-training (pre-post), un aumento nei punteggi riflette un miglioramento della performance. Questo incremento dei punteggi implica infatti una riduzione della soglia sensoriale. Il grafico riassume tutti i risultati e rappresenta la media per ciascuna condizione sperimentale, con le variazioni percentuali medie illustrate dalle barre [Figura 5].



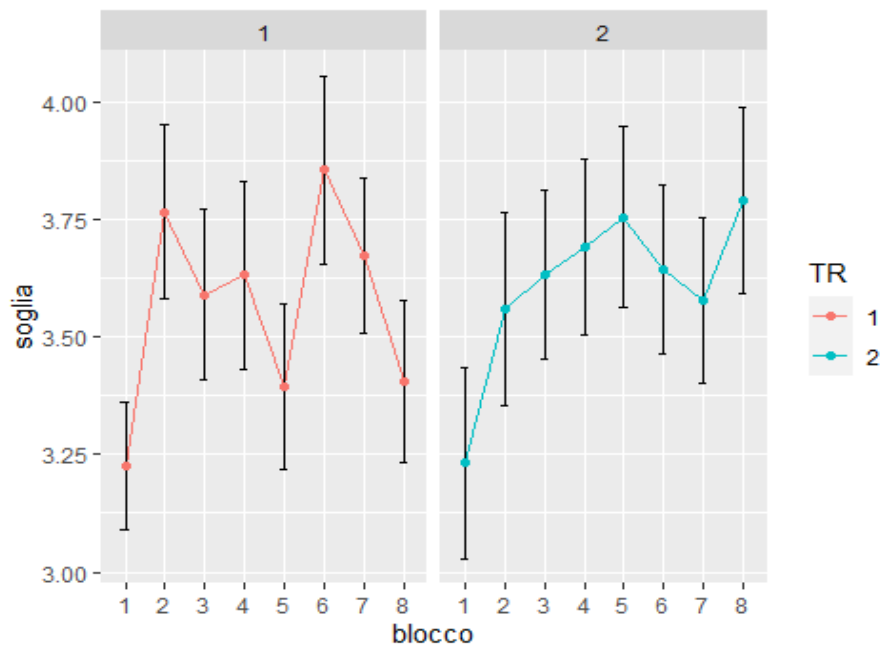
**Figura 5.** Bar plot che rappresenta la variazione percentuale media della prestazione (tra prima e dopo il training) per ciascuna orientazione nei due gruppi. Le barre d'errore rappresentano lo standard error e i punti rappresentano la performance per ogni osservazione.

Dato che il disegno sperimentale è un disegno fattoriale misto 2 (GRUPPO: INTERFERENCE, NOINTERFERENCE) x 3 (ORIENTATION: First, Second, Untrained) con il fattore GRUPPO tra i partecipanti ed il fattore ORIENTATION entro i partecipanti, è stata condotta un'ANOVA mista a due vie con la variabile dipendente che

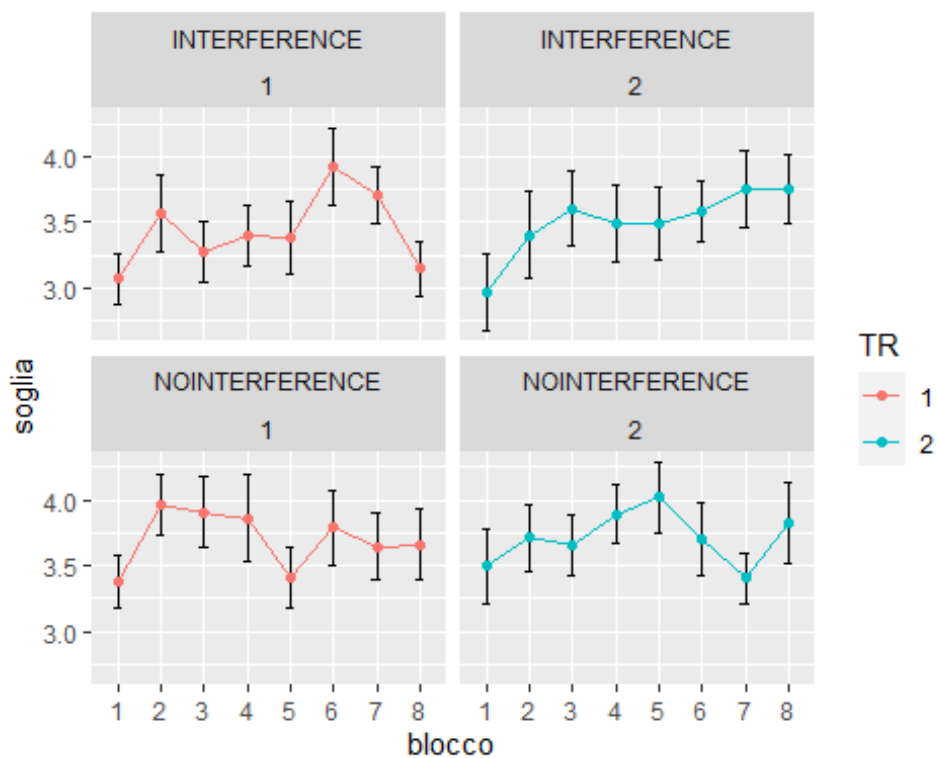
corrisponde alla differenza in percentuale tra la prestazione prima e dopo la fase di training. Per la verifica degli assunti, la variabile dipendente è stata misurata su una scala di intervalli/rapporti, poiché si tratta di una soglia sensoriale, ovvero il minimo rapporto segnale/rumore che può essere discriminato con una certa probabilità. Questo soddisfa il requisito di misurazione. L'assunto di normalità prevede che tutte le distribuzioni confrontate si approssimino a una distribuzione normale. Emerge una lieve violazione di questo assunto nella condizione di prima orientazione allenata nel gruppo Interference; tuttavia, considerata la robustezza del test ANOVA, che tende ad essere un test conservativo, i risultati sono comunque considerati affidabili. Per quanto riguarda l'omoschedasticità o sfericità, questi sono rispettati per i fattori tra i partecipanti e i fattori entro i partecipanti. L'assunto di omoschedasticità per il fattore tra partecipanti "GRUPPO" è rispettato, indicando che la varianza della variabile dipendente non differisce significativamente tra i livelli del fattore "GRUPPO". La sfericità viene verificata automaticamente dalla funzione ezANOVA del pacchetto ez, utilizzando il test di Mauchly per tutti i fattori entro i partecipanti e per le interazioni che coinvolgono questi fattori. In caso di violazione dell'assunto, i risultati vengono automaticamente corretti con il metodo di Greenhouse-Geisser.

### **Risultati statistici**

Il test di Mauchly ha mostrato che l'assunto di sfericità era violato per l'effetto principale del fattore Orientazione e l'effetto di interazione tra Orientazione e Gruppo ( $W = 0.788$ ,  $p = 0.005$ ;  $W = 0.788$ ,  $p = 0.005$ ), quindi per questi effetti vengono riportati i risultati del test corretto di Greenhouse-Geisser ( $\epsilon = 0.825$ ;  $\epsilon = 0.825$ ). Per testare come l'interferenza nella prima fase di training influenzasse l'entità del primo e del secondo apprendimento, è stata condotta un'ANOVA mista a due vie con Orientazione (First, Second, Untrained) come fattore entro i partecipanti e Gruppo (INTERFERENCE, NO INTERFERENCE) come fattore tra i partecipanti. È stato osservato che gli effetti principali di Gruppo e Orientazione non erano statisticamente significativi ( $F(1,45)=0.236$ ,  $p=0.630$ ,  $\eta^2_G = 0.002$ ;  $F(1.65,77.55)=1.11$ ,  $p=0.325$ ,  $\eta^2_G = 0.014$ ) e che l'effetto di interazione a due vie Gruppo  $\times$  Orientazione non era statisticamente significativo ( $F(1.65,77.55)=1.054$ ,  $p=0.342$ ,  $\eta^2_G = 0.013$ ).



**Figura 6.** Prestazione media per ciascun blocco per le due fasi di training, combinando i dati dei due gruppi (Interference, No Interference). In figura, sono rappresentati i dati grezzi relativi alla soglia sensoriale; pertanto, punteggi più elevati corrispondono a un peggioramento delle prestazioni.



**Figura 7.** Prestazione media per ciascun blocco per le due fasi di training divisa per i due gruppi: Training 1 e 2 del gruppo Interference (intervallo di 15 minuti tra i due training), Training 1 e 2 del gruppo No interference (intervallo di 3,5 ore tra i due training).

## **Analisi dati**

La raccolta e l'analisi dei dati non sono state effettuate in cieco da parte delle persone che hanno condotto gli esperimenti e le analisi. Tutti i test condotti in questo studio sono stati a due code. Il livello di significatività  $\alpha$  è stato impostato a 0,05. Se erano necessarie correzioni per i confronti multipli, è stato utilizzato il metodo di correzione False Discovery Rate (FDR), considerando sei confronti. Nel corso dell'analisi ANOVA condotta con un fattore all'interno, è stato applicato il test di sfericità di Mauchly per verificare il rispetto dell'assunzione di sfericità. È emersa una violazione di questa assunzione nel presente studio; perciò, è stata applicata la correzione di Greenhouse-Geisser.

In via del tutto esplorativa dal momento che ANOVA non supporta una differenza significativa delle medie della variabile dipendente nelle diverse condizioni sono stati effettuati gli stessi confronti eseguiti da Shibata et al (2017). Sono stati applicati test non parametrici sui dati solo per confermare che i test con potenza inferiore rivelassero anch'essi significatività statistica: i t test a campione singolo (o il test dei ranghi segnati di Wilcoxon nel caso in cui la violazione dell'assunto di normalità lo renda più appropriato) che indicano se la variazione percentuale media (o mediana nel caso del test dei ranghi segnati di Wilcoxon) della performance per ognuna delle tre orientazioni è diversa da 0, sia per il gruppo con interferenza che per il gruppo senza interferenza (l'ordine delle condizioni testate è lo stesso della Fig.4). Un test dei ranghi segnati di Wilcoxon ha mostrato che la mediana della variazione percentuale della performance nel gruppo Interference per l'orientazione allenata per prima ( $Mdn = 12.87$ ) non era significativamente più grande di 0,  $V = 203$ ,  $p = 0.163$ . In media, la variazione percentuale della performance del campione delle persone appartenente al gruppo Interference per l'orientazione allenata per seconda ( $M = 11.49$ ,  $SE = 3.96$ ) era maggiore di 0, un t-test a campione singolo a due code ha mostrato che la differenza da 0 era statisticamente significativa,  $t(23) = 2,90$ ,  $p = 0.024$ ,  $d = 0.59$ . In media, la variazione percentuale della performance del campione delle persone appartenente al gruppo Interference per l'orientazione non allenata ( $M = 7.92$ ,  $SE = 4.83$ ) era maggiore di 0, tuttavia un t-test a campione singolo a due code ha mostrato che la differenza da 0 non era statisticamente significativa,  $t(23) = 1,64$ ,  $p = 0.162$ ,  $d = 0.33$ .

In media, la variazione percentuale della performance del campione delle persone appartenente al gruppo No interference per l'orientazione allenata per prima ( $M = 12.96$ ,  $SE = 5.10$ ) era maggiore di 0, un t-test a campione singolo a due code ha mostrato che la differenza da 0 era statisticamente significativa,  $t(22) = 2.54$ ,  $p=0.037$ ,  $d = 0.53$ . In media, la variazione percentuale della performance del campione delle persone appartenente al gruppo No interference per l'orientazione allenata per seconda ( $M = 13.56$ ,  $SE = 3.70$ ) era maggiore di 0, un t-test a campione singolo a due code ha mostrato che la differenza da 0 era statisticamente significativa,  $t(22) = 3.66$ ,  $p=0.008$ ,  $d = 0.76$ . In media, la variazione percentuale della performance del campione delle persone appartenente al gruppo No interference per l'orientazione non allenata ( $M = 3.53$ ,  $SE = 3.68$ ) era maggiore di 0, tuttavia un t-test a campione singolo a due code ha mostrato che la differenza da 0 non era statisticamente significativa,  $t(22) = 0.96$ ,  $p=0.349$ ,  $d = 0.20$ . I confronti effettuati mostrano che, in accordo con le ipotesi, nel gruppo in cui ci si aspettava interferenza la variazione percentuale della performance è significativamente diversa da 0 solo per l'orientazione allenata per seconda e che nel gruppo in cui non ci si aspettava interferenza la variazione percentuale della performance per entrambe le orientazioni allenate è significativamente diversa da 0 a differenza dell'orientazione non allenata.

## **2.4 DISCUSSIONE GENERALE**

Il presente studio esplora i meccanismi di interferenza retrograda nel contesto dell'apprendimento percettivo visivo (VPL), replicando parzialmente i risultati di Shibata et al. (2017) e testando come il tempo tra sessioni di apprendimento influenzi il consolidamento delle informazioni. Specificamente, l'obiettivo principale è esaminare come l'interferenza retrograda influisca sul consolidamento della prima orientazione appresa quando viene introdotta una seconda orientazione in un intervallo di tempo breve (15 minuti) rispetto a uno più lungo (3,5 ore). I risultati di questo studio forniscono importanti spunti sull'influenza dell'interferenza sull'apprendimento percettivo visivo. Come mostrato dall'analisi ANOVA, l'assenza di un effetto principale significativo sia per il fattore "Gruppo" sia per il fattore "Orientazione", così come la mancanza di



un'interazione significativa tra questi fattori, suggerisce che l'intervallo tra le sessioni non ha avuto un impatto rilevante sul consolidamento dell'apprendimento percettivo, il che potrebbe indicare che il breve intervallo di 15 minuti non è stato sufficiente a causare una significativa interferenza retrograda. In particolare, i grafici rappresentanti l'andamento della performance durante i training evidenziano una mancanza di apprendimento; infatti, la performance non migliora durante i blocchi di training. Questo potrebbe essere una delle ragioni per cui non si osserva l'effetto di interferenza atteso e l'apparente mancato consolidamento delle competenze durante i blocchi di training [Figura 6-7]. Inoltre, i risultati dell'ANOVA mostrano che gli effetti principali e l'interazione hanno valori di eta squared ( $\eta^2$ ) molto bassi, suggerendo che la dimensione dell'effetto delle variabili indipendenti sull'apprendimento è minima; ciò significa che, anche se esistono differenze nelle medie [Tab.1], queste differenze non sono abbastanza grandi da avere rilevanza pratica o significato statistico. In generale, l'ANOVA suggerisce che non ci sono differenze rilevanti nelle prestazioni tra i gruppi con interferenza e senza interferenza, né tra le diverse orientazioni allenate. Questi risultati vanno contro l'ipotesi alternativa (H1), che prevedeva un miglioramento significativo delle prestazioni per la seconda orientazione con un intervallo di 15 minuti (indicativo di interferenza retrograda) e un miglioramento per entrambe le orientazioni con un intervallo di 3,5 ore (indicativo di un adeguato consolidamento). L'assenza di significatività nelle interazioni suggerisce che l'intervallo di tempo tra le sessioni di addestramento non ha influenzato in modo differente i gruppi, contraddicendo le aspettative e non confermando gli effetti attesi di consolidamento e interferenza osservati in studi precedenti, come quello di Shibata et al. (2017). Tuttavia, i test post-hoc indicano come l'interferenza possa influenzare specifiche condizioni di apprendimento. In particolare, i risultati ottenuti attraverso i t-test a campione singolo e i test dei ranghi segnati di Wilcoxon rivelano che l'interferenza ha un impatto significativo sull'apprendimento della seconda orientazione, con un miglioramento delle prestazioni significativamente diverso da 0 nel gruppo "Interference". Questo suggerisce che, nonostante l'interferenza abbia ostacolato l'apprendimento della prima orientazione, la seconda orientazione ha beneficiato di un effetto di apprendimento, forse a causa di un'attenuazione dell'effetto di interferenza o di un consolidamento più efficace delle informazioni apprese. Nel gruppo "No Interference", entrambe le orientazioni allenate mostrano miglioramenti significativi rispetto al pre-

training, il che supporta l'ipotesi che un intervallo temporale più lungo tra le sessioni di allenamento faciliti il consolidamento delle informazioni apprese e minimizzi gli effetti di interferenza. Questo è in linea con la letteratura esistente, che suggerisce che intervalli di tempo sufficientemente ampi tra le sessioni di apprendimento favoriscono il consolidamento della memoria e migliorano la performance (Ahissar & Hochstein 2004, Watanabe & Seitz 2005, Bang et al. 2018, Liu et al. 2024). L'assenza di un miglioramento significativo nell'orientazione non allenata per entrambi i gruppi evidenzia la specificità dell'apprendimento percettivo per le condizioni allenate, confermando che i miglioramenti osservati sono principalmente legati all'allenamento specifico piuttosto che a un miglioramento generale delle capacità percettive. Dal punto di vista teorico, questi risultati suggeriscono che l'interferenza non è un ostacolo uniforme all'apprendimento, ma piuttosto un fenomeno complesso che può influenzare l'apprendimento in modi diversi a seconda delle condizioni specifiche dell'allenamento. I risultati di questo studio offrono un'analisi approfondita del ruolo dell'interferenza nell'apprendimento percettivo visivo e permettono un confronto significativo con lo studio di Shibata et al. (2017), che aveva esplorato temi simili. Sebbene, lo studio di Shibata et al. 2017 ha suggerito che intervalli di tempo diversi possono modulare l'effetto dell'interferenza retrograda, il presente studio non ha rilevato differenze significative nell'effetto del tempo tra le sessioni. Questo potrebbe indicare che l'interferenza retrograda potrebbe essere meno influente di quanto precedentemente ipotizzato, oppure che l'effetto emerge solo in condizioni sperimentali specifiche. Un altro aspetto significativo riguarda l'uso di test non parametrici. Questi test hanno rivelato che solo la seconda orientazione nel gruppo "Interference" ha mostrato una variazione percentuale della performance significativamente diversa da zero, confermando in parte l'ipotesi che un intervallo breve può causare interferenza retrograda. Allo stesso modo, nel gruppo "No interference", entrambe le orientazioni allenate hanno mostrato miglioramenti significativi, in linea con l'ipotesi che un intervallo lungo consenta un consolidamento efficace. Questi risultati si aggiungono a una crescente letteratura che esplora come variabili temporali e procedurali influenzano il consolidamento della memoria percettiva. La mancanza di significatività nei risultati dell'ANOVA, combinata con i risultati dei test non parametrici, suggerisce che l'interferenza retrograda è un fenomeno complesso e che le condizioni sperimentali potrebbero dover essere ottimizzate ulteriormente per rivelare effetti robusti. È possibile

che la variabilità individuale o fattori non controllati possano aver influenzato i risultati, suggerendo la necessità di ulteriori ricerche per chiarire il ruolo dell'intervallo temporale tra le sessioni di training e dell'interferenza nel VPL.

## **LIMITI E SVILUPPI FUTURI**

### **Limiti dello studio**

I risultati dello studio presentano alcuni limiti da considerare. Sebbene il campione di 47 partecipanti, suddivisi in 24 per il gruppo "Interference" e 23 per il gruppo "No interference", possa essere considerato accettabile per studi sperimentali, esso potrebbe non essere sufficientemente grande o rappresentativo per generalizzare i risultati a una popolazione più ampia. Inoltre, la vasta fascia di età dei partecipanti, compresa tra i 20 e i 59 anni, potrebbe aver introdotto una variabilità non controllata nei risultati, poiché l'età può influenzare le capacità di apprendimento percettivo. Un altro limite riguarda gli intervalli di tempo tra le sessioni di training: i due intervalli scelti (15 minuti per il gruppo "Interference" e 3,5 ore per il gruppo "No interference") potrebbero non essere sufficientemente distinti per rilevare differenze significative nel consolidamento dell'apprendimento, e un intervallo intermedio o una serie di intervalli più variabili avrebbero potuto fornire una comprensione più dettagliata degli effetti del tempo sul consolidamento. Inoltre, l'assenza di controllo per variabili confondenti, come la variazione nella stanza in cui si è svolto l'esperimento e il fatto che i dati siano stati raccolti da quattro sperimentatori diversi, potrebbe aver introdotto differenze non controllate nelle condizioni sperimentali, influenzando i risultati. La misurazione dell'apprendimento è stata limitata alla riduzione della soglia del rapporto segnale/rumore (S/N), ma l'utilizzo di altre misure avrebbe potuto offrire una visione più completa dell'apprendimento percettivo. I risultati possono essere influenzati da diversi fattori che variano tra i partecipanti, come la motivazione, l'affaticamento e le differenze individuali nella capacità di apprendimento. Questi elementi possono aumentare la variabilità dei dati e ridurre la probabilità che l'ANOVA rilevi differenze significative, specialmente in

esperimenti di lunga durata che si estendono su più giorni, come nel caso del presente studio. Questi limiti suggeriscono che ulteriori ricerche, con controlli più rigorosi, campioni più ampi e condizioni sperimentali alternative, potrebbero essere necessarie per approfondire i risultati osservati e per rilevare effetti significativi che non sono emersi in questo studio.

### **Sviluppi futuri**

Il presente studio, pur non confermando l'ipotesi iniziale riguardo all'interferenza retrograda nell'apprendimento percettivo visivo (VPL), apre interessanti prospettive per la ricerca futura. Negli ultimi anni, l'interesse crescente per il VPL ha generato numerosi studi che hanno esplorato l'efficacia dell'addestramento percettivo in popolazioni cliniche, mostrando risultati promettenti in diverse patologie visive (Tan & Fong, 2008; Polat, 2009; Polat et al., 1999; Maniglia et al., 2016; 2020). Questi studi suggeriscono la possibilità di sviluppare procedure innovative e potenzialmente trasformative per migliorare le capacità percettive in contesti clinici (Lu, Lin & Doshier, 2016). Dal punto di vista neurale, una direzione di ricerca promettente riguarda l'uso di tecniche di neuroimaging avanzate, come la risonanza magnetica funzionale (fMRI) e la magnetoencefalografia (MEG), per esaminare in dettaglio le dinamiche cerebrali durante il consolidamento della memoria. Queste tecniche potrebbero rivelare quali aree del cervello sono maggiormente coinvolte nel processo di interferenza e come queste interagiscono durante l'introduzione di nuove informazioni subito dopo l'apprendimento iniziale (Bang et al., 2018). Inoltre, potrebbe essere utile indagare i processi sinaptici sottostanti attraverso studi elettrofisiologici, esplorando come la plasticità sinaptica venga modulata quando nuove informazioni interferiscono con quelle già consolidate (Ahissar & Hochstein, 2004). Un altro ambito di interesse riguarda le interazioni tra diverse aree cerebrali, come la corteccia visiva primaria (V1) e l'ippocampo, coinvolte nel VPL e nella memoria a lungo termine. Comprendere come queste regioni si sincronizzino durante il consolidamento potrebbe offrire una spiegazione più chiara dell'interferenza retrograda, specialmente quando nuovi stimoli competono con quelli già appresi (Watanabe & Seitz, 2005). Un'importante direzione futura riguarda l'esplorazione di variabili sperimentali aggiuntive che potrebbero influenzare il VPL e l'effetto dell'interferenza retrograda, come periodi di riposo più lunghi o di differenti protocolli di stimolazione cerebrale non

invasiva potrebbe modulare il consolidamento della memoria. Le principali tecniche di stimolazione elettrica transcranica non invasiva (tES), tra cui la stimolazione a corrente continua (tDCS), la stimolazione a corrente alternata (tACS) e la stimolazione a corrente alternata a rumore casuale (tRNS), offrono nuove prospettive per la ricerca futura (Maniglia et al., 2022). Recenti studi indicano che la tES può potenziare la plasticità corticale e migliorare l'apprendimento e il transfer nel VPL (Fertonani et al., 2011; Campana et al., 2014; Camilleri et al., 2016; Contemori et al., 2019). In particolare, è fondamentale approfondire il ruolo ancora poco esplorato della tDCS catodica nel consolidare l'apprendimento e stabilizzare le informazioni acquisite, proteggendole dall'interferenza retrograda, come suggerito da studi precedenti (Watanabe & Seitz 2005, Shibata et al. 2017, Maniglia et al. 2022, Yamada et al. 2024). L'uso della tACS a basse frequenze potrebbe facilitare il consolidamento della memoria, come indicato da studi preliminari (Kirov et al. 2009, Sale & Kuzovina 2015). Infine, l'uso della tRNS rappresenta un'altra direzione di ricerca promettente, essendo capace di estendere la finestra temporale del consolidamento e mantenere l'eccitabilità corticale oltre la fase di stimolazione attiva, contribuendo a ridurre gli effetti dell'interferenza retrograda e migliorare l'apprendimento a lungo termine (Maniglia et al. 2022). Lo studio condotto da Battaglini et al. (2020) ha esaminato gli effetti della tRNS sulla rilevazione del contrasto visivo con l'obiettivo di verificare se la tRNS potesse migliorare la capacità di rilevare contrasti visivi in un gruppo di partecipanti. I risultati hanno mostrato che la tRNS è in grado di migliorare significativamente la rilevazione del contrasto visivo, suggerendo che questa tecnica di stimolazione non invasiva possa potenziare le prestazioni visive. Questi risultati indicano un potenziale utilizzo della tRNS in ambito clinico per migliorare la funzione visiva in persone con deficit percettivi. Questi sviluppi futuri potrebbero fornire indicazioni per ottimizzare i protocolli di addestramento e migliorare le applicazioni cliniche del VPL, contribuendo a trasformare la comprensione teorica dei meccanismi di plasticità in interventi terapeutici efficaci per diverse patologie visive. Inoltre, l'ottimizzazione degli intervalli temporali tra le sessioni di apprendimento potrebbe emergere come una strategia promettente per minimizzare l'interferenza e massimizzare l'efficacia dell'addestramento. Comprendere meglio le condizioni in cui l'interferenza è più o meno influente potrebbe consentire la personalizzazione dei programmi di apprendimento, adattandoli alle esigenze specifiche degli individui. In sintesi, questo

studio contribuisce a chiarire l'effetto dell'interferenza sull'apprendimento percettivo e suggerisce che la gestione del timing dell'allenamento può influenzare significativamente i risultati. Ulteriori ricerche potrebbero approfondire i meccanismi attraverso i quali l'interferenza agisce sull'apprendimento, esplorando se gli effetti osservati siano generalizzabili ad altri tipi di apprendimento e a popolazioni diverse.

## BIBLIOGRAFIA

1. Ahissar, M., & Hochstein, S. (1993). Attentional control of early perceptual learning. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 90(12), 5718-5722.
2. Ahissar, M., & Hochstein, S. (1997). Task difficulty and the specificity of perceptual learning. *Nature*, 387(6631), 401–406. <https://doi.org/10.1038/387401a0>
3. Ahissar, M., & Hochstein, S. (2004). The reverse hierarchy theory of visual perceptual learning. *Trends in Cognitive Sciences*, 8(10), 457-464.
4. Ball, K., & Sekuler, R. (1982). A specific and enduring improvement in visual motion discrimination. *Science*, 218(4573), 697-698.
5. Bang, J.W., Shibata, K., Frank, S.M. *et al.* Consolidation and reconsolidation share behavioural and neurochemical mechanisms. *Nat Hum Behav* 2, 507–513 (2018). <https://doi.org/10.1038/s41562-018-0366-8>
6. Banks, M. S., Aslin, R. N., & Letson, R. D. (1975). Sensitive period for the development of human binocular vision. *Science (New York, N.Y.)*, 190(4215), 675–677. <https://doi.org/10.1126/science.1188363>.
7. Battaglini, L., Contemori, G., Penzo, S., & Maniglia, M. (2020). tRNS effects on visual contrast detection. *Neuroscience Letters*, 717, 134696.
8. Blakemore, C., & Cooper, G. F. (1970). Development of the brain depends on the visual environment. *Nature*, 228(5270), 477–478. <https://doi.org/10.1038/228477a0>
9. Brawn, T. P., Fenn, K. M., Nusbaum, H. C., & Margoliash, D. (2008). Consolidating the effects of waking and sleep on motor-sequence learning. *Journal of Neuroscience*, 28(12), 1108-1114.
10. Camilleri, R., Pavan, A., & Campana, G. (2016). The application of online transcranial random noise stimulation and perceptual learning in the improvement of visual functions in mild myopia. *Neuropsychologia*, 89, 225-231.
11. Campana, G., Camilleri, R., Pavan, A., Veronese, A., & Lo Giudice, G. (2014). Improving visual functions in adult amblyopia with combined perceptual training and transcranial random noise stimulation (tRNS): A pilot study. *Frontiers in Psychology*, 5. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2014.01402>
12. Campana, G., Maniglia, M., eds. (2015). *Learning to See (Better): Improving Visual Deficits with Perceptual Learning*. Lausanne: Frontiers Media. doi: 10.3389/978-2-88919-603-6.
13. Censor, N., & Sagi, D. (2009). Explaining training induced performance increments and decrements within a unified framework of perceptual learning. *Learning and Perception*, 1(1), 3-17. <https://doi.org/10.1556/lp.1.2009.1.2>

14. Censor, N., Sagi, D., & Cohen, L. G. (2006). Common mechanisms of human perceptual and motor learning. *Nature Reviews Neuroscience*, 7(10), 729-740.
15. Contemori, G., Trotter, Y., Cottureau, B. R., & Maniglia, M. (2019). tRNS boosts perceptual learning in peripheral vision. *Neuropsychologia*, 125, 129–136.  
<https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2019.02.00>
16. Delamater, A. R., Civile, C., & McLaren, I. P. L. (2021). Special issue on recent advances in perceptual learning. *Journal of Experimental Psychology: Animal Learning and Cognition*, 47(1), 1–3
17. Donald T.H Tan, Allam Fong (2008). Efficacy of neural vision therapy to enhance contrast sensitivity function and visual acuity in low myopia, *Journal of Cataract & Refractive Surgery*, Volume 34, Issue 4, Pages 570-577.
18. Doshier Barbara Anne, Lu Zhong-Lin (1999). Mechanisms of perceptual learning, *Vision Research*, Volume 39, Issue 19, Pages 3197-3221,
19. Doshier Barbara Anne, Lu Zhong-Lin (2017). Visual Perceptual Learning and Models, *Annual Review of Vision Science*, Volume 3, Pages 343-363
20. Doshier, B. A., & Lu, Z. L. (2009). Hebbian reweighting on stable representations in perceptual learning. *Learning & Perception*, 1(1), 37-58.
21. Doshier, 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*, Volume 95, Issue 23, Pages 13988–13993.
22. Eckstein M. P. (2011). Visual search: a retrospective. *Journal of vision*, 11(5), 14.  
<https://doi.org/10.1167/11.5.14>
23. Ernst, M. O., & Bühlhoff, H. H. (2004). Merging the senses into a robust percept. *Trends in Cognitive Sciences*, 8(4), 162-169
24. Fahle, M. (2004). Perceptual learning: A case for early selection. *Journal of Vision*, 4(10), 4-4.
25. Fahle, M., & Edelman, S. (1993). Long-term learning in vernier acuity: Effects of stimulus orientation, range and of feedback. *Vision research*, 33(3), 397-412.
26. Fahle, M., & Poggio, T. (Eds.). (2002). *Perceptual Learning*. MIT Press.
27. Fertonani, A., Pirulli, C., & Miniussi, C. (2011). Random Noise Stimulation Improves Neuroplasticity in Perceptual Learning. *The Journal of Neuroscience*, 31(43), 15416315423. <https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.2002-11.2011>.
28. Fine, I., & Jacobs, R. A. (2002). Comparing perceptual learning across tasks: A review. *Journal of vision*, 2(2), 5-5.
29. Fiorentini, A., & Berardi, N. (1980). Perceptual learning specific for orientation and spatial frequency. *Nature*, 287(5777), 43-44.



30. Gibson, E.J. (1963). Perceptual Learning. *Annu. Rev. Psy-chol.* 14: 29-56
31. Gibson, E.J. (1969). *Principles of Perceptual Learning and Developmnet.* New York: Appleton-Century- Crofts.
32. Gilbert, C.D., Li, W. and Piech, V. (2009), Perceptual learning and adult cortical plasticity. *The Journal of Physiology*, 587: 2743-2751. <https://doi.org/10.1113/jphysiol.2009.171488>
33. Gold, J. I., & Shadlen, M. N. (2007). The neural basis of decision making. *Annual Review of Neuroscience*, 30, 535-574.
34. Gold, J. I., & Watanabe, T. (2010). Perceptual learning. *Current biology : CB*, 20(2), R46–R48. <https://doi.org/10.1016/j.cub.2009.10.066>
35. Goldstone, R. L. (1998). Perceptual learning. *Annual Review of Psychology*, 49, 585–612. <https://doi.org/10.1146/annurev.psych.49.1.585>
36. Goldstone, Robert L., and Lisa A. Byrge, (2013) Perceptual Learning. Mohan Matthen (ed.), *The Oxford Handbook of Philosophy of Perception*
37. Grossberg, S. (1987). Competitive learning: From interactive activation to adaptive resonance. *Cognitive science*, 11(1), 23-63.
38. Held, R., & Hein, A. (1963). Movement-produced stimulation in the development of visually guided behavior. *Journal of Comparative and Physiological Psychology*, 56(5), 872–876. <https://doi.org/10.1037/h0040546>
39. Herzog MH, Fahle M. (1999) Effects of biased feedback on learning and deciding in a vernier discrimination task. *Vis. Res.* 39:4232–43
40. Hochstein, S. (2000). The spread of attention and learning in feature search: effects of target distribution and task difficulty. *Vision Research*.
41. Hung, S. C., & Seitz, A. R. (2014). Prolonged training at threshold promotes robust retinotopic specificity in perceptual learning. *The Journal of neuroscience: the official journal of the Society for Neuroscience*, 34(25), 8423–8431. <https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.0745-14.2014>
42. Hung, S. C., & Seitz, A. R. (2014). Prolonged training at threshold promotes robust retinotopic specificity in perceptual learning. *Journal of Neuroscience*, 34(25), 8423-8431.
43. Jeter, P. E., Doshier, B. A., Liu, S. H., & Lu, Z. L. (2010). Specificity of perceptual learning increases with increased training. *Vision research*, 50(19), 1928-1940.
44. Jeter, P. E., Doshier, B. A., Petrov, A., & Lu, Z. L. (2009). Task precision at transfer determines specificity of perceptual learning. *Journal of vision*, 9(3), 1-1.
45. Jiang, Y., & Leung, A. W. (2005). Implicit learning of ignored visual context. *Psychonomic bulletin & review*, 12(1), 100–106. <https://doi.org/10.3758/bf03196353>.

46. Jones, J.P., & Palmer, L.A. (1987). An evaluation of the two-dimensional Gabor filter model of simple receptive fields in cat striate cortex. *Journal of Neurophysiology*, 58(6), 1233-1258. DOI:10.1152/jn.1987.58.6.1233
47. Karni A, Sagi D. (1991). Where practice makes perfect in texture discrimination: evidence for primary visual cortex plasticity. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 88(11), 4966-4970.
48. Karni, A., & Sagi, D. (1993). The time course of learning a visual skill. *Nature*, 365(6443), 250–252. <https://doi.org/10.1038/365250a0>
49. Kirov, R., Weiss, C., Siebner, H. R., Born, J., & Marshall, L. (2009). Slow oscillation electrical brain stimulation during waking promotes EEG theta activity and memory encoding. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 106(36), 15460-15465.
50. Korman, M., Raz, N., Flash, T., & Karni, A. (2003). Multiple shifts in the representation of a motor sequence during the acquisition of killer performance. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 100(21), 12492–12497. <https://doi.org/10.1073/pnas.2035019100>
51. Korman, M., Raz, N., Flash, T., & Karni, A. (2007). Multiple shifts in the representation of a motor sequence during the acquisition of skilled performance. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 104(30), 12491-12496.
52. Kurti, Z., & Dicarlo, J. J. (2006). Learning and neurale plasticity in visual obtecta recognition. *Current Opinion in Neurobiologi*, 16(2), 152–158. <https://doi.org/10.1016/j.conb.2006.03.012>
53. Levi, D. M., & Li, R. W. (2009). Perceptual learning as a potential treatment for amblyopia: A mini-review. *Vision Research*, 49(21), 2535-2549.
54. Li, W., Piëch, V., & Gilbert, C. D. (2004). Perceptual learning and top-down influences in primary visual cortex. *Nature neuroscience*, 7(6), 651–657. <https://doi.org/10.1038/mn1255>
55. Lu Z-L, Doshier BA. (2008) Characterizing observers using external noise and observer models: assessing internal representations with external noise. *Psychol. Rev.* 115:44
56. Lu Z-L, Hua T, Huang C-B, Zhou Y, Doshier BA (2011). Visual perceptual learning. *Neurobiol. Learn. Mem.* 95:145–51
57. Lu, Z.-L., & Doshier, B. A. (2004). Perceptual learning retunes the perceptual template in foveal orientation identification. *Journal of Vision*, 4(1), 44-56.
58. Lu, Z.-L., & Doshier, B. A. (2008). Characterizing human perceptual inefficiencies with equivalent internal noise. *Journal of Vision*, 8(3), 9-9.

59. Lu, Z.-L., & Doshier, B. A. (2023). Hierarchical Bayesian perceptual template modeling of mechanisms of spatial attention in central and peripheral cuing. *Journal of Vision*, 23(2), 12–12. <https://doi.org/10.1167/jov.23.2.12>
60. Lu, Z.-L., Lin, Z., & Doshier, B. A. (2016). Translating perceptual learning from the laboratory to applications. *Trends in Cognitive Sciences*, 20(8), 561–563. <https://doi.org/10.1016/j.tics.2016.05.007>
61. Lu, ZL., Doshier, B.A. (2022) Current directions in visual perceptual learning. *Nat Rev Psychol* 1, 654–668
62. Lui J, Lu Z-L, Doshier BA. (2012) Mixed training at high and low accuracy levels leads to perceptual learning without feedback. *Vis. Res.* 61:15–24
63. Lui, Z., Yann, Y. & Wang, DH (2024). Category representation in primary visual cortex after visual perceptual learning. *Cogn Neurodyn* 18, 23–35. <https://doi.org/10.1007/s11571-022-09926-8>.
64. Maniglia M. (2022). Perspectives on the Combined Use of Electric Brain Stimulation and Perceptual Learning in Vision. *Vision*; 6(2):33. <https://doi.org/10.3390/vision6020033>
65. Maniglia, M., & Seitz, A. R. (2018). Towards a whole brain model of Perceptual Learning. *Current opinion in behavioral sciences*, 20, 47-55.
66. Maniglia, M., Cottureau, B. R., Soler, V., & Trotter, Y. (2016). Rehabilitation Approaches in Macular Degeneration Patients. *Frontiers in Systems Neuroscience*, 10. <https://doi.org/10.3389/fnsys.2016.00107>.
67. Maniglia, M., Soler, V., & Trotter, Y. (2020). Combining fixation and lateral masking training enhances perceptual learning effects in patients with macular degeneration. *Journal of vision*, 20(10), 19-19.
68. Mednick S, Nakayama K, Stickgold R. (2003) Sleep-dependent learning: A nap is as good as a night. *Nat. Neurosci.* 6:697–98
69. Nitzan Censor, Dov Sagi (2009). Global resistance to local perceptual adaptation in texture discrimination, *Vision Research*, Volume 49, Issue 21, Pages 2550-2556
70. Petrov AA, Doshier BA, Lu Z-L. (2005). The dynamics of perceptual learning: an incremental reweighting model. *Psychol. Rev.* 112:715
71. Petrov AA, Doshier BA, Lu Z-L. (2006). Perceptual learning without feedback in non-stationary contexts: data and model. *Vis. Res.* 46:3177–97
72. Poggio T, Edelman S, Fahle M. (1992). Learning of visual modules from examples: a framework for understanding adaptive visual performance. *CVGIP Image Underst.* 56:22–30
73. Polat U. (1999) Functional architecture of long-range perceptual interactions. *Spatial Vision*. 12(2):143-162. DOI: 10.1163/156856899x00094. PMID: 10221425.

74. Polat,U.,Schor,C.,Tong,J.L.,Zomet,A.,Lev,M.,Yehezkel,O.,et al.(2012). Training the brain to overcome the effect of aging on the human eye. *Sci.Rep.* 2, 278. doi: 10.1038/srep00278
75. Polat.U (2009). Making perceptual learning practical to improve visual functions, *Vision Research*, Volume 49, Issue 21, Pages 2566-2573, ISSN 0042-6989, <https://doi.org/10.1016/j.visres.2009.06.005>.
76. Ramachandran V, Braddick O. (1973). Orientation-specific learning in stereopsis. *Perception* 2:371–76
77. Sagi D. (2011). Perceptual learning in *Vision Research*. *Vision research*, 51(13), 1552–1566. <https://doi.org/10.1016/j.visres.2010.10.019>
78. Sale, M.V., Kuzovina, A. (2022). Motor training is improved by concurrent application of slow oscillating transcranial alternating current stimulation to motor cortex. *BMC Neurosci* 23, 45. <https://doi.org/10.1186/s12868-022-00731-x>
79. Sasaki, Y., Nanez, J. E., & Watanabe, T. (2010). Advances in visual perceptual learning and plasticity. *Nature reviews. Neuroscience*, 11(1), 53–60. <https://doi.org/10.1038/nrn2737>
80. Schoups, A. A., Vogels, R., & Orban, G. A. (1995). Human perceptual learning in identifying the oblique orientation: retinotopy, orientation specificity and monocularly. *The Journal of physiology*, 483(3), 797-810.
81. Schoups, A., Vogels, R., Qian, N., & Orban, G. (2001). Practising orientation identification improves orientation coding in V1 neurons. *Nature*, 412(6846), 549-553.
82. Seitz AR, Yamagishi N, Werner B, Goda N, Kawato M, et al. (2005) Task specific disruption of perceptual learning. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 102: 14895–14900.
83. Seitz, A. R., & Dinse, H. R. (2007). A common framework for perceptual learning. *Current opinion in neurobiology*, 17(2), 148–153. <https://doi.org/10.1016/j.conb.2007.02.004>
84. Seitz, A. R., & Watanabe, T. (2009). The phenomenon of task-irrelevant perceptual learning. *Vision Research*, 49(21), 2604-2610.
85. Seitz, A. R., Kim, R., & Watanabe, T. (2005). Rewards evoke learning of unconsciously processed visual stimuli in adult humans. *Neuron*, 45(6), 701-707.
86. Seitz, A. R., Nanez, J. E., Holloway, S. R., Koyama, S., Watanabe, T. (2005). Seeing what is not there shows the costs of perceptual learning. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 102(25), 9080-9085.
87. Seitz, A., & Watanabe, T. (2005). A unified model for perceptual learning. *Trends in cognitive sciences*, 9(7), 329–334. <https://doi.org/10.1016/j.tics.2005.05.010>

88. Shibata, K., Sagi, D., & Watanabe, T. (2014). Two-stage model in perceptual learning: toward a unified theory. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 1316, 18–28. <https://doi.org/10.1111/nyas.12419>
89. Shibata, K., Sasaki, Y., Bang, J. W., Walsh, E. G., Machizawa, M. G., Tamaki, M., Chang, L. H., & Watanabe, T. (2017). Overlearning hyperstabilizes a skill by rapidly making neurochemical processing inhibitory-dominant. *Nature neuroscience*, 20(3), 470–475. <https://doi.org/10.1038/nn.4490>
90. Shibata, K., Sasaki, Y., Kawato, M., & Watanabe, T. (2016). Neuroimaging Evidence for 2 Types of Plasticity in Association with Visual Perceptual Learning. *Cerebral cortex (New York, N.Y.: 1991)*, 26(9), 3681–3689. <https://doi.org/10.1093/cercor/bhw176>
91. Shibata, K., Yamagishi, N., Ishii, S., & Kawato, M. (2009). Boosting perceptual learning by fake feedback. *Vision research*, 49(21), 2574–2585. <https://doi.org/10.1016/j.visres.2009.06.009>.
92. Shiffrar, M., & Heinen, S. J. (2011). Perceptual training makes learning to dance less stressful. *Frontiers in Psychology*, 2, 34.
93. Song, Y., Chen, N., & Fang, F. (2021). Effects of daily training amount on visual motion perceptual learning. *Journal of vision*, 21(4), 6. <https://doi.org/10.1167/jov.21.4.6>
94. Sowden, P. T., Rose, D., & Davies, I. R. L. (2002). Perceptual learning of luminance contrast detection: Specific for spatial frequency and retinal location but 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)
95. Van Essen DC, Anderson CH, Felleman DJ. (1992) Information processing in the primate visual system: an integrated systems perspective. *Science* 255:419
96. Watanabe, T., & Sasaki, Y. (2015). Perceptual learning: toward a comprehensive theory. *Annual review of psychology*, 66(1), 197-221.
97. Xiao, L. Q., Zhang, J. Y., Wang, R., Klein, S. A., Levi, D. M., & Yu, C. (2008). Complete transfer of perceptual learning across retinal locations enabled by double training. *Current Biology*, 18(24), 1922-1926.
98. Yamada, T., Watanabe, T., & Sasaki, Y. (2024). Plasticity-stability dynamics during post-training processing of learning. *Trends in cognitive sciences*, 28(1), 72–83. <https://doi.org/10.1016/j.tics.2023.09.002>
99. Yen, C.; Lin, C.-L.; Chiang, M.-C. (2023) Exploring the Frontiers of Neuroimaging: A Review of Recent Advances in Understanding Brain Functioning and Disorders. *Life*: 13, 1472.

100. Yotsumoto, Y., Watanabe, T., & Sasaki, Y. (2008). Different dynamics of performance and brain activation in the time course of perceptual learning. *Neuron*, 57(6), 827-833.
101. Yu, C., Klein, S. A., & Levi, D. M. (2004). Perceptual learning in contrast discrimination and the (minimal) role of context. *Journal of Vision*, 4(3), 4-4. <https://doi.org/10.1167/4.3.4>
102. Yu, Q., Zhang, P., Qiu, J., & Fang, F. (2016). Perceptual learning of contrast detection in the human lateral geniculate nucleus. *Current Biology*, 26(23), 3176-3182.
103. Zhang, P., Zhao, Y., Doshier, B. A., & Lu, Z.-L. (2018). Assessing the detailed time course of perceptual sensitivity change in perceptual learning. *Journal of Vision*, 18 (10): 1068, <https://doi.org/10.1167/18.10.1068>
104. Zhao, Y., Lesmes, L. A., & Lu, Z.-L. (2017). The quick Change Detection method: Bayesian adaptive assessment of the time course of perceptual sensitivity change. *Investigative Ophthalmology & Visual Science*, 58(8), 5633-5633.
105. Zhao, Y., Lesmes, L. A., & Lu, Z.-L. (2019). Efficient assessment of the time course of perceptual sensitivity change. *Vision Research*, 154, 21-43.
106. Zhong-Lin Lu, Tianmiao Hua, Chang-Bing Huang, Yifeng Zhou, Barbara Anne Doshier (2011). Visual perceptual learning, *Neurobiology of Learning and Memory*, Volume 95, Issue 2, Pages 145-151.