



Università degli Studi di Padova

Dipartimento di Fisica Galileo Galilei

Corso di Laurea Triennale in Ottica e Optometria

Tesi di Laurea

Effetto della stimolazione audiovisiva sulla prestazione in un
compito di affollamento visivo: un'indagine sperimentale

Relatore: Dott. Battaglini Luca

Laureando: Gobbi Pietro

Matricola: 2012226

Anno Accademico 2022/2023

ABSTRACT	5
1. FONDAMENTI TEORICI	7
1.1 Percezione Visiva	7
1.2 Affollamento visivo e la sua elaborazione	10
1.3 Il ruolo delle onde cerebrali nell'elaborazione dell'informazione visiva	12
1.4 Stimolazione audiovisiva	13
2 DESCRIZIONE DELLO STUDIO	15
2.1 Partecipanti	15
2.2 Stimoli e Apparato	15
2.3 Procedura	17
2.4 Analisi dei risultati	19
3. RISULTATI	25
4. DISCUSSIONE	27
4.1 Riassunto dei dati	27
4.2 Interpretazione dei dati	27
4.3 Confronto con la letteratura esistente	28
4.4 Implicazioni pratiche e sviluppi futuri	28
4.5 Limiti dello studio	29
CONCLUSIONI	31
BIBLIOGRAFIA	33

Abstract

Percepire e interpretare correttamente il mondo che ci circonda ha un impatto importantissimo nella nostra vita quotidiana e l'affollamento visivo gioca un ruolo fondamentale nell'elaborazione visiva. L'affollamento visivo si verifica quando una grande quantità di stimoli visivi si presenta contemporaneamente nel nostro campo visivo, rendendo difficile la percezione e l'elaborazione dei singoli elementi. Si concretizza spesso nella vita di tutti i giorni, ad esempio quando si cerca di individuare un oggetto in una folla, di leggere un libro con un testo molto denso o di districarsi in un ambiente molto affollato come un centro commerciale o una stazione. Una buona percezione visiva è fondamentale per poter svolgere con successo queste attività quotidiane e avere una buona qualità della vita. L'affollamento visivo, pertanto, può avere un impatto significativo sulla nostra capacità di godere delle esperienze visive. Questo fenomeno rappresenta una sfida per il nostro sistema visivo, in quanto può interferire con la nostra capacità di individuare ed elaborare singoli oggetti all'interno di un ambiente visivo complesso e affollato. Tale fenomeno è stato oggetto di numerosi studi e si pensa che possa essere influenzato da vari fattori, tra cui la densità degli oggetti, la loro complessità, il contrasto e la simmetria (Rosenholtz, 2016). Ad esempio, individuare oggetti in una scena affollata può essere particolarmente difficile per le persone con disturbi dell'apprendimento come la dislessia o per coloro che hanno subito lesioni cerebrali (Martelli, et al., 2009, Gori et al., 2015). Secondo Rosenholtz (2016) "l'affollamento visivo è un fenomeno in cui l'individuazione di un oggetto è ostacolata dalla presenza di altri oggetti nella stessa regione spaziale". In particolare, negli ultimi anni sono stati effettuati studi che hanno valutato l'effetto di stimolazioni audiovisive sulla performance visiva; alcuni studi esplorativi ipotizzano la possibilità di una diminuzione dell'effetto di affollamento attraverso una stimolazione ritmica audiovisiva, (Marini, et al., 2021) ma resta un campo dove ci sono molti dubbi e spazi per nuove conoscenze. La stimolazione audiovisiva è un'area di ricerca in rapida evoluzione e che consiste nell'influenzare l'attività cerebrale con stimoli audiovisivi (bip sonori e flash) presentati in modo ritmico. Ad esempio, una stimolazione audiovisiva a 10 Hz è stata associata all'aumento dell'attività delle regioni cerebrali coinvolte nell'integrazione

temporale di stimoli visivi (Ronconi, et al., 2017; Ronconi, et al., 2018), mentre la stimolazione a 18 Hz sembra essere più strettamente legata alle regioni cerebrali coinvolte nell'elaborazione visiva di oggetti complessi (Zhou, et al., 2020). Ronconi e colleghi (Ronconi, et al., 2017¹, Ronconi, et al., 2018²) hanno recentemente dimostrato attraverso gli studi appena citati che l'utilizzo di queste frequenze nella stimolazione audiovisiva influenza l'attività di diverse aree cerebrali coinvolte nella percezione visiva, suggerendo che la stimolazione audiovisiva potrebbe rappresentare un potenziale intervento non invasivo per migliorare la prestazione in situazioni di affollamento visivo. Battaglini e colleghi (Battaglini, et al., 2020) hanno infatti confermato l'ipotesi che una stimolazione transcranica a corrente alternata (*tACS*) possa modulare l'attività cerebrale associata all'elaborazione visiva, ottenendo un miglioramento della prestazione in compito di riconoscimento di orientazione in una situazione di affollamento visivo, mediante una stimolazione a 18 Hz. L'obiettivo di questo studio è stato quello di verificare se anche una stimolazione audiovisiva con la stessa frequenza utilizzata da Battaglini e colleghi (2020) possa ridurre l'affollamento visivo. Sono stati quindi testati 18 partecipanti, sottoposti a tre differenti stimolazioni in sequenze diversificate; la prima di controllo (sham), la seconda a 10 Hz e la terza a 18 Hz. I risultati suggeriscono che la stimolazione non ha avuto effetto. Per concludere, il parallelismo fra stimolazione a corrente alternata (*tACS*) e stimolazione audiovisiva non è supportato, indicando che i due diversi metodi portano a risultati diversi, almeno in un compito psicofisico di affollamento visivo.

¹ Ronconi L, Melcher D, The Role of Oscillatory Phase in Determining the Temporal Organization of Perception: Evidence from Sensory Entrainment, *The Journal of Neuroscience*, November 1, 2017 • 37(44):10636–10644

² Ronconi, L., Busch, N.A. & Melcher, D. Alpha-band sensory entrainment alters the duration of temporal windows in visual perception. *Sci Rep*, 2018, 8, 11810.

1. Fondamenti teorici

1.1 Percezione Visiva

La percezione visiva viene definita come la capacità di elaborare le informazioni che ci circondano e il suo sviluppo gioca un ruolo fondamentale nella crescita delle abilità cognitive. Il processo di percezione ha rapporti strettissimi con le competenze di ricerca, di riconoscimento, di interpretazione e con tutti gli altri sensi dell'organismo umano.

Viene, per questo, definita percezione perché non comunica un preciso dato su ciò che ci circonda, ma al meglio delle possibilità di ogni essere, elabora e sintetizza una propria interpretazione. La percezione visiva computa le più basiche abilità di riconoscimento dalla presenza o meno di un oggetto, al riconoscimento dei suoi colori e delle sue forme, al movimento; tutte azioni apparentemente comuni e semplici che però hanno un impegno cognitivo elevato. Analizzando la visione da un punto di vista funzionale, possiamo dividere il processo percettivo in una sequenza ordinata. Quando la radiazione elettromagnetica incide la superficie esterna del bulbo oculare, incontra diversi mezzi diottrici. A partire dal film lacrimale, passando per cornea, umore acqueo, cristallino e umore vitreo, la luce viene convogliata in retina, dove avvengono i primi processi elaborativi. Possiamo anatomicamente dividere la retina in dieci strati, ma funzionalmente in due unità o tre neuroni. Lo strato dei *foto-recettori* è più esterno e rivolto verso la *coroide*, lo strato più interno rivolto verso il vitreo è invece formato dal secondo e dal terzo (Bucci, 1999). Il primo passo viene compiuto dai fotorecettori, i quali possono essere *coni* o *bastoncelli*:

coni: sono caratterizzati da un segmento esterno di piccole dimensioni, di piccolo numero rispetto ai bastoncelli, sono localizzati maggiormente in *fovea* (sede della visione centrale) e sono responsabili della visione *fotopica*. Hanno un particolare pigmento definito *opsina*, il quale si divide in tre categorie che permettono il riconoscimento dei colori;

bastoncelli: sono caratterizzati da un articolo esterno di lunghe dimensioni, sono presenti esclusivamente al di fuori della fovea e per questo sono maggiori rispetto ai coni. Contengono il pigmento *rodopsina* e sono deputati alla visione *scotopica*.

Possiamo quindi descrivere le cellule che compongono la retina come finalizzate alla trasformazione del segnale elettromagnetico in attività neurale, la trasmissione del segnale avviene quindi attraverso:

via verticale: sequenza formata da fotorecettori, cellule bipolari e successivamente cellule gangliari, essa trasmette direttamente alle vie superiori;

via orizzontale: composta dalle “propaggini” laterali dei fotorecettori, dalle cellule orizzontali e amacrine, quest’ultima non comunica alle vie superiori, ma inibisce il segnale controllandone la propagazione.

I fotorecettori sono connessi alle cellule bipolari, le quali faranno a sua volta sinapsi con le cellule gangliari dove avviene l’inizio del potenziale d’azione per la trasmissione del segnale. A questo punto gli assoni delle cellule gangliari si riuniscono a “*fascetti*” per formare il *nervo ottico*. Questo è definito come il secondo nervo cranico ed è caratterizzato da sola afferenza sensoriale (Rossetti, et al., 2003). Appena esce dall’orbita attraverso il forame ottico, dopo 10mm dalla sua estensione i due nervi cranici si incontrano andando a formare il *chiasma ottico*. Presso il chiasma ottico gli assoni delle due *emi-retine* nasali si incrociano formando una *decussazione*, è corretto quindi definirla una parziale decussazione della *proiezione retinofuga*. A questo punto è necessario menzionare l’esistenza di diversi tipi di cellule gangliari, le quali si dividono per caratteristiche e funzioni, raggruppandosi in diversi gruppi:

cellule di tipo M: le cellule M-gangliari costituiscono circa l’8% delle cellule gangliari, sono caratterizzate da ampi campi recettivi specializzate nell’elaborazione del movimento, rispondono bene a stimoli di grandi dimensioni e hanno una conduzione del segnale molto rapida;

cellule di tipo P: le cellule P-gangliari sono l’80% di questo gruppo, hanno piccoli campi recettivi, poca sensibilità al contrasto e si occupano della detenzione di dettagli fini, forme e colori;

cellule di tipo K: le cellule koniocellulari dette anche *cellule non-P non-K*, sono tutt’oggi campo di molti studi, si pensa però ricevano segnale da parte di uno dei tre coni e combinino in modo sottrattivo questo segnale con le altre due tipologie di coni (Heermann, 2017).

Dopo la decussazione chiasmatica, gli assoni della proiezione retinofuga formano i *tratti ottici* che corrono sotto la pia madre. Un piccolo numero di questi si stacca dal tratto

ottico per fare sinapsi con le cellule dell'ipotalamo, un altro 10% viene condotto al mesencefalo. Tuttavia, la gran parte degli assoni del tratto ottico innervano il *corpo genicolato laterale* (CGL) del talamo dorsale. Il corpo genicolato laterale è diviso convenzionalmente in sei strati, ed è proprio qui che avviene la sinapsi tra le cellule di tipo P, cellule di tipo M e cellule K con le cellule dei differenti strati del CGL. Le fibre di entrambi gli occhi fanno sinapsi nei sei strati di ogni corpo genicolato laterale poco fa menzionati. Considerando quindi come esempio il nucleo di destra, nei suoi strati due, tre e cinque si troveranno le fibre dell'occhio destro, nei restanti strati uno, quattro e sei faranno sinapsi le fibre provenienti dall'occhio controlaterale, in questo caso il sinistro (Hubel, 1988).

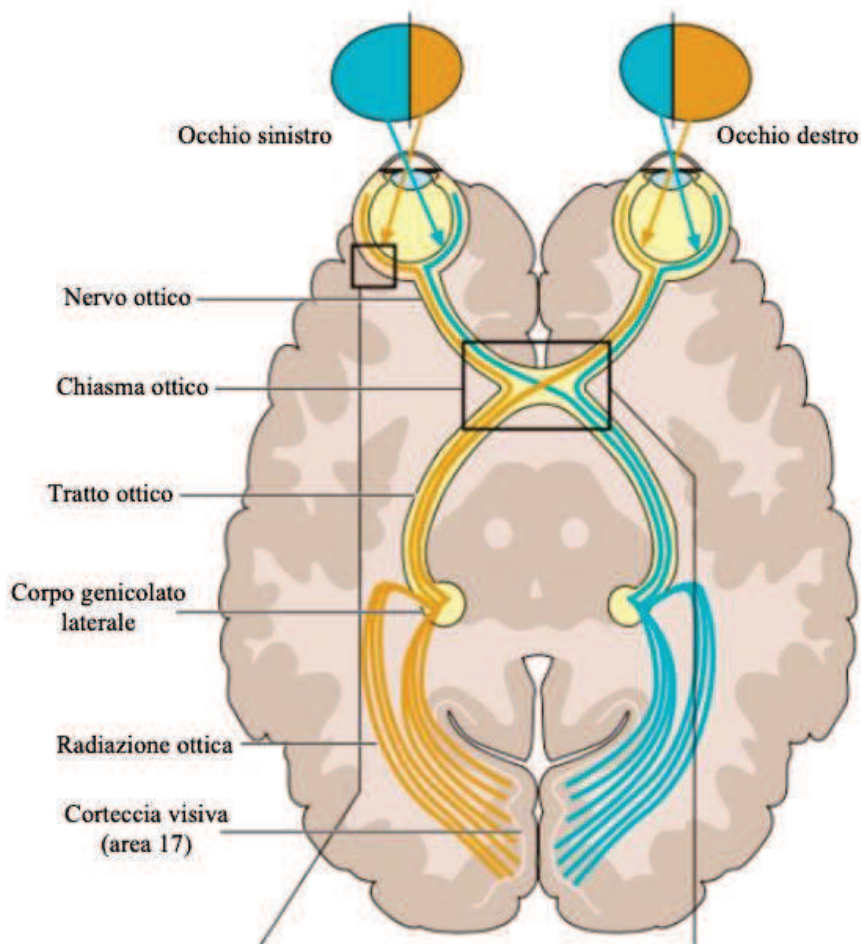


Fig. 1: neuroanatomia schematica delle vie visive

Un'ulteriore divisione viene fatta all'interno di questa zona: i primi due strati (strati ventrali) contengono neuroni di grosse dimensioni e per questo vengono definiti *magnocellulari*; i restanti strati tre, quattro, cinque e sei (strati dorsali) sono definiti *parvocellulari*. Il nucleo genicolato laterale ha ora come bersaglio la *corteccia visiva primaria o area 17 di Brodman* che viene anche detta *VI o corteccia striata*. Viene definita tale grazie alla composizione dei suoi neuroni che posseggono corpi cellulari disposti a sei strati. Partendo ora dalla sostanza bianca vengono nominati semplicemente con numeri romani partendo dal VI e finendo all'I (Hubel, 1982). Lo strato IV viene ulteriormente diviso in tre strati, A, B e C, quest'ultimo a sua volta viene diviso in $IVC\alpha$ e $IVC\beta$. La composizione cellulare varia a seconda degli strati infatti, gli strati III, IV, V e VI sono caratterizzati da cellule piramidali, lo strato IVC presenta invece cellule spinose. Al suo interno arrivano le efferenze dal NGL che divide proiettando le cellule magnocellulari nello strato $IVC\alpha$ fino all'IVB, e le cellule parvocellulari nello strato $IVC\beta$ fino allo strato III (Hubel, 1982, Spector, et al., 2004).

1.2 Affollamento visivo e la sua elaborazione

È curioso notare come manteniamo l'illusione che il nostro ambiente visivo sia costantemente nitido e stabile. Quando però ci viene chiesto di descrivere un oggetto che non rientra nel nostro campo visivo centrale, l'acuità visiva crolla e i problemi che seguono sono molteplici, questo è perché siamo in presenza di molti fenomeni tra cui l'*affollamento visivo*. Questo fenomeno viene definito come la difficoltà nel riconoscere oggetti se sono circondati da fianchi. Si tratta di un fenomeno tipico della periferia del campo visivo che compromette la nostra capacità di identificare, localizzare e contare gli oggetti, ma non di rilevarli (Pelli, et al., 2008).

Sono stati fatti molteplici studi per comprendere al meglio i fattori che influenzano l'affollamento visivo e sembra che il più importante sia la distanza tra l'oggetto da descrivere e i suoi fianchi (Maniglia, et al., 2011). Questa distanza è lo *spazio critico* e viene definita come quella spaziatura sotto alla quale i fianchi peggiorano il riconoscimento dell'oggetto. Possiamo quantificare questa misura come quella distanza

che permette una prestazione pari al 75% di risposte corrette in un compito di riconoscimento.

Nel 1970 Herman Bouma riporta che la spaziatura critica è direttamente collegata in modo proporzionale all'eccentricità del bersaglio, questo fenomeno viene descritto dalla Legge di Bouma (Bouma, 1970). È ormai chiaro che non solo la distanza critica influenza il fenomeno trattato, ma ci sono molteplici caratteristiche dei fianchi che partecipano alla sua elaborazione. L'affollamento visivo periferico viene infatti definito *non isotropo*, questo perché esiste una differenza tra i fianchi posti radialmente e tangenzialmente. Per esempio, considerato un meridiano verticale, sono più efficaci i fianchi posti verticalmente che orizzontalmente, al contrario, sul meridiano orizzontale sono più efficaci quelli posti orizzontalmente rispetto ad una posizione verticale. Bouma (1970) osservò anche una differenza consistente tra la posizione dei fianchi, definendo maggiore l'affollamento visivo per quelli posti in periferia, rispetto a quelli disposti verso la fovea. Questa asimmetria interno-esterno può essere collegata al fenomeno di *magnificazione corticale*, essendo più rappresentata in corteccia la zona dei fianchi vicino alla fovea (Whitney, et al., 2011). Possiamo ad oggi affermare con certezza che si ha una buona comprensione dei fenomeni che influenzano e regolano l'affollamento visivo, non sono però ancora chiare le basi neurali della sua elaborazione e individuazione. Numerose ipotesi prendono in considerazione la possibilità che avvenga un'errata integrazione delle caratteristiche dei target nelle aree superiori come nell'area ventrale V4. Tramite EEG Chicherov e colleghi (2014), hanno infatti dimostrato che non sono presenti effetti nella prima fase d'elaborazione delle informazioni riflessa dalla componente P1, ma si verifica una soppressione nelle aree di alto livello riflesse dalla componente N1 (stimolo dopo 180ms), come nella corteccia occipitale laterale. Non viene esclusa l'ipotesi della provenienza da processi visivi più basilari come la corteccia visiva primaria, infatti Chen e colleghi (2019), hanno diversamente registrato una riduzione del segnale *BOLD* nella componente C1, anche se fortemente modulata dall'attenzione, che origina appunto in V1 e non nelle aree corticali superiori. L'affollamento visivo viene comunque visto come un fenomeno a più stadi di processamento e quindi non omogeneo. Essendo uno stimolo complesso, la sua elaborazione nella gerarchia visiva sembra per questo deputata a diversi livelli.

1.3 Il ruolo delle onde cerebrali nell'elaborazione dell'informazione visiva

Le recenti ricerche sugli effetti dell'affollamento visivo hanno dimostrato che *onde alfa* e *onde beta* svolgono un ruolo fondamentale nel processo di selezione dell'informazione visiva. Un interessante approccio allo studio dei meccanismi neurali è l'analisi delle diverse onde cerebrali misurate tramite elettroencefalografia (EEG). In un primo studio Ronconi e colleghi (2016), manipolando lo spazio critico tra fiachi e oggetto bersaglio, hanno analizzato l'attività oscillatoria nelle bande *alfa*, *beta*, e *gamma*, riscontrando una maggiore riduzione dell'attività *post-stimolo* nella banda beta in condizioni di elevato affollamento visivo. Ronconi e colleghi (Ronconi, et al., 2017) hanno confermato nuovamente questa ipotesi studiando la potenza prestimolo e la differenza di fase in diverse condizioni di affollamento visivo. I risultati mostrano un'associazione tra le *frequenze alfa* (8-12 Hz) e situazioni di affollamento medio, come per le *frequenze beta* (13-20 Hz) in situazioni di forte affollamento. Nonostante diversi studi confermino la correlazione tra determinate oscillazioni neurali e il fenomeno dell'affollamento visivo, questa relazione viene anche osservata attraverso la modulazione diretta di queste oscillazioni. In un recente studio pubblicato da Battaglini e colleghi (2020), viene impiegata la stimolazione transcranica a corrente alternata (*tACS*) nella banda beta (18 Hz), nella banda alfa (10 Hz) e in regime di controllo (*sham/placebo*), ipotizzando, in accordo con gli studi di Ronconi e colleghi (2016; 2017) che proprio la banda dei 18 Hz possa modulare l'attività beta parietale migliorando la percezione di stimoli visivi in situazioni selettivamente affollate. I risultati confermano l'ipotesi iniziale, dimostrando che un aumento dell'attività oscillatoria della banda beta grazie all'EEG porta una riduzione dell'affollamento visivo. Tuttavia, la stimolazione transcranica ha dei criteri d'esclusione precisi; il macchinario è costoso e coinvolge l'utilizzo di elettrodi direttamente sul cuoio capelluto, per questo può talvolta comportare dei fastidi e potrebbe essere scomoda in determinati trattamenti o con partecipanti più sensibili. L'obiettivo durante la nostra indagine sperimentale è quello di verificare se una stimolazione *percettiva* può anch'essa ridurre l'affollamento visivo andando a influenzare selettivamente l'attività oscillatoria.

1.4 Stimolazione audiovisiva

Gli stimoli visivi e uditivi interagiscono e influenzano reciprocamente la percezione visiva. Sono stati infatti eseguiti diversi studi nell'ambito della psicologia visiva, i quali indagano il ruolo della stimolazione audiovisiva e un possibile conseguente *trascinamento* visivo e impatti sui ritmi oscillatori. Tuttavia, per ottenere prove più causali che colleghino la percezione con la fase e/o la frequenza di diversi ritmi oscillatori sono necessari metodi che manipolino direttamente le oscillazioni neurali. Un modo per verificarlo è sfruttare la tendenza intrinseca delle oscillazioni neurali a mostrare trascinamento a forze esterne periodiche. Thut e colleghi (2011) hanno dimostrato come la stimolazione ritmica visiva o uditiva a una frequenza specifica possa trascinare le oscillazioni neurali, portando a fenomeni di risonanza nell'attività neurale e percettiva. L'idea alla base di alcuni studi è che la stimolazione audiovisiva a specifiche frequenze, comprese quelle nella banda alfa, possa influenzare il trascinamento visivo e l'integrazione temporale delle informazioni visive nel cervello. Attraverso la stimolazione *IAF* (picco di frequenza alfa individuale) sono stati testati i possibili legami causali tra le caratteristiche oscillatorie e l'integrazione/segregazione temporale. Il trascinamento a $IAF \pm 2$ Hz è stato somministrato nell'intervallo prestimolo per allineare le oscillazioni a un ritmo più veloce o più lento, e attraverso una variazione delle prestazioni si è dimostrato un diretto collegamento tra la banda alfa e la risoluzione temporale (Ronconi, et al., 2018; Ronconi et al., 2017). Ronconi e colleghi (2017) attraverso un ulteriore studio hanno indagato sul ruolo critico delle oscillazioni nell'organizzazione temporale della percezione, dimostrando che può essere modificata dal trascinamento sensoriale. Nello studio in questione si è cercato di ridurre l'affollamento visivo attraverso una stimolazione visiva e uditiva sincrona a 18 Hz (beta), si è utilizzata una stimolazione a 10 Hz (alfa) come condizione di controllo con un tipo di stimolazione attiva e una condizione senza stimolazione ripetuta come seconda condizione di controllo. È stata successivamente analizzata l'accuratezza dei partecipanti, bilanciata la possibilità di apprendimento percettivo che può verificarsi nel corso dello svolgimento dei diversi blocchi e esaminato il tempo di reazione associato, in modo da avere dati indipendenti e più completi. Considerando il trascinamento visivo dimostrato dai recenti studi, ci

aspettiamo una modulazione dei risultati sia per i 10 Hz che per i 18 Hz. Nel corso dei prossimi capitoli verrà scrupolosamente descritta l'indagine affrontata.

2 Descrizione dello studio

2.1 Partecipanti

La seguente indagine sperimentale è stata condotta presso il Dipartimento di Psicologia Generale dell'Università degli Studi di Padova ed è stata svolta previa autorizzazione del dipartimento di Psicologia Generale e del comitato etico della ricerca psicologica (Protocollo 4026). I 18 partecipanti (13 donne e 5 uomini, età media = 22 anni; deviazione standard = 1,86; fascia di età 19-27) che si sono sottoposti hanno fornito il consenso informato e non presentavano anomalie uditive o visive.

2.2 Stimoli e Apparato

Gli stimoli utilizzati per l'esecuzione di questa indagine sono stati costruiti con Psychtoolbox per Matlab (Kleiner, et al., 2007, Brainard, 1977, Pelli 1977). I filtri gabor costituenti ciascuno stimolo sono stati ottenuti tramite il prodotto di un reticolo sinusoidale e una funzione Gaussiana secondo la formula:

$$G(x, y) = e^{-\frac{(x^2+y^2)}{2\sigma^2}} * \cos\left[\frac{2\pi * (\cos(\theta x) + \sin(\theta y))}{s + p}\right]$$

L'orientamento del reticolo, indicato dal valore di θ , può essere verticale ($\theta = 0$ deg) oppure orizzontale ($\theta = 90$ deg). La fase della sinusoide (p) è stata fissata a 90 deg. La frequenza spaziale (s) è fissata a 2 c/deg (cicli per grado) e la deviazione standard della funzione Gaussiana (σ) è pari a 0,12 deg.

Gli stimoli sono stati presentati con contrasto di Michelson, espresso dalla formula:

$$\frac{L_{max} - L_{min}}{L_{max} + L_{min}}$$

Sono 9 filtri Gabor organizzati a forma di T per gli obiettivi e 13 filtri Gabor organizzati a forma di H per i fianchi circostanti. Tutti gli stimoli deputati al riconoscimento o disturbo sono stati costruiti con le seguenti misure: 1,6 deg \times 1,2 deg. Le barre di stimolazione esterna sono rispettivamente due, sono poste esternamente rispetto agli

obiettivi e le misure sono le seguenti: larghezza pari a 1,6 deg per una lunghezza pari a 12,8 deg. La distanza tra il punto di fissazione centrale e il centro degli stimoli esterni è di 11 deg, la distanza tra gli stimoli e le barre esterne è di 1,8 deg, e la distanza tra il bordo esterno dello stimolo e il bordo interno della barra è pari a 0,2 deg. Gli stimoli esterni a forma di T sono contornati superiormente e inferiormente dai fianchi a forma di H a tre diverse distanze pari a: 1,09 deg, 3,02 deg, 4,15 deg. Gli stimoli sono presentati su uno sfondo con un'intensità media di grigio con una luminanza di 40 cd/m². La croce di fissazione è rimasta sempre presente per tutta la durata dell'esperimento. Gli stimoli utilizzati sono raffigurati nella seguente figura.



Figura 2: stimoli utilizzati durante l'indagine

Le barre di stimolazione usate non si sovrappongono mai con il futuro stimolo, così da evitare il fenomeno del mascheramento. Oltretutto è stata utilizzata la stessa altezza per le barre di stimolazione e per lo stimolo accompagnato dai disturbatori verticalmente, vedi figura 3.

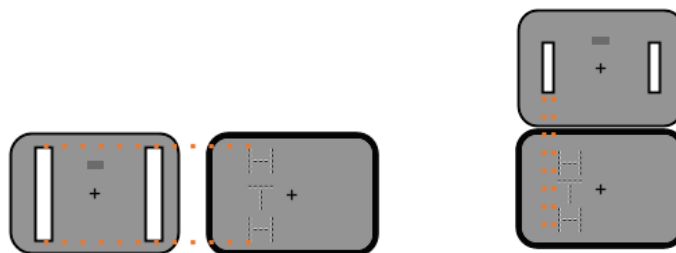


Figura 3: specifiche sulle proporzioni delle barre: la parte di sinistra mostra la pari altezza tra stimolazione e stimolo, quella di destra come è stato evitato il mascheramento.

L'apparato sperimentale prevede l'utilizzo di un monitor Full HD 24,5'' con una capacità di aggiornamento (*refresh rate*) di 146 Hz posizionato alla distanza di 57 cm dai partecipanti. Gli stimoli sono presentati su uno sfondo con un'intensità media di grigio

con una luminanza di 40 cd/m². L'audio della stimolazione è stato ascoltato attraverso un paio di cuffie direttamente collegate al PC.

2.3 Procedura

Il compito dei partecipanti consisteva nel riconoscere l'orientazione dello stimolo posizionato ai lati della croce di fissazione. Questa orientazione poteva variare tra quattro precise: $\theta = 0$ deg, $\theta = 90$ deg, $\theta = 180$ deg, $\theta = 270$ deg. È stato posto lo stesso limite per i disturbatori a forma di H; possiamo quindi considerare due sole orientazioni: verticale e orizzontale. Lo stimolo aveva la stessa possibilità di comparire a destra o a sinistra del punto di fissazione (figura 4).

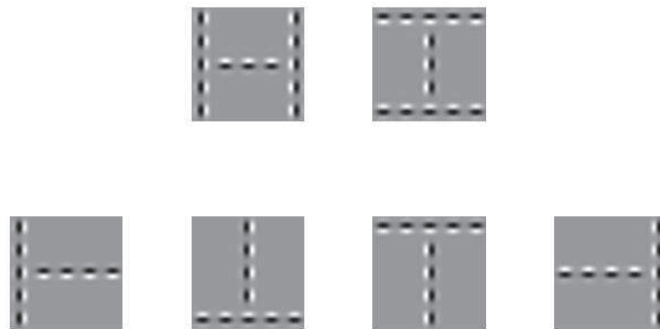


Figura 4: superiormente le orientazioni degli stimoli a forma di H, inferiormente le orientazioni degli stimoli a forma di T

Durante le stimolazioni la procedura è stata eseguita con la seguente modalità: dopo l'inizio del primo blocco è partito il primo *trial*, si sono presentate subito le barre di stimolazione esterne per una durata di comparsa di 25 ms, accompagnate in sincronia con la stimolazione uditiva della durata di 27 ms. L'*entrainment audiovisivo* ha avuto una durata complessiva di 1,64 s, la differenza tra le varie stimolazioni sta nella durata effettiva degli schermi “vuoti” posizionati tra uno stimolo e l'altro. La frequenza di presentazione degli stimoli audio-visivi varia a seconda del protocollo di stimolazione impiegato (10 Hz, 18 Hz o sham); durante il blocco di controllo è stato presentato un solo stimolo all'inizio dell'*entrainment* e uno singolo alla fine. A questo punto è stato

utilizzato l'ISI (*Interstimulus Interval*), infatti, dopo la fine della stimolazione, (*entrainment audiovisivo*) lo stimolo è apparso per 34 ms all'interno di una finestra di 300 ms dopo la scomparsa dell'ultimo flash. Questa finestra di 300 ms è stata divisa in 44 livelli (*di ISI*) di 6,8 ms ciascuno, in ognuno dei quali si sarebbe potuto presentare lo stimolo. Ne deriva che la differenza tra l'ultimo flash e la comparsa dello stimolo varia da 6,8 ms a 300 ms. Dalla scomparsa dello stimolo i partecipanti hanno avuto massimo due secondi per rispondere. Se il partecipante non risponde entro la durata totale del *trial* di 4,109 s, si passa automaticamente al trial seguente. In caso il partecipante risponda entro il tempo stabilito, comunque si attende la fine del *trial* (figura 5). Sommando la durata dell'entrainment visivo (1,64 s), la finestra di 300 ms per la comparsa dello stimolo, lo stimolo (34 ms) e i due secondi per la risposta si ha un tempo pari a 3.98 s. Sottraendo questa somma dalla durata totale del trial di 4,109 s si ottiene una durata di 0.13 s che costituisce l'*inter trial* (tempo minimo di attesa tra un trial e il seguente) minimo necessario a sincronizzare i vari trial per avere un effetto di entrainment visivo. Questa misura varia in relazione a quando lo stimolo si presenta nella finestra di 300 ms, portando ogni trial alla durata effettiva di 4,109 s. I partecipanti sono stati sottoposti anche ad un blocco di pratica prima della stimolazione. La croce di fissazione è stata presente al centro dello schermo per tutta la durata del trial. La sua comparsa, questa volta, non è però stata accompagnata dalla stimolazione. Quindi, per 1,6 s è stata presentata la croce di fissazione, successivamente è comparso lo stimolo per una durata di 34 ms come nel trial. Dalla scomparsa dello stimolo i partecipanti hanno avuto due secondi per la risposta. Passati i due secondi, è comparso il feedback contenente la risposta corretta per una durata di 0,5 s. Il blocco di pratica ha perciò una durata di 4,109 s. Blocco di pratica e stimolazione sono quindi equivalenti in durata, si eseguono di seguito e durante lo stesso giorno.

Tuttavia, dato che l'obiettivo principale di questo lavoro è quello di studiare l'effetto della stimolazione, si è cercato di ridurre la probabilità che un eventuale apprendimento percettivo potesse influenzare il fattore entrainment. Per questo si è controbilanciato l'ordine dei blocchi in modo che ciascun partecipante svolgesse l'esperimento con le diverse stimolazioni in un ordine diverso. L'accuratezza media riportata dall'insieme dei partecipanti è uguale a 0,7459, il partecipante con la prestazione peggiore ha avuto un'accuratezza pari a 0,4658 e il più performante una pari a 0,9129, mediana pari a 0,7607, primo quartile pari a 0,6819 e terzo quartile pari a 0,8286. Considerato che è un compito a scelta forzata tra quattro possibilità, una prestazione casuale darebbe un risultato di accuratezza di 0,25; si può affermare di avere un *range* di performance ideale per analizzare i dati.

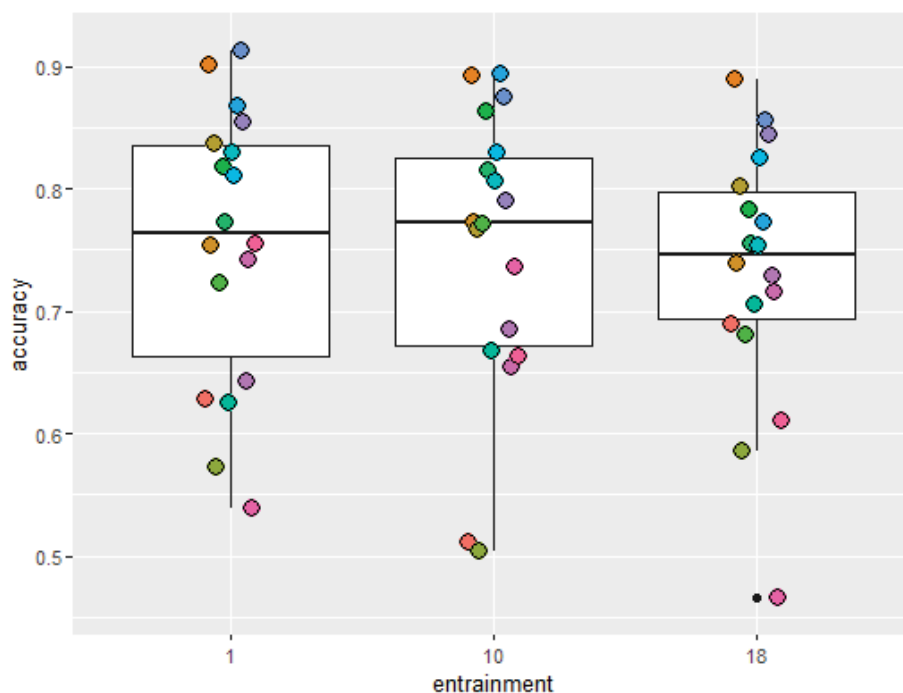


Figura 6: rappresentazione della distribuzione dei nostri dati. Nell'asse delle Y troviamo l'accuratezza, nell'asse delle X troviamo i 3 blocchi divisi per stimolazione. Ogni colore di ogni pallino corrisponde ad un partecipante e vengono raggruppati in un grafico a scatole. La linea nera centrale di ogni scatola rappresenta la mediana, il bordo superiore rappresenta il primo quartile, il bordo inferiore rappresenta il terzo quartile e i "baffi" uscenti da ogni scatola rappresentano dove sta il 95% della distribuzione dei partecipanti.

Avendo come variabile dipendente l'accuratezza, che è una variabile binomiale, abbiamo fittato un modello misto generalizzato. Quest'ultimo ha come fattori il tipo di entrainment, che è a tre livelli (sham, 10 Hz e 18 Hz) e il fattore blocco che anch'esso include tre livelli (blocco svolto per primo o "blocco 1", blocco svolto per secondo o "blocco 2", blocco svolto per terzo o "blocco tre"). In conclusione, il fattore *entrainment* ci dirà se c'è una differenza media tra i tre livelli di entrainment, mentre il fattore blocco ci dirà se c'è un fattore di apprendimento, ovvero una tendenza al miglioramento dal blocco uno al blocco tre. Dato che il disegno sperimentale è a misure ripetute, abbiamo inoltre incluso nel modello il soggetto come intercetta *random*.

Per analizzare i dati è stata fatta un'analisi della devianza su un Wald Chisquare test di tipo III, i risultati del Wald test mostrano che il fattore entrainment è statisticamente significativo $W(2) = 6,6566$, $p = 0,03585$, inoltre, anche il fattore blocco è statisticamente significativo $W(2) = 50,4376$, $p = 0,0000000001116$. Le stime del modello per il fattore blocco e per il fattore entrainment sono raffigurate in figura 7.

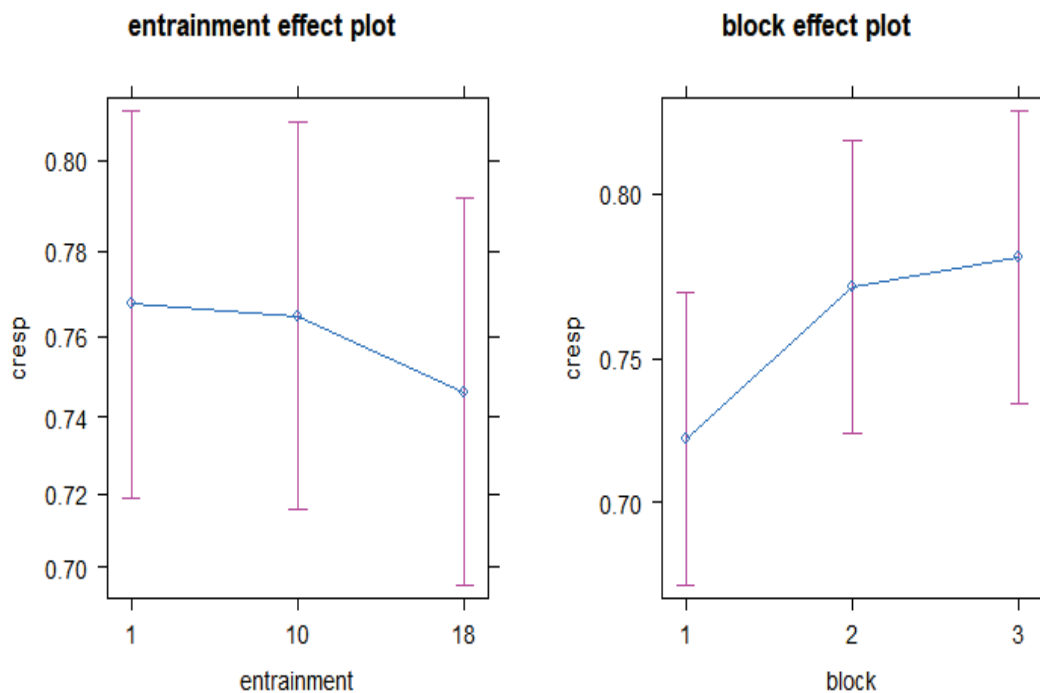


Figura 7: rappresentazione degli effetti stimati dal modello per il fattore entrainment e il fattore blocco. In entrambi gli assi delle Y troviamo l'accuratezza, nell'asse delle X del pannello di sinistra troviamo l'entrainment, nell'asse delle X del pannello di destra troviamo il blocco. Il punto blu è la media stimata, la barra viola è l'intervallo di confidenza al 95%

Per il fattore entrainment è stato fatto un post-hoc basato su dei confronti a coppie con correzione Tukey per confronti multipli. È risultato non significativo il confronto tra la stimolazione 10 Hz e lo sham con una differenza dello 0,01%, (errore standard = 0,049, z value = -0,36, p value = 0,949), non si è dimostrato significativo il confronto tra il blocco 10 Hz e il blocco 18 Hz con una differenza dello 0,1% (errore standard = 0,0488, z value = -2,061, p value = 0,098). È risultata significativa la differenza tra il blocco 18 Hz e il blocco sham con una differenza dello 0,11% (errore standard 0,048, z value = -2,364, p value = 0,048). Per il fattore blocco è stato fatto un post-hoc basato su dei contrasti ortogonali con correzione FDR per confronti multipli. Nel blocco uno l'accuratezza media è 0,723 (errore standard = 0,0262), nel blocco due l'accuratezza media è 0,773 (errore standard = 0,0230), nel blocco tre l'accuratezza media è 0,782 (errore standard = 0,0224). Nel fattore blocco il *trend* lineare è significativo (z. ratio = 6,544, p. value < 0,0001), anche il *trend* quadratico è significativo (z. ratio = -2,506, p. value = 0,0122).

Per i tempi di reazione (*reaction time*) è stata fatta una pulizia, sono stati rimossi i 359 trial con tempi di reazione che erano fuori da 2,5 dev. standard rispetto alla media, quindi quelli troppo rapidi o troppo lenti. Sono stati rimossi anche i trial a cui i partecipanti non hanno risposto in tempo, che in totale sono 181. Partendo quindi da un totale di 14256 trial, si ottengono 13716 trial per l'analisi dei tempi di reazione.

Vediamo la distribuzione in figura 8.

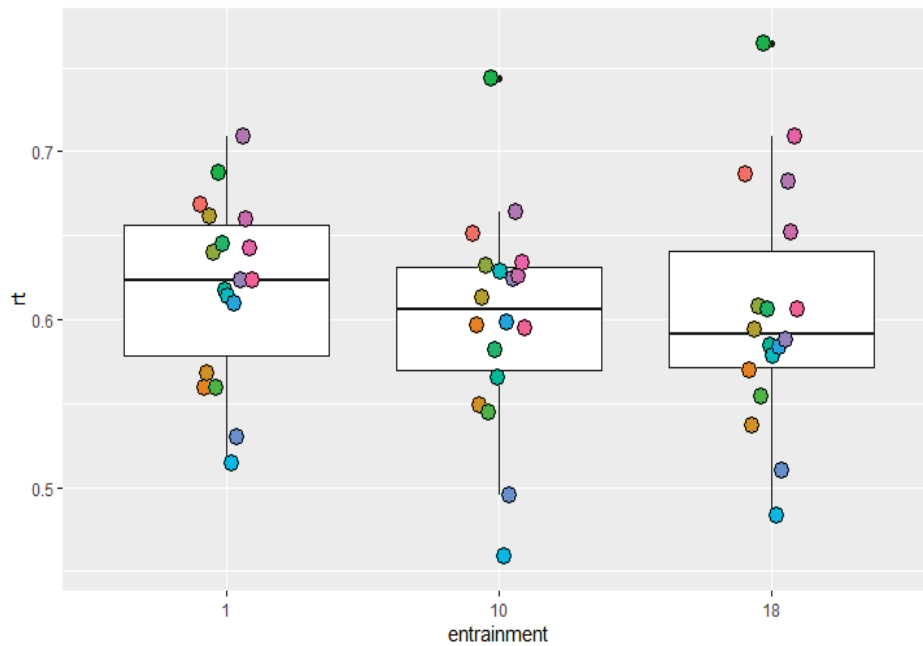


Figura 8: rappresentazione della distribuzione dei nostri dati. Nell'asse delle Y troviamo il tempo di reazione, nell'asse delle X troviamo i 3 blocchi divisi per stimolazione. Ogni colore di ogni pallino corrisponde ad un partecipante e vengono raggruppati in un grafico a scatole. La linea nera centrale di ogni scatola rappresenta la mediana, il bordo superiore rappresenta il primo quartile, il bordo inferiore rappresenta il terzo quartile e i "baffi" uscenti da ogni scatola rappresentano dove sta il 95% della distribuzione dei partecipanti.

Anche per i tempi reazione è stato utilizzato un modello misto generalizzato, usando anche in questo caso un fattore entrainment e un fattore blocco. Il fattore entrainment contiene sempre tre livelli: sham, 10 Hz e 18 Hz. Il fattore blocco è anch'esso a tre livelli, cioè l'ordine dei tre blocchi svolti. Dato che il disegno sperimentale è a misure ripetute, si è, inoltre, incluso nel modello il soggetto come intercetta *random*.

Per analizzare i dati è stata esaminata la devianza su un Wald Chi-square test di tipo III. Bisogna precisare che, data la distribuzione asimmetrica dei tempi di reazione (schiacciata verso sinistra), per *fit* il modello è stata usata una gaussiana inversa come funzione link. I risultati del Wald test mostrano che il fattore entrainment è statisticamente significativo $W(2) = 89,8960$, $p < 0,0000000000000002$. Anche il fattore blocco è statisticamente significativo $W(2) = 8,6923$, $p = 0,01296$. Per quanto riguarda i tempi di reazione, le stime del modello per il fattore blocco e per il fattore entrainment sono raffigurante in figura 9.

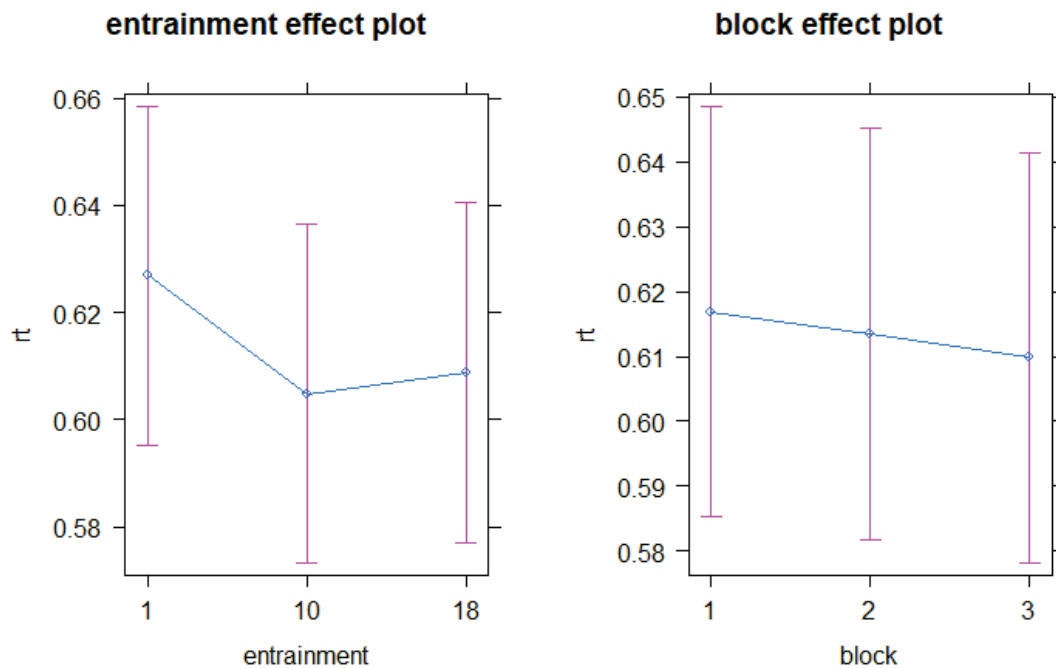


Figura 9: rappresentazione degli effetti stimati dal modello per il fattore entrainment e il fattore blocco. In entrambi gli assi delle Y troviamo i tempi di reazione, nell'asse delle X del pannello di sinistra troviamo l'entrainment, nell'asse delle X del pannello di destra troviamo il blocco. Il punto blu è la media stimata, la barra viola è l'intervallo di confidenza al 95%.

Per il fattore entrainment è stato fatto un post-hoc basato su dei confronti a coppie con correzione Tukey per confronti multipli. Risulta statisticamente significativo il confronto tra il blocco 10 Hz e il blocco sham con una differenza dello 0,022% (errore standard = 0,0025, z value = -8,98, p value <0,0001), è significativo anche il confronto tra il blocco 18 Hz e il blocco sham con una differenza di 0,018% (errore standard = 0,00246, z value = -7,32, p value <0,0001). Non è però significativo il confronto tra il blocco 18 Hz e il blocco 10 Hz con una differenza del 0,004% (errore standard = 0,0024, z value = 1,680, p value = 0,213). Per il fattore blocco è stato fatto un post-hoc basato su dei contrasti ortogonali con correzione FDR per confronti multipli. Nel blocco uno il tempo di reazione medio è 0,617 s (errore standard = 0,0162), nel blocco due il tempo di reazione medio è 0,614 s (errore standard = 0,0162), nel blocco tre il tempo di reazione medio è 0,610 s (errore standard = 0,0162). Dai dati emerge che il trend lineare è statisticamente significativo (z. ratio = -2,946, p. value 0,0064), al contrario del trend quadratico che risulta non significativo (z. ratio = -0,091, p. value = 0,9272).

3. Risultati

Possiamo affermare che l'ipotesi iniziale di miglioramento della prestazione in condizioni di affollamento visivo, non è stata confermata. Nell'analisi dell'accuratezza media, il fattore entrainment ha rivelato una significatività statistica ($W(2) = 6,6566$, $p = 0,03585$), così come il fattore blocco ($W(2) = 50,4376$, $p = 0,0000000001116$). Dai dati emerge oltretutto un calo della prestazione in presenza di una stimolazione audiovisiva con la frequenza di 18 Hz. Analizzando la prestazione singolarmente e quindi tenendo conto del possibile apprendimento percettivo, notiamo un calo nell'accuratezza media tra il blocco controllo e il 18 Hz che è stata pari a 0,11% (errore standard 0,048, z value = -2,364, p value = 0,048). Per quanto riguarda la stimolazione a 10 Hz possiamo affermare che non ci sono stati effetti statisticamente significativi rispetto alla stimolazione controllo. È molto interessante però quello che emerge dal fattore blocco, i contrasti ortogonali con correzione FDR hanno rivelato un trend lineare significativo (z . ratio = 6,544, p . value < 0,0001) e un trend quadratico significativo (z . ratio = -2,506, p . value = 0,0122). Ciò suggerisce un apprendimento percettivo significativo che diminuisce con lo svolgersi dei blocchi. Sono stati analizzati anche i tempi di reazione dei partecipanti, dividendo anche in questo caso i fattori blocco e entrainment. Le evidenze dimostrano che i tempi reazione sono diminuiti sia per la stimolazione a 10 Hz, sia per la stimolazione a 18 Hz. Anche in questo caso troviamo un linear trend statisticamente significativo nel fattore blocco (p . value = 0,0064), ciò suggerisce un calo dei tempi di reazione anche con lo svolgimento dei blocchi.

4. Discussione

4.1 Riassunto dei dati

L'analisi dei dati suggerisce che la stimolazione audiovisiva ha avuto un effetto significativo sull'accuratezza media e sui tempi di reazione durante il compito di affollamento visivo. In particolare, la stimolazione a 18 Hz ha mostrato una differenza rilevante rispetto allo sham nell'accuratezza media, peggiorando addirittura la prestazione, mentre sia il blocco 10 Hz che il blocco 18 Hz hanno mostrato tempi di reazione ridotti rispetto allo sham. Inoltre, è emerso un apprendimento percettivo considerevole, con un miglioramento dei risultati al progredire dei blocchi. Come possiamo notare (*vedi blocco di sinistra di Figura 7 e Figura 9*) i partecipanti non sono migliorati attraverso la stimolazione e al contempo hanno avuto un tempo di reazione minore. Possiamo ipotizzare quindi che siano diventati più impazienti e siano stati, di conseguenza, propensi a commettere più errori.

4.2 Interpretazione dei dati

La stimolazione audiovisiva ha influenzato con significatività le prestazioni, ma come emerge dai dati, con una riduzione e non un miglioramento. Possiamo in questo caso dedurre che la stimolazione a 18 Hz peggiori la prestazione, oltretutto per quanto riguarda i 10 Hz non ci sono stati risultati notevoli. È doveroso a questo punto notare come con lo svolgersi dei blocchi ci sia un apprendimento percettivo notevole, argomento che è già stato ipotizzato e confermato da diversi studi (Zhu, et al., 2016, Contemori, et al., 2019, Maniglia, et al., 2011). Ad oggi si è sicuri che, attraverso l'apprendimento percettivo, è solamente possibile ridurre l'affollamento visivo, ma non eliminarlo del tutto. Per quanto riguarda l'analisi dei tempi di reazione, i dati che emergono sono interessanti. Si noti come entrambe le stimolazioni (10 Hz e 18 Hz) hanno causato una diminuzione dei tempi di reazione. Solo ai 18 Hz è però associata una diminuzione dell'accuratezza. Si può quindi ipotizzare la presenza di uno *speed-accuracy tradeoff*, ciò sta a significare che l'entrainment visivo ha probabilmente spinto i partecipanti ad essere più veloci e, di conseguenza, maggiormente propensi all'errore.

4.3 Confronto con la letteratura esistente

Sebbene l'indagine condotta sia ad oggi innovativa e non sia ancora stata proposta nella letteratura scientifica, possiamo comunque ipotizzare il perché delle discrepanze trovate con l'ipotesi iniziale. Lo studio di Battaglini e colleghi (Battaglini, et al., 2020) che ha gettato le basi di questa indagine, utilizza la tACS, cioè una stimolazione a corrente alternata già molto studiata in letteratura. Questo tipo di stimolazione, a differenza di quella usata nella nostra ricerca, applica una frequenza precisa di 18 Hz attraverso l'uso di corrente alternata, che potrebbe risultare più mirata nell'indurre la sincronizzazione neurale necessaria per l'integrazione sensoriale. Diversi studi hanno confermato l'efficacia di questo metodo, descrivendo addirittura una preferenza di applicazione tra corteccia parietale destra o sinistra (Ronconi, et al., 2017³, Ronconi, et al., 2016⁴). Possiamo inoltre affermare che l'audiostimolazione non è selettiva quanto la tACS, coinvolgendo stimoli visivi e uditivi simultanei, potrebbe portare a un'interazione più complessa tra i segnali sensoriali, influenzando il processo di integrazione. Quest'ipotesi è comunque da verificare e lascia spazio a futuri studi.

4.4 Implicazioni pratiche e sviluppi futuri

Comprendere il fenomeno dell'affollamento visivo e cercare di migliorare la sua elaborazione gioca un ruolo fondamentale nello sviluppo di tecniche riabilitative in condizioni come la dislessia, dove l'affollamento è invalidante per la presenza anche nella visione centrale (Gori, et al., 2015, Martelli, et al., 2009). Questo fenomeno ha implicazioni cliniche anche in soggetti che soffrono di ambliopia o degenerazione maculare (Bonneh, et al., 2007, Hussain, et al., 2012, Maniglia, et al., 2016), per questo la possibilità di sviluppare una tecnica riabilitativa non invasiva costituisce un importantissimo obiettivo per la riabilitazione di queste patologie, che purtroppo ad oggi sono solamente controllabili e difficilmente migliorabili.

³ Ronconi, L., Bellacosa Marotti, R., 2017. Awareness in the crowd: beta power and alpha phase of prestimulus oscillations predict object discrimination in visual crowding. *Conscious. Cognit.* 54, 36–46.

⁴ Ronconi, L., Bertoni, S., Bellacosa Marotti, R., 2016. The neural origins of visual crowding as revealed by event-related potentials and oscillatory dynamics. *Cortex* 79, 87–98.

Al netto dei risultati emersi da questa indagine si può affermare che la stimolazione audiovisiva non influisce sulla prestazione e, di conseguenza, non è teoricamente applicabile a nessun protocollo riabilitativo. Resta interessante capire se l'apprendimento percettivo registrato dall'analisi possa avere in futuro degli sviluppi pratici. Possiamo concretamente affermare che questi risultati forniscono una prospettiva più approfondita sulla relazione tra stimolazione audiovisiva, elaborazione visiva e affollamento visivo, aprendo la strada a future ricerche e possibili applicazioni pratiche, anche nel campo dell'optometria.

4.5 Limiti dello studio

Nonostante gli sforzi compiuti per condurre uno studio accurato e ben strutturato, è importante riconoscere alcune limitazioni che potrebbero aver influenzato i risultati e la concretezza delle conclusioni. Sono stati coinvolti 18 partecipanti, i quali rappresentano una piccola porzione della popolazione. Un futuro campione di partecipanti più ampio potrebbe confermare o ampliare i risultati ottenuti. Gli esperimenti condotti prevedevano una prolungata osservazione da parte dei partecipanti di uno schermo posizionato a una distanza di 57 cm per un periodo di 1 ora e mezza. Tuttavia, l'effetto delle lunghe sessioni di stimolazione attente in un unico giorno potrebbe differire da quello di più sessioni a giorni alterni. Dobbiamo oltretutto considerare che il compito di riconoscimento svolto dai partecipanti ha un'accuratezza media discretamente elevata (pari a 0.7459), e che dagli studi precedentemente analizzati, la stimolazione a 18 Hz è associata a condizioni di forte affollamento visivo. Sarebbe interessante riproporre la stessa stimolazione in una situazione di maggiore affollamento visivo, utilizzando diverse durate di stimolazione e intervalli di tempo. Future ricerche potrebbero affrontare queste limitazioni per arricchire la comprensione di come la stimolazione audiovisiva possa influenzare l'elaborazione visiva in diversi contesti e campioni di popolazioni.

Conclusioni

Con l'inizio di questa indagine sperimentale ci siamo chiesti se sarebbe stato possibile gettare le basi per l'utilizzo di una stimolazione meno invasiva rispetto alla *tACS*. Coscienti dei numerosi limiti che lo studio presenta, abbiamo però realizzato una delle prime ricerche che utilizza l'audiostimolazione in un compito di affollamento visivo. Fiduciosi che questo campo verrà approfondito, è sicuramente necessario ripetere l'indagine con un campione di partecipanti più ampio. L'esplorazione dell'interazione tra stimolazione audiovisiva, affollamento visivo e prestazione visiva ha portato a risultati che, sebbene non completamente soddisfacenti, offrono spunti significativi per ulteriori indagini nel campo dell'optometria e della psicofisica. L'assenza di risultati significativi non rappresenta una conclusione negativa, bensì una base per ulteriori sviluppi. Questa ricerca contribuisce a stimolare il dibattito e l'approfondimento di nuove strategie per migliorare la performance visiva in condizioni di affollamento e a mantenere uno spirito di esplorazione e innovazione per affrontare le complessità della percezione visiva e delle sue interazioni. In definitiva, nonostante i risultati ottenuti possano rappresentare notevoli sfide, rappresentano allo stesso modo anche un punto di partenza per futuri progressi. Questa ricerca invita a considerare l'interazione tra stimolazione audiovisiva e percezione visiva come un terreno fertile per ulteriori scoperte e sviluppi, aprendo la strada a nuove riflessioni.

Bibliografia

- Battaglini, L., Ghiani, A., Casco, C. & Ronconi, L., 2020. Parietal tACS at beta frequency improves vision in a crowding regime. *NeuroImage* , Volume 208.
DOI: 10.1016/j.neuroimage.2019.116451
- Bonneh, Y. S., Sagi, D. & Polat, U., 2007. Spatial and temporal crowding in amblyopia. *Vision Research*, Volume 47, pp. 1950-1962,
DOI: 10.1016/j.visres.2007.02.015
- Bouma, H., 1970. Interaction Effects in Parafoveal Letter Recognition. *Nature* , Issue 226, pp. 177-178. <https://doi.org/10.1038/226177a0>
- Brainard, D., 1977. The Psychophysics Toolbox. *Spat Vis*, 10(4), pp. 433-436.
- Bucci, M. G., 1999. Oftalmologia. In: Roma: Società Editrice Universo, p. 3.
- Chen, N., Shin, K., Millin, R., Song, Y., Kwon, MY & Tjan, BS., 2019. Cortical Reorganization of Peripheral Vision Induced by Simulated Central Vision Loss. *The Journal of Neuroscience*, 39(18), p. 3529 –3536.
DOI: 10.1523/JNEUROSCI.2126-18.2019
- Chicherov, V., Plomp, G. & Herzog, M. H., 2014. Neural correlates of visual crowding. *NeuroImage* , Issue 93, pp. 23-31. DOI: 10.1016/j.neuroimage.2014.02.021
- Contemori, G., Trotter, Y., Cottureau , B. & Maniglia, M., 2019. tRNS boosts perceptual learning in peripheral vision. *Neuropsychologia*, Volume 125, pp. 129-136. <https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2019.02.001>
- Gori, S. & Facoetti, A., 2015. How the visual aspects can be crucial in reading acquisition: The intriguing case of crowding and developmental dyslexia. *Journal of Vision*, Volume 15, pp. 1-20. <https://doi.org/10.1167/15.1.8>

Heermann, S., 2017. Neuroanatomy of the Visual Pathway. *Klin Monbl Augenheilkd*, Volume 11, pp. 1327-1333. DOI: 10.1055/s-0043-118101

He, Q., Yang, XY., Gong, B., Bi, K & Fang, F., 2022. Boosting visual perceptual learning by transcranial alternating current stimulation over the visual cortex at alpha frequency. *Brain Stimulation*, 15(3), pp. 546-553.
<https://doi.org/10.1016/j.brs.2022.02.018>

Hubel, D. H., 1982. Exploration of the primary visual cortex, 1955–78. *Nature*, Volume 299, p. 515–524. DOI: 10.1038/299515a0

Hubel, D., 1988. Eye, Brain and Vision. In: s.l.:W H Freeman & CO, p. 65.

Hussain, Z., Webb, B. S., Astle, A. T. & McGraw, P. V., 2012. Perceptual Learning Reduces Crowding in Amblyopia and in the Normal Periphery. *The Journal of Neuroscience* , 32(2), pp. 474-480. DOI: 10.1523/JNEUROSCI.3845-11.2012

Kleiner, M., Brainard, D. & Pelli, D., 2007. <http://psychtoolbox.org/credits>.

[Online] Available at:

[http://psychtoolbox.org/\[http://www.perceptionweb.com/abstract.cgi?id=v070821](http://psychtoolbox.org/[http://www.perceptionweb.com/abstract.cgi?id=v070821)

Maniglia , M., Cottreau, B. R., Soler, V. & Trotter, Y., 2016. Rehabilitation Approaches in Macular Degeneration Patients. *Frontiers in Systems Neuroscience* , Volume 10. <https://doi.org/10.3389/fnsys.2016.00107>

Maniglia, M., Pavan, A & Cuturi, LF., 2011. Reducing Crowding by Weakening Inhibitory Lateral Interactions in the Periphery with Perceptual Learning. *PloS one*, 6(10). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0025568>

Marini, E., Lavitola, C & Casco, C., 2021. *AUDIOVISUAL RHYTHMIC STIMULATION WITHIN THE BETA BAND IMPROVES THE PERCEPTION OF CROWDED STIMULI*. <https://osf.io/2nhe9/wiki/home/>

Martelli, M., Di Filippo, G., Spinelli, D. & Zoccolotti, P., 2009. Crowding, reading, and developmental dyslexia. *Journal of Vision*, Volume 9, pp. 1-18.

doi:<https://doi.org/10.1167/9.4.14>

Pelli, D. G. & Tillman, K. A., 2008. The uncrowded window of object recognition. *Nature Neuroscience*, Issue 11, pp. 1129-1135. doi: 10.1038/nn.2187

Ronconi, L., Bertoni, S. & Bellacosa Marotti, R., 2016. The neural origins of visual crowding as revealed by event-related potentials and oscillatory dynamics. *Cortex*. DOI: 10.1016/j.cortex.2016.03.005

Ronconi, L. & Melcher, D., 2017. The Role of Oscillatory Phase in Determining the Temporal Organization of Perception: Evidence from Sensory Entrainment. *Journal of Neuroscience*, 37(44), p. 10636 –10644. <https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.1704-17.2017>

Ronconi, L. & Bellacosa Marotti, R., 2017. Awareness in the crowd: Beta power and alpha phase of prestimulus oscillations predict object discrimination in visual crowding. Volume 54, pp. 36-46. DOI: 10.1016/j.concog.2017.04.020

Ronconi, L., Busch, N. & Melcher, D., 2018. Alpha-band sensory entrainment alters the duration of temporal windows in visual perception. *Scientific reports* , 8(1), p. 11810. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-29671-5>

Rosenholtz, R., 2016. Capabilities and limitations of peripheral vision. *Annual review of vision science*, Issue 2, pp. 437-457. DOI: 10.1146/annurev-vision-082114-035733

Rossetti, A. & Gheller, P., 2003. Manuale di optometria e contattologia. In: s.l.:Zanichelli , pp. 73-78.

Spector, K. G., Malach, R., 2004. The human visual cortex. *Annual Reviews of Neuroscience* , Volume 27, pp. 649-677.

DOI:10.1146/annurev.neuro.27.070203.144220

Thut, G., Schyns, P. & Gross, J., 2011. Entrainment of perceptually relevant brain oscillations by non-invasive rhythmic stimulation of the human brain.. *Front Psychol* , 2(170). <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2011.00170>

Whitney, D. & Levi, D. M., 2011. Visual crowding: a fundamental limit on conscious perception and object recognition. *Trends in Cognitive Sciences*, 15(4), pp. 160-168. doi: 10.1016/j.tics.2011.02.005

Zhu, Z., Fan, Z. & Fang, F., 2016 . Two-stage perceptual learning to break visual crowding. *Journal of Vision* , 16(16). <https://doi.org/10.1167/16.6.16>