



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA

Dipartimento di Psicologia generale

Corso di laurea triennale in Scienze Psicologiche Cognitive e Psicobiologiche

Elaborato finale

**Il ruolo del contrasto dei fianchi nelle interazioni spaziali
inibitorie e facilitatorie nel paradigma di mascheramento
laterale**

**The role of flankers contrast on inhibitory and facilitatory spatial
interactions on the lateral masking paradigm**

Relatore
Prof. Luca Battaglini

Laureando: Niccolò Simonelli
Matricola: 2011015

Anno Accademico 2022/2023

Indice

Abstract **pag.1**

Capitolo 1

1. Introduzione **pag.3**

1.1. Campi recettivi **pag.4**

1.2. Sensibilità al contrasto nelle vie visive **pag.6**

2. Stimoli Gabor e interazioni laterali **pag.7**

2.1. Il ruolo dei fianchi **pag.8**

2.2. Lo studio di Zenger e Sagi **pag.10**

3. Ipotesi di ricerca **pag.13**

Capitolo 2

4. Metodo **pag.15**

4.1. Limiti di ricerca **pag.15**

4.2. Partecipanti **pag.15**

4.3. Apparato **pag.16**

4.4. Stimoli utilizzati **pag.17**

4.5. Procedura sperimentale **pag.20**

Capitolo 3

5. Risultati	pag.23
5.1. Esperimento 1	pag.23
5.2. T-test a campione singolo	pag.23
5.3. Correzione di Bonferroni	pag.26
6.1. Esperimento 2	pag.26
6.2 T-test a campione singolo	pag.28
6.3 Correzione di Bonferroni	pag.31

Capitolo 4

7. Discussione	pag.33
7.1. Clinica	pag.37
7.2. Terapia tRNS	pag.37
7.3. Apprendimento percettivo e maculopatie	pag.38

Appendice

8.1. Grafici	pag.41
---------------------	---------------

Bibliografia	pag.43
---------------------	---------------

Abstract

Nell'ambito della psicofisica le interazioni facilitatorie e inibitorie tra stimoli Gabor collineari (variazioni sinusoidali di luminanza smussati da una curva gaussiana), hanno da sempre interessato il settore della ricerca nell'ambito della visione. Nello specifico, a livello neurale, si è dimostrato che i neuroni appartenenti a diverse iper-colonne e che elaborano questi stimoli comunicano tra loro tramite specifiche connessioni, denominate interazioni laterali. Queste connessioni possono inibire o innalzare la risposta di un terzo neurone, modulando la sua attività. A livello psicofisico stimoli presentati in determinate porzioni del campo visivo possono facilitare o inibire la detezione di uno stimolo bersaglio. In letteratura questo paradigma è spesso indagato tramite mascheramento laterale, ovvero l'affiancamento di due Gabor collineari, "fianchi", ad uno stimolo Gabor centrale "bersaglio". Molto spesso le Gabor laterali presentano un contrasto maggiore rispetto al bersaglio (>0.6 contrasto di Michelson). Questa specifica condizione comporta effetti facilitatori e inibitori a seconda della distanza λ (lunghezza d'onda) tra bersaglio e fianchi. A piccole distanze ($\leq 2\lambda$) si evidenziano effetti inibitori, che necessitano di un contrasto maggiore per rilevare la Gabor bersaglio rispetto ad una condizione senza fianchi. A distanze più ampie ($\geq 3\lambda$) si trovano invece effetti facilitatori, con rilevazione della Gabor bersaglio con contrasto minore rispetto ad una condizione senza fianchi. In questo elaborato si è indagato in maniera approfondita il ruolo dei vari livelli di contrasto dei fianchi, soprattutto quando presentati con valori bassi, seguendo il paradigma del mascheramento laterale. I dati ottenuti da due esperimenti distinti evidenziano e confermano come la probabilità di rilevare la Gabor bersaglio sia modulata dal valore di contrasto dei fianchi. Nello specifico, si evidenziano risultati coerenti con la letteratura quando i fianchi hanno contrasto elevato ($\leq 2\lambda$ inibizione, $\geq 3\lambda$ facilitazione). Di particolare importanza i risultati per le condizioni a basso contrasto, dove è possibile osservare un effetto facilitatorio a distanze $\leq 2\lambda$. Questi dati sono in linea con le predizioni di Zenger e Sagi (1996), evidenziando l'importanza delle condizioni a basso contrasto nel paradigma del mascheramento laterale. Nello specifico questa condizione potrebbe rivelarsi utile nello studio di popolazioni cliniche, soprattutto in casi di degenerazione maculare e ambliopia. Letteratura di riferimento ha già indagato questo aspetto, evidenziando

diversa organizzazione della corteccia visiva primaria e delle interazioni laterali in questi pazienti.

Capitolo 1

Introduzione

Il contrasto, ovvero il rapporto tra le differenze di luminosità (Contrasto di Michelson, formula 1), è una caratteristica essenziale dello stimolo visivo per poter studiare la risposta dei neuroni.

Infatti, non tutti gli stimoli sono in grado di elicitare una risposta nel sistema visivo: solo specifici valori oltre una certa soglia di contrasto provocheranno una risposta consapevole da parte dell'individuo.

Nello specifico, il minor valore di contrasto necessario per far sì uno stimolo diventi visibile ad un individuo è detto soglia di contrasto (*contrast threshold o luminance* in letteratura). Questa soglia definisce il limite tra stimolo visibile e non visibile.

$$\text{Contrasto di Michelson} = \frac{L_{max} - L_{min}}{L_{max} + L_{min}} \quad (\text{formula 1})$$

La soglia di contrasto può essere misurata tramite molteplici compiti percettivi, tutti riguardanti la detezione di uno stimolo bersaglio e l'individuazione del valore di contrasto più basso entro il quale questo viene visualizzato.

Nella letteratura la soglia di contrasto è spesso indicata come sensibilità al contrasto, ognuna il reciproco dell'altra (formula 2). Persone con alta soglia di contrasto hanno minore sensibilità al contrasto, mentre quelle con bassa soglia avranno maggiore sensibilità (Owsley, 2003).

$$\text{Sensibilità al contrasto} = \frac{1}{\text{Soglia di contrasto}} \quad (\text{formula 2})$$

1.1. Campi recettivi

Per poter proseguire è necessario introdurre i meccanismi alla base del funzionamento del sistema visivo, ovvero i campi recettivi, nello specifico quelli delle cellule gangliari della retina, del nucleo genicolato laterale (NGL) e della corteccia visiva primaria (V1).

Un campo recettivo è una regione dello spazio nella quale deve essere localizzato uno stimolo sensoriale affinché un neurone possa rispondere. Nel caso delle vie visive si parla della porzione del campo visivo che se colpita da uno stimolo luminoso produce una risposta.

Nella retina i campi recettivi delle cellule gangliari sono circolari, hanno centro e periferia antagonisti e possono essere di due tipi differenti: centro ON e centro OFF (*Kuffler, 1953*).

Le cellule centro on sono eccitate e aumentano la frequenza di scarica quando la loro regione centrale viene colpita da un fascio di luce. Se il centro viene completamente illuminato, fino al confine con la periferia, la scarica sarà massima. La periferia invece, se colpita da un raggio di luce, comporterà inibizione.

Le cellule con campo recettivo centro off invece si comportano in maniera opposta; un raggio di luce nel centro comporta inibizione mentre in periferia un aumento di scarica.

Ci sono quindi due tipi di risposte:

-Risposta ON, dove il neurone scarica più rapidamente quando viene mostrata la luce e si interrompe all'interruzione della luce.

-Risposta OFF, dove il neurone smette di scaricare quando viene mostrata la luce e inizia a scaricare allo spegnimento della stessa.

Le cellule gangliari non sono semplicemente sensibili alla luce, ma al contrasto locale nell'immagine. Luce al centro e buio nell'immediata periferia per una cellula centro on, l'opposto per un centro off.

Nel NGL i campi recettivi mantengono queste caratteristiche, quindi concentrici ad antagonismo centro periferia (on e off).

Arrivando a V1 i campi recettivi diventano invece più complessi, essendo sensibili all'inclinazione, al movimento e alla misura degli stimoli luminosi che ricadono su di essi (*Hubel and Wiesel, 1959, 1974*).

V1 è basata su un'organizzazione colonnare (fig. 1.2.), infatti è possibile suddividerla in moduli cellulari di 30-100 micron (*Bonhoeffer e Grinvald, 1991; Swindale, 1996*) detti iper-colonne, formati da:

Colonne di orientamento: cellule semplici e complesse che rispondono massimamente a stimoli con lo stesso orientamento (10° di differenza tra una colonna e l'adiacente). In questo caso parliamo di preferenza d'orientazione (OP).

Colonne di dominanza oculare (OD): regioni alternate in cui si trovano cellule con preferenza per le informazioni provenienti dall'uno o dall'altro occhio.

BLOB: legati alla codifica del colore

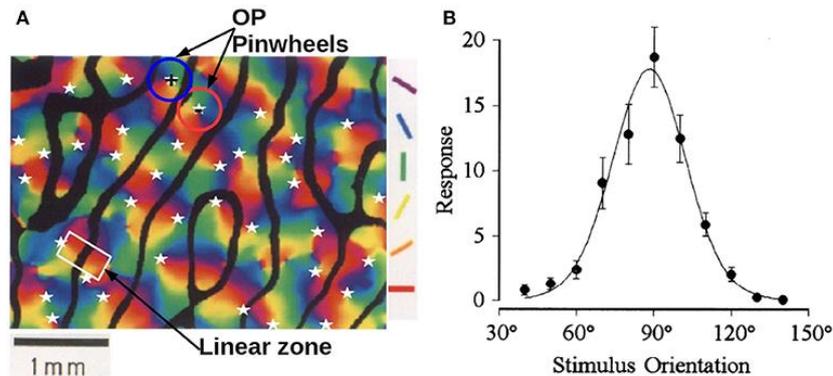


Figura 1.2. Nell'immagine possiamo osservare l'organizzazione delle colonne sulla base di preferenza d'orientazione (OP) e dominanza oculare (OD). I solchi in nero separano differenti regioni di dominanza oculare. Le regioni colorate indicano le diverse orientazioni codificate da specifiche colonne. Tramite tecniche di optical imaging è stato possibile osservare come le colonne d'orientazione abbiano un'organizzazione quasi-periodica e siano posizionate intorno ad un centro chiamato singolarità (*Bonhoeffer e Grinvald, 1991, 1993; Blasdel, 1992; Swindale, 1996*). Le singolarità tendono a formarsi intorno alle aree in nero, in specifiche zone lineari (*linear zone* in letteratura). La curva a destra mostra come ci sia una preferenza (incremento di scarica) per gli stimoli con un'orientazione di 90° (*Swindale, 1998*).

Iper-colonne adiacenti sembrano potersi stimolare tra loro tramite interazioni laterali (*Polat e Sagi, 1993; Stemmler, Usher e Niebur, 1995*). Interesse di questo elaborato è la stimolazione laterale tra iper-colonne, la stimolazione tra iper-colonne non direttamente adiacenti e i possibili vantaggi che ne possono derivare a livello di apprendimento percettivo.

1.2. Sensibilità al contrasto nelle vie visive

Il sistema visivo umano è quindi specializzato nella detezione di stimoli in base al loro contrasto e alla loro frequenza spaziale (*SF, spatial frequency*), solitamente espressa in cicli per grado di angolo visivo (*cpd, cycle per degree*) (*De Valois e De Valois, 1990*). Contrasto e frequenza spaziale sono quindi le unità fondamentali nelle quali vengono scomposte e codificate le immagini che visualizziamo (*Campbell e Robson, 1964*).

La funzione di sensibilità al contrasto (*CSF, contrast sensitivity function*, fig. 1.1) ci mostra nel dettaglio a quali frequenze spaziali e livelli di contrasto è sensibile il sistema visivo umano. In base a questi due fattori alcuni stimoli visivi attiveranno maggiormente i campi recettivi delle cellule delle vie visive rispetto ad altri.

Basse frequenze spaziali sono legate all'elaborazione di informazioni più grossolane, mentre alte frequenze codificano informazioni più dettagliate (*Morrison e Schyns, 2001; Ruiz-Soler e Beltran, 2006*). La soglia di contrasto varia in base alla frequenza spaziale. La curva di sensibilità al contrasto (fig. 1.1.) mostra il variare della sensibilità al contrasto (il reciproco della soglia di contrasto) in funzione della frequenza spaziale (cpd).

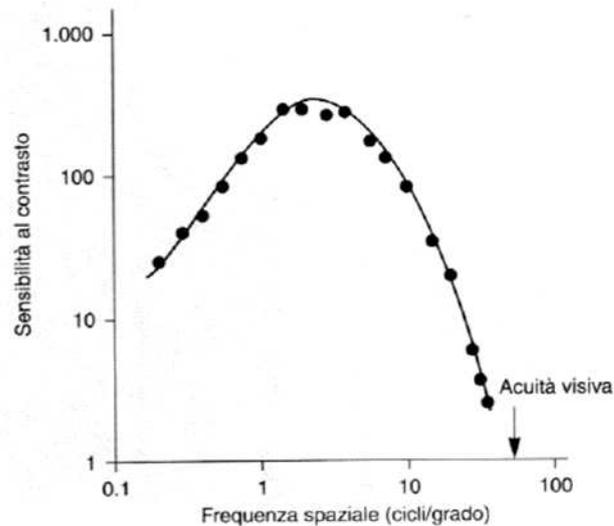


Figura 1.1. La curva di sensibilità al contrasto (CSF) individuata da Campbell e Robson nel 1964. La U rovesciata indica il variare della sensibilità al contrasto in funzione di differenti cpd.

2. Stimoli Gabor e interazioni laterali

Un ampio numero di studi evidenzia come lo stimolo più adatto ad attivare i campi recettivi di V1 sia una funzione Gabor bidimensionale (*Marcelja, 1980; Polat e Tyler, 1999; Ringach, 2002; Watson, 1983*).

È importante evidenziare come nonostante nelle prime fasi di elaborazione dell'immagine l'informazione sia processata sulla base di caratteristiche locali (*Hubel e Wiesel, 1963*), le cellule interagiscono comunque l'una con l'altra. Per questo motivo la loro frequenza di scarica può essere influenzata da ciò che si trova intorno allo stimolo (*Gilbert e Wiesel, 1990*). Questa interazione sembra derivare dai collegamenti orizzontali a lungo raggio tra neuroni corticali con simile preferenza di orientamento e frequenza spaziale (*Gilbert, 1998*). Queste connessioni si estendono ben oltre la parte di corteccia che rappresenta la fovea, raggiungendo aree che seguendo l'organizzazione retinotopica ricadono nella periferia (*Gilbert, 1992; Gilbert e Wiesel, 1990*).

Visto che le risposte delle cellule di V1 dipendono anche dall'influenza del contesto intorno allo stimolo, anche stimoli che cadono al di fuori del campo recettivo, in regioni vicine del campo visivo, possono comportare una risposta, modulando la frequenza di scarica (*Gilbert, 1992; Gilbert e Wiesel, 1990*).

2.1 Il ruolo dei fianchi

Polat e Sagi sono stati tra i primi ad indagare l'importanza dei fianchi (*flankers* in letteratura) presentati in concomitanza ad uno stimolo Gabor bersaglio (*target* in letteratura) in compiti di detezione dello stimolo. Dai loro studi emergono anche risultati circa le interazioni laterali.

Una delle scoperte principali nel campo della percezione visiva è stata l'individuazione di più canali paralleli all'interno del sistema visivo. Ognuno di questi canali è specializzato nella trasmissione di uno specifico aspetto dello stimolo visivo. Questa scoperta è stata possibile grazie agli studi sui campi recettivi (*Hubel e Wiesel, 1963; Campbell e Robson, 1964*). Il termine canale (*channel* in letteratura) si riferisce a meccanismi che operano in parallelo lungo le vie visive, rispondendo solo ad alcuni stimoli e ignorandone altri (selettività).

Possiamo assumere che i meccanismi basilari di questi canali siano filtri lineari (*linear filters* in letteratura), selettivi per orientazione, posizione e frequenza spaziale dello stimolo (*Polat e Sagi, 1993*). Per definire questi filtri spesso vengono usate delle funzioni, nello specifico quella di Gabor.

I filtri sopra citati elaborano input retinici locali. Bisogna però considerare anche input eccitatori provenienti da unità vicine (*neighboring units* in letteratura). Come anticipato precedentemente studi di fisiologia evidenziano l'esistenza di interazioni a lungo raggio nella corteccia visiva primaria (*Gilbert, 1998*). In psicofisica invece le prove dell'esistenza di interazioni laterali eccitatorie vengono da esperimenti con stimoli bersaglio e fianchi solitamente ad alto contrasto (*Polat e Sagi, 1993; Zenger e Sagi, 1996*).

Gli studi di Polat e Sagi, 1993, evidenziano come la detezione dello stimolo bersaglio a basso contrasto è migliorata dalla presenza di fianchi collineari (allineati sulla stessa retta) ad alto contrasto (fig. 2.1.). I dati mostrano un innalzamento delle soglie (inibizione) a piccole distanze bersaglio-fianchi ($<2\lambda$, dove λ corrisponde alla lunghezza d'onda dello stimolo Gabor), e una riduzione delle soglie (facilitazione) a grandi distanze bersaglio-fianchi ($>2\lambda$). La facilitazione è riconducibile a input eccitatori e la

regione di facilitazione può arrivare fino a dieci volte la lunghezza d'onda (λ) del bersaglio (*Polat e Sagi, 1993*).

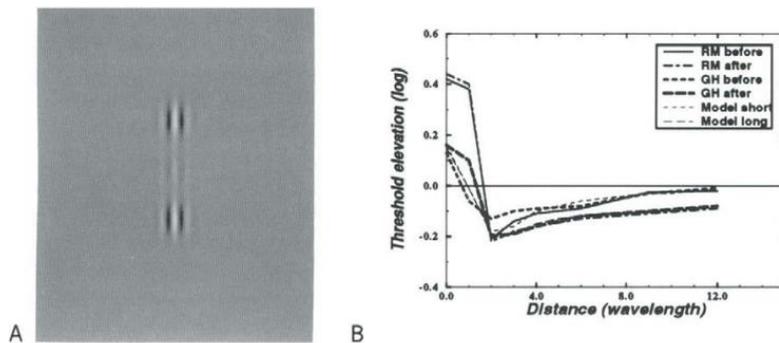


Figura 2.1. Nella fig. A abbiamo un esempio di stimolo bersaglio e fianchi laterali collineari (1 cpd, 0° di inclinazione) utilizzati da Polat e Sagi nei loro compiti di percezione dello stimolo. L'immagine evidenzia il basso contrasto dello stimolo bersaglio rispetto ai fianchi collineari. Nella fig. B il grafico mostra i livelli di facilitazione ed inibizione (*threshold elevation*) al variare della lunghezza d'onda (distanza tra bersaglio e fianchi espressa in λ). È possibile notare il picco di facilitazione una volta superati i 2λ e l'area di inibizione precedente.

Le regioni del campo visivo nelle quali alla comparsa di uno stimolo corrisponde un'inibizione possono essere considerate sinonimo di inibizione laterale a livello corticale, mentre dove avviene facilitazione (nella detezione del bersaglio) si suppone avvengono interazioni laterali eccitatorie (*Polat e Sagi, 1993*).

Questo miglioramento avviene se bersaglio e fianchi hanno stessa orientazione, frequenza spaziale e fase (le bande chiare e scure all'interno delle Gabor devono essere collineari, *Polat e Sagi, 1993*), suggerendo connessioni laterali soltanto tra filtri con campi recettivi simili (sensibilità agli stessi stimoli). Il miglioramento diminuisce poi gradualmente in funzione della diversità di orientazione, frequenza spaziale e fase.

Polat e Norcia, 1996, hanno evidenziato tramite VEPs (*visual evoked potentials*) come l'utilizzo di Gabor collineari (allineate) stimoli maggiormente le cellule delle vie visive.

Il VEPs, infatti, produce un tracciato espressione dell'attività elettrica lungo le vie visive (dal nervo ottico fino a V1). Le Gabor collineari, una volta visualizzate, corrispondono ad un aumento di scarica nel tracciato.

L'eccitazione inoltre viene ridotta se il bersaglio presenta alto contrasto (>20%). Se il contrasto del bersaglio cresce il miglioramento diminuisce (*Polat e Sagi, 1994*).

Queste connessioni eccitatorie laterali inoltre non sono limitate solo a cellule vicine, la propagazione dello stimolo a cellule lontane rimane infatti possibile, nonostante comporti attenuazione del segnale sinaptico e tempi maggiori (*Polat e Sagi, 1994*).

La propagazione laterale del segnale a cellule lontane è quindi possibile, ma ha delle restrizioni.

Con la pratica (apprendimento percettivo) sembra che la distanza bersaglio-fianchi possa aumentare (fino a 12λ) comportando sempre facilitazione (*Polat e Sagi, 1994*). Può aumentare quindi il range di interazione laterale (nonostante i limiti citati sopra, ovvero attenuazione del segnale e tempi leggermente dilatati).

2.2. Lo studio di Zenger e Sagi

Zenger e Sagi (1996) ipotizzarono che la modulazione dell'attività di scarica da parte di unità vicine (*contextual modulation* in letteratura) potesse essere dovuta all'interazione tra la distanza bersaglio-fianchi (λ) e il rapporto di contrasto (*contrast ratio* in letteratura).

Con rapporto di contrasto si intende il log del rapporto tra contrasto dei fianchi e soglia del bersaglio in assenza di fianchi (Formula 3) (*Zenger e Sagi, 1996*).

$$\text{Rapporto di contrasto} = \log_{10} \frac{(\text{contrasto dei fianchi})}{(\text{soglia bersaglio isolato})} \quad \text{Formula 3}$$

Secondo gli autori l'influenza delle interazioni laterali (quantificate con l'elevazione di soglia, *threshold elevation* in letteratura, Formula 4) può essere predetta finché il contrasto del bersaglio è molto più basso rispetto a quello dei fianchi (Fig. 2.2.)

$$\text{Elevazione di soglia} = \log_{10} \frac{(\text{soglia bersaglio non isolato})}{(\text{soglia bersaglio isolato})}$$

Formula 4: l'elevazione di soglia corrisponde al logaritmo del rapporto tra soglia di detezione del bersaglio in presenza di fianchi e soglia del bersaglio isolato. Un aumento positivo del valore di soglia indica un effetto inibitorio, mentre un abbassamento del valore di soglia indica

facilitazione. Se il valore è nullo non è presente alcun effetto a livello di interazioni laterali (Zenger e Sagi, 1996).

A brevi distanze bersaglio-fianchi, con basso contrasto per il bersaglio e alto per i fianchi, l'elevazione di soglia sarà alta (inibizione).

Nelle stesse condizioni, ma con una distanza bersaglio-fianchi aumentata, avremo invece facilitazione (abbassamento soglia). Infatti, con un contrasto dei fianchi 10 volte più alto della soglia del bersaglio isolato (corrispondente ad un rapporto di contrasto di 1) si può osservare un'inibizione a 2λ e una facilitazione a distanze maggiori, come 3λ o 4λ .

Tuttavia, se il contrasto dei fianchi viene ridotto, la soglia associata a qualsiasi distanza bersaglio-fianchi diminuisce fino a raggiungere un minimo (picco di facilitazione) dopodiché comincerà a crescere, avvicinandosi ad un effetto nullo, dove non si noterà né facilitazione né inibizione (Woods, Nugent, e Peli, 2002).

Anche in condizione 2λ la sensibilità al contrasto può aumentare progressivamente (nonostante il basso valore λ), infatti è possibile osservare facilitazione nella detezione del bersaglio una volta che il contrasto dei fianchi si avvicina alla soglia del bersaglio isolato, ad esempio quando il contrasto dei fianchi è circa 3 volte più alto di quello del bersaglio (rapporto di contrasto di 0,5). In quel caso ci sarà un effetto di massima facilitazione.

A distanze più grandi (3λ o 4λ) la soglia smette di abbassarsi ed inizia ad alzarsi ad un rapporto di contrasto rispettivamente di 1 e 0,8.

Infine, quando il contrasto del bersaglio diventa maggiore di quello dei fianchi l'effetto di facilitazione diminuisce fino ad essere soppresso.

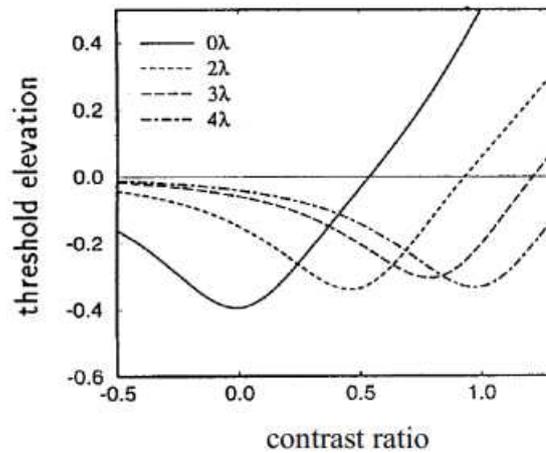


Figura 2.2. Nel grafico sono riportate le interazioni tra distanza bersaglio-fianchi e rapporto di contrasto in relazione a inibizione e facilitazione (Zenger e Sagi, 1996). Un valore positivo di elevazione di soglia (asse delle y) indica inibizione, mentre un valore negativo facilitazione. Quando vicino a zero l'effetto è nullo. Nell'asse delle x è riportato il rapporto di contrasto; maggiore è il rapporto, maggiore è il contrasto dei fianchi. Le differenti linee indicano le varie condizioni di distanza bersaglio-fianchi, misurate in lambda (λ).

3. Ipotesi di ricerca

Questo elaborato si pone un duplice obiettivo e quindi differenti ipotesi di ricerca.

Nel primo punto affrontato si cercherà di falsificare (o confermare) e approfondire con esperimenti il modello di Zenger e Sagi circa il ruolo dei fianchi. Non si proverà semplicemente a replicare il loro esperimento, ma a sondare in maniera più approfondita specifiche distanze bersaglio-fianchi da loro individuate.

Nello studio originale infatti sono state indagate le condizioni 0λ , 2λ , 3λ e 4λ . Interesse principale è quello di studiare nello specifico le condizioni 2λ e 4λ , associate rispettivamente a inibizione e facilitazione quando i fianchi hanno contrasto elevato.

L'obiettivo è quello di individuare per ognuna delle due condizioni λ i valori di contrasto dei fianchi, in modo da identificare quelli facilitatori e inibitori e verificare se questi valori sono predetti dal modello di Zenger e Sagi (1996, fig 10b).

Nel primo esperimento presentato in questa tesi si utilizzeranno gli stessi parametri usati da Zenger e Sagi (1996) nel loro modello, cioè stimoli Gabor a 1cpd e con orientazione verticale.

Il secondo scopo di questo elaborato è quello di verificare se il modello proposto dagli autori sopracitati si può estendere anche a gabor con frequenze spaziali, orientazioni e lambda diversi.

In altre parole, è possibile ottenere gli stessi pattern di facilitazione e inibizione andando a manipolare questa variabile?

Una volta ultimata anche la seconda raccolta dati a 12cpd sarà possibile confrontare i dati con quella precedente a 1cpd. I livelli di facilitazione e inibizione a differenti frequenze spaziali saranno sovrapponibili oppure si noteranno differenze?

Riassumendo:

Ipotesi 1: indagare il modello di Zenger e Sagi (1996) a 1cpd e individuare sette livelli di contrasto dei fianchi riconducibili a inibizione o facilitazione.

Ipotesi 2: verificare se i livelli osservati a termine del primo esperimento sono individuabili nuovamente nella condizione 12cpd.

Capitolo 2

4. Metodo

Si analizzerà ora il metodo. Visto che vengono portati avanti due diversi esperimenti verranno affrontate ogni volta le specifiche di entrambi. Per ogni paragrafo (Partecipanti, Apparato, Stimoli utilizzati ecc.) si specificheranno se necessario le differenze tra le due raccolte dati, ovvero quella a 1cpd (Esperimento 1) e quella a 12cpd (Esperimento 2).

4.1. Limiti di ricerca

Prima di proseguire è importante fare una precisazione. Per motivi di ricerca le due raccolte dati (1cpd e 12cpd) non variano per una sola variabile, ovvero i cicli per grado (cpd).

L'inclinazione degli stimoli a 1cpd corrisponde a 0° , mentre a 12cpd a 45° . Questa differenza è legata a motivi pratici. Una ricerca parallela richiedeva la modifica di questa variabile, motivo per il quale è stata manipolata. Anche i livelli λ sono differenti (2λ e 4λ per 1cpd, $1,5\lambda$ e 3λ per 12cpd), sempre per motivi legati a ricerche parallele.

Si è consapevoli del fatto che è necessario cambiare una singola variabile per volta, ma era importante raccogliere i dati 12cpd con stimoli obliqui (45°) per sviluppi futuri legati alla stimolazione elettrica. La tRNS, infatti, sembra migliorare la sensibilità al contrasto solo con alti cpd e orientazioni non cardinali (*Battaglini, Contemori, Penzo e Maniglia, 2020*).

4.2. Partecipanti

Nell'esperimento 1 sono stati raccolti 20 partecipanti naïve (4 maschi e 16 femmine, età media= 21,35, ds= 1,63), mentre nell'esperimento 2 sono stati raccolti 20 partecipanti naïve (9 maschi e 11 femmine, età media= 23,25, ds=5,55). I partecipanti non erano a

conoscenza dello scopo dello studio e hanno aderito spontaneamente alla ricerca. Lo studio è stato condotto in accordo con gli standard etici della Dichiarazione di Helsinki (1964). Il protocollo (n. 4732) è stato approvato dal comitato etico del Dipartimento di Psicologia Generale di Padova.

4.3. Apparato

Gli stimoli di entrambi gli esperimenti sono stati presentati su un monitor 20" CRT (Philips 202P) con una risoluzione di 1600×1200 e una frequenza di aggiornamento di 85Hz. Il monitor era collegato ad un ASUS P8H61-M LX2, equipaggiato con un processore Intel Core i5 3450, utilizzando il sistema operativo Windows 7 Pro 64bit SPI. La luminosità del monitor era di 44.8 cd/m^2 in un ambiente completamente buio. Ogni pixel sottende 1.5 arcmin . È stata usata una scheda video NVIDIA GeForce GT 220 insieme ad un sistema Bits++ (Cambridge Research System). Questo ha permesso al sistema di ottenere una risoluzione della luminanza di 12-bit (4096 livelli di scala di grigi). Per programmare l'esperimento sono stati usati MATLAB (The Mathworks, Inc., versione 7.8.0.347) e Psychophysics Toolbox. Il monitor è stato calibrato usando colorimetro COlorCal2 (Cambridge Research Systems). La correzione della Gamma è stata effettuata tramite una lookup table (LUT) da 12-bit, in modo che la luminanza fosse una funzione lineare della rappresentazione digitale dell'immagine. Gli stimoli sono stati somministrati ad una distanza di 70 cm per l'esperimento 1 e 114 cm per l'esperimento 2, questo perché altrimenti sarebbe stato impossibile mostrare i 12cpd a soli 70 cm di distanza. Entrambi gli esperimenti si sono svolti in un ambiente buio. È stata utilizzata una mentoniera per stabilizzare la testa dei soggetti. Ai partecipanti è stato insegnato a concentrarsi sul punto di fissazione al centro dello schermo, senza distogliere lo sguardo. La visione era binoculare.

4.4. Stimoli utilizzati

Gli stimoli impiegati sono macchie Gabor, ovvero reticoli caratterizzati da una variazione sinusoidale di luminanza moltiplicata per una funzione gaussiana, definiti dall'equazione (Eq.1).

$$G(x, y) = \cos\left(\frac{2\pi}{\lambda}X + \varphi\right) e^{-\frac{x^2+y^2}{\sigma^2}} \quad (\text{Eq.1})$$

Questi stimoli sono caratterizzati da una loro lunghezza d'onda sinusoidale (λ), da una fase (φ) e da una deviazione standard della funzione gaussiana ($\sigma=1$ deg per l'esperimento 1, $\sigma=1/12$ deg per l'esperimento 2) nello spazio di immagine (x,y). In tutte le condizioni degli esperimenti, la deviazione standard delle Gabor era uguale al periodo del vettore (sia bersaglio che fianchi avevano $\sigma=\lambda$), mentre la frequenza spaziale era di 1 ciclo per grado (1cpd) nell'esperimento 1 e di 12 cicli per grado (12cpd) nell'esperimento 2. La fase spaziale era uguale in entrambe le condizioni (perciò $\varphi=0$). Esempi degli stimoli dell'esperimento 1 sono riportati nella fig.3.1., mentre stimoli dell'esperimento 2 in fig.3.2.

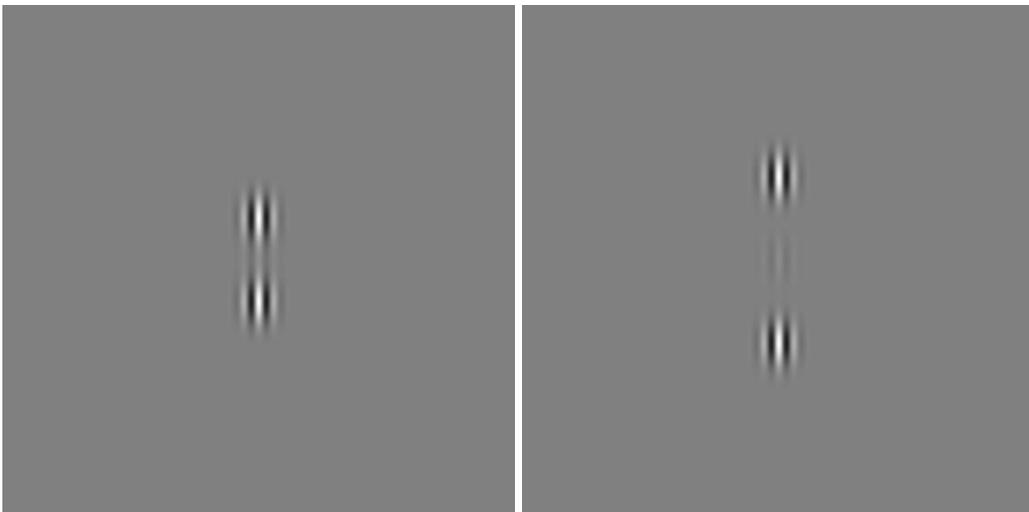


Figura 3.1. Stimoli Gabor collineari utilizzati nell'esperimento 1 (1cpd), 0° di inclinazione. La lunghezza d'onda è di 2λ a sinistra e 4λ a destra. In entrambi i casi il contrasto dei fianchi è impostato a 0,99.

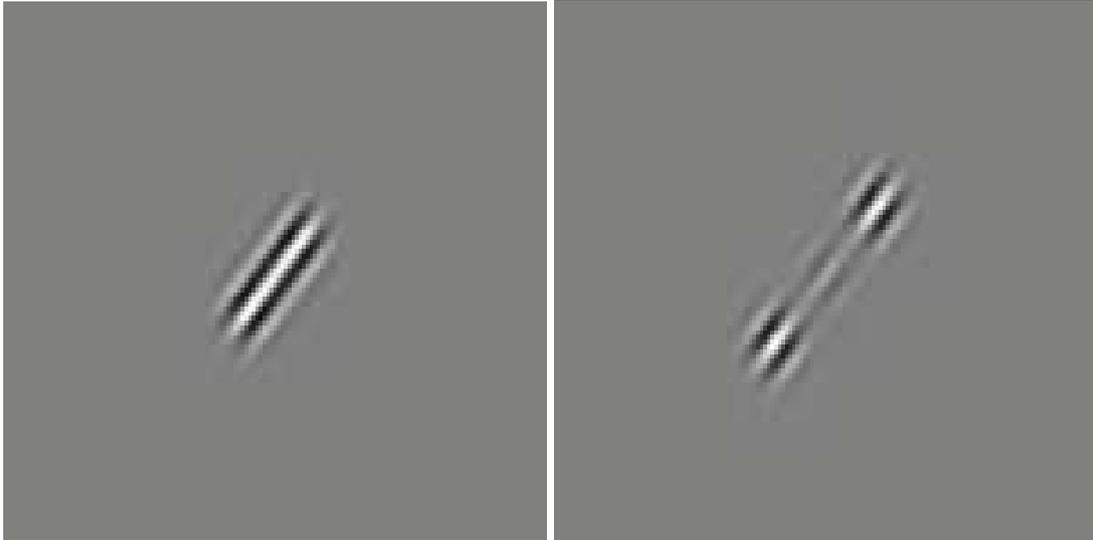


Figura 3.2. Stimoli Gabor collineari utilizzati nell'esperimento 2 (12cpd), 45° di inclinazione. La lunghezza d'onda (distanza bersaglio-fianchi) è di $1,5\lambda$ a sinistra e 3λ a destra. In entrambi i casi il contrasto dei fianchi è impostato a 0,99. L'immagine non permette la corretta visualizzazione dei 12cpd, essendo stata allargata per mostrare meglio gli stimoli utilizzati.

Il bersaglio era presentato singolarmente (*baseline* in letteratura) o insieme a due fianchi equidistanti. Nell'esperimento 1 i fianchi erano uno sopra e uno sotto al target (0° di inclinazione), in modo da presentare tutti gli stimoli contemporaneamente.

Nell'esperimento 2 invece i fianchi erano posizionati in obliquo rispetto allo stimolo centrale (45° di inclinazione). In entrambe le condizioni gli stimoli erano collineari.

Gli stimoli Gabor dell'esperimento 2 erano notevolmente più piccoli di quelli impiegati nell'esperimento 1, motivo per il quale veniva visualizzata una circonferenza intorno allo stimolo al posto del punto di fissazione, in modo da facilitare fissazione e individuazione della Gabor. Il diametro della circonferenza corrispondeva a 2,5 deg.

La distanza bersaglio-fianchi, ovvero la distanza tra il centro dello stimolo bersaglio e il centro dello stimolo fianco, varia tra gli esperimenti sulla base della lunghezza d'onda lambda (λ). Nell'esperimento 1 i fianchi potevano trovarsi ad una distanza di 2λ in modo da massimizzare l'inibizione collineare, o a 4λ per massimizzare la facilitazione collineare (Polat e Sagi, 1993; Zenger e Sagi, 1996). Nell'esperimento 2 i fianchi erano posizionati ad una distanza di $1,5\lambda$ o 3λ , valori che rientrano ancora nel range di inibizione e facilitazione collineare (Zenger e Sagi, 1996).

Per poter investigare l'effetto dei differenti livelli di contrasto dei fianchi sulle interazioni laterali al variare della distanza bersaglio-fianchi, il livello di contrasto dei fianchi variava sistematicamente per un totale di 8 volte (un livello di soglia e 7 di contrasto. Nel livello di soglia il valore di contrasto dei fianchi era uguale a 0). Nell'esperimento 1 per mappare gli effetti del contrasto dei fianchi sulla sensibilità al contrasto sono stati usati valori in linea con gli studi di Zenger e Sagi (1996). Prendendo in considerazione il valore minimo delle curve di contrasto per le condizioni 2λ e 4λ (un rapporto di contrasto rispettivamente di 0,5 e 1), è stato selezionato un valore intermedio (0,7), da cui sono stati presi 3 ulteriori valori superiori e 3 inferiori, utilizzando una scala quasi-logaritmica del rapporto di contrasto (Tab. 1). Ognuno di questi livelli è stato moltiplicato per la soglia di contrasto del target isolato (baseline) del partecipante. Dopodiché il contrasto dei fianchi è stato calcolato singolarmente per ogni soggetto sulla base della loro baseline.

LIVELLO	MOLTIPLICATORI	VALORI LOGARITMICI
1	0,5623	-0,25003
2	1,235	0,09167
3	2,7123	0,43334
4	5,9566	0,775
5	13,0818	1,11667
6	28,7298	1,45833
7	63,0957	1,8

Tabella 1 I 7 valori selezionati dalla scala logaritmica di rapporto di contrasto, modificati successivamente tramite la funzione `linspace` di MATLAB per fornire i 7 moltiplicatori. Moltiplicando questi valori per il contrasto della soglia di ogni partecipante si ottiene il valore di contrasto dei fianchi calibrato sulle capacità del singolo soggetto.

Nell'esperimento 2 il range del rapporto di contrasto di Zenger e Sagi è stato esteso a -1 e 1, usando la funzione `linspace` di MATLAB (The Mathworks Inc. versione 7.8.0.347). Successivamente sono stati individuati 7 valori equidistanti su scala logaritmica (Tab.2), differenti rispetto a quelli dell'esperimento 1.

LIVELLO	MOLTIPLICATORI	VALORI LOGARITMICI
1	0,1	-1
2	0,215	-0,6667
3	0,464	-0,3333
4	1	0
5	2,15	0,3333
6	4,64	0,6667
7	10	1

Tabella 2 I 7 valori selezionati per l'esperimento 2, differenti da quelli del primo (il range del valore logaritmico va da -1 a 1).

4.5. Procedura sperimentale

Per entrambi gli esperimenti è stata utilizzata una scelta forzata a due intervalli (*2IFC*, *two-interval forced choice*). I partecipanti attivavano una sequenza di trial premendo un tasto dopo essersi concentrati su un punto di fissazione al centro dello schermo. Ogni trial consisteva in una schermata senza stimoli di 1000 ms, seguita da due intervalli sequenziali (130 ms ognuno) segnalati ogni volta da uno stimolo sonoro. I due intervalli sequenziali erano separati da un intervallo intra stimolo (ISI) di 200 ms. Solo uno dei due intervalli conteneva il bersaglio, il quale compariva randomicamente, ma entrambi contenevano i fianchi. I soggetti dovevano indicare quale dei due intervalli conteneva il bersaglio. La decisione veniva indicata premendo un tasto (una volta per il primo intervallo, due per il secondo) e un feedback sonoro seguiva ogni risposta: tono a bassa frequenza per ogni risposta corretta e tono ad alta frequenza per ogni risposta errata.

In entrambi gli esperimenti il contrasto iniziale del bersaglio era impostato a 0,1 (contrasto di Michelson) e variava seguendo una scala con rapporto 3:1 (*Levitt, 1971*), una procedura che aumenta il contrasto del target di 0,1 unità logaritmiche per ogni risposta errata e lo diminuisce ogni 3 risposte corrette consecutive. La procedura terminava dopo 120 trial o 14 reversal. La soglia di detezione del bersaglio, equivalente

a 79,4% risposte corrette, è stata computata facendo una media del valore di contrasto degli ultimi 6 reversal. Tranne il contrasto del bersaglio, ogni parametro degli stimoli rimaneva costante entro ogni blocco.

Venti partecipanti hanno preso parte all'esperimento 1. Le soglie di contrasto sono state misurate in due differenti condizioni: 2λ e 4λ . L'ordine delle condizioni è stato randomizzato per ogni partecipante.

Altri venti partecipanti hanno preso parte all'esperimento 2. Le soglie di contrasto sono state misurate in due differenti condizioni: $1,5\lambda$ e 3λ . Anche in questo caso l'ordine delle condizioni è stato randomizzato.

CAPITOLO 3

5. Risultati

5.1. Esperimento 1

Vengono riportate adesso le analisi svolte sui dati raccolti nell'esperimento 1. Tutte le analisi sono state svolte sui dati relativi ai valori delle interazioni laterali. Per questo esperimento ci si aspetta di riconoscere il pattern già individuato da Zenger e Sagi (1996).

5.2. t-test a campione singolo

Come prima analisi è stato svolto un t-test a campione singolo (Formula 5) sulle medie delle soglie di contrasto raccolte. Obiettivo di questa procedura è verificare se i valori del nostro campione si discostano significativamente da 0.

$$t = \frac{\bar{x} - \mu_x}{\left(\frac{S}{\sqrt{n}}\right)}$$

Formula 5 Formula del t-test a campione singolo, ovvero media del campione osservato-media se H_0 è vera (0), fratto il rapporto tra la deviazione standard e la numerosità del campione (20).

Sono state quindi individuate un'ipotesi nulla (H_0) e un'ipotesi alternativa (H_1) per entrambe le condizioni (2λ e 4λ).

- H_0 : i valori raccolti non si discostano sufficientemente da zero, inibizione e facilitazione nei vari livelli sono dovute al caso ($\mu=0$, media del campione osservato uguale a 0)

- H_1 : i valori raccolti si discostano in maniera significativa da zero, inibizione e facilitazione nei livelli osservati non sono dovute al caso ($\mu \neq 0$, media del campione osservato diversa da zero)

Il valore α selezionato è di 0,05, ovvero si accetta come compromesso uno 0,05% di probabilità di commettere un errore rifiutando l'ipotesi nulla H_0 .

Le analisi sono state svolte utilizzando il software R (ver. 4.3.0, 2023).

Oltre al t value sono stati calcolati i gradi di libertà e il p value delle raccolte dati (Tabella 3, Tabella 4).

Tutti i t value sono stati calcolati sulla base delle medie di ogni singolo livello.

	t-value	df	p-value
Livello 1	-0.032	19	0.974
Livello 2	-5.862	19	< 0.001
Livello 3	-3.761	19	< 0.001
Livello 4	-1.771	19	0.093
Livello 5	-0.241	19	0.812
Livello 6	1.096	19	0.287
Livello 7	4.890	19	< 0.001

Tabella 3 t value, gradi di libertà e p value in condizione 1cpd, 2 λ . I livelli significativamente diversi da 0 risultano essere 2, 3 e 7.

	t-value	df	p-value
Livello 1	1.391	19	0.180
Livello 2	-0.745	19	0.465
Livello 3	-2.127	19	0.047
Livello 4	-4.189	19	< 0.001
Livello 5	-4.707	19	< 0.001
Livello 6	-3.299	19	0.004
Livello 7	-2.680	19	0.015

Tabella 4 t value, gradi di libertà e p value in condizione 1cpd, 4 λ . I livelli significativamente diversi da 0 risultano essere principalmente 4, 5 e 6, ma anche 3 e 7 in maniera minore.

Normalmente si sarebbe dovuto confrontare il t calcolato (t-value ottenuto tramite la Formula 5) con il t critico, ottenuto dall'intersezione di df (gradi di libertà, n-1) e α nelle specifiche tabelle statistiche. Ottenendo un t calcolato minore del t critico si sarebbe potuta rifiutare H_0 . Utilizzando però un software di calcolo la significatività dei livelli sarà data semplicemente dal p-value.

Il p-value, o livello di significatività osservato, indica il grado di significatività del campione. In un'analisi di campioni di dati, determina la probabilità di ottenere risultati uguali o meno probabili di quelli osservati durante il test, supponendo vera l'ipotesi nulla (differenze dovute al caso).

Il p-value ottenuto nei vari livelli risulta in alcuni casi inferiore allo 0,001. Di solito un p-value sotto lo 0,05 è considerato statisticamente significativo (permette di rifiutare H_0).

In questo caso risulta che i livelli di contrasto dei fianchi 2, 3 e 7 per la condizione 2λ e 4, 5 e 6 per la condizione 4λ mostrano una significatività statistica, permettendoci di rifiutare l'ipotesi nulla. I valori osservati si discostano significativamente da 0.

Nella condizione 4λ anche i livelli 3 e 7 mostrano un p-value significativo.

Visualizzando i valori di sensibilità al contrasto in un grafico avente il livello di contrasto dei fianchi nell'asse delle x e l'elevazione di soglia nelle y si noterà come i livelli evidenziati dall'analisi statistica corrispondano alle condizioni di massima facilitazione o massima inibizione osservate da Zenger e Sagi (1996) (Figura 5.1.)

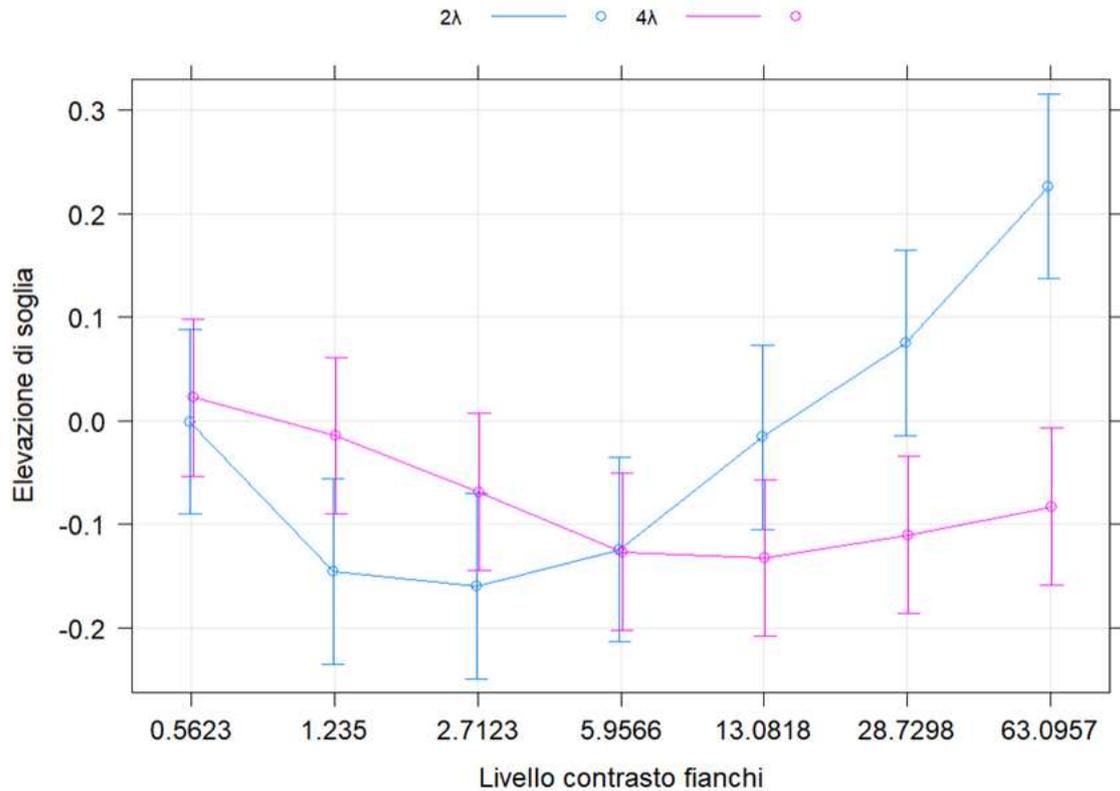


Figura 5.1. Il grafico presenta il valore dell'elevazione di soglia nell'asse delle y e il livello di contrasto dei fianchi in quello delle x. Viene mostrato come per la condizione 2λ i valori dei livelli di contrasto dei fianchi 2 e 3 comportino una massima facilitazione (rispettivamente -0,146 e -0,159), mentre al livello 7 una massima inibizione (0,226). Nella condizione 4λ invece abbiamo massima facilitazione nei livelli 4, 5 e 6 (rispettivamente -0,126, -0,132 e -0,110).

5.3. Correzione di Bonferroni

Successivamente è stata eseguita una correzione di Bonferroni sui dati analizzati tramite t-test. Per svolgere questo passaggio è bastato confrontare i p-value con un nuovo valore α , ottenuto dalla divisione del precedente (0.05) per il numero totale di t-test svolti. Prendendo in considerazione entrambi gli esperimenti dell'elaborato si contano 28 t-test (7 per condizione). Dividendo α per 28 otteniamo un valore di 0,0017.

Questa operazione permette di eliminare la probabilità di errore che si accumula ogni volta che vengono affrontati test differenti all'interno dello stesso esperimento (in questo caso i 28 livelli).

	2λ	4λ
Livello 1	0,974	0,180
Livello 2	<0,001	0,465
Livello 3	<0,001	0,047
Livello 4	0,093	<0,001
Livello 5	0,812	<0,001
Livello 6	0,287	0,004
Livello 7	<0,001	0,015

Tabella 5 I valori di p-value evidenziati sono quelli significativi dopo la correzione di Bonferroni, ovvero quelli minori di $\alpha=0,0017$.

I livelli 2, 3 e 7 (2λ) e 4 e 5 (4λ) risultano quelli più solidi da un punto di vista statistico in quanto significativi sia con t-test che con correzione di Bonferroni.

Si può quindi fare un confronto diretto con il grafico individuato da Zenger e Sagi, evidenziando le stesse curve in relazione a rapporto di contrasto e elevazione di soglia (Fig. 5.2.)

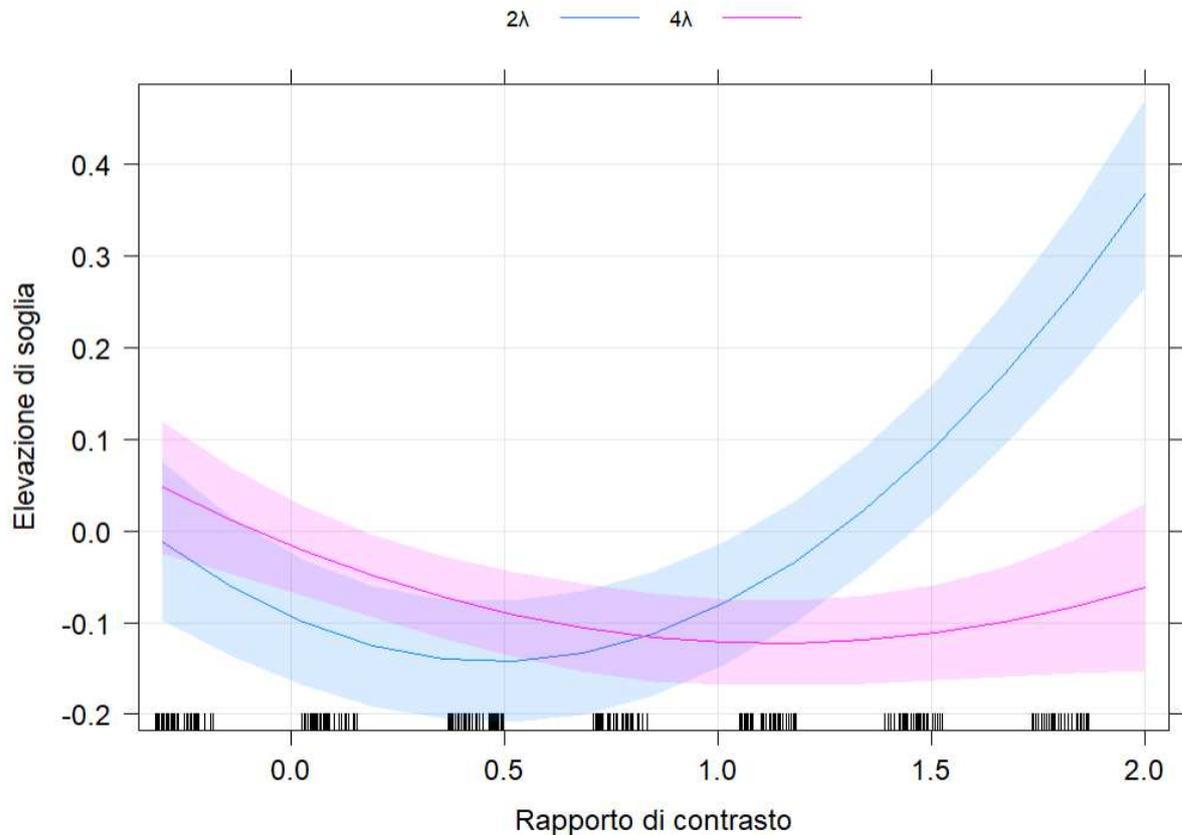


Figura 5.2. Le curve di regressione delle condizioni 2λ e 4λ . Il grafico è perfettamente in linea con quello di Zenger e Sagi, 1996, evidenziando la relazione tra l'influenza delle interazioni laterali (elevazione di soglia) e il rapporto di contrasto (tanto maggiore tanto è elevato il livello di contrasto dei fianchi).

6.1. Esperimento 2

Vengono riportate adesso le analisi svolte sui dati raccolti nell'esperimento 2. Tutte le analisi sono state svolte sui dati relativi ai valori delle interazioni laterali. In questo caso ci si chiede se i pattern individuati da Zenger e Sagi (1996) saranno individuabili nonostante il cambio di frequenza spaziale (da 1cpd a 12cpd).

6.2. T-test a campione singolo

Anche in questo caso è stato svolto un t-test a campione singolo, con l'obiettivo di individuare i livelli nei quali i valori ottenuti si discostano significativamente da 0.

Sono state individuate un'ipotesi nulla (H_0) e un'ipotesi alternativa (H_1) per entrambe le condizioni ($1,5\lambda$ e 3λ).

$-H_0$: i valori raccolti non si discostano sufficientemente da zero, inibizione e facilitazione nei vari livelli sono dovute al caso ($\mu=0$, media del campione osservato uguale a 0)

$-H_1$: i valori raccolti si discostano in maniera significativa da zero, inibizione e facilitazione nei livelli osservati non sono dovute al caso ($\mu\neq 0$, media del campione osservato diversa da zero)

Nelle tabelle 6 e 7 sono riportati t-value e p-value ottenuti.

	t-value	df	p-value
Livello 1	-0.982	19	0.339
Livello 2	-0.952	19	0.353
Livello 3	-3.126	19	0.006
Livello 4	-3.341	19	0.003
Livello 5	-0.373	19	0.713
Livello 6	2.313	19	0.032
Livello 7	6.510	19	< 0.001

Tabella 6 t value, gradi di libertà e p value in condizione 12cpd, $1,5\lambda$. I livelli significativamente diversi da 0 risultano essere 3,4 e 7, ma anche 6 in maniera minore.

	t-value	df	p-value
Livello 1	0.637	19	0.532
Livello 2	0.682	19	0.504
Livello 3	-0.412	19	0.685
Livello 4	0.088	19	0.930
Livello 5	-1.650	19	0.115
Livello 6	-2.837	19	0.011
Livello 7	-1.864	19	0.078

Tabella 7 t value, gradi di libertà e p value in condizione 12cpd, 3λ . Risulta esserci un singolo livello significativamente diverso da 0, ovvero il 6.

I valori di p-value ottenuti mostrano significatività per i livelli 3, 4, 6 e 7 nella condizione $1,5\lambda$ e solo livello 6 nella condizione 3λ .

Visualizzando i valori di sensibilità al contrasto in un grafico avente il livello di contrasto dei fianchi nell'asse delle x e l'elevazione di soglia nelle y si noterà come i livelli evidenziati dall'analisi statistica corrispondano alle condizioni di massima facilitazione o massima inibizione osservate nell'esperimento 1 e quindi da Zenger e Sagi nel 1996 (Figura 6.1.).

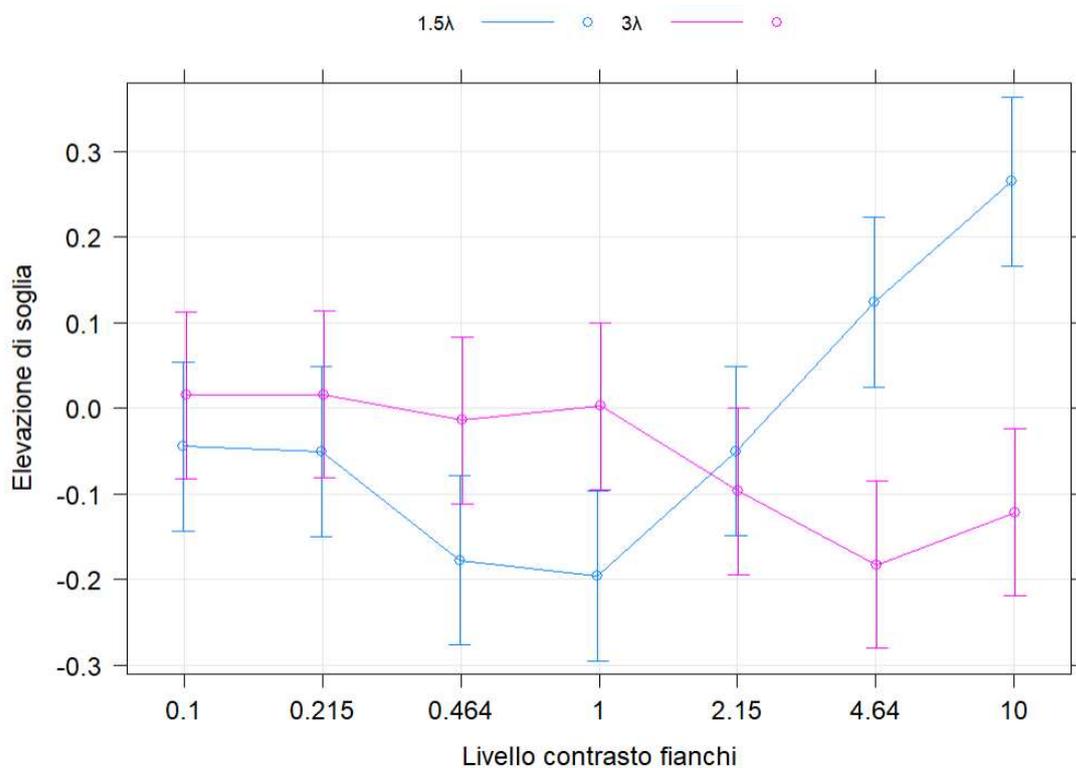


Figura 6.1. Il grafico presenta il valore dell'elevazione di soglia nell'asse delle y e il livello di contrasto dei fianchi in quello delle x. Viene mostrato come per la condizione $1,5\lambda$ i valori dei livelli di contrasto dei fianchi 3 e 4 comportino una massima facilitazione (rispettivamente -0,163 e -0,185), mentre al livello 7 una massima inibizione (0,295). Nella condizione 3λ invece abbiamo massima facilitazione nel livello 6 (-0,183).

6.3 Correzione di Bonferroni

Successivamente è stata eseguita una correzione di Bonferroni sui dati analizzati tramite t-test, confrontando $\alpha=0,0017$ con i precedenti p-value.

	$1,5\lambda$	3λ
Livello 1	0,339	0,532
Livello 2	0,353	0,504
Livello 3	0,006	0,685
Livello 4	0,003	0,930
Livello 5	0,713	0,115
Livello 6	0,032	0,011
Livello 7	<0,001	0,078

Tabella 8 I valori di p-value evidenziati sono quelli significativi dopo la correzione di Bonferroni, ovvero quelli minori di $\alpha=0,0017$.

Avendo utilizzato una correzione di Bonferroni molto stringente (28 condizioni), risulta esserci un singolo livello significativo, ovvero il 7 della condizione $1,5\lambda$. Proprio per questo motivo si possono comunque considerare validi i valori ottenuti tramite t-test a campione singolo, significativi in ogni caso sulla base del loro p-value.

Si può quindi fare un confronto diretto con il grafico individuato da Zenger e Sagi, evidenziando le stesse curve in relazione a rapporto di contrasto ed elevazione di soglia (Fig. 6.2.).

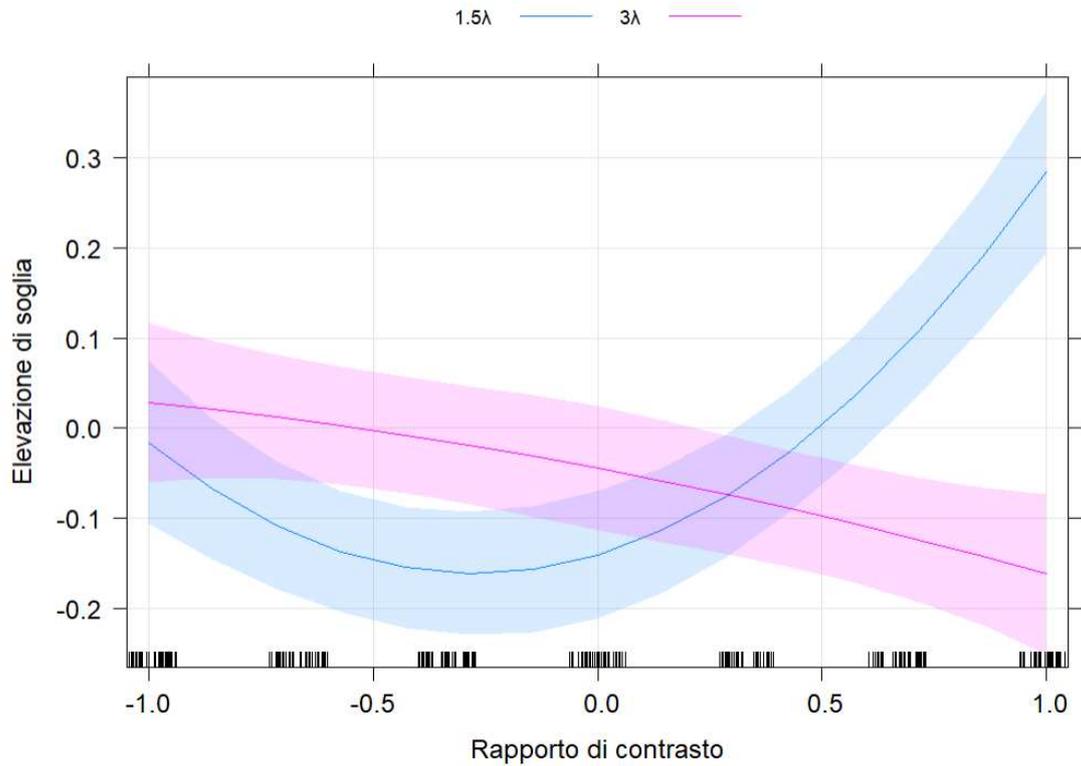


Figura 6.2. Le curve di regressione delle condizioni $1,5\lambda$ e 3λ . Il grafico è in linea con quello di Zenger e Sagi, 1996, evidenziando la relazione tra l'influenza delle interazioni laterali (elevazione di soglia) e il rapporto di contrasto (tanto maggiore tanto è elevato il livello di contrasto dei fianchi).

CAPITOLO 4

7. Discussione

La corteccia visiva primaria è caratterizzata da una struttura retinotopica, con cellule che reagiscono in maniera selettiva a specifiche caratteristiche dello stimolo (ad esempio la loro orientazione). La frequenza di scarica di queste cellule sembra però modificarsi quando vengono presentati stimoli nelle vicinanze della porzione di campo visivo sulla quale ricade lo stimolo principale. Questa modulazione della frequenza di scarica sulla base del contesto è stata attribuita a interazioni laterali tra cellule della corteccia visiva primaria, mostrando come anche nei primi livelli dell'elaborazione visiva le cellule siano capaci di accorpare informazioni provenienti da una regione più estesa del campo visivo (*Ts'o, Gilbert e Wiesel, 1986; Gilbert, 1992, 1998; Gilbert e Wiesel, 1990*).

Nonostante ciò, non tutti gli stimoli possono elicitarne una risposta a livello di modulazione contestuale. In letteratura si è osservato come stimoli Gabor collineari con stessa inclinazione tendano ad attivare maggiormente le interazioni laterali (*Polat e Sagi, 1992, 1993; Zenger e Sagi, 1996*). Anche la distanza tra stimolo bersaglio e stimoli fianchi modula significativamente il livello di facilitazione o inibizione, insieme al livello di contrasto degli stimoli laterali (*Zenger e Sagi, 1996*).

Zenger e Sagi (1996) hanno indagato 4 diversi livelli di distanza bersaglio-fianchi (0λ , 2λ , 3λ e 4λ), manipolando ogni volta la variabile contrasto fianchi, in un compito di detezione dello stimolo Gabor bersaglio. Sulla base dei loro risultati e della letteratura (*Polat e Sagi, 1992, 1993*) hanno stabilito che la soglia di detezione per uno stimolo bersaglio (presentato in fovea) diminuisce quando i fianchi presentati a brevi distanze hanno alto contrasto. Tuttavia, l'elevazione di soglia (unità di misura per quantificare l'effetto delle interazioni laterali) si suppone declini gradualmente fino a corrispondere a facilitazione man mano che il contrasto dei fianchi viene ridotto rispetto alla soglia del bersaglio isolato (*Zenger e Sagi, 1996*). Una volta che l'abbassamento del livello di contrasto dei fianchi sia avvicina allo 0, l'influenza collineare scompare (*Zenger e Sagi, 1996*). Gli studi a riguardo sono molteplici e spesso indagano solo specifici range di

contrasto dei fianchi, corrispondenti a facilitazione e quindi impiegabili in ambito clinico. Per questo motivo si è deciso di replicare l'esperimento di Zenger e Sagi (1996), individuando 7 livelli facilitatori ed inibitori e potendosi soffermare sui picchi di modulazione. Nello specifico sono stati selezionati due livelli di distanza bersaglio-fianchi rispetto a quelli dello studio originale, ovvero 2λ (solitamente inibitorio quando accompagnato da alto livello di contrasto fianchi) e 4λ (solitamente facilitatorio quando accompagnato da alto livello di contrasto fianchi). Queste due condizioni selezionate sono poi state mappate più dettagliatamente tramite l'individuazione dei 7 livelli. Il livello del contrasto dei fianchi veniva inoltre modulato sulla base della soglia di ogni partecipante, il quale doveva svolgere un compito di scelta forzata tra due alternative, per un totale di 8 blocchi.

Come ci si aspettava la prima ipotesi è stata confermata, visto che il livello di contrasto dei fianchi ha effettivamente modulato l'elevazione di soglia. Questo implica che la modulazione delle interazioni laterali non è determinata soltanto dalla distanza tra bersaglio e fianchi; infatti, l'abbassamento della soglia dei fianchi ha comportato un cambiamento dell'elevazione di soglia, provocando facilitazione anche a 2λ e inibizione a 4λ (effetti opposti rispetto a quelli solitamente attesi).

A brevi distanze (2λ), fianchi ad alto contrasto determinano innalzamenti di soglia (inibizione), mentre più bassi livelli di contrasto dei fianchi comportano facilitazione (effetto opposto), che raggiunge il suo picco quando la visibilità dei fianchi è circa tre volte quella del bersaglio isolato.

A distanze maggiori (4λ), fianchi a livello intermedio comportano facilitazione, mentre a livelli ancora più alti inibizione.

Interessante evidenziare come le due curve ottenute siano come specchiate, con valori dei picchi di facilitazione e inibizione opposti, rispecchiando il ragionamento fatto sopra.

Zenger e Sagi hanno indagato le varie distanze bersaglio-fianchi considerando sempre una frequenza spaziale di 1cpd. Negli anni studi successivi hanno utilizzato frequenze maggiori ma senza mai spingersi a valori particolarmente alti.

Vista l'importanza di alte frequenze spaziali nell'utilizzo di terapia tRNS (*Battaglini et al., 2020*) si è deciso di indagare i 12cpd, applicando la stessa metodologia del primo esperimento e cercando un pattern riconoscibile nelle curve. I valori di λ utilizzati sono diversi rispetto a quelli della condizione 1cpd, questo per testare delle variabili differenti in maniera esplorativa. Il range distanza bersaglio-fianchi che comporta inibizione si può infatti estendere dai 2λ fino a $1,5\lambda$, mentre la facilitazione dai 4λ ai 3λ , come osservato da Zenger e Sagi (1996).

Proprio per questo motivo nei 12cpd sono stati utilizzati $1,5\lambda$ e 3λ invece di 2λ e 4λ .

Inoltre, rispetto al primo esperimento sono state utilizzate scale logaritmiche con range differenti per il calcolo dei valori di contrasto dei vari livelli.

Anche l'inclinazione dello stimolo è differente per i 12cpd, essendo 45° invece di 0° come nell'1cpd, proprio per favorire eventuali confronti futuri con raccolte dati tRNS, dove sono necessarie inclinazioni non cardinali (*Battaglini et al., 2020*).

Solitamente non è buona norma manipolare più di una variabile, soprattutto se l'obiettivo è quello di attuare un confronto tra due raccolte dati (1cpd e 12cpd). C'è consapevolezza dei limiti di questa ricerca e del fatto che matematicamente non sia possibile confrontare in maniera corretta i valori ottenuti. A causa di ciò la seconda parte di questa discussione, incentrata sul confronto tra le due condizioni di frequenze spaziali, sarà più esplorativa, facendo confronti tramite dati e grafici ma senza un solido supporto statistico, che potrà però essere approfondito in raccolte dati future.

I valori ottenuti tramite le raccolte a 12cpd evidenziano, soprattutto nella condizione $1,5\lambda$, la presenza di picchi di facilitazione ed inibizione. Importante far notare come la presenza di minori livelli significativi nella condizione 3λ sia probabilmente dovuta alla manipolazione di più variabili tra le due raccolte. Nonostante ciò, risulta ancora visibile il pattern individuato da Zenger e Sagi (1996), ottenuto anche nell'esperimento 1. Le curve, infatti, mostrano una regione di massima facilitazione (meno evidente nella condizione 3λ) e una di massima inibizione. Il livello di massima inibizione della curva $1,5\lambda$ (6) risulta invece in una massima facilitazione nella curva del 3λ .

Le curve delle condizioni 1cpd e 12cpd coincidono, soprattutto confrontando le condizioni 2λ e $1,5\lambda$, dove troviamo in entrambe un livello 7 fortemente inibitorio e le

coppie 2-3 e 3-4 fortemente facilitatorie, rientrando nei range di inibizione e facilitazione individuati dagli autori (Fig. 7.1.) (Polat e Sagi, 1993; Zenger e Sagi, 1996).

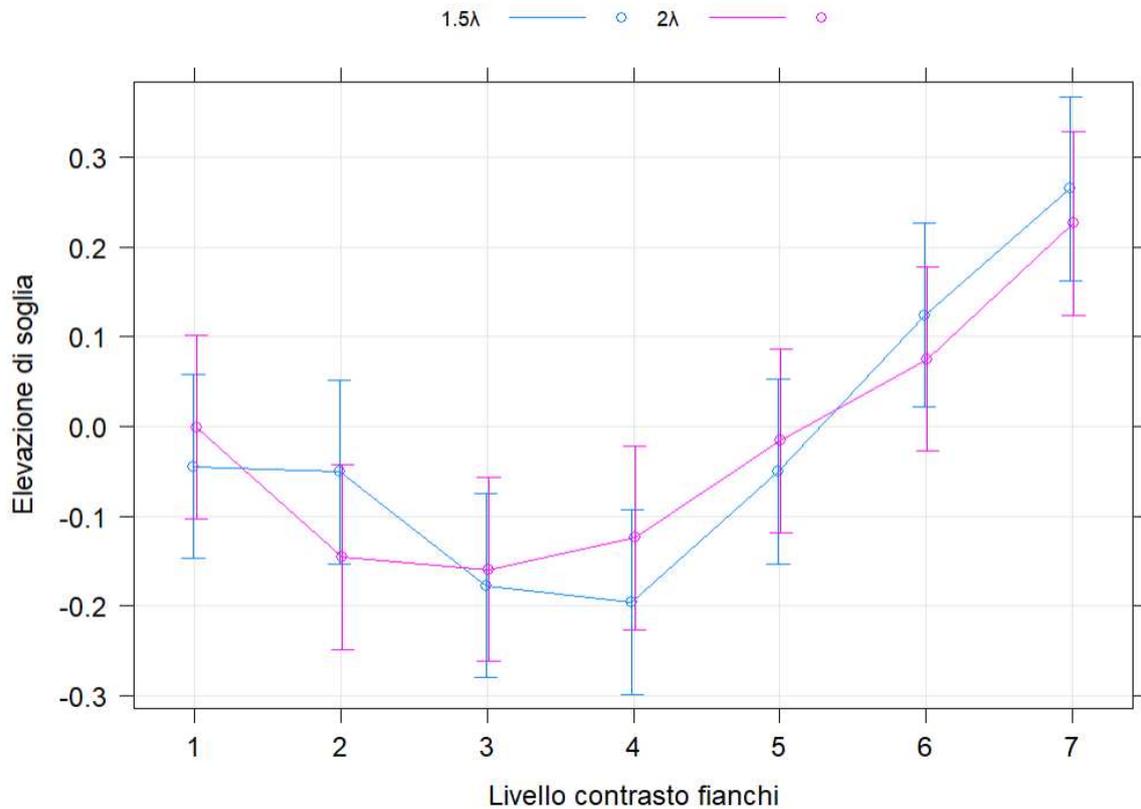


Figura 7.1. Confronto tra i dati delle condizioni $1,5\lambda$ e 2λ . Nell'asse delle x è riportato il livello dei fianchi mentre nell'asse delle y l'elevazione di soglia, ovvero l'effetto delle interazioni laterali. È evidente la stessa tendenza nei livelli di inibizione (7 per entrambe le condizioni) e facilitazione (dove è possibile osservare le coppie facilitatorie 2-3 e 3-4).

Il confronto non è accurato statisticamente per i motivi già evidenziati nel capitolo 2 e in discussione, ma permette di effettuare una comparazione approssimativa delle due condizioni, evidenziando comunque l'effetto modulatore dei livelli di contrasto dei fianchi.

7.1. Clinica

Come evidenziato sopra, il motivo per il quale sono stati raccolti dati ad una frequenza spaziale di 12cpd sta in possibili applicazioni future, vista l'importanza di questa frequenza in compiti di apprendimento percettivo in popolazione clinica (*Battaglini et al., 2020*). Cosa si può evincere da queste raccolte?

7.2. Terapia tRNS

La tRNS (stimolazione a rumore casuale) è una tipologia di stimolazione elettrica transcranica, una categoria di tecniche non invasive per la stimolazione corticale tramite scariche elettriche applicate a livello dello scalpo, in regioni specifiche (frontale ed occipitale). La peculiarità della tRNS sta nella frequenza di scarica della corrente, che viene randomizzata sulla base di un range che solitamente va dai 100Hz ai 600Hz (*Moret, Donato, Nucci, Cona e Campana, 2019*). Durante la procedura i neuroni vengono continuamente depolarizzati o iperpolarizzati, infatti la tRNS opera sull'attivazione e de-attivazione dei canali del sodio Na⁺. La scarica inoltre, essendo casuale, non permette alla zona stimolata di abituarsi e prevedere la stimolazione, mantenendo nel tempo i benefici della sollecitazione elettrica.

Le applicazioni della tRNS sono molteplici in ambito clinico. Nel settore della neuroriabilitazione visiva la tRNS sembra efficace nel trattamento dell'ambliopia (*Campana, Camilleri, Pavan, Veronese e Lo Giudice, 2014; Battaglini, Di Ponzio, Ghiani, Mena, Santacesaria e Casco, 2022*). L'ambliopia, o occhio pigro, è una condizione che comporta una riduzione della capacità visiva di un occhio, o più raramente entrambi. A causa della ridotta acuità visiva di un occhio il cervello privilegia l'altro, comportando un'alterazione della trasmissione del segnale nervoso. Questa patologia può essere dovuta a difetti di refrazione non corretti o patologie che impediscono alla luce di raggiungere correttamente la retina (*Blair, Cibis, Gulani, 2022*). Oltre ad un abbassamento di acuità visiva vengono compromesse anche le funzioni di sensibilità al contrasto.

I dati raccolti nella condizione 12cpd mostrano chiaramente la presenza di livelli di massima facilitazione ed inibizione. Visti gli effetti positivi di questa terapia in compiti di detezione in base al contrasto (*Battaglini et al., 2020*) sarebbe interessante ipotizzare

un'indagine circa gli effetti su pazienti affetti da ambliopia, considerate le compromissioni delle funzioni visive relative alla sensibilità al contrasto.

7.3 Apprendimento percettivo e maculopatie

Grazie ai dati raccolti nella condizione 1cpd, distanza bersaglio-fianchi 2λ , è possibile fare un'interessante osservazione riguardante l'aspetto clinico di questi studi.

Solitamente la condizione 2λ risulta inibitoria con livello di contrasto dei fianchi particolarmente alto, come si è potuto osservare in letteratura (*Zenger e Sagi, 1996; Polat e Sagi, 1993*) e nella raccolta dati dell'esperimento 1, dove al livello 7 (contrasto 0,226) corrispondeva una massima inibizione.

In pazienti affetti da maculopatia l'effetto ottenuto è l'opposto (*Contemori, Battaglini e Casco, 2019*). Con maculopatia si intende qualsiasi condizione per cui la macula, ovvero l'area della retina al cui centro troviamo la fovea, viene compromessa o danneggiata. Questo comporta compromissione dell'acuità visiva e della capacità di detezione del contrasto.

Nei dati raccolti da Contemori e colleghi, 2019, risulta evidente come in condizione 2λ ad alti livelli di contrasto si abbia facilitazione, l'opposto di quello che normalmente si nota in soggetti sani. Non è possibile portare avanti un'analisi completa ma si possono fare ipotesi esplorative da vagliare eventualmente in futuro. Per quale motivo in questi soggetti una condizione che solitamente comporta inibizione comporta invece facilitazione? Le possibili ipotesi da esplorare sono due.

È stato dimostrato che in pazienti affetti da ipovisione si attivi un meccanismo di plasticità corticale in grado di riorganizzare i collegamenti nervosi e favorire una migliore comunicazione a livello cellulare (*Chen, Shin, Millin, Song, Kwon e Tjan, 2019*). Questo tipo di riorganizzazione potrebbe essere alla base dell'effetto osservato, andando a generare connessioni laterali con un raggio differente rispetto ad un soggetto sano.

Un'ipotesi diversa potrebbe essere legata ai principi alla base delle maculopatie, ovvero la perdita di input nella regione della corteccia visiva primaria corrispondente alla fovea, con conseguente perdita di acuità visiva e sensibilità al contrasto. A 2λ (con alto contrasto fianchi) i soggetti clinici citati potrebbero performare meglio proprio perché il

loro contrasto dei fianchi potrebbe essere basso percettivamente parlando (anche se per un soggetto sano quello stesso contrasto è alto e inibitorio), facendogli percepire fianchi ad alto contrasto come a basso contrasto.

Sono solo ipotesi esplorative ma le due opzioni sono plausibili ed entrambe supportate da letteratura, motivo per il quale potrebbero coesistere ed essere indagate in ricerche future.

Inoltre, compiti di apprendimento percettivo potrebbero essere sfruttati in condizione 2λ in pazienti affetti da maculopatie. L'apprendimento percettivo, infatti, sembra influenzare il range delle interazioni laterali (*Polat e Sagi, 1994*).

L'apprendimento percettivo (*perceptual learning* in letteratura) è definito da Lu e colleghi, 2010, come quel fenomeno per cui una pratica ripetuta e una lunga esposizione agli stimoli determinano un miglioramento nell'utilizzo delle capacità percettive e nelle prestazioni in esercizi legati a tali abilità.

Quando un soggetto svolge esercizi di discriminazione di uno stimolo visivo sulla base del contrasto solitamente mostra un miglioramento nel tempo. Questi miglioramenti si sono dimostrati specifici per orientazione e posizionamento del bersaglio, suggerendo il coinvolgimento delle interazioni laterali di V1 (*Polat e Sagi, 1994*). Nonostante le connessioni laterali attivate siano locali, la pratica può aumentarne il range, migliorando anche l'efficacia della trasmissione del segnale. L'attivazione di una iper-colonna adiacente tramite uno stimolo esterno (ad esempio fianchi) è solitamente possibile solo fino ad una distanza di 4λ . Raggiungere iper-colonne più distanti è difficile senza pratica, ma con l'apprendimento percettivo le interazioni laterali possono raggiungere la distanza di 12λ (*Polat e Sagi, 1994*).

Questo paradigma potrebbe essere applicato in pazienti affetti da maculopatia, indagando distanze bersaglio-fianchi di 2λ , studiando la plasticità neurale in relazione alla facilitazione in questa condizione, solitamente legata a inibizione.

Appendice

8.1. Grafici

Vengono riportati in appendice due grafici aggiuntivi (Fig.8.1.).

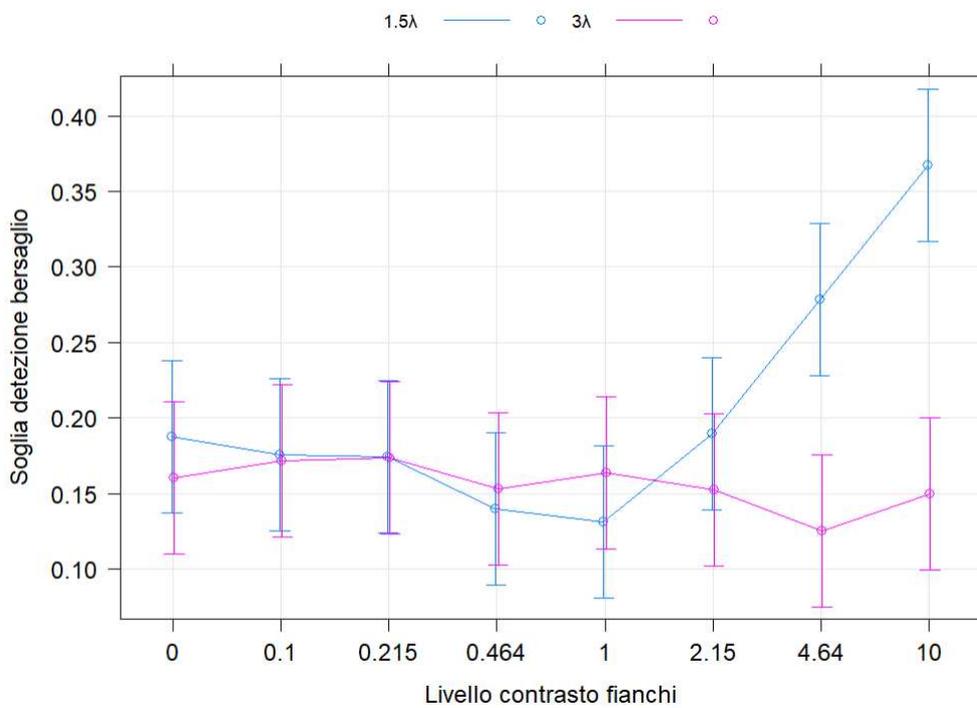
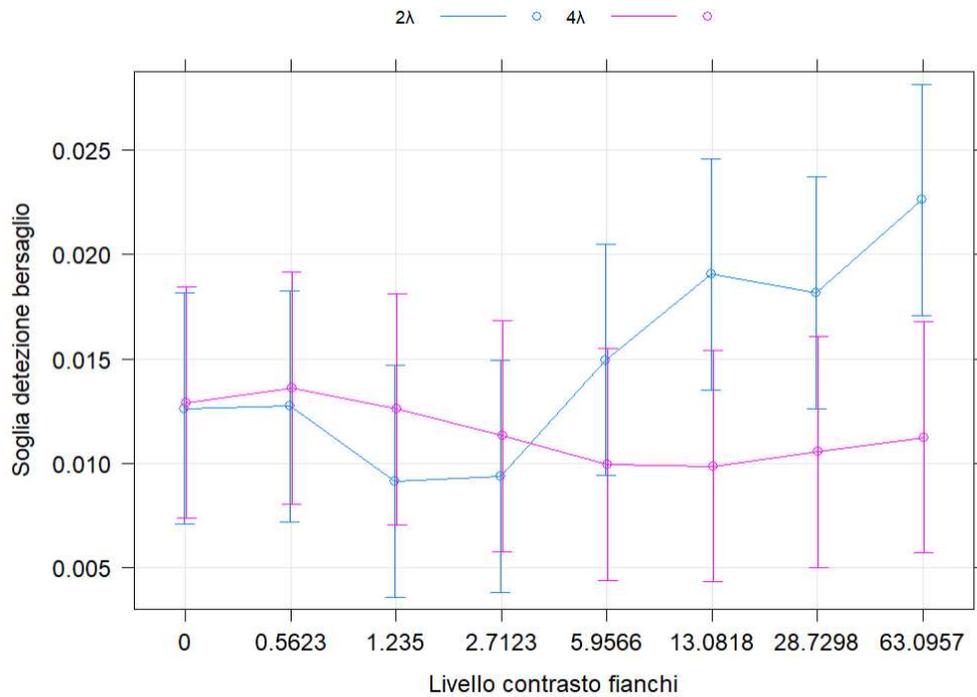


Figura 8.1. I grafici mostrano nell'asse delle x il livello di contrasto dei fianchi, già presente nei grafici in Fig.5.1. e Fig.6.1., mentre nelle y la soglia di detezione del bersaglio. È quindi possibile osservare il variare dell'abilità nella detezione del bersaglio in relazione al contrasto dei fianchi. Anche in questo caso è possibile notare livelli dove la performance migliora o peggiora nettamente. Sono presenti 8 livelli di contrasto, in quanto viene considerato anche il livello 0, dove il contrasto dei fianchi è pari a 0.

Interessante notare come in condizione 2λ e 4λ , in corrispondenza del livello 0, la soglia di detezione del bersaglio sia identica nelle due condizioni, come ci si aspetta in assenza di interazioni laterali e quindi modulazione dell'attività di scarica. Nelle condizioni $1,5\lambda$ e 3λ invece, anche a livello 0, i valori ottenuti sembrano discostarsi. Questo è dovuto a valori estremi nella raccolta dati.

Bibliografia

- Battaglini, L., Contemori, G., Penzo, S., & Maniglia, M. (2020). TRNS effects on visual contrast detection. *Neuroscience Letters*, 717, 134696.
<https://doi.org/10.1016/j.neulet.2019.134696>
- Battaglini, L., Di Ponzio, M., Ghiani, A., Mena, F., Santacesaria, P., & Casco, C. (2022). Vision recovery with perceptual learning and non-invasive brain stimulation: Experimental set-ups and recent results, a review of the literature. *Restorative Neurology and Neuroscience*, 40(3), 137–168. <https://doi.org/10.3233/RNN-221261>
- Blair, K., Cibis, G., & Gulani, A. C. (2023). Amblyopia. In *StatPearls*. StatPearls Publishing.
<http://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK430890/>
- Blasdel, G. G. (1992). Orientation selectivity, preference, and continuity in monkey striate cortex. *The Journal of Neuroscience: The Official Journal of the Society for Neuroscience*, 12(8), 3139–3161. <https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.12-08-03139.1992>
- Bonhoeffer, T., & Grinvald, A. (1991). Iso-orientation domains in cat visual cortex are arranged in pinwheel-like patterns. *Nature*, 353(6343), Articolo 6343.
<https://doi.org/10.1038/353429a0>
- Bonhoeffer, T., & Grinvald, A. (1993). The layout of iso-orientation domains in area 18 of cat visual cortex: Optical imaging reveals a pinwheel-like organization. *Journal of Neuroscience*, 13(10), 4157–4180. <https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.13-10-04157.1993>
- 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://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpsyg.2014.01402>

Chen, N., Shin, K., Millin, R., Song, Y., Kwon, M., & Tjan, B. S. (2019). Cortical Reorganization of Peripheral Vision Induced by Simulated Central Vision Loss. *Journal of Neuroscience*, 39(18), 3529–3536. <https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.2126-18.2019>

Contemori, G., Battaglini, L., & Casco, C. (2019). Contextual influences in the peripheral retina of patients with macular degeneration. *Scientific Reports*, 9(1), 1–10.

De Valois, R. and D. V. (1990). *Spatial Vision (Oxford Psychology Series) (Volume 14)*. Oxford University Press Usa. <https://www.biblio.com/book/spatial-vision-oxford-psychology-series-volume/d/1503152941>

Gilbert, C. D. (1992). Horizontal integration and cortical dynamics. *Neuron*, 9(1), 1–13. [https://doi.org/10.1016/0896-6273\(92\)90215-y](https://doi.org/10.1016/0896-6273(92)90215-y)

Gilbert, C. D., Hirsch, J. A., & Wiesel, T. N. (1990). Lateral interactions in visual cortex. *Cold Spring Harbor Symposia on Quantitative Biology*, 55, 663–677. <https://doi.org/10.1101/sqb.1990.055.01.063>

Gilbert, R., Ryan, J. S., Horackova, M., Smith, F. M., & Kelly, M. E. M. (1998). Actions of substance P on membrane potential and ionic currents in guinea pig stellate ganglion neurons. *American Journal of Physiology-Cell Physiology*, 274(4), C892–C903. <https://doi.org/10.1152/ajpcell.1998.274.4.C892>

Hubel, D. H., & Wiesel, T. N. (1959). Receptive fields of single neurones in the cat's striate cortex. *The Journal of Physiology*, 148(3), 574–591.

- Hubel, D. H., & Wiesel, T. N. (1974). Sequence regularity and geometry of orientation columns in the monkey striate cortex. *The Journal of Comparative Neurology*, 158(3), 267–293. <https://doi.org/10.1002/cne.901580304>
- Kuffler, S. W. (1953). Discharge patterns and functional organization of mammalian retina. *Journal of Neurophysiology*, 16(1), 37–68. <https://doi.org/10.1152/jn.1953.16.1.37>
- Levitt, H. (1971). Transformed up-down methods in psychoacoustics. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 49(2), Suppl 2:467+.
- Lu, Z.-L., Yu, C., Sagi, D., Watanabe, T., & Levi, D. (2010). Perceptual Learning: Functions, Mechanisms, and Applications. *Vision research*, 50(4), 365–367. <https://doi.org/10.1016/j.visres.2010.01.010>
- Marçelja, S. (1980). Mathematical description of the responses of simple cortical cells*. *JOSA*, 70(11), 1297–1300. <https://doi.org/10.1364/JOSA.70.001297>
- Moret, B., Donato, R., Nucci, M., Cona, G., & Campana, G. (2019). Transcranial random noise stimulation (tRNS): A wide range of frequencies is needed for increasing cortical excitability. *Scientific Reports*, 9(1), Articolo 1. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-51553-7>
- Morrison, D. J., & Schyns, P. G. (2001). Usage of spatial scales for the categorization of faces, objects, and scenes. *Psychonomic Bulletin & Review*, 8(3), 454–469. <https://doi.org/10.3758/BF03196180>
- Nugent, A. K., Woods, R. L., & Peli, E. (2002). Flanker size affects visual lateral interactions. *Association of Research Vision Ophthalmology 2002 annual meeting, CD-ROM*, 4718.
- Owsley, C. (2003). Contrast sensitivity. *Ophthalmology Clinics of North America*, 16(2), 171–177. [https://doi.org/10.1016/s0896-1549\(03\)00003-8](https://doi.org/10.1016/s0896-1549(03)00003-8)

- Polat, U., & Norcia, A. M. (1996). Neurophysiological evidence for contrast dependent long-range facilitation and suppression in the human visual cortex. *Vision Research*, 36(14), 2099–2109. [https://doi.org/10.1016/0042-6989\(95\)00281-2](https://doi.org/10.1016/0042-6989(95)00281-2)
- Polat, U., & Sagi, D. (1993). Lateral interactions between spatial channels: Suppression and facilitation revealed by lateral masking experiments. *Vision Research*, 33(7), 993–999. [https://doi.org/10.1016/0042-6989\(93\)90081-7](https://doi.org/10.1016/0042-6989(93)90081-7)
- Polat, U., & Sagi, D. (1994). Polat, U. & Sagi, D. Spatial interactions in human vision: From near to far via experience-dependent cascade of connections. Proc. Natl Acad. Sci. USA 91, 1206-1209. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 91, 1206–1209. <https://doi.org/10.1073/pnas.91.4.1206>
- Polat, U., & Tyler, C. W. (1999). What pattern the eye sees best. *Vision Research*, 39(5), 887–895. [https://doi.org/10.1016/s0042-6989\(98\)00245-4](https://doi.org/10.1016/s0042-6989(98)00245-4)
- Ringach, D. L., Shapley, R. M., & Hawken, M. J. (2002). Orientation selectivity in macaque V1: Diversity and laminar dependence. *The Journal of Neuroscience: The Official Journal of the Society for Neuroscience*, 22(13), 5639–5651. <https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.22-13-05639.2002>
- Ruiz-Soler, M., & Beltran, F. S. (2006). Face perception: An integrative review of the role of spatial frequencies. *Psychological Research*, 70(4), 273–292. <https://doi.org/10.1007/s00426-005-0215-z>
- Stemmler, M., Usher, M., & Niebur, E. (1995). Lateral interactions in primary visual cortex: A model bridging physiology and psychophysics. *Science*, 269, 1877–1880. <https://doi.org/10.1126/science.7569930>

- Swindale, N. V. (1996). The development of topography in the visual cortex: A review of models. *Network (Bristol, England)*, 7(2), 161–247. <https://doi.org/10.1088/0954-898X/7/2/002>
- Swindale, N. V. (1998). Orientation tuning curves: Empirical description and estimation of parameters. *Biological Cybernetics*, 78(1), 45–56. <https://doi.org/10.1007/s004220050411>
- Ts'o, D. Y., Gilbert, C. D., & Wiesel, T. N. (1986). Relationships between horizontal interactions and functional architecture in cat striate cortex as revealed by cross-correlation analysis. *The Journal of Neuroscience: The Official Journal of the Society for Neuroscience*, 6(4), 1160–1170. <https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.06-04-01160.1986>
- Watson, A. B. (1983). Detection and Recognition of Simple Spatial Forms. In O. J. Braddick & A. C. Sleight (A c. Di), *Physical and Biological Processing of Images* (pp. 100–114). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-642-68888-1_8
- Wiesel, T. N., & Hubel, D. H. (1963). SINGLE-CELL RESPONSES IN STRIATE CORTEX OF KITTENS DEPRIVED OF VISION IN ONE EYE. *Journal of Neurophysiology*, 26, 1003–1017. <https://doi.org/10.1152/jn.1963.26.6.1003>
- Zenger, B., & Sagi, D. (1996). Isolating Excitatory and Inhibitory Nonlinear Spatial Interactions Involved in Contrast Detection **Part of this paper was presented at the 17th ECVF conference, Eindhoven, The Netherlands (September 1994). *Vision Research*, 36(16), 2497–2513. [https://doi.org/10.1016/0042-6989\(95\)00303-7](https://doi.org/10.1016/0042-6989(95)00303-7)