**UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA**

**Dipartimento di Psicologia Generale**

**Corso di laurea in Scienze psicologiche dello sviluppo, della personalità e delle relazioni interpersonali**

**Elaborato finale**

# Dinamiche Attentive e Percettive nella Visione Periferica: Ricerca visiva, Affollamento Visivo e Mascheramento Laterale a confronto

**Attentional and Perceptual Dynamics in Peripheral Vision: A Comparison of Visual Search, Visual Crowding, and Lateral Masking**

***Relatore***
**Prof. Luca Battaglini**

***Laureando/a: Luca Antonio Dominante***
***Matricola: 2075637***

Anno Accademico 2024/2025

# Indice

**ABSTRACT** ..... **5**

**CAPITOLO 1** ..... **7**

1.1 VIE VISIVE E ORGANIZZAZIONE DEI PROCESSI VISIVI ..... 7

1.2 ORGANIZZAZIONE DI V1 ..... 10

1.3 SENSIBILITÀ AL CONTRASTO ..... 11

1.4 INTERAZIONI LATERALI ..... 12

1.5 CROWDING ..... 14

1.6 OBIETTIVI DELLO STUDIO ..... 17

**CAPITOLO 2** ..... **19**

2.1 PARTECIPANTI ..... 19

2.2 STRUMENTAZIONE ..... 19

2.3 STIMOLI ..... 20

2.4 PROCEDURA SPERIMENTALE ..... 24

**CAPITOLO 3** ..... **27**

3.1 INTERAZIONI LATERALI ..... 27

3.2 CROWDING ..... 28

3.3 VISUAL SEARCH ..... 29

3.4 ANALISI CORRELAZIONALE ..... 30

3.5 CONCLUSIONI ..... 32

# Abstract

Obiettivo

La presente tesi sperimentale ha avuto come obiettivo la verifica di una possibile correlazione tra tre fenomeni fondamentali della percezione visiva: interazioni laterali, crowding e visual search.

Metodologia

Lo studio è stato condotto su un campione di partecipanti normovedenti, sottoposti a compiti di discriminazione e ricerca visiva con stimoli controllati in termini di contrasto, distanza spaziale e configurazione. Le prove hanno incluso misure relative all'effetto facilitatorio e inibitorio delle interazioni laterali, all'interferenza del crowding in periferia retinica e alla performance nei compiti di visual search, con particolare attenzione all'influenza del numero e della disposizione dei distrattori.

Risultati

L'analisi dei dati ha confermato la presenza di pattern distintivi e coerenti con la letteratura: facilitazione a distanze ottimali nelle interazioni laterali, incremento della soglia di riconoscimento in condizioni di affollamento e peggioramento della ricerca visiva al crescere della numerosità dei distrattori. Tuttavia, le analisi correlazionali hanno mostrato che non vi è alcuna relazione significativa tra le prestazioni nei diversi compiti, indicando che i tre fenomeni non condividono un unico meccanismo sottostante.

Conclusioni

Il lavoro evidenzia l'autonomia funzionale di interazioni laterali, crowding e visual search, sottolineando come essi rappresentino processi distinti dell'elaborazione visiva periferica. Questa distinzione contribuisce a chiarire i confini dei fenomeni e apre la strada a future indagini volte a esplorare condizioni sperimentali diverse in cui eventuali interazioni possano emergere.

# Capitolo 1

## Introduzione

La visione rappresenta una delle funzioni sensoriali più complesse e fondamentali dell'essere umano, centrale per l'interazione quotidiana con l'ambiente circostante. Grazie ad essa, l'essere umano risulta in grado di riconoscere oggetti, cogliere movimenti, individuare pericoli o stimoli rilevanti ed orientarsi nello spazio con efficacia. Evolutivamente parlando, la centralità della visione è ravvisabile nel suo contributo alla sopravvivenza: individuare predatori, prede, compagni laddove, nella vita moderna, tale importanza si declina nella capacità di interpretare simboli, leggere, riconoscere volti e stimoli ambientali complessi. Sotteso a questa complessa ma fondamentale funzione si trova un sistema visivo altamente specializzato, che a partire dall'occhio e dai suoi fotorecettori, elabora in maniera gerarchica e sofisticata l'informazione luminosa fino alla corteccia visiva. Obiettivo del presente lavoro è indagare alcune delle dinamiche più rilevanti che regolano l'elaborazione visiva in periferia, concentrandosi sui fenomeni del *crowding*, delle *interazioni laterali* e dei meccanismi di *ricerca visiva*.

## 1.1 Vie visive e organizzazione dei processi visivi

Il processo visivo ha inizio quando i fotoni, una volta colpita la retina, vengono convertiti in segnali elettrici dai fotorecettori (coni e bastoncelli). Quando si parla di fotorecettori, si fa riferimento ad una serie di cellule, altamente specializzate, il cui compito è quello di provvedere alla *trasduzione* dell'informazione visiva, nello specifico sono cellule che si occupano di convertire l'energia luminosa in variazioni del potenziale di membrana, che si manifestano sotto forma di *potenziali graduati.* Tali segnali sono trasmessi attraverso svariati strati di cellule, tra cui le cellule bipolari e gangliari, i cui assoni si raccolgono in un unico fascio terminale, definito come *nervo ottico*. Dopo aver attraversato il chiasma ottico, l'informazione raggiunge il nucleo genicolato laterale (NGL) del talamo. Da qui, attraverso gli assoni dei neuroni del NGL, viene proiettata direttamente sulla corteccia visiva primaria (V1) (situata nel lobo occipitale, attorno alla scissura calcarina) mediante un sistema di fibre nervose chiamato radiazione ottica.

A livello retinico sono presenti le cellule gangliari, ovvero cellule caratterizzate da specifici *campi recettivi*, laddove per campo recettivo si intendano le regioni spaziali nelle quali sono situati i fotorecettori da cui ogni cellula gangliare riceve input. In altre parole, ci si riferisce al termine *campo recettivo* quando si parla di quella porzione di retina che, quando stimolata dalla luce, possiede la capacità di modificare l'attività della specifica cellula gangliare cui è connessa.

Grazie agli esperimenti di Kuffler (1953), è stato possibile individuare due caratteristiche fondamentali: in primo luogo, la forma dei campi recettivi è approssimabile ad una forma circolare; in secondo luogo, i campi recettivi risultano suddivisi in due aree concentriche, un centro ed una periferia. Sulla base della tipologia dei campi recettivi presenti nelle varie cellule gangliari, queste vengono categorizzate in cellule centro-ON, le quali si attivano quando la luce colpisce il centro e si inibiscono con la stimolazione della periferia, e cellule centro-OFF, per le quali vale il contrario (Fig. 1.1).

L'eccitazione e l'inibizione vengono rispettivamente tradotte come incremento o decremento della frequenza di scarica, mentre se l'anello di luce stimola simultaneamente entrambe le sezioni del campo recettivo, la risposta della cellula risulta quasi completamente soppressa (meccanismo osservabile in entrambe le tipologie di cellule, sia centro-ON che centro-OFF). Questo sistema opponente consente una raffinata elaborazione dei contrasti di *luminanza,* contribuendo alla rilevazione dei bordi degli oggetti già nei primi stadi della percezione visiva.

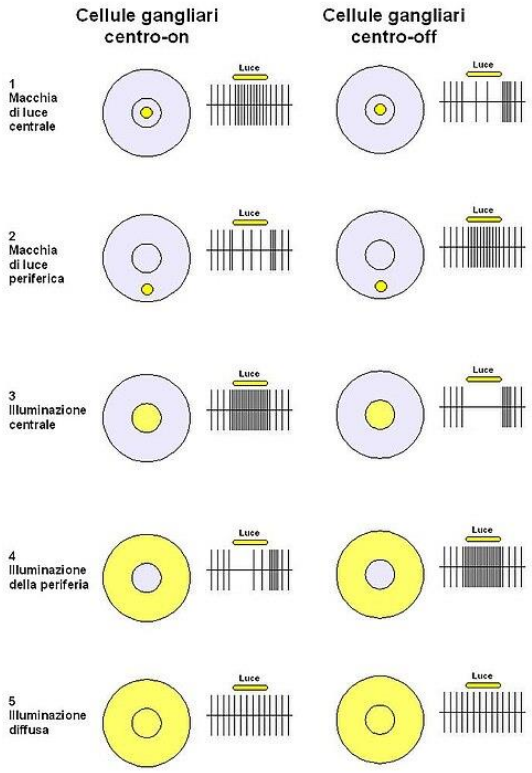



Figura 1.1: Organizzazione dei campi recettivi delle cellule centro ON, in alto, e centro OFF, in basso. Le prime aumentano la frequenza di scarica quando il fascio di luce colpisce il centro.

Le risposte delle cellule gangliari non dipendono tanto dall'intensità assoluta della luce che colpisce il campo recettivo, quanto dalle differenze di *luminanza* tra il centro e la periferia del campo stesso. Maggiore è questo contrasto, maggiormente intensa sarà la risposta della cellula gangliare. Da ciò si deduce che i campi recettivi a opponenza centro-periferia sono particolarmente utili per rilevare contrasti di luminosità, corrispondenti ai bordi degli oggetti nello spazio visivo. Già nei primi stadi dell'elaborazione visiva, dunque, si costruisce una sorta di *primal sketch* (Marr 2010), ossia una rappresentazione bidimensionale dell'immagine, composta da contorni e profili.

Le cellule gangliari si distinguono anche in cellule M (magnocellulari) e P (parvocellulari): le prime, sensibili al movimento e dotate di elevata risoluzione temporale, hanno campi recettivi ampi; le seconde, specializzate nei dettagli fini e nel colore, possiedono campi più piccoli e una risoluzione spaziale maggiore. Tale distinzione si riflette anche nell'organizzazione del NGL.

## 1.2 Organizzazione di V1

La corteccia visiva primaria (V1) costituisce una tappa fondamentale dell'elaborazione visiva. Qui avviene l'analisi di orientamento, direzione del movimento e frequenza spaziale degli stimoli (Hubel e Wiesel 1962; Tootell et al. 1988). L'organizzazione di questa regione viene definita "modulare": i neuroni di V1 sono disposti in colonne, perpendicolari alla corteccia, ognuna delle quali rappresenta una porzione del campo visivo. Tra queste colonne, quelle di orientamento comprendono cellule che rispondono in maniera selettiva ad uno specifico orientamento dello stimolo visivo (Hubel e Wiesel, 1962).

Le colonne adiacenti, invece, presentano una risposta preferenziale per orientamenti leggermente diversi, dando origine ad una progressione continua nota come *mappa a raggiera*. Parallelamente, i neuroni risultano organizzati in colonne di dominanza oculare. Si tratta di gruppi cellulari che possiedono una risposta preferenziale nei confronti degli stimoli provenienti da uno dei due occhi (Hubel e Wiesel, 1965). Il risultato di questa organizzazione doppia ha portato al concetto, introdotto da Hubel e Wiesel nel 1968, di "ipercolonna", ovvero un'unità funzionale completa, contenente l'intera gamma di orientamenti per entrambi gli occhi, in una specifica area del campo visivo (Hubel e Wiesel, 1968). All'interno di ognuna di queste ipercolonne si trovano anche i *"blob"*, ovvero regioni specializzate nell'elaborazione cromatica (Livingstone e Hubel, 1984) (Fig. 1.2).

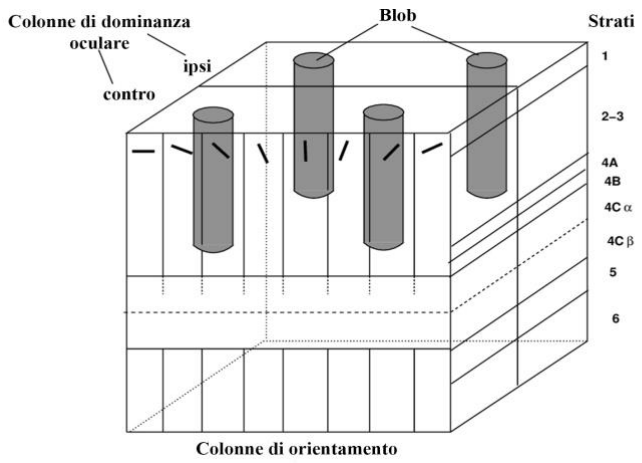



Figura 1.2: Organizzazione modulare di V1. Un'ipercolonna comprende: entrambe le colonne di dominanza oculare, i blob, le colonne con risposta preferenziale per tutti i possibili orientamenti (la cui organizzazione è descritta dalla mappa a raggiera).

## 1.3 Sensibilità al contrasto

La sensibilità al contrasto, che si configura come il primo stadio di elaborazione dell'informazione visiva, risulta fondamentale per ottenere una percezione corretta del mondo esterno. In psicofisica, il tipo di contrasto maggiormente utilizzato è il contrasto di Michelson, definito dalla seguente equazione:

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

dove:

• Lmax è la luminanza massima

• Lmin è la luminanza minima

Si tratta di un tipo di contrasto comunemente utilizzato con stimoli periodici, come i reticoli sinusoidali. Esso assume valori compresi tra 0 e 1, laddove un valore pari a 0 indica l'assenza di contrasto (non vi è differenza tra Lmax ed Lmin, lo stimolo risulta uniforme), mentre un valore pari a 1 corrisponde al massimo contrasto percepibile (la differenza tra Lmax ed Lmin risulta massima).

Il contrasto, inteso come la differenza di luminanza tra un oggetto e il suo sfondo, rappresenta una variabile cruciale per la percezione visiva. La funzione di sensibilità al contrasto (CSF), introdotta da Campbell e Robson (1968), mostra come la sensibilità vari in base alla frequenza spaziale degli stimoli (Figura 1.3). Essa assume una forma a campana rovesciata, con un picco intorno ai 3-4 cicli per grado: questo è il range in cui il sistema visivo è più sensibile.

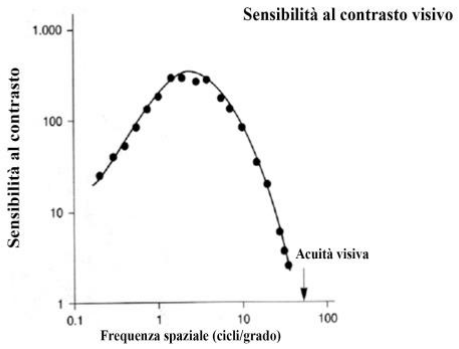



Figura 1.3: La curva di sensibilità al contrasto. Il picco viene raggiunto per frequenze intermedie, mentre il punto più estremo rappresenta l'acuità visiva del sistema visivo umano

## 1.4 Interazioni laterali

I neuroni di V1 sono influenzati non solo dalle afferenze feedforward, provenienti dal NGL, ma anche da connessioni orizzontali ed a feedback, che consentono l'integrazione di informazioni spaziali più ampie, arricchendo e raffinando l'elaborazione visiva.

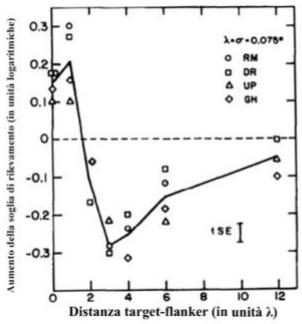



Figura 1.4: Andamento dei valori di soglia in relazione alla distanza fra target e *flankers,* ovvero stimoli visivi posizionati accanto a un target, utilizzati in esperimenti di percezione per studiare interferenze contestuali come il *crowding* o le interazioni laterali.

Le connessioni a feedback connettono V1 con stazioni di elaborazione corticale superiori, come V2 ed MT, e risultano coinvolte nella modulazione di regioni maggiormente distanti rispetto al classico campo recettivo, note come *far surround* (Angelucci e Bresslof, 2006).

Ai fini di questo elaborato, risulta particolarmente cruciale porre interesse sulle connessioni orizzontali, che si sviluppano all'interno dello stesso strato cellulare e collegano cellule con simili proprietà (es. orientamento preferito), anche se appartenenti a colonne diverse (Gilbert e Wiesel, 1989; Ts'o, Gilbert e Wiesel, 1986). Queste connessioni risultano essere alla base di un fenomeno noto come *modulazione contestuale*, per il quale la risposta di un neurone è modulata dagli stimoli presenti nelle zone circostanti al campo recettivo. Ne derivano dunque interazioni laterali che possono avere effetti di natura facilitatoria o inibitoria, a seconda delle caratteristiche del contesto. Conseguentemente, il modo in cui una cellula risponde risulta non dipendere esclusivamente dalle informazioni provenienti dal proprio campo recettivo, ma viene fortemente influenzata dalla configurazione contestuale; si tratta di un principio che si riflette anche nei paradigmi sperimentali, nei quali la detezione di uno stimolo target può essere influenzata dalla presenza di altri stimoli all'interno di porzioni limitrofe di spazio (Kapadia et al., 1995).

Il lavoro di Polat e Sagi (1993) ha dimostrato quali siano le variabili che determinano una facilitazione o una soppressione della detezione dello stimolo. I ricercatori si sono focalizzati, in particolare, sulla distanza degli stimoli laterali (noti come *flankers*) dallo stimolo target. Il grafico in Fig. 1.4 rende osservabile come la soglia di detezione dello stimolo target dipenda dalla distanza (riportata sull'asse delle ascisse) e dall'orientazione dei *flankers*. A distanze inferiori a 2λ, la soglia aumenta: si osserva un incremento nella difficoltà di rilevamento dello stimolo, dando dunque luogo ad un effetto inibitorio. All'aumentare della distanza, la soglia di abbassa in maniera progressiva, mostrando dunque un effetto facilitatore nella detezione (il picco di questo effetto si ha intorno a 3λ, ove compare una facilitazione massima). Superata questa distanza, l'effetto di facilitazione si riduce in maniera graduale, fino a rientrare nei livelli di baseline quando la distanza supera il valore di 10λ, dove l'effetto tende a scomparire. Questi risultati sono stati spiegati attraverso i campi recettivi delle cellule: quando i *flankers* risultano molto

vicini al target, essi cadono dentro lo stesso campo recettivo dello stimolo centrale. Questo darebbe luogo a un effetto inibitorio dovuto all'attivazione di cellule della stessa ipercolonna. Quando, invece, le distanze aumentano, i *flankers* vengono elaborati da cellule appartenenti a ipercolonne diverse, in quanto appartenenti a porzioni di spazio differenti rispetto al target. In questo modo, le connessioni orizzontali fra le ipercolonne modulerebbero la risposta del neurone interessato, facilitandone la rilevazione dello stimolo.

Anche l'orientazione gioca un ruolo critico nella presenza di effetti di facilitazione ed inibizione: La presenza o assenza di suddetti effetti risulta condizionata dal grado di somiglianza tra l'orientazione del target e quella degli stimoli laterali.

I risultati dimostrano la presenza di effetti massimi (indipendentemente dalla natura, facilitatoria o inibitoria) osservabili quando target e *flankers* condividono la medesima orientazione (ad esempio, risultando entrambi verticali), mentre l'intensità degli stessi effetti risulta inversamente proporzionale al grado di vicinanza dell'orientazione dei flankers rispetto ad una condizione di orientazione ortogonale, ovvero una differenza di 90° rispetto a quella del target.

Questo specifico comportamento evidenzia in maniera particolarmente lampante la specificità orientamento-dipendente delle interazioni laterali nella percezione visiva.

La letteratura rende particolarmente chiaro come le interazioni laterali costituiscano meccanismi precoci dell'elaborazione visiva, localizzati nelle stazioni corticali di basso livello. In particolare, questi fenomeni trovano il proprio substrato neurale all'interno di V1, dove le connessioni orizzontali tra i neuroni consentono di integrare informazioni provenienti da diversi campi recettivi, contribuendo così a costruire, sin dai primi stadi della percezione, rappresentazioni visive coerenti e contestualmente modulate.

## 1.5 Crowding

Il crowding o affollamento visivo si manifesta quando la presenza di stimoli adiacenti ostacola il riconoscimento di un target, senza comprometterne la semplice rilevazione. Il fenomeno è più marcato nella visione periferica e in presenza di stimoli simili (Kooi et al., 1994; Nazir, 1992). In particolare, questo effetto risulta maggiormente pronunciato

quando i distrattori ed il target condividono alcune caratteristiche specifiche come la forma, dimensione, orientazione, frequenza spaziale, colore e movimento (Andriessen e Bouma, 1976; Levi, Hariharan e Klein, 2002; Banton e Levi, 1993). La spaziatura critica, che definisce la distanza minima alla quale i flankers smettono di interferire con il riconoscimento del target, è definita dalla legge di Bouma, e risulta, nel caso di lettere, direttamente proporzionale all'eccentricità del target rispetto alla fovea. (Bouma, 1970).

Da suddetta legge, definita dalla seguente equazione:

$$\text{Spaziatura critica} = 0.5 \times \text{eccentricità} \tag{1.2}$$

Si evince che in visione foveale, ove l'eccentricità risulta nulla, l'affollamento è praticamente assente, oppure si verifica esclusivamente in situazioni nelle quali la distanza tra target e flankers risulti particolarmente ridotta (Flom, Weymouth, Kahneman, 1963; Liu e Arditi, 2000). In visione periferica, invece, l'affollamento diviene maggiormente marcato, quantificandolo moltiplicando l'eccentricità per 0.5 (Toet e Levi, 1992).

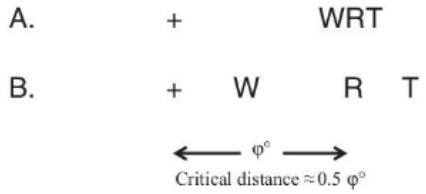



Figura 1.5: Il fenomeno del crowding nella visione periferica. Condizione A: le lettere risultano eccessivamente ravvicinate e difficilmente riconoscibili singolarmente. Condizione B: la spaziatura è maggiore di quella critica, permettendo un riconoscimento accurato. Il simbolo "+" rappresenta il punto di fissazione centrale.

I flankers posti verso l'esterno esercitano un effetto più marcato rispetto a quelli più centrali, per via della rappresentazione corticale non uniforme dello spazio visivo. La rappresentazione corticale dell'area centrale del campo visivo, infatti, risulta più estesa, ragion per cui gli stimoli vicini alla fissazione occupano una porzione di corteccia visiva più grande rispetto a quelli periferici (Kooi et al. 1994). Ne consegue che, in contesti nei quali gli stimoli risultino parzialmente distanti nello spazio visivo, nella rappresentazione corticale il flanker più esterno risulta più vicino al target, aumentando l'intensità dell'effetto di affollamento.

Il crowding si distingue dal mascheramento e interazioni laterali per i livelli coinvolti e per le sue caratteristiche. Il mascheramento avviene quando l'interferenza di una maschera avviene in maniera diretta sul target, aumentandone la soglia di rilevazione e identificazione (Thomas, 1985). D'altro canto, le interazioni laterali descrivono l'effetto che stimoli adiacenti hanno sulla percezione del target, il quale può risultare facilitato o inibito in base alla distanza (Polat e Sagi, 1993). Una ulteriore differenza riguarda i livelli del sistema visivo in cui questi fenomeni si manifestano. Determinati studi associano effetti come il crowding a processi di alto livello, soprattutto in presenza di stimoli complessi (ad esempio i volti). In particolare, alcuni studi hanno dimostrato come l'affollamento interferisca con la percezione olistica dei volti, riducendo l'efficienza del riconoscimento in scenari visivi affollati (Louie, Bressler e Whitney, 2007). Nel loro studio, ai partecipanti venivano presentati volti target circondati da distrattori (altri volti), manipolandone l'orientamento (volti diritti vs. capovolti). I volti diritti vengono elaborati in maniera maggiormente olistica, mentre quelli capovolti tendono a essere elaborati più localmente. I dati hanno mostrato un effetto di crowding superiore nella condizione olistica, supportando l'ipotesi secondo cui le stazioni dell'elaborazione visiva (oltre V1) nelle quali opera l'affollamento visivo sono più alte. In merito a questo, però, la letteratura non risulta univoca: recenti studi hanno infatti dimostrato come il fenomeno del crowding possa avere origine addirittura a livello della corteccia visiva primaria, il che potrebbe portare ad ipotizzare un coinvolgimento precoce nei meccanismi di elaborazione visiva (Millin et al., 2014; X. Liu, Zhang e Li, 2019).

Per comprendere appieno la portata del crowding, è utile richiamare brevemente il concetto di *acuità visiva*, che rappresenta la misura tradizionale della capacità risolutiva del sistema visivo. Per *acuità visiva* si intende la capacità di discernere le frequenze spaziali più alte, ovverosia di risolvere spazialmente le differenze di luminosità, ad un livello di contrato al 100%. In sostanza, dunque, l'acuità visiva indica la minima dimensione possibile di uno stimolo affinché esso rimanga comunque percepibile in maniera nitida, quando il contrasto risulta massimo. Nella funzione di sensibilità al contrasto, l'acuità visiva si colloca dunque all'estremità destra (Fig. 1.2). Fisiologicamente parlando, l'acuità visiva è dipendente soprattutto dalla densità dei fotorecettori sulla retina e dalla dimensione dei campi recettivi relativi. All'interno della

fovea, dove i fotorecettori risultano più concentrate ed i campi recettivi più piccoli, è possibile distinguere dettagli molto fini, ragion per cui l'acuità visiva risulta massima in questa zona. Nella periferia retinica, invece, i campi rcettivi risultano più ampi, e per questo motivo si ha una perdita di risoluzione spaziale ed un'inferiore abilità nella percezione dei dettagli.

Dunque, mentre l'acuità visiva definisce la minima dimensione dello stimolo risolvibile in condizioni di massimo contrasto, il crowding rappresenta un vincolo che emerge in presenza di stimoli vicini al target. In fovea la prestazione è limitata prevalentemente dall'acuità, mentre in periferia, anche quando l'acuità sarebbe sufficiente a risolvere il dettaglio, l'affollamento visivo impedisce l'identificazione corretta.

## 1.6 Obiettivi dello studio

L'obiettivo della presente ricerca è confrontare i fenomeni delle interazioni laterali e del crowding, focalizzandosi sulla visione periferica e contribuendo ad arricchire i dati già presenti in letteratura. Si intende verificare l'eventuale presenza di meccanismi comuni di inibizione in compiti percettivi dove è richiesta un'elaborazione del campo visivo periferico. Oltre all'analisi dell'inibizione laterale e del crowding, è stato incluso un protocollo di visual search training volto a esplorare il ruolo dell'integrazione visiva precoce e della configurazione del target nella facilitazione dell'apprendimento percettivo. L'obiettivo secondario è verificare se compiti di visual search basati su configurazioni gestaltiche (es. Gabor in cerchio) promuovano un miglioramento maggiore rispetto a stimoli isolati, suggerendo un coinvolgimento delle reti visive precoci nel trattamento delle configurazioni complesse.

Nell'ambito delle interazioni laterali, vi sono numerosi studi che hanno evidenziato la presenza, in visione foveale, di effetti sia inibitori che facilitatori, riconducibili alle connessioni orizzontali di V1. In visione periferica, invece, gli effetti di facilitazione risultano molto meno evidenti, soprattutto alle distanze classiche di 2–3λ, laddove (in fovea) si osservano effetti facilitatori robusti (Polat e Sagi 1993, Zenger e Sagi 1996). Alcuni studi hanno rilevato facilitazione collinare solo in determinate condizioni sperimentali: è il caso dello studio di Williams e Hess 1998 e Zenger-Landolt e Koch 2001, nel quale non è stata rilevata facilitazione collineare nella periferia utilizzando un

paradigma spaziale 2AFC, mentre in altri studi (Giorgi et al. 2004; Polat e Sagi 1994, Wu e Chen 2010) essa è risultata rilevabile esclusivamente adottando un paradigma temporale 2AFC. Tale esito lascia presupporre una facilitazione periferica debole (o una totale assenza della stessa), specialmente nelle condizioni spaziali standard, oltre a suggerire una prevalenza di effetti inibitori in periferia. Il seguente studio, nella convinzione che essa possa rappresentare un fenomeno maggiormente stabile e misurabile in periferia, si concentrerà prevalentemente sull'inibizione laterale.

A livello pratico, questa ipotesi viene testata attraverso tre esperimenti distinti, che misurano tutti i fenomeni sopra citati. I dati raccolti vengono poi sottoposti ad analisi correlazionale, da cui ci si attende una relazione positiva tra le prestazioni nei vari compiti. Il compito sulle interazioni laterali, nello specifico, è stato ulteriormente suddiviso in due condizioni sperimentali, nelle quali non è stata modificata la procedura sperimentale, bensì è stata modulata unicamente la condizione riguardo l'orientazione dei flankers. Come descritto nel paragrafo 1.4, l'effetto di facilitazione o di inibizione dovuto alla presenza dei flankers si annulla quando questi ultimi presentano un'orientazione marcatamente differente rispetto a quella del target (Polat e Sagi 1993, Polat e Sagi 2007). Per valutare correttamente se la presenza dei flankers abbia un effetto inibitorio sulla prestazione, è quindi fondamentale disporre di una baseline di riferimento. Questa baseline è rappresentata dalla condizione sperimentale in cui l'orientazione dei flankers risulta ortogonale rispetto a quella del target in quanto, in tale configurazione, non ci si aspetta una prestazione che ne risulti influenzata. Nel compito del crowding, invece, tale misura non è stata necessaria in quanto la relazione tra eccentricità e spaziatura critica è già ben documentata in letteratura. Impostando, infatti, la posizione del target a un'eccentricità nota, risulta possibile determinare la spaziatura critica attesa senza dover ricorrere a una condizione di controllo separata.

In conclusione, questo studio si propone di approfondire la comprensione dei meccanismi precoci dell'elaborazione visiva, indagando congiuntamente le interazioni laterali, il crowding e l'integrazione configurazionale nel visual search, con particolare attenzione alla visione periferica. L'obiettivo è verificare l'esistenza di un substrato neurale comune a questi fenomeni, così da fare luce sui processi corticali che potrebbero essere alla loro base.

# Capitolo 2

## Metodo

### 2.1 Partecipanti

Il gruppo sperimentale per questo studio è stato composto di 10 soggetti, di cui 8 maschi e 2 femmine (età media = 22 anni e deviazione standard, ds=0.70). Tutti i partecipanti avevano una visione normale. I partecipanti che portavano occhiali da vista ma erano sprovvisti di lenti a contatto non hanno preso parte agli esperimenti, al fine di evitare che le lenti degli occhiali impedissero la corretta rilevazione dei movimenti oculari da parte del sistema Eyelink-1000. Non sono stati presi in considerazione partecipanti con difficoltà, in assenza di lenti, a distinguere finemente gli stimoli presentati sulla base della distanza prevista dallo schermo. I partecipanti non erano a conoscenza delle ipotesi dello studio; la maggior parte di loro non aveva svolto compiti visivi simili in precedenza, non risultando familiari con la tipologia di stimoli utilizzata, ragion per cui è stato previsto, per ogni *task* sperimentale, un blocco "di prova".

### 2.2 Strumentazione

Gli stimoli visivi sono stati presentati su un monitor OLED da 27" (ASUS ROG Swift

PG27AQDM) con una risoluzione di 2560×1440 pixel e una frequenza di aggiornamento di 120 Hz. Gli esperimenti si sono svolti all'interno di una stanza buia, illuminata unicamente dal monitor, in modo da minimizzare il più possibile eventuali interferenze visive esterne. Il computer utilizzato è un sistema assemblato con una scheda madre, una scheda grafica AMD Radeon RX 6750 XT e sistema operativo Windows 11 Pro a 64 bit. Il processore è Intel(R) Core (TM) i7-14700KF. La profondità di colore è stata impostata a 10 bit, con formato colore RGB a gamma dinamica standard (SDR). La programmazione degli esperimenti è stata effettuata tramite il software MATLAB (The Mathworks, Inc., versione 23.2.0.2485118) e l'estensione Psychophysics Toolbox (Brainard e Vision 1997, Pelli 1997). I partecipanti sono stati posizionati a 57 cm dallo schermo; per stabilizzare la testa è stato utilizzato un supporto per il mento e per la fronte

che ha permesso al soggetto di mantenere fermo lo sguardo per tutta la durata degli esperimenti. Questo ha garantito anche una distanza di visione costante e ha ridotto eventuali movimenti della testa. Un punto di fissazione forzato, al centro dello schermo, è stato ottenuto utilizzando l'EyeLink-1000 Plus (SR Research, con una configurazione Tower Mount), un dispositivo di monitoraggio dei movimenti oculari. La visione è rimasta binoculare per tutta la sessione di esperimenti. Infine, per ottenere una funzione lineare della luminosità delle immagini presentate è stata applicata una correzione della funzione gamma del monitor.

## 2.3 Stimoli

Gli stimoli visivi impiegati sono stati di due categorie: filtri Gabor per il compito sulle *interazioni laterali* e ottotipi direzionali per quello sull'*affollamento visivo*. I filtri Gabor sono reticoli in cui una modulazione sinusoidale della luminanza è combinata con un inviluppo gaussiano, secondo la seguente equazione:

$$\boldsymbol{G}(x,y) = cos\left(\frac{2\pi}{\lambda}x + \phi\right) \cdot e^{-\frac{x^2+y^2}{\sigma^2}} \tag{2.1}$$

In questa formulazione, λ indica la lunghezza d'onda sinusoidale, φ la fase e σ la deviazione standard della funzione gaussiana (φ = 1deg) nello spazio dell'immagine (x, y). In entrambe le condizioni dell'esperimento sulle interazioni laterali (flankers con la stessa orientazione del target vs. flankers ortogonali al target), la deviazione standard delle Gabor era uguale al periodo del vettore (σ =λ), con una fase fissa (φ = 0), mentre la frequenza spaziale, sia del target che dei flankers, è stata impostata a 6 cpd.

Questi stimoli sono ampiamente utilizzati in psicofisica poiché riproducono in modo fedele le caratteristiche funzionali dei neuroni della corteccia visiva primaria. Analogamente alle cellule di V1, i filtri Gabor presentano una specifica selettività per l'orientamento, una determinata frequenza spaziale e una localizzazione circoscritta nello spazio (Marcelja, 1980). Inoltre, studi precedenti hanno evidenziato che, all'interno del campo recettivo di un neurone corticale, sono presenti 2–3 subunità spaziali che operano in modo antagonista, ossia con risposte opposte, al fine di ottimizzare la codifica dello

stimolo (Polat & Tyler, 1999; Watson, 1982; Watson, Barlow & Robson, 1983). Per tali ragioni, i Gabor si rivelano particolarmente idonei a modellare le risposte dei neuroni di V1.

Nella prima condizione sperimentale sulle interazioni laterali, target e flankers condividevano lo stesso orientamento. La Fig. 2.1 riporta due esempi di configurazione della Gabor centrale: nel pannello (a) il contrasto del target è simile a quello dei *flankers*, mentre nel pannello (b) è ridotto in maniera significativa, rendendo più complessa la sua individuazione.

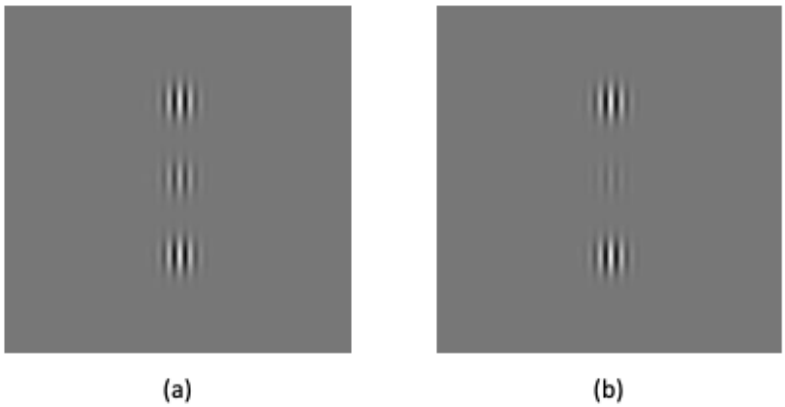



Figura 2.1: Possibili configurazioni degli stimoli nella condizione con target e *flankers* aventi la stessa orientazione. Nel pannello (a) il contrasto della Gabor centrale è simile a quello dei *flankers*; nel pannello (b) è notevolmente ridotto, aumentando la difficoltà di rilevamento.

La seconda condizione era strutturata come la precedente, con la sola differenza che i *flankers* erano orientati ortogonalmente rispetto al target, ossia inclinati di 90°. Anche in questo caso, il contrasto della Gabor centrale variava nel corso delle prove, diminuendo progressivamente. La Fig. 2.2 mostra esempi relativi a questa configurazione.

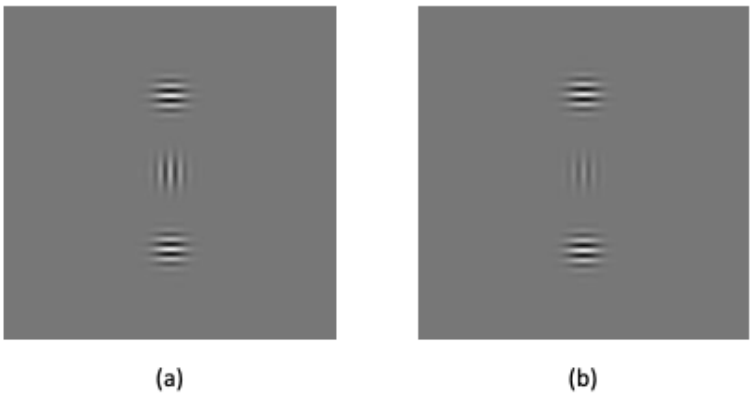



Figura 2.2: Esempi di configurazioni nella condizione con *flankers* inclinati di 90° rispetto al target. Nel pannello (a) la Gabor centrale presenta un contrasto elevato; nel pannello (b) il contrasto risulta ridotto.

Per il compito di *crowding* sono stati impiegati stimoli visivi più semplici rispetto ai Gabor. Nella periferia del campo visivo veniva presentato un anello di Landolt, uno stimolo comunemente utilizzato per la valutazione dell'acuità visiva. L'anello, simile alla lettera "C", poteva comparire con un *gap* disposto secondo 4 diverse orientazioni: 0°, 90°, 180° e 270°. Il target occupava un angolo visivo di 1° ed era affiancato lungo la sua diagonale da due distrattori circolari pieni, privi di apertura. Questa scelta eliminava la variabile dell'orientamento nei distrattori, pur mantenendo un'elevata somiglianza visiva con il target. Durante la sequenza di prove, la distanza tra target e distrattori veniva gradualmente ridotta fino a ottenere una sovrapposizione quasi completa con l'anello di Landolt. La Fig. 2.3 illustra due configurazioni tipiche del compito.

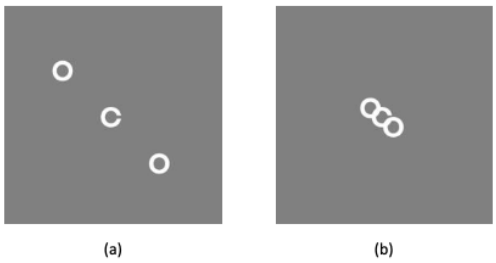
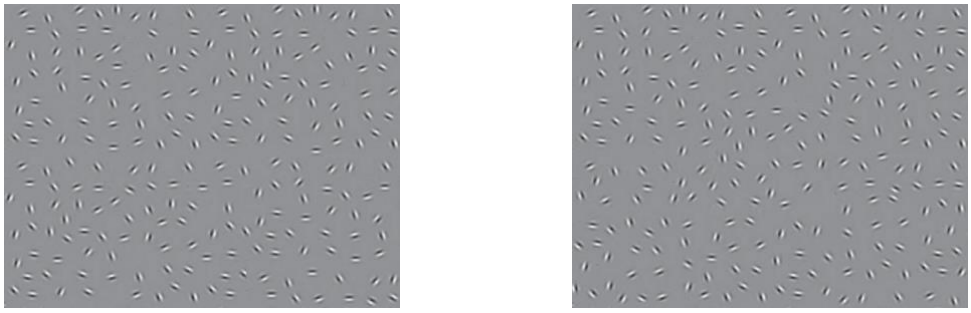



Figura 2.3: Esempi di configurazioni dell'anello di Landolt e dei distrattori a 90°. Nel pannello (a) i distrattori sono sufficientemente distanti dal target da non interferire con il riconoscimento dell'orientamento; nel pannello (b) risultano quasi sovrapposti, aumentando la difficoltà del compito.

Per il compito di *visual search* è stata impiegata una versione specifica del training visivo denominata "configurazionale", caratterizzata dall'utilizzo di stimoli complessi basati su *Gabor patches* con frequenza spaziale di circa 5 cicli/° visivo e contrasto al 95% (Michelson). L'orientamento dei singoli elementi, ad eccezione di quelli costituenti il target, era randomizzato. Lo stimolo target era costituito da una configurazione circolare formata da più Gabor orientate in modo da suggerire un contorno chiuso, in linea con quanto proposto da Szwed et al. (2012) per studiare i processi precoci di integrazione del contorno (*contour integration*). Questa disposizione è associata a un maggiore coinvolgimento dei meccanismi di *grouping* e di combinazione di caratteristiche semplici in unità percettive globali. In ogni immagine, il target (quando presente) era immerso in un campo di Gabor distrattori con orientamenti casuali. Nella condizione *target presente*, la configurazione circolare era collocata in una posizione casuale sul display; nella condizione *target assente*, tutte le Gabor erano disposte casualmente, senza formare configurazioni strutturate (Fig. 2.4).

Il gruppo sperimentale, composto da 10 soggetti (8 uomini e 2 donne) con visione normale o corretta, ha svolto un solo blocco sperimentale per il compito di *visual search*, preceduto da un blocco di prova. Ogni blocco era costituito da immagini statiche presentate per un tempo massimo di 2 secondi. Il 50% delle immagini conteneva il target, mentre il restante 50% ne era privo. La risposta veniva fornita premendo un tasto dedicato alle condizioni "presente" o "assente" del target.



(a) (b)

Figura 2.4: Esempio di configurazione circolare i *Gabor patches*. Nella figura (a), la configurazione viene presentata *con* target, mentre nella figura (b) viene presentata *senza* target.

## 2.4 Procedura Sperimentale

La procedura sperimentale differiva in base al tipo di task svolto. Nel caso dello studio sulle interazioni laterali (per entrambe le condizioni), è stato utilizzato il paradigma della scelta forzata a due intervalli (two-interval forced choice, 2IFC). I 10 partecipanti dovevano mantenere lo sguardo fisso su un punto di fissazione al centro dello schermo. Gli stimoli Gabor venivano presentati nella porzione sinistra del monitor, in una zona periferica del campo visivo. In ciascuno dei due intervalli temporali distinti venivano mostrati i flankers (Gabor laterali), mentre solo in uno dei due appariva anche il target centrale. Al termine della seconda presentazione, il compito del partecipante consisteva nell'indicare, tramite la pressione della freccia sinistra o destra, in quale dei due intervalli temporali fosse apparso il target. Ogni trial consisteva nella presentazione di due intervalli della durata di 133 ms ciascuno, separati da un intervallo interstimolo (ISI) di 500 ms, accompagnati da un segnale sonoro. Tra un trial e l'altro era prevista una pausa di 1 secondo. Dopo ogni risposta veniva fornito un feedback acustico: un tono acuto per le risposte corrette e un tono grave per quelle errate (Fig. 2.5).

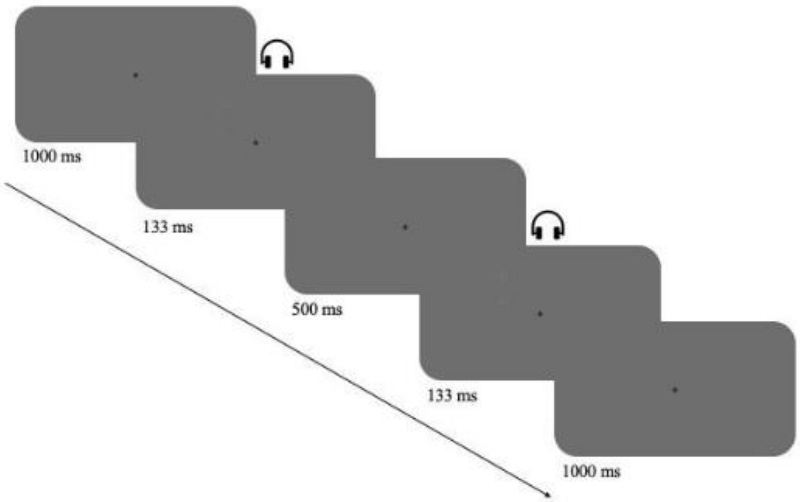



Figura 2.5: Procedura dell'esperimento sulle interazioni laterali, condizione flankers a 0°. Lo stimolo centrale viene presentato solamente in uno dei due intervalli di tempo, in questo caso nel primo. Ogni presentazione è accompagnata da un segnale acustico.

In entrambe le condizioni (flankers a 0° e a 90°), il contrasto iniziale del target era fissato a 0.7 (secondo la definizione di contrasto di Michelson), modulato poi dinamicamente in base alle risposte del partecipante attraverso una procedura adattiva staircase 2-down 1-up (Levitt, 1971). In particolare, il contrasto diminuiva di 0.05 unità logaritmiche (per riferimento, 0.05 unità logaritmiche corrispondono a una variazione del 12% del segnale) ogni due risposte corrette consecutive (aumentando la difficoltà), mentre aumentava dopo ogni errore (semplificando il compito). Questa procedura permette di stimare la soglia percettiva corrispondente a una discriminazione con probabilità circa del 70.7%. Ogni blocco sperimentale terminava al raggiungimento di 100 trial o dopo 10 inversioni (reversal) della direzione di variazione del contrasto (da crescente a decrescente, o viceversa).

Per ciascuna condizione è stato condotto un singolo blocco sperimentale, preceduto dalla somministrazione di una sessione demo, costituita da un blocco identico alla versione sperimentale, volto a far familiarizzare i partecipanti con il compito.

Nel compito di crowding è stato impiegato il paradigma della scelta forzata a quattro alternative (four-alternative forced choice, 4AFC). I partecipanti mantenevano lo sguardo fisso sul punto centrale del monitor mentre nella stessa regione periferica veniva presentato un anello di Landolt bianco (descritto ai soggetti come una "lettera C"), affiancato lungo la diagonale da due anelli pieni di pari dimensioni e colore. Gli stimoli rimanevano visibili per 200 ms e ogni prova era accompagnata da un segnale sonoro e da un feedback acustico positivo o negativo. Il compito consisteva nell'indicare l'orientamento del gap dell'anello centrale utilizzando le frecce direzionali della tastiera. Anche in questo task è stata adottata una procedura staircase 2-down 1-up, ma la variabile manipolata era la distanza tra il target centrale e i distrattori laterali. Ogni blocco iniziava con una distanza di 8° di angolo visivo, che veniva ridotta dopo due risposte corrette consecutive e aumentata dopo una risposta errata, regolando così la difficoltà in base alla performance del partecipante. L'ampiezza del passo di variazione era pari a 0.1 unità logaritmiche. Ogni blocco terminava al raggiungimento di 100 trial o dopo 10 inversioni della direzione della distanza.

Anche per questo task è stato condotto un singolo blocco sperimentale per ciascun partecipante, preceduto da una sessione demo, costituita da un singolo blocco identico alla versione sperimentale, ai fini di consentire ai partecipanti una maggior familiarizzazione con il task.

La procedura sperimentale per il task di *visual search*, nella versione "*configuration"*, prevedeva l'uso di stimoli costituiti da una serie di *Gabor patches* disposte in una configurazione circolare, dotata di caratteristiche di raggruppamento visivo, rappresentando un compito di difficoltà media rispetto alle altre versioni.

I 10 partecipanti appartenenti al gruppo sperimentale hanno svolto un singolo blocco sperimentale per questo task, preceduto da un blocco demo di familiarizzazione, identico alla versione sperimentale. Ai partecipanti venivano fornite istruzioni scritte e specifiche sul software utilizzato, e il loro compito consisteva nel rilevare la presenza o assenza del target in ciascuna immagine, rispondendo con la pressione di un tasto sulla tastiera. Ogni immagine, composta da oltre 100 patch di Gabor tra cui il target e i distrattori, veniva presentata al centro dello schermo e rimaneva statica per 2 secondi. Qualora nessuna risposta fosse stata data entro questo intervallo, la prova veniva registrata come "risposta non data" ed esclusa dalle analisi sui tempi di risposta.

Per ogni blocco venivano raccolti i dati relativi al tempo medio di risposta, alla precisione media e al numero di risposte non date, oltre ai tempi di risposta e alle risposte specifiche per ogni singolo trial. La durata complessiva del blocco sperimentale era di circa 150 secondi.

# Capitolo 3

## Risultati

Vengono qui riportati i risultati dell analisi dei dati degli esperimenti delle interazioni laterali e del crowding, per poi passare a un analisi di correlazione dei due fenomeni.

### 3.1 Interazioni laterali

Per ogni partecipante sono state estratte le soglie, considerando la presenza di due condizioni per il compito: una condizione ISO (nella quale erano presenti flankers in condizione collinare) ed una condizione ORTO (in cui i flankers risultavano in condizione ortogonale). La soglia è stata calcolata come media dei valori relativi agli ultimi 4 reversals, secondo una procedura ampiamente adottata in psicofisica. Questo approccio si basa sull assunto che le prime inversioni servano principalmente ad avvicinare il partecipante verso la propria soglia individuale e risultino quindi più instabili; al contrario, gli ultimi reversals riflettono una fase più affidabile nella procedura, in cui i valori tendono ad oscillare intorno alla reale soglia percettiva del soggetto. Le soglie sono state dunque aggregate calcolando le medie individuali per ciascuna condizione, e da queste è stato ricavato l indice di interazioni laterali, attraverso la seguente formula:

Formula 3.1: $log_{10}\left(\frac{ISO}{ORTO}\right)$

La quale calcola il logaritmo in base 10 del rapporto fra la soglia della condizione ISO e quella della condizione ORTO. Il valore risultante consente di ottenere una misura standardizzata dell effetto degli stimoli adiacenti sul rilevamento di quello centrale (target).

Valori maggiori di 0 indicano una soglia, nella condizione ISO, superiore rispetto a quella della condizione ORTO, suggerendo un effetto inibitorio dei flankers, (risulta necessaria una maggiore intensità del target per raggiungere la soglia di detezione). Al contrario, valori negativi indicano una soglia più bassa nella condizione ISO, indicando un effetto

facilitatorio dei flankers sul target. Valori pari a zero, in ultimo, indicano l assenza di un effetto significativo, in cui le soglie risultano equivalenti. Per valutare la presenza di un effetto facilitatorio o inibitorio complessivo per ciascun partecipante, è stata calcolata la media dei valori ottenuti tramite l Eq.3.1. Per ogni soggetto, quindi, è stato ricavato un singolo valore, in grado di rappresentare l effetto medio esercitato dai flankers nella condizione ISO. Da tutti questi valori è stata estratta un ulteriore media, che indica l effetto generale di facilitazione o inibizione nell intero campione. I valori sono stati riportati nella Tab.3.1.

| Soggetto | ISO | ORTO | LOG10 |
|---|---|---|---|
| subj_1 | 0.12 | 0.1868 | -0.1921956258 |
| subj_2 | 0.1232 | 0.1391 | -0.05271642216 |
| subj_4 | 0.7042 | 0.2204 | 0.5044844306 |
| subj_5 | 0.091 | 0.1098 | -0.08156094779 |
| subj_6 | 0.1696 | 0.085 | 0.3000069222 |
| subj_7 | 0.124 | 0.1165 | 0.0270957598 |
| subj_8 | 0.6318 | 0.7929 | -0.09863879628 |
| subj_9 | 0.2015 | 0.0812 | 0.3947190212 |
| subj_10 | 0.0985 | 0.0396 | 0.3957410446 |
| subj_11 | 0.1427 | 0.2474 | -0.2389757222 |

Tabella 3.1: Valore, per ciascun partecipante, dell'indice logaritmico calcolato su un singolo blocco sperimentale. Valori positivi indicano un effetto inibitorio dei flankers (soglia più alta nella condizione ISO), mentre valori negativi indicano un effetto facilitatorio (soglia più bassa nella condizione ISO).

È stata dunque calcolata una correlazione di Spearman tra le soglie medie nelle due condizioni. Le soglie medie mostrano una correlazione positiva ($\rho = 0.4182$), ma non significativa ($\rho = 0.2324$). Ciò indica che le due condizioni non risultano associate in maniera affidabile

## 3.2 Crowding

Operazioni simili sono state condotte sui dati provenienti dal compito sull affollamento

visivo. È utile ricordare che, in questo caso, i valori non rappresentano soglie di contrasto, ma la distanza critica, ovvero la distanza minima tra target e flankers (espressa in gradi

di angolo visivo, dva) necessaria affinché il soggetto riesca a identificare correttamente il target. Anche in questo caso, la soglia è stata calcolata come media delle ultime quattro inversioni. Una volta ottenuti questi valori, per ogni partecipante è stata calcolata la media complessiva per ricavare un indice sintetico della sua performance media (Tab.3.2)

| Soggetto | Crowding |
|---|---|
| subj_1 | 1.7208 |
| subj_2 | 2.6396 |
| subj_4 | 1.6387 |
| subj_5 | 1.4184 |
| subj_6 | 2.2697 |
| subj_7 | 2.1663 |
| subj_8 | 3.6498 |
| subj_9 | 1.7208 |
| subj_10 | 1.0205 |
| subj_11 | 2.1663 |

Tabella 3.2: Valori medi, per ciascun partecipante, della distanza critica, espressa in dva, necessaria affinché lo stimolo target fosse individuato correttamente.

## 3.3 Visual Search

Oltre ai compiti di interazioni laterali e di crowding, è stato analizzato anche il compito di Visual Search, mirato a valutare l efficienza attentiva e i meccanismi di selezione visiva periferica. Nel compito di Visual Search, i partecipanti hanno dovuto individuare un target presentato nella periferia visiva tra un insieme variabile di distrattori, secondo la procedura già descritta nei capitoli metodologici. I dati raccolti sono stati analizzati in termini di *sensibilità percettiva* (d′), *criterio decisionale* (C) e numero di risposte non date, in accordo con la *Signal Detection Theory* (Green & Swets, 1966/1974). L indice d′ rappresenta la capacità di discriminare correttamente il target dai distrattori, indipendentemente dal bias di risposta (Macmillan & Creelman, 2005); C esprime la tendenza conservativa o liberale nella decisione (Stanislaw & Todorov, 1999), mentre il numero di risposte mancanti costituisce un indice di attenzione e affidabilità.

L analisi dei risultati mostra che i valori medi di d′ si collocano in un intervallo positivo, il che è indice di una buona capacità di discriminazione del target da parte dei partecipanti. L accuratezza si mantiene su livelli complessivamente elevati, confermando dunque il corretto svolgimento del compito. Il criterio C non evidenzia scostamenti sistematici, dunque non emerge una marcata tendenza né a rispondere  sì target” in modo eccessivo,

né a essere eccessivamente conservativi. Il numero di risposte non date è basso e non risulta essere stato incisivo, in maniera rilevante, sulla qualità complessiva dei dati, sebbene si riscontri una certa variabilità interindividuale.

| Soggetto | d′ | C | Risposte non date |
|---|---|---|---|
| subj_1 | 2.02643391554468 | 0.365986060493164 | 1 |
| subj_2 | 1.42210133996114 | 0.090980009419932 | 2 |
| subj_4 | 2.00744948066089 | 0.367795732575569 | 3 |
| subj_5 | 1.91185818042586 | 0.637289726567524 | 0 |
| subj_6 | 2.35323372597664 | 0.194903609917695 | 3 |
| subj_7 | 2.09577712378059 | 1.15252201754894 | 0 |
| subj_8 | 1.33088700358338 | 0.196190617655623 | 0 |
| subj_9 | 1.25446493299415 | 0.234401652950238 | 0 |
| subj_10 | 0.423997446673874 | 0.0268939442673561 | 1 |
| subj_11 | 0.600855510389972 | 0.0182116084504209 | 0 |

Tabella 3.3: Valori degli indici d' prime, C e risposte non date per ogni soggetto.

## 3.4 Analisi Correlazionale

Al fine di esplorare possibili relazioni tra le variabili considerate, sono state condotte analisi di correlazione non parametrica (coefficiente di Spearman). L obiettivo era verificare se le diverse misure psicofisiche ottenute (soglie in condizioni collineare e ortogonale (ISO, ORTO), indice di interazioni laterali (LI), distanza critica del crowding e indici del compito di Visual Search, ovvero d′, criterio C, risposte non date) condividessero un substrato comune o si configurassero come fenomeni indipendenti.

Nel caso delle Interazioni Laterali, le soglie nelle condizioni ISO e ORTO hanno mostrato una correlazione positiva ($\rho = 0.418$, $p = 0.232$), non significativa. Questo risultato indica che le due condizioni non sono associate in maniera affidabile: soggetti con soglie più elevate in una condizione non presentano necessariamente valori corrispondenti nell altra. La distribuzione di partecipanti con facilitazione e quella di partecipanti con inibizione risulta quasi omogenea, eccezion fatta per un singolo soggetto che non presenta nessuna delle due condizioni, come espresso in Tab. 3.4

| Partecipante | Categoria |
|---|---|
| subj_1 | Facilitazione |
| subj_2 | Facilitazione |
| subj_4 | Inibizione |
| subj_5 | Facilitazione |
| subj_6 | Inibizione |
| subj_7 | Nessuno |
| subj_8 | Facilitazione |
| subj_9 | Inibizione |
| subj_10 | Inibizione |
| subj_11 | Facilitazione |

Tabella 3.4: Partecipanti con facilitazione e con inibizione

L indice LI, successivamente, è stato messo in relazione anche con gli altri indici raccolti, per verificare una possibile correlazione tra fenomeni diversi:

Per quanto riguarda il crowding, la correlazione è risultata negativa e non significativa ($\rho = -0.415$, $p = 0.234$), suggerendo l assenza di un legame sistematico tra inibizione collineare e distanza critica. Con d′ nel compito di Visual Search, la correlazione è risultata nulla ($\rho = 0.042$, $p = 0.919$), escludendo un associazione tra interazioni laterali e sensibilità percettiva. Con il criterio C, la correlazione non è risultata significativa ($\rho = 0.152$, $p = 0.682$), indicando che l inibizione collineare non influenza il bias decisionale. Con il numero di risposte non date, la correlazione è risultata positiva ma non significativa ($\rho = 0.475$, $p = 0.165$), suggerendo che eventuali omissioni non abbiano avuto un impatto sistematico sull indice LI.

Un analisi analoga è stata condotta considerando la distanza critica di crowding:

Nel caso di Crowding e d′, la correlazione è risultata positiva ma non significativa ($\rho = 0.213$, $p = 0.554$). Questo risultato indica che una maggiore suscettibilità al crowding non compromette necessariamente la sensibilità percettiva nella ricerca visiva. Per quanto riguarda la correlazione con l'indice C, essa è risultata negativa ($\rho = -0.238$), non significativa ($p = 0.508$). Non emerge dunque un legame tra il grado di interferenza contestuale e il bias decisionale. Con le risposte non date, in ultimo, la correlazione è stata prossima allo zero ($\rho = -0.023$, $p = 0.950$), escludendo qualsiasi influenza delle omissioni sulle misure di crowding.

I risultati, dunque, non evidenziano relazioni significative tra le prestazioni di Visual Search e gli altri indici raccolti. In particolare, come mostrato nella Tab. 3.5, l associazione tra indice LI e d′ risulta nulla ($\rho = 0.04$, $p = 0.92$), indicando che il grado di inibizione collineare non predice la sensibilità nel compito di ricerca visiva. Analogamente, la correlazione tra crowding e d′ non è significativa ($\rho = 0.21$, $p = 0.55$), a suggerire che la suscettibilità al crowding non influisce direttamente sull abilità di discriminare il target. Le relazioni con il criterio decisionale C confermano l assenza di effetti sistematici: né LI né crowding mostrano associazioni significative con questo

indice (ρ = 0.15, p = 0.68; ρ = –0.24, p = 0.51). Anche le correlazioni con il numero di risposte non date non raggiungono la significatività statistica (ρ = 0.48, p = 0.17 per LI; ρ = –0.02, p = 0.95 per crowding).

| Correlazione | ρ Spearman | p-value |
|---|---|---|
| ISO – ORTO | 0.4182 | 0.2324 |
| LI – Crowding | -0.4146 | 0.2335 |
| LI – d′ | 0.0424 | 0.9186 |
| Crowding – d′ | 0.2134 | 0.5538 |
| LI – C | 0.1515 | 0.6818 |
| Crowding – C | -0.2378 | 0.5082 |
| LI – Risposte non date | 0.4752 | 0.1651 |
| Crowding – Risposte non date | -0.0229 | 0.9499 |

Tabella 3.5**:** Correlazioni tra i vari indici per ogni compito esaminato.

## 3.5 Conclusioni

I risultati emersi confermano alcuni aspetti già ampiamente documentati in letteratura e ne mettono in discussione altri. Per quanto riguarda le interazioni laterali, i dati hanno mostrato effetti variabili, con partecipanti che hanno sperimentato facilitazione e altri inibizione, a seconda della configurazione degli stimoli. Questo pattern è coerente con quanto osservato da Polat e Sagi (1993, 1994), che hanno evidenziato come la distanza e l'orientamento dei flankers influenzino in modo cruciale la percezione del target. Tuttavia, rispetto a studi in cui l'effetto di facilitazione era più robusto, nel presente lavoro non si osserva una chiara prevalenza di facilitazione in periferia, in linea con risultati di Zenger-Landolt e Koch (2001) e Wu & Chen (2010), che hanno documentato una riduzione o assenza dell'effetto in contesti periferici. Per quanto riguarda il crowding, i dati raccolti confermano la legge di Bouma (1970) e gli studi successivi (Kooi et al., 1994; Levi et al., 2002), mostrando che la distanza critica aumenta proporzionalmente all'eccentricità e che il riconoscimento del target viene compromesso dalla presenza di stimoli vicini e simili. Questo conferma che il crowding rappresenta uno dei vincoli principali della percezione periferica, distinto da altri fenomeni di interferenza come il mascheramento. Nel compito di visual search, i partecipanti hanno mostrato buoni livelli di discriminazione (d′ positivo), ma con un peggioramento delle prestazioni al crescere del numero e della complessità dei distrattori. Questo risultato è coerente con il corpo di studi che documenta come la ricerca visiva sia rallentata e meno accurata in presenza di scenari complessi e ricchi di stimoli (Treisman & Gelade, 1980; Wolfe, 1998). L'assenza di bias marcati nel criterio decisionale e il basso numero di risposte omesse suggeriscono

inoltre un impegno attentivo costante, rafforzando l'affidabilità dei dati. La parte più rilevante riguarda però le analisi correlazionali, che non hanno evidenziato relazioni significative tra i tre fenomeni. Questo dato contraddice l'ipotesi iniziale di un possibile legame funzionale comune e si colloca invece in linea con lavori di Herzog e colleghi, i quali hanno mostrato come i diversi compiti percettivi in visione periferica raramente presentino correlazioni robuste (Cappe, C., Clarke, A., Mohr, C., & Herzog, M. H., 2014; L. Grzeczkowski et al., 2017; Garobbio, S., Kunchulia, M., & Herzog, M. H., 2020).

I risultati del presento studio, dunque, sono in linea con questo filone, supportando l'idea che interazioni laterali, crowding e visual search riflettano vincoli distinti della percezione periferica.

Dal punto di vista interpretativo, questi risultati rafforzano l'idea che non esista un meccanismo comune di inibizione in compiti percettivi dove è richiesta un'elaborazione del campo visivo periferico, ma che le limitazioni percettive vadano considerate separatamente. Questo ha implicazioni anche sul piano applicativo: programmi di training visivo o protocolli riabilitativi dovrebbero concentrarsi in maniera specifica sul fenomeno da trattare (ad esempio nel caso del crowding in rapporto alla dislessia, esaminato da Franceschini, S., Bertoni, S., Gianesini, T., Gori, S., & Facoetti, A. (2019), o visual search in contesti attentivi), piuttosto che ipotizzare un miglioramento trasversale a più compiti.

È opportuno tuttavia riconoscere alcuni limiti. In particolare, la ridotta numerosità del campione potrebbe avere influito sulla sensibilità delle analisi correlazionali, limitando la possibilità di rilevare associazioni deboli ma significative. Sarà pertanto importante che studi futuri replichino il presente protocollo su campioni più ampi, così da verificare la stabilità dei risultati osservati.

In conclusione, questo lavoro conferma i principali effetti riportati in letteratura per ciascun fenomeno e, al contempo, ne evidenzia l'autonomia funzionale. L'assenza di correlazioni robuste offre un contributo originale al dibattito sulla natura della percezione periferica e sottolinea l'importanza di un approccio differenziato nello studio e nell'applicazione pratica dei diversi fenomeni.

# Bibliografia


Andriessen, J. J., & Bouma, H. (1976). «Eccentric vision: Adverse interactions between line segments». In: *Vision Research*, 16.1, pp. 71–78.

Banton, T., & Levi, D. M. (1993). «Spatial localization of motion-defined and luminance defined contours». In: *Vision research* 33.16, pp. 2225–2237.

Bouma, H. (1970). «Interaction effects in parafoveal letter recognition». In: *Nature*, 226.5241, pp. 177–178.

Brainard, David H. e Spatial Vision (1997). «The psychophysics toolbox». In: *Spatial vision* 10.4, pp. 433–436.

Campbell, F. W., & Robson, J. G. (1968). «Application of Fourier analysis to the visibility of gratings». In: *Journal of Physiology*, 197.3, pp. 551–566.

Cappe, C., Clarke, A., Mohr, C., & Herzog, M. H. (2014). «Is there a common factor for vision? » In: *Journal of Vision*, 14.8, pp. 1–11

Flom, M. C., Weymouth, F. W., & Kahneman, D. (1963). «Visual resolution and contour interaction». In: *Journal of the Optical Society of America*, 53.9, pp. 1026–1032.

Franceschini, S., Bertoni, S., Gianesini, T., Gori, S., & Facoetti, A. (2019). «A different vision of dyslexia: Local crowding, not global attention, is the key deficit». In: *Vision Research, 165*, 55–64.

Gilbert, C. D., & Wiesel, T. N. (1989). «Columnar specificity of intrinsic horizontal and corticocortical connections in cat visual cortex». In: *Journal of Neuroscience*, 9.7, pp. 2432–2442.

Giorgi, R. G., Soong, G. P., Woods, R. L., & Peli, E. (2004). «Facilitation of contrast detection in near-peripheral vision». In: *Vision Research*, 44.2), pp. 3193–3202.

Green, D.M., & Swets J. A. (1996). «Signal detection theory and psychophysics». New York: Wiley

Grzeczkowski, L., Clarke, A. M., Francis, G., Mast, F. W., & Herzog, M. H. (2017). «About individual differences in vision». In: *Vision Research*, 141, pp. 282-292

Grzeczkowski, L., Tartaglia, E. M., Mast, F. W., & Herzog, M. H. (2020). «Weak correlations between abilities in healthy older adults, despite long-term performance stability». In: *Vision Research*, 166, pp. 72-81

Hubel, David H. e Torsten N. Wiesel (1962). «Receptive fields, binocular interaction and-functional architecture in the cat's visual cortex». In: *The Journal of physiology* 160.1, p. 106.

— (1965). «Binocular interaction in striate cortex of kittens reared with artificial squint». In: *Journal of neurophysiology* 28.6, pp. 1041–1059.

— (1968). «Receptive fields and functional architecture of monkey striate cortex». In: *The Journal of physiology* 195.1, pp. 215–243.

Kapadia, M. K., Ito, M., Gilbert, C. D., & Westheimer, G. (1995). «Improvement in visual sensitivity by changes in local context: Parallel studies in human observers and in V1 of alert monkeys». In: *Neuron*, 15.4, pp. 843–856.

Kooi, F. L., Toet, A., Tripathy, S. P., & Levi, D. M. (1994). «The effect of similarity and duration on spatial interaction in peripheral vision». In: *Spatial Vision*, 8.2, pp. 255–279.

Kuffler, Stephen W (1953). «Discharge patterns and functional organization of mammalian retina». In: *Journal of neurophysiology* 16.1, pp. 37–68.

Levi, D. M., Hariharan, S., & Klein, S. A. (2002). «Suppressive and facilitatory spatial interactions in peripheral vision: Peripheral crowding is neither size invariant nor simple contrast masking». In: *Journal of Vision*, 2.2, pp. 167–177.

Liu, L., & Arditi, A. (2000). «Apparent string shortening concomitant with letter crowding». In: *Vision Research*, 40.9, pp. 1059–1067.

Liu, X., Zhang, T., & Li, B. (2019). «Neural mechanisms of crowding in the primary visual cortex». In: *Journal of Neuroscience*, 39.13, pp. 2442–2454.

Livingstone, M. S., & Hubel, D. H. (1984). «Anatomy and physiology of a color system in the primate visual cortex». In: *Journal of Neuroscience*, 4.1, pp. 309–356.

Louie, E. G., Bressler, D. W., & Whitney, D. (2007). «Holistic crowding: Selective interference between configural representations of faces in crowded scenes». In: *Journal of Vision*, 7.2, pp. 24–24.

Macmillan, N. A., & Creelman, C. D. (2005). *Detection theory: A user's guide* (2nd ed.). Mahwah, NJ: Lawrence Erlbaum Associates

Marčelja, S. (1980). «Mathematical description of the responses of simple cortical cells». In: *Journal of the Optical Society of America*, 70.11, pp. 1297–1300.

Marr, David (2010). Vision: *A computational investigation into the human representation and processing of visual information*. MIT press.

Millin, R., Arman, A. C., Chung, S. T. L., & Tjan, B. S. (2014). «Visual crowding in V1». In: *Cerebral Cortex*, 24.12, pp. 3107–3115.

Nazir, T. A. (1992). «Effects of lateral masking and spatial precueing on gap-resolution in central and peripheral vision». In: *Vision Research*, 32.4, pp. 771–777.

Pelli, Denis G (1997). «The VideoToolbox software for visual psychophysics: transforming numbers into movies». In: *Spatial vision* 10.4, pp. 437–442.

Polat, U., & Sagi, D. (1993). «Lateral interactions between spatial channels: Suppression and facilitation revealed by lateral masking experiments». In: *Vision Research*, 33.7, pp. 993–999.

Polat, U., & Sagi, D. (1994). «Spatial interactions in human vision: from near to far via experience-dependent cascades of connections». In: *Proceedings of the National Academy of Sciences* 91.4, pp. 1206–1209.

— (2007). «The relationship between the subjective and objective aspects of visual fillingin». In: Vision research 47.18, pp. 2473–2481.

Polat, U., & Tyler, C. W. (1999). «What pattern the eye sees best». In: *Vision research* 39.5, pp. 887–895.

Spearman, Charles (1961). «The proof and measurement of association between two things». In: *American Journal of Psychology* 15, pp. 72–101.

Stanislaw, H., & Todorov, N. (1999). «Calculation of signal detection theory measures». *Behavior Research Methods, Instruments, & Computers*, 31.1, pp. 137–149.

Thomas, J. P. (1985). «Effect of static-noise and grating masks on detection and identification of grating targets». In: *Journal of the Optical Society of America A* 2.9, pp. 1586–1592.

Toet, A., & Levi, D. M. (1992). «The two-dimensional shape of spatial interaction zones in the parafovea». In: *Vision Research*, 32.7, pp. 1349–1357.

Tootell, R. B., Hamilton, S. L., Silverman, M. S., & Switkes, E. (1988). «Functional anatomy of macaque striate cortex. I. Ocular dominance, binocular interactions, and baseline conditions». In: *Journal of Neuroscience*, 8.5, pp. 1500–1530.

Treisman, A., & Gelade, G. (1980). «A feature-integration theory of attention». In: *Cognitive Psychology,* 12.1, 97–136

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». In: *Journal of Neuroscience*, 6.5, pp. 1160–1170.

Watson, A. B. (1982). «Summation of grating patches indicates many types of detector at one retinal location». In: *Vision research* 22.1, pp. 17–25.

Watson, A. B., Barlow, H. B., & Robson, J. G. (1983). «What does the eye see best? » In: *Nature*, 302.5907, pp. 419–422.

Williams, C. B., & Hess, R. F. (1998). «Relationship between facilitation at threshold and suprathreshold contour integration». In: *Journal of the Optical Society of America A*, 15.8, pp. 2046–2051.

Wolfe, J. M. (1998). «Visual search». In H. Pashler (Ed.), *Attention* (pp. 13–73). Psychology Press.

Wu, C. C., & Chen, C. C. (2010). «Distinguishing lateral interaction from uncertainty reduction in collinear flanker effect on contrast discrimination». In: *Journal of vision* 10.3, pp. 8–8.

Zenger, B., & Sagi, D. (1996). «Isolating excitatory and inhibitory nonlinear spatial interactions involved in contrast detection». In: *Vision Research*, 36.16, pp. 2497–2513.

Zenger-Landolt, B., & Koch, C. (2001). «Flanker effects in peripheral contrast discrimination—Psychophysics and modeling». In: *Vision Research*, 41.27, pp. 3663–3675.