

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA

Dipartimento di Psicologia Generale

Corso di Laurea Magistrale in Psicologia Cognitiva Applicata

Tesi di Laurea Magistrale

**Tecnologie a realtà virtuale e aumentata: nuovi approcci allo
studio della sinestesia**

**Virtual reality and augmented reality technologies: new approaches to the study
of synesthesia**

Relatore

Prof. Mariagrazia Ranzini

Laureando: Marco Pistolato

Matricola: 2013916

Anno Accademico 2022/2023

Indice

Abstract	6
1 Introduzione	8
1.1 I processi multisensoriali	11
1.2 La sinestesia	15
1.2.1 Tipologie di sinestesia	17
1.2.2 Individui sinestesici differenti	20
1.2.3 Studi classici sulla sinestesia	22
1.2.4 Substrato neurale della sinestesia	26
1.3 Sinestesia artificiale	29
1.3.1 Indurre sinestesia artificiale	31
1.3.2 L'utilizzo di tecnologie innovative	34
1.4 Realtà Virtuale e Aumentata	36
1.4.1 Esempi applicativi	38
1.5 Introduzione allo studio	40
2 Metodo: revisione sistematica della letteratura	41
2.1 Le linee guida PRISMA	43
2.1.1 Flowchart	46
3 Risultati dello studio	49
3.1 Obiettivi di ricerca	50
3.2 Dispositivi utilizzati	54

3.3	Modalità sensoriali coinvolte	59
3.4	Tipologia di partecipanti	62
3.5	Obiettivi raggiunti	63
3.5.1	Studi che simulano la sinestesia grafema-colore	66
3.5.2	Studi che hanno utilizzato SSD	69
3.5.3	Studi che hanno utilizzato visori VR “puri”	72
4	Discussione	74
5	Limiti dello studio	78
6	Prospettive future	79
7	Conclusioni	81
	Riferimenti bibliografici	82

Abstract

L'elaborato si pone come una revisione sistematica strutturata della letteratura, con l'obiettivo di indagare quali siano i risultati di studi che hanno utilizzato le più recenti tecnologie per lo studio della sinestesia. Per la ricerca è stato utilizzato il metodo PRISMA (*Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses*). La tesi si concentrerà nell'analizzare le sperimentazioni volte a simulare una sinestesia artificiale in individui non sinestesici e, nello specifico, nelle tecnologie a Realtà Virtuale e Aumentata, in quanto negli ultimi anni si sono dimostrate rivoluzionarie in questo campo e nello studio di quelle che potrebbero essere le conseguenze cognitive della sinestesia artificiale. Per sinestesia si intende una condizione neuropsicologica per cui la stimolazione di un particolare canale sensoriale porta automaticamente e involontariamente all'attivazione di un'altra struttura sensoriale, facendo così sperimentare all'individuo un'esperienza multisensoriale, in cui parte delle sensazioni provate non sono presenti nello stimolo (ad esempio un "suono giallo"). Quando si parla di sinestesia artificiale si intende una situazione in cui le persone vengono indotte a sperimentare una forma di sinestesia attraverso l'uso di dispositivi o tecniche create dall'uomo. Diversi studi affermano che quest'ultima migliora le prestazioni di memoria e attenzione visiva, come la letteratura ci suggerisce faccia la condizione di sinestesia naturale in alcuni casi. Questa ricerca sistematica si è rivelata utile anche per individuare altri scenari in cui la sinestesia artificiale ha migliorato le prestazioni umane. Partendo dalle facoltà visive, uditive e olfattive fino ad arrivare al trattamento del dolore cronico. Infine, getteremo uno sguardo sulle prospettive future

dell'applicazione di queste tecnologie innovative, dove l'avanzamento della tecnica e l'introduzione della tecnologia ad Intelligenza Artificiale stanno monopolizzando diversi campi di ricerca.

1 Introduzione

Il mio progetto di tesi si pone come una revisione sistematica strutturata della letteratura, con l'obiettivo di rispondere ad una domanda: "le più recenti tecnologie a realtà virtuale e aumentata possono fornire dei nuovi approcci allo studio della sinestesia?" Per la ricerca è stato utilizzato il metodo PRISMA (*Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses*) il quale fornisce un set di linee guida sviluppate per condurre e presentare in modo trasparente le revisioni sistematiche e le meta-analisi nella ricerca scientifica. Consente ai revisori di riferire in modo accurato i dettagli di come hanno pianificato, eseguito e riportato i risultati delle loro revisioni sistematiche. Le linee guida PRISMA costituiscono un elenco di elementi essenziali da includere in un articolo scientifico che descrive una revisione sistematica o una meta-analisi. Questi elementi aiutano i lettori a comprendere meglio la metodologia utilizzata nella revisione, la selezione degli studi inclusi, la valutazione del rischio di bias e l'analisi dei risultati. La review inizierà con una panoramica sulla sinestesia, un fenomeno neuropsicologico per cui una stimolazione di un particolare canale sensoriale porta all'attivazione di un'altra struttura sensoriale, facendo così sperimentare all'individuo una multisensorialità. Se questo fenomeno avviene spontaneamente e si presenta sempre nello stesso modo, cioè creando sempre la stessa associazione tra i due sensi, allora parliamo di sinestesia naturale. È una condizione piuttosto rara nella popolazione e ne esistono molteplici tipologie, che variano in base a quali sensi vengono coinvolti. La ricerca ha dimostrato che è inoltre possibile indurre la sinestesia in persone che non sono sinestesiche. Questa particolare

tipologia prende il nome di sinestesia artificiale. Tramite tecniche e tecnologie specifiche si può simulare sinestesia negli individui non sinestesici e studiare se questa si lega alla loro multisensorialità. In questa ricerca sistematica della letteratura sono state visionate le varie tecnologie utilizzate per simulare la sinestesia, con un interesse particolare per quelle che utilizzano visori a realtà virtuale e aumentata. I primi si riferiscono a dispositivi indossabili che coprono totalmente il campo visivo e uditivo dell'individuo, immergendolo in un mondo virtuale. I secondi utilizzano dispositivi simili, ma l'alterazione virtuale di ciò che l'individuo vede avviene sovrapponendosi al suo naturale campo visivo. Verranno visionate tecnologie che non si limitano solamente all'alterazione visiva e uditiva ma anche tattile e olfattiva. Sebbene risulti molto interessante scoprire come questa sinestesia artificiale alteri la percezione degli individui, lo scopo ultimo è quello di verificare se permette di ottenere dei miglioramenti alle prestazioni cognitive. Infatti, alcuni studi hanno mostrato che la sinestesia naturale può comportare miglioramenti cognitivi negli individui che la sperimentano. La letteratura mostra che i domini dell'attenzione e della memoria sono quelli che possono beneficiare maggiormente di questa condizione (Plouznikoff et al., 2005). Tuttavia, non tutti gli studi hanno ottenuto effetti dello stesso tipo, dando vita ad un acceso dibattito accademico (Ward et al., 2019). Dalla ricerca si deduce che non solo i benefici cognitivi sono presenti anche con la sinestesia artificiale, ma che lo studio sempre più approfondito di questa ha aperto la strada a nuovi campi di ricerca, supportato anche da una tecnologia sempre più avanzata ed economica. Tra i più interessanti troviamo l'utilizzo della sinestesia artificiale per il trattamento del dolore cronico e un dispositivo di sostituzione

sensoriale che permette ai non vedenti di riconoscere ambiente e forme che li circondano (Hoffman et al., 2001; Ward & Meijer, 2010). La tesi si concluderà con alcune considerazioni sulle prospettive future dello studio della sinestesia. In particolare menzionando le possibili sinergie con i sistemi ad Intelligenza Artificiale, rivoluzionari nel campo degli apprendimenti automatici per migliorare le interfacce uomo-macchina e nell'analisi dei dati sensoriali e cerebrali.

1.1 I processi multisensoriali

Trattando il fenomeno della sinestesia, in questa review era fondamentale introdurre la tematica dei processi multisensoriali. Essa rappresenta un'area di ricerca in rapida crescita che esplora come il cervello integra e coordina informazioni provenienti da diversi sensi al fine di formare una percezione completa e coerente del mondo che ci circonda. Questi processi giocano un ruolo fondamentale nella nostra comprensione della realtà e nella nostra capacità di interagire efficacemente con l'ambiente. In questo campo l'argomento di interesse è la percezione, e le considerazioni sui meccanismi sottostanti coinvolti alla sua attuazione. Storicamente, le ricerche sulla percezione erano caratterizzate da un approccio “*sense-by-sense*” (Calvert et al., 2004), nel quale ci si focalizzava sulle proprietà funzionali di una sola modalità sensoriale alla volta. Ciò ha permesso di accumulare molto materiale sulla percezione sensoriale ad ogni livello di analisi. Tuttavia, aumentando sempre di più la profondità delle analisi, i ricercatori compresero che la percezione non poteva essere descritta completamente da singoli processi sensoriali, ma che era fundamentalmente un fenomeno multisensoriale. Al giorno d'oggi non ci sono dubbi che il nostro cervello sia organizzato per far cooperare i vari canali sensoriali in modo da usare efficacemente le informazioni che gli forniscono. Lo scopo ultimo è sempre quello di identificare oggetti ed eventi e reagire in modo appropriato. Il fulcro dei processi multisensoriali c'è il concetto di integrazione sensoriale, che si riferisce al modo in cui il cervello combina segnali sensoriali provenienti da sensi diversi, come la vista, l'udito, il tatto, il gusto e l'olfatto, per creare un'esperienza sensoriale unificata. Questo

processo non è solo una somma di segnali separati, ma implica anche una complessa interazione tra le diverse modalità sensoriali. Per questo motivo, ricollegandosi alla consapevolezza che i processi sensoriali sono di fatto un fenomeno multisensoriale, è più corretto parlare di integrazione multisensoriale. Un esempio comune di integrazione multisensoriale è la percezione del linguaggio parlato. Quando ascoltiamo qualcuno che parla, il nostro cervello integra le informazioni uditive con quelle visive dei movimenti delle labbra e, se possibile, con il senso del tatto quando siamo in contatto fisico con la persona che parla. Questa integrazione ci consente di comprendere meglio il linguaggio e di riconoscere le emozioni e l'intenzione di chi parla. Vista la rilevanza che queste ricerche hanno acquistato negli ultimi anni, è nata una crescente consapevolezza che i processi multisensoriali siano alquanto comuni e che influenzino ampiamente la nostra percezione degli eventi ambientali. La rapida crescita di questo campo non è stata limitata a una singola tecnica, disciplina, specie o prospettiva. Questi sforzi hanno prodotto dati che suggeriscono la presenza di notevoli costanti in alcuni dei principi sottostanti con cui il cervello sintetizza le diverse informazioni sensoriali a sua disposizione, indicando la loro ampia applicabilità in circostanze ecologiche molto diverse. Questi principi sembrano essere operativi indipendentemente dalla specifica combinazione di sensi valutata. Quindi, alcuni dei medesimi principi che regolano la sintesi delle informazioni visive e uditive si applicano altrettanto bene ad altre combinazioni dei sensi spaziali e potrebbero persino applicarsi a sensi come il gusto e l'olfatto. L'interazione tra i sensi non è limitata alla percezione sensoriale, ma si estende anche all'attenzione e alla memoria (Spence, 2002). Gli psicologi cognitivi studiano come l'attenzione può essere guidata

o influenzata da stimoli multisensoriali. In un suo report, Spence (2002) spiega come i meccanismi dell'attenzione selettiva operino tra differenti modalità sensoriali, in modo tale da facilitarci la selezione di informazioni rilevanti nelle circostanze multisensoriali proprie della vita quotidiana (Driver & Spence, 1998). Come esempio riporta il famoso fenomeno del “*cocktail party*”, inizialmente considerato come un artefatto unimodale, ma che analisi più mirate hanno dimostrato essere un problema di selezione multisensoriale (Driver & Spence, 1994). In un ambiente rumoroso in cui molte persone parlano tra loro, se abbiamo necessità di parlare o ascoltare un singolo interlocutore, è necessario non solo selezionare una particolare voce tra le molte presenti, ma anche estrarre informazioni visive rilevanti dai movimenti delle labbra, dalle espressioni facciali e persino dai gesti. Inoltre, potrebbe essere necessario ignorare stimoli concorrenti irrilevanti che colpiscono gli altri sensi, come ad esempio la sensazione dei vestiti sul corpo (tatto), l'odore del profumo di qualcuno (olfatto) e forse persino il sapore della propria bevanda (gustativo). Un altro aspetto chiave dei processi multisensoriali è la cosiddetta “modalità crociata” (*cross-modality*), che si verifica quando uno stimolo in una modalità sensoriale influenza la percezione in un'altra modalità sensoriale. Un ampio corpus di ricerche dimostra che le persone manifestano queste corrispondenze crossmodali, coerenti tra molte caratteristiche degli stimoli, in diverse modalità sensoriali. Ad esempio, le persone associano costantemente suoni ad alta frequenza con oggetti piccoli e luminosi posizionati in alto nello spazio (Spence, 2011). Queste corrispondenze tra modalità sensoriali mostrano il massimo livello di forza nelle persone che sperimentano sinestesia. Proprio per questo la sinestesia può essere considerata come una forma molto

particolare di multisensorialità. Il legame tra i sensi che queste persone dimostrano supera di gran lunga quello sperimentato dagli individui non sinestesici. I processi multisensoriali hanno anche implicazioni in settori applicativi, come la realtà virtuale e aumentata, la progettazione di interfacce utente e la terapia sensoriale. Ad esempio, nella progettazione di interfacce uomo-macchina, è essenziale considerare come presentare informazioni in modo che siano facilmente comprensibili e utili per gli utenti, tenendo conto delle interazioni multisensoriali (Spence, 2021). Infatti, andando a visionare le ricerche che analizzano il binomio sinestesia e realtà virtuale, la consapevolezza dei processi multisensoriali è risultata fondamentale.

1.2 La sinestesia

La sinestesia è una condizione neuropsicologica non patologica tale per cui, nell'individuo che la sperimenta, la stimolazione di un canale sensoriale porta all'attivazione involontaria e automatica di un secondo canale sensoriale. L'individuo sperimenta così una multisensorialità, dove parte delle sensazioni provate non sono presenti nello stimolo (come percepire un suono giallo oppure sentire un sapore amaro quando si tocca uno specifico oggetto). La sinestesia è una condizione di sviluppo che diventa evidente a partire dall'infanzia (Simner & Bain, 2013). Sembra avere una componente ereditaria (Barnett et al., 2008), ed è collegata in età adulta a differenze strutturali nel cervello, comprese l'aumento della densità della materia grigia e l'organizzazione della materia bianca in diverse regioni, tra cui quelle coinvolte nella memoria (ad esempio, i lobi temporali mediali e la corteccia parietale) (Rouw & Scholte, 2010). Il termine deriva dal greco *syn-aisthanestai*, e in particolare dall'unione di *syn* (insieme), e *aisthánomai* (percepisco), termini già indicativi per la comprensione del suo significato. Rappresenta un fenomeno studiato da molti decenni e attraverso campi di ricerca differenti, tuttavia negli ultimi vent'anni si è riscontrata una progressiva impennata di interesse che ha portato i ricercatori a studiare nuovi approcci che potessero unire le conoscenze pregresse con paradigmi innovativi. Gli scienziati sono a conoscenza della sinestesia dal 1880, quando Francis Galton, cugino di Charles Darwin, pubblicò un articolo su Nature al riguardo. Successivamente, non sempre destò molto interesse da parte della comunità scientifica, perché veniva ritenuta come un artefatto dovuto all'uso di droghe allucinogene come l'LSD

(*dietilammide dell'acido lisergico*) oppure un fenomeno fasullo (Ramachandran & Hubbard, 2003).

1.2.1 Tipologie di sinestesia

Nel corso di decenni di studi sono state individuate molte tipologie di sinestesia differenti. Queste differiscono per quali sensi coinvolgono e anche per come si manifestano. Tuttavia, in accordo con ciò che riporta Edward Hubbar (2007), famoso studioso della sinestesia, varie forme di questa si possono identificare secondo la forma X-Y, dove lo stimolo che elicitava l'esperienza sinestesica è chiamato "induttore" (X) e la sensazione addizionale è chiamata "concorrente" (Y). Ad esempio, in una forma molto comune di sinestesia, chiamata grafema-colore, lettere o numeri scritti con inchiostro nero sono percepiti come colorati. Oppure nella sinestesia sequenza-spazio, dove sequenze di numeri, giorni della settimana o mesi dell'anno corrispondono a precise posizioni nello spazio tridimensionale (Hubbard, 2007). La sinestesia è più spesso provocata da induttori linguistici, suoni, gusti, odori e tatto; invece i concorrenti più frequenti sono colore, tatto e olfatto (Rogowska, 2011). Un'altra ricercatrice del fenomeno, Alexandra Rogowska, trovata davanti alla grande varietà di sinestesie e notando come queste differivano tra individui, nel modo in cui le sensazioni si mischiavano e nella tipologia di sensazioni sperimentate, si è posta l'obiettivo di descrivere nella sua revisione quelle che fossero le caratteristiche generali che potevano essere condivise da tutte le sinestesie. La letteratura scientifica negli ultimi vent'anni ha individuato cinque aspetti comuni (Rogowska, 2011):

- le sensazioni sinestesiche sono indotte involontariamente in reazione agli stimoli;
- una singola stimolazione innesca la percezione simultanea di numerose modalità sensoriali;

- le ricerche hanno confermato un'occorrenza automatica della sinestesia e la sua natura percettiva;
- la sinestesia è relativamente costante a livello intraindividuale, una stimolazione specifica genera nell'individuo sempre la stessa risposta percettiva;
- dal punto precedente si può aggiungere che ogni individuo "possiede" una sua specifica sinestesia con una configurazione di sensazioni unica.

Recenti studi affermano che la sinestesia ha una incidenza del 4% nella popolazione, con un'uguale prevalenza tra uomini e donne (Simner et al., 2006). Tuttavia proprio per le differenti tipologie in cui si può presentare, spesso risulta anche difficile identificarla. Prendendo in considerazione l'intensità con cui la sinestesia si può palesare (forte vs. debole), la sua causa diretta (cambiamenti di natura strutturale, biochimica, funzionale, cambiamenti funzionali del cervello, suggestionabilità), il momento in cui si verifica (infanzia vs. età adulta), e la sua durata durante la vita (permanente vs. temporaneo), Rogowska (2011) riporta una suddivisione di questo fenomeno in quattro tipi:

- developmental synaesthesia: si presenta nell'infanzia con delle forti associazioni che tendono a non cambiare durante la crescita; è quella che più di tutte si avvicina alla terminologia di sinestesia naturale usata nella letteratura internazionale;
- acquired synaesthesia: si presenta inequivocabilmente dopo alterazioni cerebrali, disfunzioni neurologiche o danni permanenti ai nervi; è in questa categoria che viene inserito il sottotipo della sinestesia artificiale e della sinestesia fantasma (si verifica come conseguenza del dolore fantasma);

- temporary synaesthesia: si presenta in individui non sinestesici in seguito all'influenza di droghe o forti suggestioni; qui viene inserito il sottotipo della sinestesia virtuale;
- associational synaesthesia, è comune perché si basa su regole universali di associazioni intermodali; in questa viene inserito il sottotipo più debole, legato agli effetti delle esperienze artistiche e sensoriali.

La classificazione riportata da Rogowska (2011) è utile per fare chiarezza sul modo in cui le varie sinestesie si presentano, tuttavia, non c'è ad oggi accordo tra la comunità scientifica su come classificare i diversi tipi di esperienze sinestesiche. Ad esempio, ciò che viene internazionalmente chiamato "sinestesia artificiale" si discosta dalla categorizzazione appena vista, posizionandosi nel mezzo della classificazione virtuale-artificiale descritta da Rogowska. Questo accade perché la sinestesia artificiale risulta temporanea e acquisita in seguito all'utilizzo di tecniche o tecnologie particolari, quali l'utilizzo di droghe, l'ipnosi o l'uso di strumentazione digitale su individui non sinestesici. Molti studiosi, invece di dividerle, le racchiudono entrambe nel macro-dominio della sinestesia artificiale, anche detta sintetica (Reif & Alhalabi, 2016).

1.2.2 Individui sinestesici differenti

Se in precedenza è stato detto che l'esperienza sinestesica tende ad essere la stessa a livello intra-soggettivo, ciò non vale per il livello inter-soggettivo. Individui differenti sperimenteranno differenti esperienze sinestesiche, anche se queste appartengono alla stessa categoria. Dixon et al. (2004) riportarono queste differenze individuali nella descrizione dell'esperienza del colore sinestesico, descritta da un gruppo di individui come “fuori dallo spazio” e da un altro come “nell'occhio della mente”. Dividendo così gli individui sinestesici rispettivamente in “proiettori” e “associatori” (Hubbard & Ramachandran, 2005). I primi riportano un'esperienza sinestesica più intensa, dove la percezione del colore è intrinsecamente legata al grafema e si sovrappone visivamente ad esso. I secondi invece riportano un'esperienza più debole, percepiscono il colore come associato al grafema, ma non gli si presenta come una sua caratteristica intrinseca. Questa distinzione viene anche confermata dai diversi livelli di interferenza di stimoli irrilevanti (o caratteristiche irrilevanti dello stimolo) che gli individui con sinestesia grafema-colore subiscono, come dimostrato attraverso l'utilizzo del test di Stroop. Con questo tipo di sinestesia, quando gli individui osservano un grafema scritto con inchiostro nero essi sperimentano un “fotismo”, cioè lo vedono di un particolare colore. Questo resterà invariato se individuo e grafema rimarranno gli stessi. A differenza della versione classica di questo test, dove si misurano i tempi di reazione in seguito alla possibile interferenza che l'inchiostro colorato genera nella lettura della parola, nella versione applicata agli individui sinestesici si vanno a misturare i tempi di reazione dell'interferenza che il fotismo

genera in contrasto con il colore del grafema. Nello specifico, per gli individui sinestesici proiettori, nominare il colore dell'inchiostro in cui veniva presentato il grafema induceva una maggiore interferenza di Stroop rispetto alla denominazione del colore del fotismo. Mentre per gli individui sinestesici associatori è stato osservato il modello opposto (Hubbard & Ramachandran, 2005).

1.2.3 Studi classici sulla sinestesia

Una volta che i ricercatori si resero conto di queste differenze nelle varie sinestесie e nelle esperienze individuali, iniziarono a chiedersi quali fossero le basi neurali della sinestesia e come potesse influenzare le performance cognitive. Come è stato accennato in precedenza, uno dei primi test utilizzati per la ricerca fu la variante per sinesteti grafema-colore del test di Stroop. Questo paradigma di interferenza è stato fondamentale per dimostrare che la sinestesia si presenta in modo automatico e non sotto il controllo volontario dell'individuo. Tuttavia, l'interferenza di Stroop da sola non distingue tra processi percettivi o concettuali, in quanto può essere indotta anche da associazioni concettuali apprese nel corso del tempo (Hubbard & Ramachandran, 2005). Gli studi psicofisici che nacquero con lo scopo di determinare i processi sottostanti alla sinestesia si concentrarono maggiormente

sulla sinestesia grafema-colore, perché oltre a essere una delle sinestесie più diffuse, era anche quella che si adattava maggiormente a dei test visivi quali i paradigmi di ricerca visiva e di mascheramento. Un primo esperimento di ricerca visiva rientrava nella categoria dei test di "texture segregation", dove alcuni target erano immersi nel mezzo di molti distrattori, e il compito degli individui (sinestесici e non) era di individuare i target (Figura 1). Essendo target e distrattori tutti colorati di nero su sfondo bianco, gli individui sinestесici producevano

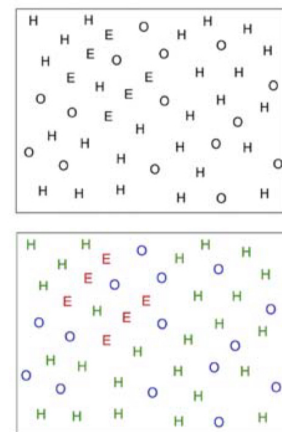


Figura 1: texture segregation task, in alto come viene presentato, e in basso come viene visto dagli individui sinestесici (Hubbard & Ramachandran, 2005)

performance molto superiori al gruppo di controllo dei non sinestesici, perché potevano sfruttare l'effetto pop-out generato dal fotismo della loro sinestesia grafema-colore. Di fatto, dal loro punto di vista, i grafemi target venivano percepiti di uno specifico colore che differiva da quello dei distrattori. In un secondo esperimento i sinestesici dovevano identificare e localizzare dei numeri mentre lo sfondo sul quale erano rappresentati poteva essere congruente o incongruente con il colore sinestesico del

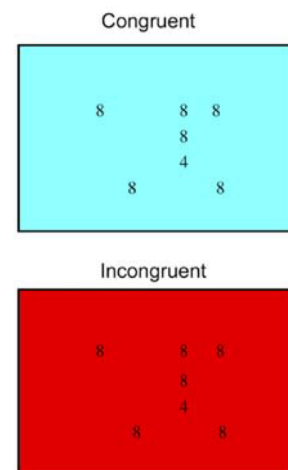


Figura 2: congruent-incongruent task (Hubbard & Ramachandran, 2005)

loro grafema (Figura 2). Questo compito ha dimostrato inequivocabilmente l'interferenza che si genera nei sinestesici. Dai risultati di questo esperimento e dal precedente i ricercatori hanno concluso l'ipotesi che i "colori sinestesici" vengano evocati nelle prime fasi dell'elaborazione percettiva. Tuttavia, ricerche più recenti hanno messo in dubbio questa abilità di ricerca visiva parallela, suggerendo che l'effetto pop-out potrebbe non essere vero per tutti, ma solo per alcuni individui sinestesici. Di conseguenza, a queste ricerche sono seguiti degli esperimenti per indagare in profondità il collegamento tra sinestesia e attenzione, somministrando sempre test di ricerca visiva. Analizzando le prestazioni in funzione del numero di distrattori, i ricercatori hanno dimostrato la migliore efficienza degli individui sinestesici rispetto agli individui di controllo. Invece, misurando i tempi di reazione in funzione dell'eccentricità, cioè la posizione del target nel campo visivo rispetto al punto focale o al centro, il vantaggio nei tempi di ricerca si notava solo quando il target era a una distanza inferiore a 10 gradi dalla posizione centrale dello sguardo.

Ciò suggerisce che il miglioramento percettivo, o di ricerca visiva, sembra verificarsi solo all'interno di ciò che gli autori chiamano il "campo funzionale di attenzione". Ulteriori studi hanno inoltre dimostrato che non era tanto la velocità a riconoscere il target che portava gli individui sinestesici ad avere performance migliori, ma era la loro velocità ad eliminare i distrattori dalla ricerca visiva (Hubbard & Ramachandran, 2005). Passando invece ai test che utilizzavano il mascheramento, fu scelto di esplorare il paradigma del "crowding" per investigare se i colori sinestesici potessero aiutare a identificare target periferici. In questo genere di test il grafema target è attorniato da distrattori che ne rendono difficile l'identificazione. Inizialmente, i risultati suggerirono che due individui sinestesici erano significativamente migliori nell'identificare il grafema bersaglio rispetto al gruppo di controllo. Tuttavia, ricerche successive con un campione di sei individui sinestesici hanno indicato che questi effetti potrebbero non applicarsi a tutti gli individui sinestesici. In altre parole, sembrava che l'effetto positivo dei colori sinestesici sulla percezione potesse variare tra individui con sinestesia. Andando contro queste conclusioni, Mattingley et al. (2001), hanno mostrato che l'interferenza sinestesica Stroop veniva eliminata in conseguenza all'eliminazione dell'esplicita consapevolezza del grafema. Presentando a un gruppo di 15 individui sinestesici un grafema target posizionato nel mezzo di due maschere, l'interferenza si mostrava solamente quando il target aveva un tempo di esposizione di 500ms. Quando veniva presentato per un tempo compreso tra i 28 e i 56 ms, non c'era alcun tipo di interferenza sinestesica Stroop. Proprio perché l'individuo non aveva il tempo di identificare coscientemente il grafema. Tuttavia, studiando un singolo individuo sinestesico, Wagar et al. (2002), hanno mostrato che

l'effetto deleterio del mascheramento dell'oggetto sull'identificazione di un grafema mascherato, era molto inferiore rispetto a uno qualsiasi degli otto individui di controllo. Riaprirono così il dibattito sull'argomento, affermando che il mascheramento non elimina l'esperienza dei colori sinestesici, in quanto considerata una caratteristica visiva di base, ma elimina solamente il riconoscimento cosciente dei grafemi, il quale sembra richiedere un'attenzione focalizzata per legare insieme gli elementi (Hubbard & Ramachandran, 2005). Per spiegare tutte queste contraddizioni nelle ricerche sui colori sinestesici sono state proposte tre potenziali interpretazioni dei risultati:

- ci sono differenze sostanziali tra individui sinestesici, i quali necessitano di paradigmi differenti e specifici per essere testati;
- non è detto che i fotismi (colori sinestesici) siano strettamente preattentivi; sebbene vengano elicitati nelle prime fasi dell'elaborazione, i colori sinestesici non sono equivalenti ai colori reali;
- è possibile che la visione dicotomica dei processi di attenzione come pre- o post-attentivi sia troppo semplice, e la sinestesia semplicemente metta in evidenza le insufficienze di questa distinzione dicotomica.

1.2.4 Substrato neurale della sinestesia

Sulla base di questi e altri risultati che dimostrano la realtà delle esperienze sinestesiche, i ricercatori iniziarono ad interrogarsi sul possibile substrato neurale della sinestesia. Le ricerche di neuroimaging (in particolare con fMRI: *functional Magnetic Resonance Imaging*) sono state condotte su forme di sinestesia in cui la presentazione uditiva, visiva o tattile di stimoli linguistici suscitava l'esperienza dei colori. Ad oggi ci sono due dibattiti, in qualche modo paralleli, riguardanti il substrato neurale della sinestesia. Il primo avviene a livello neurofisiologico, e indaga se l'esperienza sinestesica derivi da un fallimento del taglio di connessioni sinaptiche (*pruning*) in fase di crescita, o da qualche forma di disinibizione nel sistema visivo. La seconda discussione avviene a livello architettonico. Finora sono stati proposti quattro modelli architettonici, a cui ci riferiremo qui come “attivazione incrociata” (*cross-activation*), “feedback a lungo raggio” (*long-range feedback*), “elaborazione rientrante” (*re-entrant processing*) e “iperlegatura” (*hyperbinding*) (Hubbard, 2007). Approfondendo il livello neuropsicologico, possiamo interpretarlo come un paradigma di connessione contro uno di comunicazione. Nel modello che ipotizza una “potatura sinaptica”, si presume che ci sia un incremento di connettività tra regioni cerebrali, e questo porterebbe a una maggiore intensità degli input neurali per gli individui sinestesici rispetto ai non sinestesici. Diversamente, nel modello che ipotizza una disinibizione dei feedback, si presume che il grado di connettività sia identico negli individui sinestesici e nei non sinestesici, ma si ritiene che nei primi la comunicazione neurale sia aumentata tra le regioni del cervello a causa della

mancanza di processi inibitori. Approfondendo invece il livello architettonico, passeremo in rassegna i quattro modelli riportati da Hubbard & Ramachandran (2005):

- *cross-activation*: dato che l'area cerebrale che si occupa del riconoscimento delle lettere e dei numeri, la *Visual Word Form Area*, si trova a ridosso della regione hV4, specializzata nell'elaborazione dei colori, i ricercatori ipotizzano che la sinestesia grafema-colore possa derivare da attivazioni incrociate tra adiacenti aree cerebrali. Per ricollegare questa teoria con l'ipotesi della riduzione del taglio di connessioni sinaptiche, essi ritengono che la presenza di queste attivazioni incrociate in tenera età possa impedire il "*pruning*";
- *long-range disinhibited feedback*: secondo questa teoria la sopracitata sinestesia potrebbe derivare da una disinibizione in un punto di convergenza in cui si verificano interazioni multisensoriali; un esempio potrebbe essere la giunzione temporo-parietale-occipitale. A supporto di questa teoria spesso viene citata la condizione secondo cui gli individui che sperimentano droghe psichedeliche riportano esperienze sinestesiche;
- *re-entrant processing*: Secondo Smilek et al. (2001), oltre ad un'attivazione che dalla corteccia visiva primaria V1 passa a V4 (area visiva extrastriata), poi alla regione PIT (area posteriore inferotemporale) e infine alla regione AIT (area anteriore inferotemporale), si aggiunge un'attività neurale insolita che torna indietro e funge da feedback per PIT e V4, dando vita all'esperienza dei colori sinestesici;

- *hyperbinding*: Rispetto ai modelli precedenti è quello proposto più recentemente.

In circostanze normali, il cervello deve unire insieme informazioni relative a colore, forma, movimento, ecc., per creare una rappresentazione coerente del mondo, e questo processo di unione dipende da meccanismi parietali. Questo modello suggerisce che la sinestesia si manifesti attraverso una sovra-attivazione di questi meccanismi parietali di unione.

Bisogna tuttavia aggiungere che questi modelli non si escludono a vicenda; dato che nessuno può da solo spiegare la totalità delle tipologie sinestesiche, si ipotizza che debbano cooperare per dare vita alle esperienze sinestesiche. Inoltre, un'altra possibilità è che le differenti teorie neurali possano applicarsi solamente ad alcuni tipi di sinestesia; senza tuttavia escludere che i meccanismi neurofisiologici possano essere condivisi tra differenti forme di sinestesia (Hubbard, 2007).

1.3 Sinestesia artificiale

Come è stato descritto in precedenza, esistono moltissime tipologie differenti di sinestesia; tuttavia, la distinzione più interessante per la mia ricerca è quella tra la sinestesia naturale e la sinestesia artificiale. Una distinzione che già dalla terminologia fa intendere che ciò che separa questi due fenomeni è proprio la natura che determina la loro comparsa. La sinestesia naturale, così come è riportato nel capitolo precedente, si presenta come un'associazione sensoriale, un ponte, che collega due o più sensi in un individuo che naturalmente sperimenta questo fenomeno sensoriale. Essere sottoposti ad un determinato stimolo ne elicitano un altro, in un secondo canale sensoriale. Questo si manifesta parallelamente al primo, sovrapponendo una sensazione all'altra. La definizione di sinestesia naturale racchiude quindi tutte quelle sinestesiane che si presentano nell'individuo durante la normale fase di crescita. Le ricerche che si concentrarono su questo fenomeno, si posero quindi l'obiettivo di individuare quali fossero le caratteristiche che permettevano a una sinestesia di classificarsi come "naturale". Come riportato da Schwartzman et al. (2019), sono stati individuati tre indicatori, tre caratteristiche che definiscono l'esperienza sinestesica naturale:

- l'esperienza sinestesica deve avere consistenza e costanza nell'individuo che la sperimenta, cioè presentazioni ripetute dello stesso stimolo induttore devono generare la stessa (o molto simile) esperienza sensoriale concorrente;
- questa esperienza non può essere sotto il controllo volontario dell'individuo, avviene autonomamente;

- la sensazione concorrente, quindi quella che si genera in seguito alla presentazione dello stimolo induttore, provoca nell'individuo una sorta di distacco percettivo; l'esperienza sensoriale secondaria viene percepita come distaccata dall'ambiente reale.

1.3.1 Indurre sinestesia artificiale

Individuare questi tre aspetti è stato fondamentale perché ha dato la possibilità ai ricercatori di interrogarsi su una questione estremamente interessante: se si sottopone un individuo ad una esperienza sensoriale che ricrea queste caratteristiche, esso sperimenterà una sensazione paragonabile a quella di un individuo sinestesico naturale? Questo è il punto chiave che definisce la sinestesia artificiale, l'idea di poter indurre, tramite determinate tecniche o tecnologie, un'esperienza sinestesica in individui che non possiedono questa condizione neurologica. Lo scopo ultimo di questa procedura è quello di ricreare le conseguenze che un tale paradigma comporta, non solo a livello percettivo, ma soprattutto a livello neuro-cognitivo. È necessario comprendere come indurre sinestesia artificiale. Schwartzman et al. (2019) riportano varie metodologie che potrebbero rispondere alla domanda:

- sinestesia tramite training: se gli individui fossero stati sottoposti ad un intensivo addestramento associativo tra stimolo induttore e stimolo concorrente, si sarebbero notati una serie di effetti comportamentali comuni tra gli individui sottoposti al training e gli individui sinestesici di riferimento. In particolare, solamente i grafemi sui quali venivano addestrati dimostravano un adeguato livello di costanza e automatismo esperienziale. Inoltre, da report verbale, gli individui affermavano di vedere gli stimoli come separati a livello percettivo (Bor et al., 2014; Rothen et al., 2018). Questa metodologia comprende quindi tutte le caratteristiche proprie della sinestesia naturale;

- sinestesia tramite farmacologia: l'utilizzo di droghe allucinogene come l'LSD ha una lunga storia di induzione di esperienze simili alla sinestesia. Tuttavia, sebbene molto vivide a livello esperienziale, non danno prova di possedere le tre caratteristiche distintive della sinestesia. In particolare, non producono associazioni costanti, non avvengono autonomamente e inoltre possono essere influenzate dallo stato mentale dell'individuo (Sinke et al., 2012);
- sinestesia tramite ipnosi: i ricercatori riportano che negli individui suggestionabili, l'ipnosi ha indotto anormali esperienze cross-modali, simili a quelle della sinestesia naturale. I test percettivi hanno mostrato la presenza di automaticità; tramite report verbale è stato affermato un consistente grado di coerenza. Tuttavia, la percezione del colore suggestionato non è apparsa come separata, ma bensì come sostituita a quella del colore proprio del grafema. Questo ad indicare una piccola differenza con la sinestesia naturale (Kallio et al., 2017);
- sinestesia come risultato della privazione sensoriale: studiata principalmente negli individui che hanno sperimentato una profonda perdita di capacità visiva. Che fosse dovuta a una deafferentazione oppure a un danno del nervo ottico, molti degli individui studiati sperimentarono fotismi in risposta alla percezione di suoni. Ad ogni modo, le esperienze a cui erano soggetti non rispettavano le caratteristiche della sinestesia naturale, condividendo con essa solo delle similitudini superficiali (Jacobs et al., 1981);
- sinestesia come risultato di un danno cerebrale: in un caso studiato da Ro et al. (2007), in seguito ad una lesione focale del nucleo ventrolaterale talamico, il paziente ha scoperto che gli stimoli uditivi davano vita a percezioni tattili. Questa

esperienza simile alla sinestesia si ipotizza sia dovuta alla riorganizzazione funzionale e strutturale del cervello in seguito al trauma; nello specifico ad una connettività abnorme tra talamo ventromediale destro e corteccia. Tuttavia, se paragonata ad una sinestesia naturale, l'esperienza somatosensoriale acquisita risulta indubbiamente più superficiale, non possedendo le sue caratteristiche distintive.

1.3.2 L'utilizzo di tecnologie innovative

In un altro paradigma utilizzato per indurre sinestesia artificiale, si utilizzano delle tecnologie specifiche in grado di generare negli individui non sinestesici delle esperienze paragonabili a quelle sinestesiche. Grazie ai progressi metodologici e tecnologici, negli ultimi anni vengono utilizzati sempre di più gli SSD (*Sensory Substitution Devices*) e i Visori per la realtà Virtuale e Aumentata. I primi hanno lo scopo di compensare o potenziare un canale sensoriale, raccogliendo gli input a lui dedicati e trasformandoli nel linguaggio di uno degli altri sensi. Oltre ad avere delle sorprendenti applicazioni pratiche, questi dispositivi sembrano generare negli individui che li utilizzano delle esperienze multisensoriali paragonabili a quelle della sinestesia. In particolare, risultano molto interessanti:

- un dispositivo in grado di presentare a livello sonoro stimoli visivi (tecnica detta sonificazione), così da compensare le limitazioni del normale sistema visivo ed estenderlo oltre la sua portata di applicazione (Foner, 1999);
- un dispositivo in grado di presentare visivamente gli stimoli destinati al canale olfattivo, così da migliorare la normale discriminazione degli odori (Ward et al., 2020). Capacità che presentano le persone con sinestesia odore-visione naturale;
- un dispositivo che permette alle persone ipovedenti (o bendate) di “vedere“ grossolanamente l'ambiente circostante tramite la trasformazione delle immagini in suoni (Ward & Meijer, 2010).

Invece, i visori a Realtà Virtuale e Aumentata si concentrano principalmente nella creazione artificiale della sinestesia tramite presentazioni visive. Vengono utilizzati

anche negli SSD, proprio per rendere la conversione dal senso deficitario verso quello visivo più comoda e realistica possibile. Ovviamente hanno un loro campo di applicazione specifico; restando nel paradigma della sinestesia “visiva”, essi sembrano in grado di immergere l’individuo in un ambiente virtuale che simula le percezioni di un individuo sinestesico naturale. Tuttavia, l’innovazione di questo metodo non si ferma qui; ad esempio, ricreando artificialmente la sinestesia grafema-colore, se sottoposti a test cognitivi, gli individui sembrano presentare gli stessi miglioramenti della memoria e dell’attenzione che osserviamo negli individui con sinestesia naturale (Plouznikoff, 2005). In aggiunta, oltre ai miglioramenti prestazionali, questa tecnologia sembra così efficace nel riorientare l’attenzione da avere applicazioni anche nel trattamento del dolore cronico (Reif & Alhalabi, 2016).

1.4 Realtà Virtuale e Aumentata

Oramai da diversi anni i dispositivi atti a immergere le persone in una realtà digitale hanno preso il nome di “visori” per la realtà virtuale (VR) o aumentata (AR). Questo perché le tecnologie necessarie per questo tipo di strumento sono facilmente reperibili, e nel corso degli anni di innovazione hanno subito molti miglioramenti, raggiungendo uno standard di design che li rappresenta come microschermi ultrapiatti posizionati a pochi centimetri degli occhi. La diffusione e la versatilità degli smartphone permette che anch’essi possano essere usati come dei visori; tuttavia, solo con un visore come “*Quest*” di Meta oppure “*Vision Pro*” di Apple (Figura 3) raggiungiamo lo stato dell’arte per questa tecnologia. Essendo apparecchi dedicati a questo tipo di utilizzo, evitano le complicazioni dovute ad affaticamento visivo oppure al surriscaldamento del dispositivo che invece avremo utilizzando



Figura 3: *VisionPro* di Apple (www.apple.com)

regolarmente smartphone. Questa piccola premessa è necessaria, perché nella mia ricerca ci saranno sperimentazioni eseguite sia tramite smartphone che tramite visori dedicati. Agli albori dell'utilizzo di questa tecnologia, tuttavia, essi non venivano chiamati visori, bensì display montati sulla testa (HMD: *head-mounted displays* oppure HWD: *head-worn displays*). Questo perché la tecnologia era portatile, ma ancora limitata da un'eccessiva grandezza e da batterie poco performanti. C'era un ulteriore motivo, sebbene adesso possiamo fare tutto tramite la computer grafica, che ci permette di rappresentare l'ambiente circostante attraverso monitor ad altissima risoluzione, trenta anni fa non era possibile questa praticità e di conseguenza i primi esperimenti sul paradigma dell'alterazione visiva utilizzavano display semi-trasparenti che permettevano di vedere il mondo esterno, ma mostravano in sovrapposizione anche elementi digitali. Questi presero il nome di *Video See-Through HMD*, e diedero inizio alla cosiddetta Realtà Aumentata (Rolland et al., 1995). Questa differisce dalla Realtà Virtuale perché non sostituisce completamente l'ambiente circostante, ma bensì si combina con esso. Invece, nella strumentazione per la VR, l'immersione dell'individuo nel mondo virtuale è totale. Spesso digitalizzando anche il canale uditivo tramite l'utilizzo di cuffie.

1.4.1 Esempi applicativi

La versatilità della strumentazione odierna ha permesso una rapida crescita degli esperimenti sulla percezione virtuale. Dando molta rilevanza alle installazioni con lo scopo di simulare i processi multisensoriali e la sinestesia. Un esempio applicativo lo troviamo nel progetto “*Syn(es)thetic Reality*” di Khare et al. (2019), dove utilizzando uno smartphone come visore e inserendolo in una struttura indossabile, i ricercatori hanno potuto simulare la cromestesia in individui non sinestesici (Figura 4).

Rappresenta una particolare sinestesia che permette di vedere involontariamente dei colori come risultato di input sonori. I suoni venivano associati a un particolare colore mappando lo spettro sonoro parallelamente a quello della luce. Quindi la



Figura 4: design finale del visore (Khare et al., 2019)

saturatione dei colori visibili dipendeva dall'ampiezza della frequenza associata a quel colore. Quando l'individuo vedeva delle immagini, la saturazione di queste dipendeva dai suoni che gli venivano somministrati. I dispositivi di recente utilizzo garantiscono un'immersione così profonda che hanno permesso di fare delle speculazioni in grado di superare la mera rappresentazione virtuale, facendole sfociare nell'alterazione sensoriale. Come vediamo nello studio esplorativo di Weir et al. (2013), dove i ricercatori, utilizzando un visore AR, potevano far provare l'illusione di

vedere le proprie mani bruciare. Hanno ottenuto questo risultato sovrapponendo fiamme virtuali e fumo alle mani degli individui, facendo percepire anche il suono del fuoco che brucia. Questa dimostrazione è stata chiamata “BurnAR” (Figura 5). Sorprendentemente, 6 dei 20 individui testati hanno sperimentato una involontaria sensazione di calore alle mani; uno di questi ha anche percepito odore di bruciato. Osservandone il comportamento, gli individui dimostravano una elevata immersione nel sistema illusorio dopo circa tre minuti di utilizzo. Secondo i ricercatori, questo studio suggerisce che gli stimoli visivi combinati con quelli sonori possono generare delle illusioni cross-modali di calore; in assenza di qualsiasi fonte di calore esterna. L’ipotesi è che stimolazioni multiple, presentate in un sistema AR, possano dare adito a sensazioni involontarie in nuovi canali sensoriali.

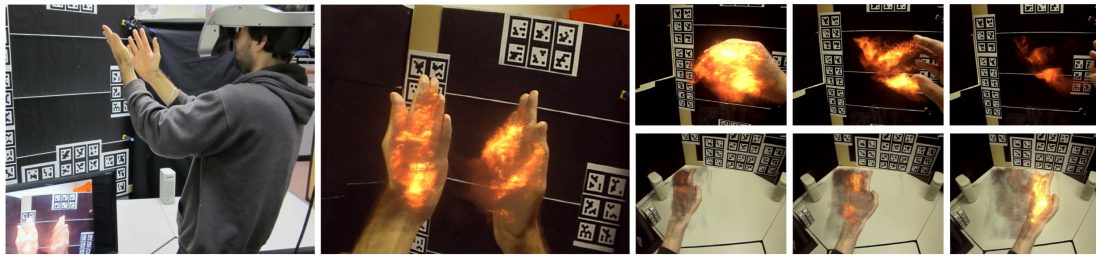


Figura 5: dimostrazione del BurnAR, sovrapposizione virtuale delle fiamme e del fumo alle mani. Il movimento delle mani influenza l’animazione digitale (Weir et al., 2013)

1.5 Introduzione allo studio

Per rispondere alla domanda di ricerca se “le più recenti tecnologie a realtà virtuale e aumentata possono fornire dei nuovi approcci allo studio della sinestesia”, discuterò alcuni articoli che ho raccolto durante la fase di analisi della letteratura. Questi hanno affrontato il paradigma della sinestesia artificiale tramite l’utilizzo di Visori AR e VR, generando situazioni sperimentali più o meno immersive. La popolazione di riferimento per tutti gli studi è rappresentata da individui non sinestesici, le cui esperienze sensoriali vengono confrontate (a livello descrittivo) con quelle registrate in letteratura da individui sinestesici; invece, le loro performance ai test, vengono confrontate prima e dopo l’applicazione della strumentazione per generare sinestesia artificiale. In questo modo si può verificare realmente se quest’ultima genera dei benefici nelle prestazioni degli individui. Nella mia raccolta dati rientrano anche quelle ricerche che, adottando il paradigma della sinestesia artificiale, hanno applicato i visori AR/VR con lo scopo di catturare l’attenzione degli individui e riorientarla per modificare il loro stato mentale. Il metodo utilizzato per questa revisione sistematica della letteratura segue le linee guida PRISMA, riportando in maniera trasparente tutti i passaggi eseguiti durante l’analisi della letteratura e dividendo le variabili sperimentali e gli obiettivi raggiunti in tabelle per facilitarne la lettura.

2 Metodo: revisione sistematica della letteratura

Le revisioni sistematiche (in inglese *Systematic Review*), sono un potente strumento di ricerche scientifica, che permettono di esplorare e riassumere evidenze provenienti da uno specifico campo di interesse. Come, ad esempio, una rassegna esaustiva della letteratura scientifica con particolare attenzione alle fonti, che devono essere altamente referenziate, per individuare, evidenziare e valutare, in una ricerca di alta qualità, tutte le prove pertinenti a una specifica questione scientifica. La revisione sistematica fornisce una sintesi dello stato dell'arte nel settore disciplinare specifico oggetto della stessa, e per la particolare questione posta in esame. Una delle caratteristiche distintive delle revisioni sistematiche è la chiara definizione di una domanda di ricerca specifica e il metodo rigoroso per trovare risposte a tale domanda. Nelle neuroscienze, ciò significa identificare un argomento di interesse, ad esempio, l'efficacia di una terapia nel trattamento di una malattia neurologica, e quindi cercare sistematicamente tutte le ricerche pertinenti che forniscono dati su quell'argomento. La prima fase di una revisione sistematica comporta la ricerca della letteratura. Questo passo è fondamentale, poiché assicura che nessuna ricerca rilevante venga trascurata. Una volta raccolti tutti gli articoli pertinenti, si applicano criteri di inclusione ed esclusione rigorosi per selezionare solo gli studi che soddisfano i requisiti specifici della revisione. Dato che la precisione e la validità dei dati sono essenziali in questo campo, è fondamentale valutare attentamente la metodologia e la

progettazione di ciascuno studio. Questo passo aiuta a identificare eventuali limitazioni degli studi e a determinare quanto possano essere affidabili i risultati. Una volta completata l'estrazione dei dati, gli autori di una revisione sistematica conducono una sintesi delle evidenze. Questa fase può implicare un'analisi quantitativa (meta-analisi) o una sintesi qualitativa delle scoperte, a seconda della natura dei dati raccolti. La meta-analisi ha lo scopo di minimizzare gli errori e di generalizzare le conclusioni relative e può essere particolarmente preziosa quando si cercano relazioni tra variabili o si valutano gli effetti di interventi terapeutici. Le revisioni sistematiche nelle neuroscienze possono essere applicate a molteplici aree di ricerca. Ad esempio, possono essere utilizzate per valutare l'efficacia di farmaci nel trattamento di disturbi neurologici, esaminare i meccanismi cellulari e molecolari associati a malattie cerebrali, o esplorare gli effetti di interventi terapeutici nelle neuroscienze cognitive. Inoltre, le revisioni sistematiche possono contribuire a identificare le lacune nella conoscenza e suggerire direzioni future per la ricerca. Ad esempio, potrebbero rivelare che esistono poche ricerche sulla terapia di una determinata malattia neurologica o che le scoperte in un'area specifica sono contraddittorie. Queste informazioni possono guidare i ricercatori nel progettare nuovi studi e indirizzare le loro ricerche verso le questioni ancora irrisolte.

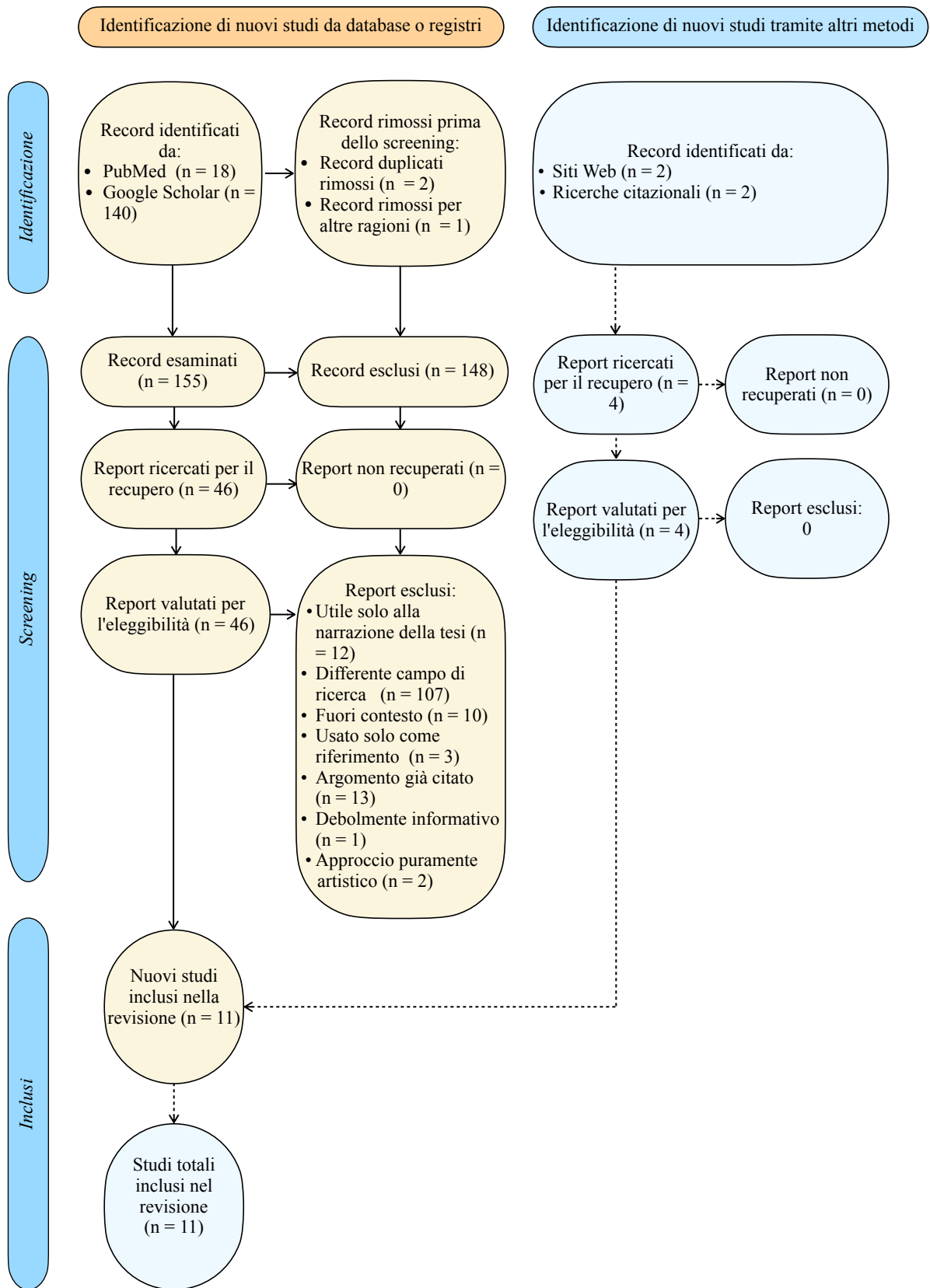
2.1 Le linee guida PRISMA

Per questa ricerca sistematica è stato utilizzato il metodo PRISMA (*Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses*) il quale fornisce un set di linee guida sviluppate per condurre e presentare in modo trasparente le revisioni sistematiche e le meta-analisi nella ricerca scientifica. Questi elementi aiutano i lettori a comprendere meglio la metodologia utilizzata nella revisione, la selezione degli studi inclusi, la valutazione del rischio di bias e l'analisi dei risultati. Negli ultimi anni il numero di revisioni sistematiche è aumentato vertiginosamente per varie ragioni: l'alta considerazione di questa tipologia di lavori, l'elevato numero di citazioni che generano, la recente possibilità di automatizzare il processo di screening e selezione degli articoli mediante Intelligenza Artificiale e lo sviluppo di tecniche di analisi statistica sempre più sofisticate. Tuttavia, quantità non è sinonimo di qualità; spesso questo genere di ricerche vengono poste in cima alla piramide delle evidenze, anche quando create in maniera subottimale, sia per il tipo di evidenze raccolte che per il modo di analizzarle. Piuttosto dovrebbero essere considerate come delle lenti attraverso cui valutare gli studi sottiacenti. Le revisioni sistematiche possono fungere da sintesi delle conoscenze di un particolare settore, possono affrontare questioni che altrimenti resterebbero irrisolte se affrontate da studi individuali, e possono ipotizzare o valutare teorie su come o perché si verificano determinati fenomeni. Grazie a queste capacità esplorative possono inoltre fornire gli spunti per individuate future priorità di ricerca. Il PRISMA Statement fornisce indicazioni aggiornate per il reporting di revisioni sistematiche che riflettono i progressi nei metodi di identificazione,

selezione, valutazione e sintesi degli studi. Le due colonne portanti su cui basa la sua validità sono una flowchart che descrive graficamente il processo di screening, selezione e inclusione degli articoli, e una check-list di 27 voci avente l'obiettivo di guidare gli autori in un'ottimale e trasparente descrizione dell'intero lavoro a partire dal titolo fino alle conclusioni. Nello specifico la mia ricerca è stata suddivisa in quattro differenti analisi della letteratura. Una volta individuata e perfezionata la domanda di ricerca sono state scelte le parole chiave che avrebbero determinato come filtrare gli articoli. Incentrando la ricerca sulla sinestesia artificiale e sull'utilizzo dei visori AR, le parole chiave scelte sono state "Artificial Synesthesia" e "Synesthesia + AR". Dato che la combinazione "Synesthesia + AR" contaminava fortemente la raccolta dati, perché introduceva nei risultati articoli che affrontavano argomenti scientifici totalmente differenti dal mio (come ad esempio quello dell'elettronica e dell'ingegneria dei materiali), è stata scelta solo per la fase iniziale dell'analisi. Cioè una ricerca preliminare esplorativa, la prima delle quattro fasi di analisi eseguite. Utilizzando invece le parole "Artificial Synesthesia" si è potuta eseguire una ricerca molto più mirata in database dedicati quali PubMed e Google Scholar. In queste analisi sono stati inseriti tutti gli articoli che venivano ritenuti utili per rispondere alla domanda di ricerca e che fornivano informazioni necessarie alla creazione di una narrazione coerente. Tutti gli articoli che invece non fornivano questo genere di informazioni, o erano fuori contesto, oppure affrontavano un differente campo di ricerca sono stati esclusi. Sono state escluse anche le mere citazioni. La seconda fase dell'analisi è stata svolta su PubMed; utilizzando le parole chiave "Artificial Synesthesia". Ho ottenuto un output di 18 risultati; di questi, 6 erano utili alla

formazione della tesi, ma nessuno di essi informazioni essenziali per la domanda di ricerca. La terza fase dell'analisi è stata eseguita su Google Scholar, sempre utilizzando le stesse parole chiave. È stato scelto questo motore di ricerca specializzato nell'ambito accademico e scientifico in quanto la tematica della mia revisione sistematica è relativamente recente, e Google Scholar permette una ricerca a 360° nei vari siti di pubblicazioni accademiche. La ricerca ha prodotto 140 risultati; 140 articoli che spaziavano da articoli di ricerca, revisioni sistematiche, studi interdisciplinari, fino a tesi di ricerca PhD. Tra questi la maggior parte affrontavano la tematica della sinestesia artificiale da un punto di vista ingegneristico (materiali sinestesici che nel loro utilizzo ricordano le proprietà multi-sensoriali della sinestesia), e per questo sono stati esclusi. Un secondo gruppo di articoli si avvicinava maggiormente alla mia domanda di ricerca, ma utilizzava un approccio di studio puramente artistico, e quindi fortemente distante dall'impronta neuro-scientifica che avrebbe avuto la mia tesi. Anche questo secondo gruppo è stato visionato ed escluso. Gli articoli che alla fine sono risultati utili alla mia ricerca erano 13, ma di questi solamente 7 davano informazioni essenziali per la domanda di ricerca. A questo punto, avendo già 9 articoli che mostravano una concreta narrativa atta a rispondere alla domanda di ricerca, ho eseguito una quarta e ultima analisi della letteratura, questa volta concentrandomi sulle bibliografie che questi articoli presentavano. Utilizzando sempre le parole chiave "Artificial Synesthesia" ho ottenuto altri 2 articoli che ho ritenuto fornissero informazioni importanti ma non accuratamente citate in precedenza. Il flowchart riportato descrive dettagliatamente il numero di articoli selezionati e i vari passaggi per la valutazione dell'eleggibilità.

2.1.1 Flowchart



Nello specifico, la fase di “identificazione” si riferisce alla ricerca degli studi nei vari database e nelle piattaforme selezionate. In questa fase ho rimosso tre articoli prima che accedessero alla fase di screening in quanto risultavano come duplicati, oppure erano dei riferimenti che non portavano ad alcun articolo scientifico. La fase di “screening” mi ha permesso di eliminare 148 articoli (senza considerare i tre record rimossi preliminarmente), in quanto rientravano in categorie non utili per la mia ricerca:

- utili solo alla narrazione della tesi: possedevano informazioni interessanti per la formazione della mia tesi, quindi inerenti agli argomenti trattati, ma non entravano nello specifico della mia domanda di ricerca;
- differente campo di ricerca: come accennato precedentemente, questi articoli affrontavano la tematica della sinestesia artificiale parlando di ingegneria dei materiali sinestesici;
- articoli fuori contesto: sebbene discutessero di tematiche vicine a quelle di mio interesse, costruivano un discorso non inerente alla domanda di ricerca;
- articoli usati solamente come riferimento: questi articoli non mi erano utili nella loro interezza, ma solamente come spunto per discutere di una tematica, oppure per prenderli come riferimento in modo da mettere in luce dettagli secondari;
- argomento già citato: racchiude tutti gli articoli che trattano una tematica già presente in altri report in mio possesso e che quindi non possono aggiungere ulteriori dettagli di interesse;
- articolo debolmente informativo: non fornisce informazioni così dettagliate da rientrare nella raccolta finale di ricerche;

- approccio puramente artistico: articoli che trattano la tematica della sinestesia da un punto di vista artistico, senza soffermarsi sulle tematiche neuroscientifiche.

Tutti gli articoli che hanno superato la fase di screening, non rientrando tra questi motivi di esclusione, vengono “inclusi” nella revisione. Dei 158 articoli identificati, ne vengono tolti 3 preliminarmente perché copie o link inconsistenti. In seguito, dei 155 restanti, 46 vengono ricercati per essere recuperati, scaricati e visionati. Tuttavia, 39 di questi vengono esclusi per i vari motivi citati precedentemente. Questi 39 rientrano nella totalità dei 148 articoli esclusi durante lo screening. Abbiamo quindi un totale di 7 articoli restanti dai database PubMed e Google Scholar e 4 articoli da siti Web e ricerche citazionali che vengono così inclusi nella revisione sistematica. La lista completa degli articoli individuati con le parole chiave, delle caratteristiche di ogni articolo e degli articoli selezionati, è reperibile a questo link: https://osf.io/e8mtw/?view_only=eb24b7b30d504bf88261932250800196

3 Risultati dello studio

Per facilitare l'esposizione e la l'analisi degli studi, prima passerò in rassegna alcuni punti comuni che gli articoli condividono, raggruppandoli nelle seguenti sezioni:

- obiettivi di ricerca (Tabella 1), ciò che gli sperimentatori puntano a indagare con il loro studio;
- dispositivi utilizzati (Tabella 2), quindi l'utilizzo dei visori per la realtà virtuale e aumentata, degli SSD e dei display di simulazione;
- modalità sensoriali coinvolte (Tabella 3), cioè quali sensi sono stati interessanti dallo studio e come questi sono stati influenzati dagli sperimentatori;
- tipologia di partecipanti (Tabella 4), nei vari studi vediamo solamente individui non sinestesici come partecipanti, con l'eccezione di alcuni studi dove sono presenti anche individui con deficit assieme a quelli sani.

Infine, verranno mostrati gli obiettivi raggiunti dagli studi (Tabella 5), evidenziando le variabili (dipendete e indipendente) per ogni articolo e se questi siano supportati da significatività statistica.

3.1 Obiettivi di ricerca

Studi	Aumentare la sensibilità sensoriale	Catturare e riorientare l'attenzione	Migliorare memoria e ricerca visiva	Migliorare le interazioni uomo-macchina
Plouznikoff et al. (2005)			√	
Hoffman et al. (2001)		√		
Foner (1999)	√			
Fallman et al. (2003)		√		
V. Matanski (2016)		√		
Ward et al. (2020)	√			
Plouznikoff et al. (2006)				√
Ward & Meijer (2010)	√			
Kose et al. (2018)	√			

Tabella 1: obiettivi di ricerca

Sotto l'obiettivo di "aumentare la sensibilità sensoriale" sono raccolte tutte le ricerche che, tramite il paradigma della sinestesia artificiale, mirano a indagare i limiti della sostituzione sensoriale. Vediamo un esempio nella ricerca di Kose et al. (2018) dove tramite visore VR e un set di microfoni si punta a localizzare una fonte sonora per poi trasformarla in una serie di forme visive, permettendo così all'individuo di visualizzarla nella realtà virtuale. Esattamente come avviene nella sinestesia suono-colore (cromestesia). In questo modo l'individuo aumenta la precisione della sua discriminazione sonora, perché in aiuto al canale uditivo viene quello visivo. Egli sperimenta così in parallelo le percezioni legate alla fonte sensoriale. Vediamo una similitudine nelle ricerche che puntano ad aumentare la sensibilità sensoriale tramite

l'utilizzo di SSD. Nella ricerca di Foner (1999), è stata utilizzata la "sonificazione" per migliorare la discriminazione visiva degli individui, presentando uditivamente le differenze spettroscopiche degli oggetti. L'obiettivo è quello di compensare le limitazioni del sistema visivo umano, dando accesso all'individuo all'intero spettro della luce visibile, rendendo gli individui da tricromatici a policromatici. Comparando a livello sonoro le differenze di pigmentazione, le quali possiedono uno spettro differente, i partecipanti dovrebbero essere in grado di "sentire" la differenza, letteralmente. Altro esempio lo vediamo nella ricerca di Ward et al. (2020), dove i ricercatori hanno mirato ad aumentare la discriminazione degli odori negli individui coinvolti, tramite la presentazione delle fragranze come forme astratte in un ambiente virtuale. Ogni figura generata si correla per forma e colore ad uno specifico aroma, tramite una classificazione computerizzata. L'obiettivo è quello di simulare (soprattutto nella creazione delle forme astratte) la sinestesia odore-visione in tempo reale con strumentazione a basso costo. Invece, nella ricerca di Ward & Meijer (2010), piuttosto che puntare a migliorare le capacità di un canale sensoriale, fornendo all'individuo in parallelo l'output di un secondo canale, si descrive il funzionamento di un dispositivo che sostituisce completamente un senso (in questo caso la visione), permettendo però di percepire grossolanamente l'ambiente circostante tramite la conversione delle immagini dell'ambiente in suoni. La sensibilità uditiva veniva stimolata così egregiamente che i ricercatori lo testarono sia con individui bendati che con individui ipovedenti. Un altro obiettivo di ricerca lo troviamo nel paradigma di "catturare e riorientare l'attenzione" dell'individuo. Qui vediamo alcuni degli esperimenti che possiamo classificare come esplorativi, in quanto, utilizzando

strumentazione a basso costo, si posero l'obiettivo di constatare il senso di presenza e il coinvolgimento degli individui. Senza mirare alla realizzazione di un ambiente virtuale eccessivamente realistico, cosa che invece si vedrà negli esperimenti successivi. Ad esempio nello studio interdisciplinare di Fallman et al. (2003), si punta a simulare grossolanamente le percezioni di un individuo sinestesico naturale, tramite un visore che presenta i suoni come immagini e le immagini come suoni; più che altro da un punto di vista esperienziale-interattivo. Per questo motivo è stato utile solo come esempio e non fornirà risultati sperimentali da discutere. Allo stesso modo vediamo lo studio di Matanski (2016), dove osservando un display gli individui potevano sperimentare virtualmente l'esperienza sinestesica della cromestesia. Le frequenze del suono venivano correlate a quelle dello spettro visivo in modo da creare "fotismi" congruenti. Diverso invece l'approccio nell'articolo di Reif e Alhalabi (2016), dove vengono riportate ricerche il cui scopo non era solo catturare l'attenzione dell'individuo, ma orientarla in un diverso stato mentale. L'ipotesi è che in questo modo si possa ridurre la percezione del dolore (Hoffman et al., 2001). Un ulteriore obiettivo di ricerca lo troviamo nel voler "migliorare le prestazioni di memoria e di ricerca visiva". Replicando la sinestesia grafema-colore artificialmente, i ricercatori Pluznikoff et al. (2005), puntarono a verificare se questa potesse migliorare le suddette prestazioni negli individui testati. Così come la letteratura ci suggerisce possa fare questa condizione degli individui sinestesici naturali. Nello specifico, i ricercatori hanno testato gli individui con due matrici 5x5 di numeri random da 0 a 9. La prima veniva vista normalmente, con numeri a inchiostro nero, la seconda invece subiva la modifica digitale, avvicinandola ad una matrice con numeri

sinestesici. Infine, troviamo un obiettivo di ricerca che si posiziona ad un livello intermedio tra quelli visti finora. Nella ricerca di Pluznikoff et al. (2006), lo scopo fissato è quello di “migliorare le interazioni uomo-macchina”. Simulando sempre una sinestesia grafema-colore, dove però la figura del grafema “*digit*”, quindi della cifra, viene sostituita da componenti di interfaccia della macchina in esame. Tramite questo espediente i ricercatori studiano se si possano migliorare i tempi di esecuzione per compiti semplici come identificazione e selezione visiva. Riducendo così il carico cognitivo dell’individuo.

3.2 Dispositivi utilizzati

Studi	Visore AR - VSTHWD	Visore VR (con cuffie)	Naso elettronico + Visore VR	The vOICe	Spettrometro indossabile + cuffie	Display di simulazione
Plouznikoff et al. (2005)	√					
Hoffman et al. (2001)		√				
Foner (1999)					√	
Fallman et al. (2003)		√				
Matanski (2016)						√
Ward et al. (2020)			√			
Plouznikoff et al. (2006)	√					
Ward & Meijer (2010)				√		
Kose et al. (2018)		√				

Tabella 2: dispositivi utilizzati

Non tutti gli articoli scelti hanno mirano a riprodurre la sinestesia artificiale solamente tramite visori AR/VR. Vengono menzionati anche i dispositivi di sostituzione sensoriale (SSD), gli smartphone e i monitor usati come display di simulazione. Tuttavia, i visori risultato indubbiamente i più presenti nella mia raccolta. Nelle ricerche di Plouznikoff et al. (2005) e Plouznikoff et al. (2006) viene utilizzato un visore AR "Video See-Through Head Worn Display", il quale sovrappone alla visione naturale elementi digitali. Come, ad esempio, colorare digitalmente i numeri scritti con inchiostro nero (Plouznikoff et al., 2005), oppure evidenziare alcuni elementi di

interfaccia di una macchina (Plouznikoff et al., 2006). Nelle ricerche che utilizzano visore VR vediamo sicuramente una delle strumentazioni più avanzate tecnologicamente. In queste situazioni sperimentali l'individuo viene immerso totalmente in un ambiente digitale, sia visivamente che uditivamente. Questo per garantire il massimo livello di coinvolgimento. Nell'esperimento di Kose et al. (2018), viene utilizzato anche un microfono esterno al visore per catturare la fonte sonora. Questo espediente migliora il campionamento sonoro, ma genera dei ritardi nella successiva rappresentazione visiva (circa 500ms). Queste limitazioni tecniche ne impediscono l'utilizzo con gruppo di controllo. Invece, nello studio di Hoffman et al. (2001), la strumentazione è completamente indossabile, caratteristica fondamentale anche per il suo utilizzo con i bambini. Avviene un'immersione totale, in un ambiente virtuale che ricrea un mondo magico oppure un mondo innevato. Nel secondo

esempio, ci si trova in un canyon tridimensionale di ghiaccio dove i pazienti possono interagire attivamente, lanciando palle di neve a igloo e pupazzi di neve (Figura 6). I ricercatori ipotizzano che in questo modo si possa riorientare l'attenzione fino a cambiare lo stato

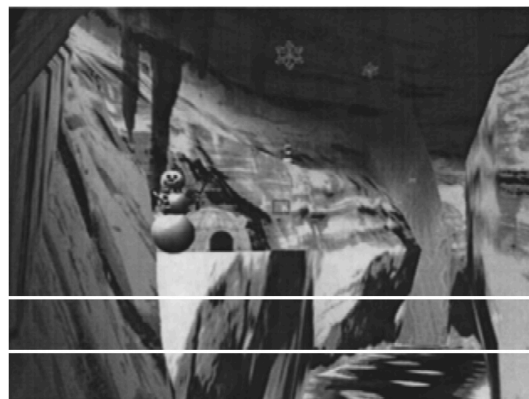


Figura 6: il mondo innevato (Hoffman et al., 2001)

mentale dell'individuo grazie alla perdita di consapevolezza di sé che la realtà virtuale comporta. Nell'SSD testato da Ward et al. (2020), vediamo l'uso di un visore VR accoppiato ad un naso elettronico. I sensori chimici dell'*e-nose* captavano la fragranza dispersa nell'aria e trasmettevano i dati ad un elaboratore che, tramite il

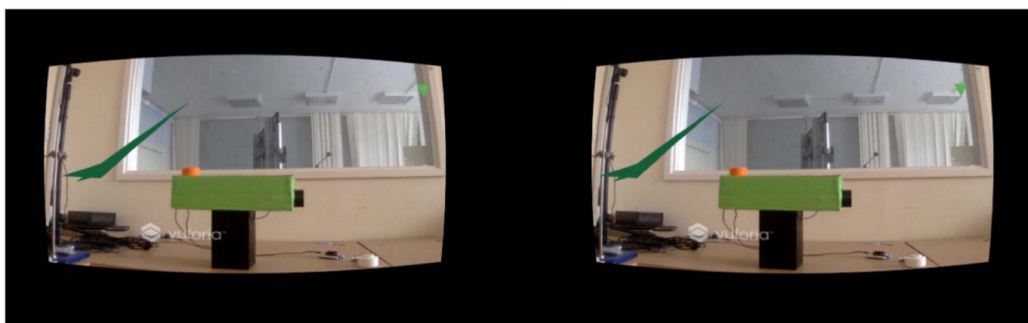


Figura 7: sopra vediamo la generazione delle forme; sotto le differenti figure astratte generate in base alle differenti fragranze (Ward et al., 2020).

riconoscimento dei pattern, calcolava quale forma e colore avrebbe dovuto avere la figura astratta. Le forme sinestesiche venivano generate e classificate in base varie proprietà come intensità dell'aroma, umidità, temperatura o qualità dell'aria. Completato questo passaggio, la forma astratta bidimensionale veniva presentata visivamente all'individuo, che indossava un alloggiamento per visore VR su cui era applicato uno smartphone, sovrapponendola alla visione dell'ambiente circostante (Figura 7). Esattamente come avviene per un individuo che presenta naturalmente sinestesia odore-visione. Un ulteriore lato estremamente positivo di questa strumentazione era quello di essere a basso costo. Nella ricerca di Ward e Meijer (2010), vediamo il dispositivo "The vOICe". Questo SSD indossabile converte le immagini dell'ambiente in suoni, tramite una conversione dei pixel acquisiti da una videocamera. I pixel (176 x 64) vengono classificati in alti di frequenza (o bassi) in base alla rispettiva posizione nella griglia, e di forte (o debole) volume se più

luminosi (o meno luminosi). È indubbiamente un sistema complesso a livello sensoriale, tuttavia, i ricercatori riportano che più lo strumento viene utilizzato, più gli individui si sentono a loro agio. Migliorando la loro discriminazione sensoriale col passare del tempo. Un dispositivo simile nel funzionamento è quello riportato da Foner (1999), dove tramite la sonificazione si convertono le immagini dell'ambiente in suoni (Figura 8). In questo

esempio però la conversione avviene considerando solamente gli aspetti cromatici degli oggetti, non cerca di riportare la loro forma o posizione. Il dispositivo è stato ideato come una sorta di fascia indossabile sulla fronte; contiene il laser per

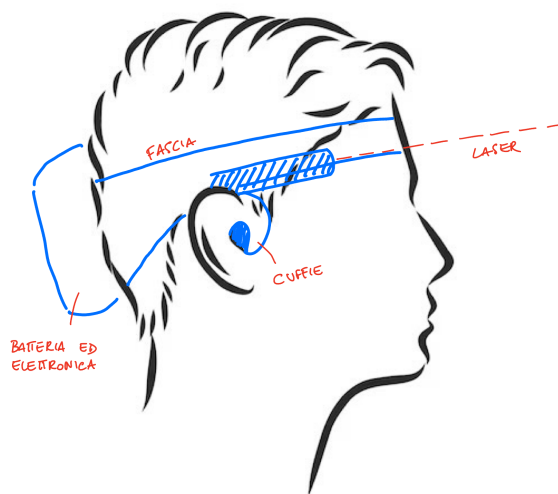


Figura 8: Sonificatore (Foner, 1999)

la rilevazione dell'immagine, il quale punta esattamente dove viene orientata la testa, lo spettrometro che analizza l'immagine catturata e un processore che trasforma il segnale video campionato in audio da presentare all'individuo. Quest'ultimo può sempre vedere l'ambiente circostante ed è stato anche aggiunto un laser di puntamento per aiutarlo a capire quali immagini il dispositivo sta elaborando. Di conseguenza, l'individuo sperimenterà parallelamente il segnale sonoro assieme alla sua stessa vista. La sonificazione punta a fornire informazioni aggiuntive in merito al target visivo scelto. Infine, nella strumentazione riportata da Matanski (2016), non è stato utilizzato alcun visore, ma solamente un monitor in cui mostrare le forme

sinestesiche generate tramite software. Un display di simulazione che permette a individui non sinestesici di sperimentare varie tipologie di sinestesia suono-colore. In base alla musica riprodotta cambiano le figure generate, come forma e colore. Le forme potevano rappresentarsi come cerchi e linee ordinate oppure randomiche, statiche o in movimento (Figura 9). I ricercatori hanno correlato ampiezza, frequenza, tonalità e numerosità dei suoni in modo da farli associare con i fotismi che si creavano, modulando grandezza, colore, posizione e numerosità di questi. Un sistema che simula così precisamente una cromestesia è sicuramente applicabile anche ad un visore AR, così da migliorare ancora di più il coinvolgimento e l'impatto che queste simulazioni hanno sulle persone.

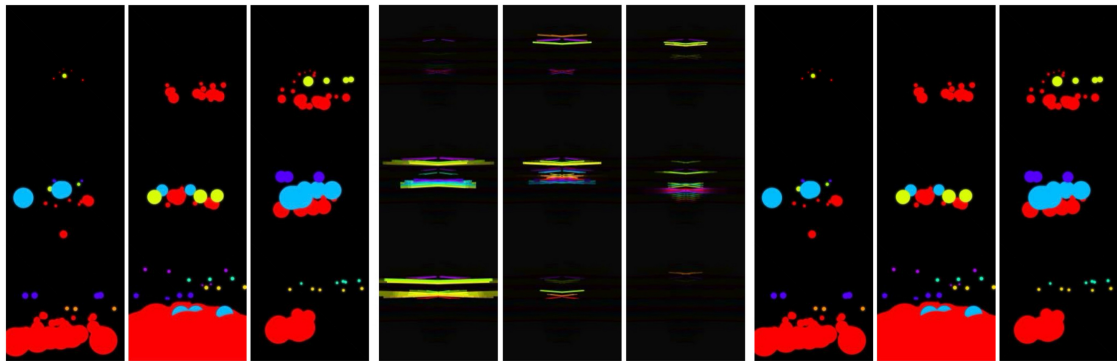


Figura 9: forme sinestesiche sperimentate da individui (Matanski, 2016)

3.3 Modalità sensoriali coinvolte

Studi	Visione per stimolare visione	Udito per stimolare visione	Presentare immagini come suoni e viceversa	Visione per stimolare olfatto	Suono per “sostituire” visione	Visione e udito
Plouznikoff et al. (2005)	√					
Hoffman et al. (2001)	√					
Foner (1999)		√				
Fallman et al. (2003)			√			
Matanski (2016)						√
Ward et al. (2020)				√		
Plouznikoff et al. (2006)	√					
Ward & Meijer (2010)					√	
Kose et al. (2018)						√

Tabella 3: modalità sensoriali coinvolte

Nei vari articoli revisionati indubbiamente la vista è stato il canale sensoriale più coinvolto. D'altronde era inevitabile avendo canalizzato la ricerca sui “visori” utilizzati per studiare le sinestesie. Ci sono studi dove la visione è stata utilizzata per stimolare, oltre alla visione stessa, anche altri canali sensoriali, come l'olfatto e l'udito. Nella ricerca di Ward et al. (2020) abbiamo visto come la presentazione visiva delle fragranze si ipotizzi possa aiutare la discriminazione olfattiva degli odori. Per l'individuo la percezione era in parallelo tra le due modalità sensoriali coinvolte. Dagli altri studi vediamo come accoppiare udito e vista trovi la sua espressione in

molteplici modalità. Esse possono essere presentate in parallelo all'individuo, con lo scopo di aumentare la ricchezza dei contenuti sensoriali in input, come vediamo negli studi di Matanski (2016) e Kose et al. (2018). Oppure completamente invertite, dove una viene presentata nel canale sensoriale dell'altra (Fallman et al., 2003). In questo caso, lo scopo della simulazione della sinestesia artificiale non era quello di misurare facoltà cognitive, ma solamente di constatare il senso di coinvolgimento dell'individuo nell'utilizzare un dispositivo che presentasse i suoni come immagini e le immagini come suoni. Nella modalità che più di tutte si avvicina all'espressione sinestesica vediamo come viene usato il canale uditivo con lo scopo di stimolare quello visivo (Foner, 1999). Il primo fornisce informazioni aggiuntive al secondo, permettendo all'individuo una migliore discriminazione sensoriale. Perlomeno questa è l'ipotesi che i ricercatori si sono posti di indagare nella ricerca. Arriviamo infine alla sperimentazione che più di tutte porta al limite il binomio visione-udito. Nello studio di Ward e Meijer (2010), le informazioni sonore vanno addirittura a sostituirsi a quelle visive. Testato su individui ipovedenti, oppure normovedenti bendati, il dispositivo converte le immagini dell'ambiente in suoni. Si ipotizza che in questo modo possa permettere, dopo un adeguato training, di vedere grossolanamente l'ambiente circostante. Questo è un perfetto esempio di un dispositivo di sostituzione sensoriale.

Analizziamo ora l'ampio utilizzo che si fa della visione negli studi un cui essa è l'unica modalità sensoriale coinvolta. Plouznikoff et al. (2005), studiano come la replicazione dei colori sinestesici possa migliorare le performance di memoria e ricerca visiva. Puntando a simulare la stessa sinestesia grafema-colore, Plouznikoff et al. (2006) studiano le interazioni uomo-macchina. Restando sempre nel paradigma

della visione utilizzata per migliorare la visione, vediamo come sia stato fatto un ulteriore passo in avanti nello studio di Hoffman et al. (2001), dove si è ipotizzato che l'immersione visiva in un ambiente totalmente virtuale potesse essere applicata perfino alla terapia del dolore.

3.4 Tipologia di partecipanti

Studi	Individui non sinestesici sani	Individui non sinestesici con deficit
Plouznikoff et al. (2005)	√	
Hoffman et al. (2001)	√	√
Foner (1999)	√	
Fallman et al. (2003)	√	
Matanski (2016)	√	
Ward et al. (2020)	√	
Plouznikoff et al. (2006)	√	
Ward & Meijer (2010)	√	√
Kose et al. (2018)	√	

Tabella 4: tipologia di partecipanti

In tutti gli studi visionati i partecipanti erano individui non sinestesici sani. Questo per osservare, prima e dopo la somministrazione di sinestesia artificiale, se erano avvenute modifiche in merito agli obiettivi di ricerca scelti. Le performance venivano comparate con quelle degli individui sinestesici, agli stessi test, osservando in letteratura i loro risultati. Gli unici studi dove sono stati testati anche individui non sinestesici con deficit li vediamo nello studio di Hoffman et al. (2001), per il trattamento del dolore cronico, e nella ricerca di Ward e Meijer (2010), dove sono stati testati, assieme a individui bendati, individui ipovedenti. Quest'ultimi (abbreviati con PF e CC) vennero studiati anche come casi singoli.

3.5 Obiettivi raggiunti

Gli studi che vengono riportati in Tabella 5 sono quelli che hanno prodotto delle sperimentazioni sufficientemente solide. Sia dal punto di vista metodologico che strumentale. Indipendentemente dal raggiungimento dell'obiettivo di ricerca preposto. Sono stati omessi gli studi di Weir et al. (2013) e Khare et al. (2019) in quanto puramente esplorativi e descrittivi solamente delle premesse del paradigma della sinestesia artificiale. Metodi e risultati di queste ricerche sono stati ampiamente discussi nel capitolo dedicato all'introduzione della sinestesia artificiale. Inoltre, non vengono discussi i risultati degli studi di Fallman et al. (2003) e Matanki (2016), in quanto non si sono posti alcuna misurazione prestazionale negli obiettivi di ricerca. Il loro scopo scientifico era solamente quello di mostrare una corretta strumentazione per simulare sinestesia artificiale, e constatare così il livello di coinvolgimento degli individui. Diverso invece l'apporto fornito dagli altri articoli, i quali descrivono sperimentazioni volte a studiare le possibili conseguenze cognitive della sinestesia artificiale, e nella maggior parte dei casi menzionano anche la significatività statistica dei loro risultati. Questi sono stati raggruppati in:

- studi che simulano la sinestesia grafema-colore;
- studi che hanno utilizzato SSD;
- studi che hanno utilizzato visori VR "puri".

Studi	Variabile Dipendente	Variabile Indipendente	Obiettivi raggiunti	Significatività Statistica
Plouznikoff et al. (2005)	Exp_1: Numero corretto di cifre ricordate. Exp_2: Tempo per la risposta corretta nell'individuare le cifre irregolari.	Applicazione del colore sinestesico alle cifre ad inchiostro nero	Nel test di ricreazione della matrice ha migliorato la media prestazionale del 30,8%. Nel test di ricerca del target del 47,4%.	Confermata
Hoffman et al. (2001)	Scale di dolore visiva analogica	Immersione del paziente nella realtà virtuale	La sinestesia artificiale ha attirato e orientato l'attenzione degli individui in modo così efficace da essere applicata con successo alla terapia del dolore.	Confermata
Foner (1999)	Distinguere tra oggetto reale e immagine fotocopiata	Applicazione del dispositivo sonificatore per la discriminazione visiva	Gli individui hanno colto uditivamente le differenze spettroscopiche tra oggetto reale e immagine fotocopiata. Nel secondo esperimento il visore non ha fornito informazioni extra rispetto alla visione.	Nel primo esperimento era oltre il caso. Nel secondo esperimento un individuo correttamente addestrato poteva produrre le stesse performance di un individuo che utilizzava il dispositivo.
Ward et al. (2020)	Performance nella discriminazione olfattiva	Applicazione del visore per la discriminazione olfattiva	I partecipanti eseguivano un compito di discriminazione olfattiva, prima senza aiuto e poi con il visore: la performance migliorava del 32,40% con l'aiuto del visore	Confermata
Plouznikoff et al. (2006)	Tempi di esecuzione per compiti di identificazione e selezione visiva	Applicazione del colore virtuale su elementi di macchina tramite visore	Miglioramento dei tempi di esecuzione per compiti di identificazione e selezione visiva del 30% e riduzione del carico cognitivo	Confermata

Studi	Variabile Dipendente	Variabile Indipendente	Obiettivi raggiunti	Significatività Statistica
Ward & Meijer (2010)	Capacità di riconoscimento degli oggetti senza l'utilizzo della vista	Applicazione del dispositivo "The vOICE"	Gli individui ipovedenti hanno usato il dispositivo per anni e hanno sviluppato la percezione della profondità e (solo una) delle sfumature dei colori. Questi traguardi si sono mantenuti anche dopo aver rimosso il dispositivo.	Non riportata
Kose et al. (2018)	Capacità di individuare visivamente la fonte sonora	Applicazione del visore VR che mostra virtualmente la fonte sonora	La generazione della forma sferica nella posizione della fonte sonora è accurata, tuttavia le limitazioni tecniche ne impediscono l'utilizzo per sperimentazioni	Non riportata

Tabella 5: variabili, obiettivi raggiunti e significatività statistica

3.5.1 Studi che simulano la sinestesia grafema-colore

Vediamo in primis lo studio di Plouznikoff et al. (2005), dove il prototipo viene testato su 8 partecipanti (individui non sinestesici), studenti laureati e non laureati, che hanno eseguito i compiti seduti a una scrivania. Nel primo esperimento, era richiesto di memorizzare una matrice 5x5 di numeri casuali da 0 a 9. Ogni individuo eseguiva l'esperimento due volte, ogni volta con una nuova matrice casuale. Nella prima parte dell'esperimento, il dispositivo non alterava la percezione dei colori, quindi i numeri venivano visti dall'individuo come ad inchiostro nero. Nella seconda parte, veniva applicato il colore sinestesico tramite il visore VSTHWD (Figura 10). L'individuo aveva 2 minuti per memorizzare la matrice, 2 minuti di riposo e poi 1 solo minuto per scrivere in una matrice vuota quante più cifre ricordava. Quest'ultima fase veniva eseguita senza indossare il visore. L'utilizzo della sinestesia artificiale sembra migliorare la media delle performance mnemoniche del



*Figura 10: MicroOptical SV6
"display opaco monoculare"
(Plouznikoff, 2005)*

30.8%. Nel secondo esperimento era richiesto di cercare visivamente le cifre diverse in mezzo a numerose cifre uguali. Ad esempio dalle 4 alle 8 cifre "5" nascoste tra le 60 e le 80 cifre "2". Ovviamente tutte posizionate casualmente e senza che si sovrapponevano. Anche in questo caso l'esperimento veniva eseguito due volte, prima con inchiostro nero e poi con l'applicazione dei colori sinestesici. L'utilizzo della sinestesia artificiale sembra diminuire notevolmente il tempo di ricerca visiva,

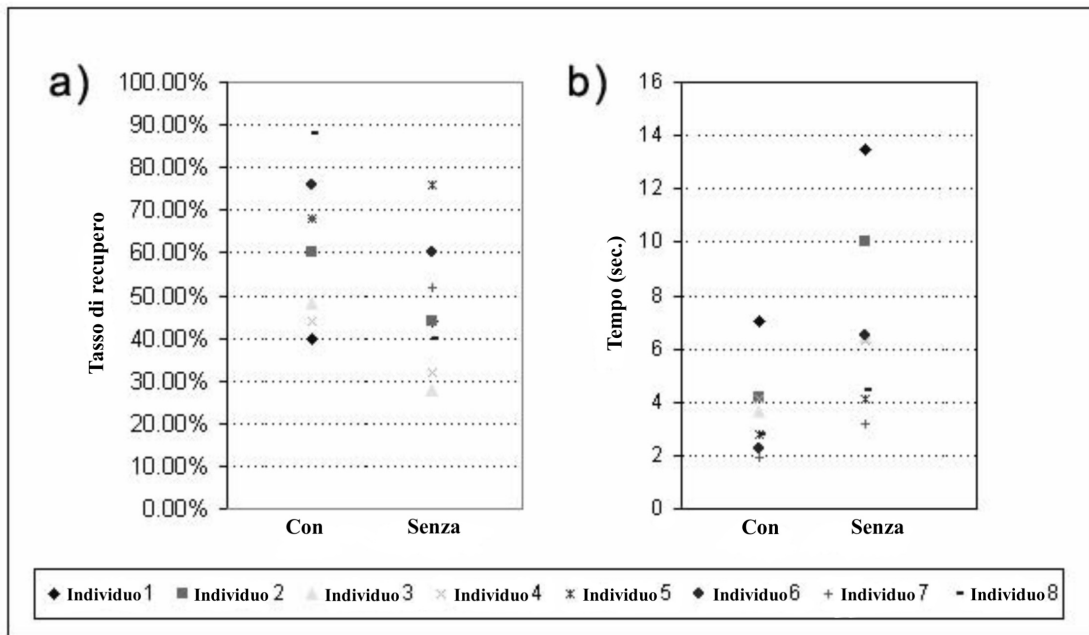


Grafico 1: (a) matrici con tasso di recupero & (b) compito di ricerca visiva con e senza sinestesia artificiale (Plouznikoff et al., 2005)

con una riduzione del 47.4%, passando da una media di 6.81 a 3.58 secondi. Per entrambi gli esperimenti è stato eseguito un T-test ($\alpha = 0.05$), il quale ha dimostrato che l'incremento delle performance mostrato era statisticamente significativo (Grafico 1). I ricercatori affermano che non solo la sinestesia artificiale ha migliorato le performance, così come sembra fare la sinestesia naturale, ma la prima dimostra di avere anche le maggiori caratteristiche di una vera sinestesia; cioè stabile nel tempo, fuori dal controllo volontario dell'individuo ma rappresentata nel suo spazio personale. In un altro studio, sempre di Plouznikoff et al. (2006), restiamo nel paradigma della simulazione di sinestesia grafema-colore. Gli individui erano divisi in due gruppi, il primo gruppo doveva eseguire una procedura di 5 minuti su un forno, che gli era stata precedentemente descritta. Ovviamente i ricercatori si erano accertati che tutti gli individui non avessero molta familiarità con l'utilizzo della macchina. Inoltre, per evitare di alterare i risultati, entrambi i gruppi indossavano il visore al

momento del compito. Tuttavia, nel primo gruppo questo presentava la visione dell'ambiente senza alcuna alterazione digitale. Proprio per fungere da gruppo di controllo. Invece, il secondo gruppo eseguiva la procedura con l'alterazione virtuale in tempo reale. I pulsanti da premere erano evidenziati di arancione, colore che si sovrapponeva totalmente al colore naturale del pulsante. I risultati (Tabella 6) mostrano che l'interferenza digitale ha abbassato notevolmente il tempo di esecuzione del compito, passando da una media di 17 a 12 secondi, per una riduzione del 29.4% (risultato statisticamente significativo).

	Soggetti				Media
Gruppo 1	17	16	16	19	17
Gruppo 2	12	11	14	11	12

Tabella 6: tempo (in secondi) impiegato per eseguire la procedura di 5 min (Plouznikoff et al., 2006)

3.5.2 Studi che hanno utilizzato SSD

Passiamo adesso a discutere i risultati degli studi che hanno utilizzato SSD per creare sinestesia artificiale. Nell'articolo di Foner (1999), i ricercatori hanno testato il dispositivo sulla differenziazione dei materiali. Nel primo esperimento gli individui dovevano comparare una foglia con la sua immagine fotocopiata ad alta risoluzione. Basandosi solamente sulla vista non sarebbe possibile notare differenze, tuttavia, potendo combinare il canale visivo con quello uditivo, grazie al dispositivo di sonificazione, gli individui erano in grado di cogliere le differenze spettrografiche. Da loro punto di vista le due immagini non "suonavano" nello stesso modo. I target venivano presentati alternativamente, con un intervallo di 10 secondi. In queste condizioni gli individui riuscivano sempre a distinguere tra oggetto reale e fotocopia. Producendo delle performance ampiamente superiori al caso. Nel secondo esperimento invece i ricercatori hanno somministrato una varietà di materiali e oggetti, comparati con delle stampe che presentassero gli stessi colori. La procedura è stata differente, circa 30 individui hanno sentito la sonificazione tramite altoparlanti, e solo alcuni indossavano anche il dispositivo. In questa situazione nessun individuo ha avuto difficoltà a identificare le differenze tra oggetto reale e fotocopia, anche dopo un training di pochi minuti. Tuttavia, questo era vero solo per le comparazioni dei colori più sgargianti; quelle che hanno coinvolto i colori meno saturi come il bianco e il grigio hanno prodotto risultati che approssimavano la casualità. Cioè viene spiegato dal fatto che questi ultimi tendono ad avere spettri di emissione piuttosto piatti. Dove, quindi, il visore risulta meno utile. I ricercatori concludono affermando che in seguito

ad un miglioramento del dispositivo, potremmo vederne un'applicazione nel campo militare, in particolare nella visione attraverso la mimetizzazione, oppure a livello medico, nella diagnosi del melanoma. Ward et al. (2020), invece, hanno utilizzato un naso elettronico insieme ad un visore VR, con l'obiettivo di migliorare la discriminazione olfattiva. I partecipanti potevano annusare la fragranza per un massimo di 5 secondi, ma ciò veniva eseguito per due volte, la prima senza l'ausilio della trasformazione visiva della fragranza, la seconda volta invece potendo sperimentare anche la forma sinestesica come aiuto sensoriale. I risultati mostrano che l'emulazione

artificiale della sinestesia odore-visione ha migliorato la discriminazione olfattiva del 32.40%, producendo delle performance statisticamente significative (Grafico 2). Inoltre, il sistema emula alcune delle caratteristiche della sinestesia naturale, come il fatto di essere passiva, percepita in tempo reale

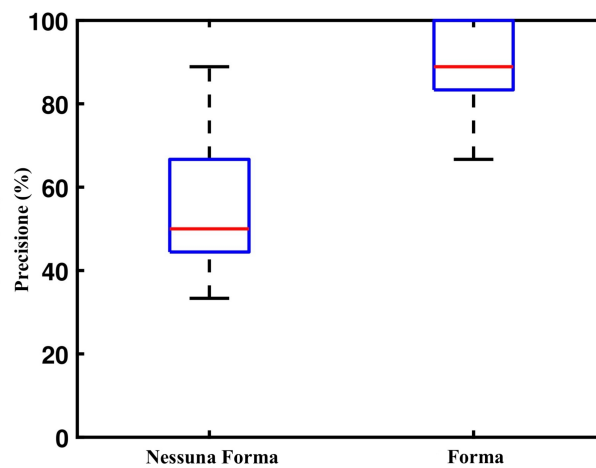


Grafico 2: mostra la mediana (linea rossa), i valori minimo e massimo (linee blu orizzontali) e il 25° e il 75° percentile indicati rispettivamente dai bordi inferiore e superiore dei riquadri blu (Ward et al., 2020)

e come un incremento del campo visivo dell'individuo. L'ultimo SSD lo vediamo nello studio di Ward e Meijer (2010), dove vengono descritti i risultati riportati dagli individui bendati e degli individui ipovedenti chiamati per riservatezza PF e CC. Questi ultimi hanno utilizzato il dispositivo per molto tempo. Dando prova del fatto che serve un ingente addestramento per usarlo correttamente. Gli individui bendati,

dopo un addestramento di circa 15 ore, erano in grado di localizzare oggetti su un tavolo e di identificarli. Alcuni partecipanti riportarono che in seguito all'adattamento, l'esperienza del dispositivo era simile alla visione, o per lo meno non sembrava più legata al canale uditivo (Auvray et al., 2007). Osservando i casi singoli di PF e CC abbiamo invece una dimostrazione dei risultati del dispositivo dopo un utilizzo molto più prolungato. Nei primi mesi si sono addestrati al riconoscimento di alcuni oggetti geometrici. Nei primi due anni le percezioni sono passate da forme astratte senza dettagli a forme non dettagliate in scale di grigi. Nei primi cinque anni mancavano sempre i dettagli ma comparvero le prime percezioni di fotopsie (sensazioni visive luminose). In seguito, sperimentarono la percezione della profondità, e sebbene il sistema abbia un certo ritardo della presentazione del suono, iniziarono a percepire anche il movimento. L'unico individuo che riporta, ad un certo punto, di aver sperimentato anche la percezione dei colori è PF. Tuttavia, questo più che un effetto diretto del dispositivo, appare come un adattamento del cervello, che altera la percezione sfruttando le immagini in memoria, cioè quelle che ha visionato prima che l'individuo diventasse ipovedente. Ciò che risulta particolarmente interessante nel contesto attuale è che sia PF che CC affermano di essere in grado di "vedere i suoni" anche quando non utilizzano The vOICE. Sembra che i loro cervelli abbiano interiorizzato le regole del dispositivo per la mappatura tra udito e visione, e che tali regole vengano applicate sempre. Inoltre, questa esperienza sembra riportare alcune delle caratteristiche della sinestesia naturale, come la non volontarietà, la percezione della "visione" come se fosse nella mente e non negli occhi, e la stabilità che dimostra nel tempo.

3.5.3 Studi che hanno utilizzato visori VR “puri”

Vediamo ora i risultati di una ricerca che ha utilizzato il paradigma della sinestesia artificiale per trattare il dolore. Nello studio di Hoffman et al. (2001), è stata testata la Realtà Virtuale immersiva in pazienti sottoposti al trattamento di cure per ustioni. Normalmente a questi pazienti si somministrano oppioidi per permettergli di sopportare la terapia, tuttavia, questi hanno un limite in quanto a somministrazione prolungata, senza considerare i possibili effetti collaterali. Utilizzando VR invece, si è vista una immediata riduzione del dolore percepito in terapia, senza effetti collaterali.

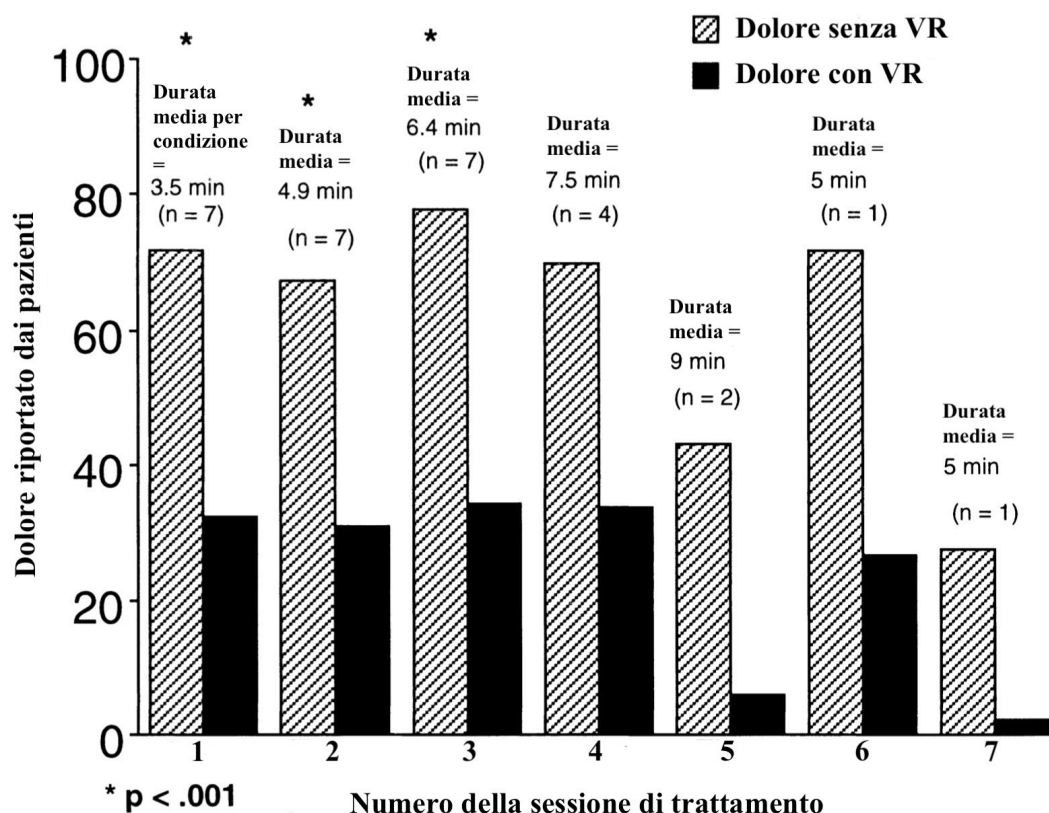


Grafico 3: l'effetto analgesico della VR rimane efficace dopo trattamenti ripetuti (Hoffman et al., 2001)

Nello specifico, un individuo veniva immerso in uno *Spider-World* virtuale e gli altri sei in uno *Snow-World*. In entrambi era possibile interagire con l'ambiente e generare animazioni tridimensionali. Durante questa immersine i pazienti eseguivano, assistiti da professionisti, gli esercizi per la terapia. La terapia con VR è stata eseguita ripetutamente, per un tempo sempre maggiore, alternata con quella classica in modo da avere una situazione di controllo. I pazienti non solo hanno riportato sulla scala del dolore dei valori molto inferiori, ma sorprendentemente, la ripetuta somministrazione del VR non ha diminuito il suo effetto analgesico nel tempo (Grafico 3). La distrazione provocata dal mondo virtuale ha permesso ai pazienti di pensare meno al dolore e di rendere meno spiacevole il trattamento. I risultati di ogni sessione di terapia sono descritti come statisticamente significativi. L'ultimo studio che verrà descritto è quello di Kose et al. (2018), tuttavia, questo non si è dimostrato adeguato a fornire dei risultati generalizzabili. Esso spiega la sperimentazione di un ottimo sistema per la replicazione della cromestesia; tuttavia, la strumentazione possiede delle limitazioni tecniche che ne impediscono l'utilizzo con gruppi sperimentali. La generazione delle forme sferiche che caratterizzano una fonte sonora è accurata, ma possiede dei ritardi non trascurabili che portano l'individuo a distrarsi. Inoltre, presenta poca distinzione tra i colori che rappresentano i suoni e mancano le coordinate per la profondità. L'aspetto che più di tutti viene preservato è indubbiamente l'immersione che genera il visore VR. Per questo motivo è imperativo migliorarne la tecnologia, così da poterlo applicare in un futuro allo studio della sinestesia.

4 Discussione

Questa revisione sistematica si è posta l'obiettivo di raccogliere ed esaminare degli studi che riportassero i lati più interessanti e innovativi nello studio della sinestesia. Avendo trovato nella maggior parte delle ricerche risultati con una statistica significativa, si può affermare che (seppur ai primi stadi) l'utilizzo delle recenti tecnologie possa aprire la strada ad un nuovo tipo di ricerca. I risultati non sono certamente esenti da critiche, ma è solo sviluppando interesse nei ricercatori che un campo di studio può continuare a essere esplorato. Nell'ultimo ventennio l'utilizzo di tecnologie virtuali è aumentato a dismisura, portando anche all'utilizzo di visori AR/VR per lo studio della multisensorialità. Tramite queste ricerche si è potuto constatare quanto si possa stimolare la plasticità cerebrale (Weir et al., 2013) e indirettamente comprendere sempre di più il funzionamento del cervello. Inoltre, non dobbiamo mettere in secondo piano le prospettive dell'applicazione di queste tecnologie per il trattamento di individui con deficit. In questa revisione sono stati riportati gli studi di Hoffman et al. (2001) e Ward e Meijer (2010) al riguardo, ma le applicazioni future daranno sicuramente spazio ad altri ricercatori ed ulteriori paradigmi. In ultima analisi, ricerche che mirano a indagare i possibili miglioramenti delle prestazioni in individui che sperimentano sinestesia (sia essa naturale o artificiale), una volta che iniziano a raccogliere dati statisticamente significativi, portano validità e affidabilità alla ricerca attuale e a quella futura. La ricerca sulla sinestesia tramite tecnologie virtuali rappresenta un campo di ricerca nuovo e stimolante, ma proprio per la sua natura innovativa è soggetto a critiche. Ho voluto dare spazio alle contestazioni sulla

veridicità della sinestesia artificiale, dove viene messo in dubbio che l'addestramento, l'ipnosi o l'uso di droghe possano generare un'esperienza sinceramente definibile sinestesica (Deroy & Spence, 2013). Sempre su questo tema porto un'analisi di Kirsch et al. (2020), dove mettono in dubbio l'utilizzo degli SSD come forme di sinestesia artificialmente indotta. Affermando che questi non possiedono le caratteristiche necessarie per generare un'esperienza classificabile come sinestesica. Anzi, i ricercatori concludono che le due dovrebbero essere indipendenti. Infine, da una meta-analisi di Ward et al. (2019), si portano alla luce le criticità sulla presunta superiorità mnemonica che possiedono gli individui sinestesici. Affermando che un miglioramento mnemonico c'è, ed è supportato statisticamente, ma questo va analizzato nel modo corretto quando si fa ricerca e non può essere citato in modo superficiale. Nello studio di Deroy e Spence (2013), i ricercatori mettono in evidenza l'errore di utilizzare la terminologia "sinestesia" con leggerezza. Questa deve essere presentata sempre assieme ad una robusta sperimentazione, che dimostri inequivocabilmente che il fenomeno che si sta analizzando possiede le caratteristiche distintive della sinestesia. Come, ad esempio, usare le parole "diventare un individuo sinestesico", quando in letteratura non ci sono prove certe che la sinestesia possa essere genuinamente acquisita; a meno che non si possedano delle predisposizioni, e che questa si sviluppi poi in un determinato periodo critico. Mettono inoltre in dubbio i risultati che si basano sulla "interferenza Stroop", affermando che le risposte comportamentali in seguito alla loro somministrazione, non possiedono tutte le caratteristiche distintive della sinestesia. Potrebbero quindi essere classificate semplicemente come corrispondenze cross-modali o intra-modali. In merito

all'utilizzo di ipnosi o droghe, come già avevamo visto nel capitolo dedicato, i ricercatori affermato che le sperimentazioni a riguardo non forniscono abbastanza prove per classificare come sinestesiche le esperienze che ne conseguono, anzi dichiarano che potrebbero banalmente essere nulla di più di una "immaginazione mentale" dovuta all'ipnosi o all'effetto allucinogeno delle droghe. Criticano l'utilizzo del termine sinestesia come una sorta di ombrello, al di sotto del quale inserire qualsiasi fenomeno che assomiglia anche lontanamente a questa condizione. Insistono sull'importanza della "consapevolezza" nell'esperienza sinestesica; questa deve essere presente a livello percettivo nell'individuo perché una condizione possa essere definita sinestesica. Tuttavia, il loro studio non può, in tutta onestà, escludere la possibilità che addestramento, ipnosi o droghe possano generare un'esperienza sinestesica. Essendoci molta controversia sull'argomento, magari in un prossimo futuro si individueranno metodi più solidi, sperimentazioni ancora più valide che possano così erigere un ponte tra individui sinestesici e non sinestesici. Nell'analisi di Kirsch et al. (2020), le criticità degli SSD come forma di sinestesia artificiale viene racchiusa nella dimostrazione che questi possiedono solamente alcuni dei criteri che definiscono un'esperienza sinestesica. L'utilizzo degli SSD sembra riportare una certa solidità solamente nel garantire un'associazione tra stimolo induttore e concorrente e nella sua costanza nel tempo. Tuttavia, sono assenti altre caratteristiche fondamentali, quali l'automaticità del processo e l'unicità dell'associazione. In oltre, la documentazione a riguardo si basa sui report soggettivi dei pazienti, di conseguenza manca una prova dell'effettiva estensione della consapevolezza percettiva. Per concludere, menzioniamo la meta-analisi di Ward et al. (2019), dove i ricercatori,

confrontando gli individui sinestesici con gruppi di controllo (non-sinestesici), hanno descritto un vantaggio sia per la memoria a lungo termine (episodica) che per quella di lavoro. Tuttavia, i benefici della memoria episodica superavano ampiamente quelli della memoria di lavoro, che si discostava di poco dal gruppo di controllo. Preso atto di questi dati, i ricercatori commentano che spesso si riscontra una difficoltà del distinguere tra le due tipologie di memoria nei paradigmi sperimentali, e questo può portare a una letteratura inconsistente e fuorviante. Inoltre, dichiarano che gli effetti della sinestesia sono pervasivi, i miglioramenti della memoria che essa comporta si estendono equamente per tutti gli stimoli, per tutte le tipologie di test mnemonici e per tutte le tipologie di sinestesia testate finora. Di conseguenza, serviranno analisi future più precise e più consapevoli per chiarire maggiormente le differenze tra individui sinestesici e non sinestesici.

5 Limiti dello studio

La mia ricerca verte su tematiche che spesso sono difficilmente categorizzabili e giustamente questo porta i ricercatori a mettere in dubbio la solidità di alcune ipotesi o affermazioni. Il punto più critico della mia revisione è sicuramente quello di non poter discutere un vasto numero di studi. La domanda di ricerca scelta ha limitato molto la tipologia di articoli selezionati. Lo studio della sinestesia viene effettuato da diversi decenni, ma la natura delle tecnologie predisposte all'immersione dell'individuo in un ambiente virtuale è recente. Sicuramente è recente una tecnologia a basso costo e facilmente indossabile, che ne permette l'utilizzo in contesti sperimentali differenti. Per questo motivo, il debole organico di ricerche al riguardo non rende possibile una generalizzazione dei risultati. Sarà necessario aspettare che le tecnologie migliorino ulteriormente e che aumentino le ricerche mirate a studiare la sinestesia tramite visori a realtà virtuale e aumentata.

6 Prospettive future

Il campo dello studio della sinestesia è in costante evoluzione, con nuove ricerche che rivelano sempre più dettagli sui meccanismi sottostanti a questo fenomeno affascinante. Mentre il presente lavoro ha esaminato le basi cognitive, neurali e le applicazioni della sinestesia, è fondamentale esplorare le prospettive future che promettono di portare questa area di ricerca a nuovi livelli. Uno dei domini più interessanti per queste prospettive è l'integrazione della sinestesia con le reti neurali artificiali e l'Intelligenza Artificiale (IA). L'Intelligenza Artificiale è una disciplina in crescita, con applicazioni in una vasta gamma di settori, tra cui il riconoscimento dei modelli e l'apprendimento automatico. La sinestesia offre l'opportunità di arricchire l'interazione tra esseri umani e macchine. Ad esempio, potremmo immaginare sistemi che utilizzano le associazioni sinestesiche per rendere le interfacce uomo-macchina più intuitive ed efficaci, così come abbiamo visto nella ricerca di Plouznikoff et al. (2006). Questo potrebbe migliorare notevolmente l'esperienza dell'utente in vari contesti, dall'uso di dispositivi tecnologici alla navigazione in ambienti virtuali. Su quest'ultimo punto è importante sottolineare quanto l'avanzamento della tecnologia e la facilità nel creare realtà virtuali potrebbe migliorare la ricerca. I modelli generativi garantirebbero ai ricercatori di creare l'ambiente virtuale migliore per i loro parametri di ricerca, in modo rapido ed economico. Nel dominio delle reti neurali artificiali, vediamo un interessante campo di ricerca nella progettazione di modelli neurali che simulano la sinestesia. Come riportato dell'articolo di Shriki et al. (2016), dove viene studiato un modello di rete neurale che rappresenta due sistemi neurali connessi in

modo ricorrente. Le interazioni nella rete evolvono secondo regole di apprendimento che ottimizzano la sensibilità sensoriale. Analizzando così diversi scenari, come la deprivazione sensoriale o la plasticità cerebrale. Studi come questo, possono offrire nuovi approcci allo studio della sinestesia, vedendola non più come una deviazione dalla connettività considerata canonica, ma piuttosto come uno stato funzionale del cervello, che può emergere come conseguenza dell'ottimizzazione dell'elaborazione delle informazioni sensoriali.

7 Conclusioni

Questa ricerca sistematica strutturata si è posta una domanda di ricerca: se le recenti tecnologie a realtà virtuale e aumentata potessero fornire dei nuovi approcci allo studio della sinestesia. In particolare, concentrandosi sulla sinestesia artificiale e sui possibili miglioramenti delle performance cognitive in seguito alla sua somministrazione. I risultati raccolti hanno confermato, nella maggior parte degli studi, che un individuo che sperimenta una condizione di sinestesia artificiale migliora le proprie performance in compiti mnemonici, di ricerca visiva, di controllo attenzionale e di discriminazione sensoriale. Sebbene ci siano alcune limitazioni da considerare, quali: metodologie di ricerca inadeguate oppure risultati difficilmente generalizzabili, questa ricerca apre la strada per ulteriori indagini future su applicazioni della tecnologia allo studio della sinestesia. Risulta fondamentale utilizzare un approccio rigoroso nella scelta della metodologia sperimentale, in modo da ideare test che possano comprendere un grande numero di individui, divisi in gruppo sperimentale e di controllo, evitando il più possibile bias o fattori che possano alterare le variabili sperimentali.

Riferimenti bibliografici

- Auvray, M., Hanneton, S., & O'Regan, J. K. (2007). Learning to perceive with a visuo—auditory substitution system: localisation and object recognition with ‘The Voice’. *Perception*, 36(3), 416-430.
- Barnett, K. J., Finucane, C., Asher, J. E., Bargary, G., Corvin, A. P., Newell, F. N., & Mitchell, K. J. (2008). Familial patterns and the origins of individual differences in synaesthesia. *Cognition*, 106(2), 871-893.
- Bor, D., Rothen, N., Schwartzman, D. J., Clayton, S., & Seth, A. K. (2014). Adults can be trained to acquire synesthetic experiences. *Scientific reports*, 4(1), 7089.
- Calvert, G., Spence, C., & Stein, B. E. (Eds.). (2004). *The handbook of multisensory processes*. MIT press.
- Deroy, O., & Spence, C. (2013). Training, hypnosis, and drugs: artificial synaesthesia, or artificial paradises?. *Frontiers in psychology*, 4, 660.
- Dixon, M. J., Smilek, D., & Merikle, P. M. (2004). Not all synaesthetes are created equal: Projector versus associator synaesthetes. *Cognitive, Affective, & Behavioral Neuroscience*, 4(3), 335-343.
- Driver, J., & Spence, C. (1994). Spatial synergies between auditory and visual attention. *Attention and performance XV: Conscious and nonconscious information processing*
- Driver, J., & Spence, C. (1998). Cross-modal links in spatial attention. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series B: Biological Sciences*, 353(1373), 1319-1331.

- Fallman, D., Jalkanen, K., Lörstad, H., Waterworth, J., & Westling, J. (2003). The Reality Helmet: A wearable interactive experience. In ACM SIGGRAPH 2003 Sketches & Applications (pp. 1-1).
- Foner, L. N. (1999). Artificial synesthesia via sonification: A wearable augmented sensory system. *Mobile Networks and Applications*, 4, 75-81.
- Hoffman, H. G., Patterson, D. R., Carrougher, G. J., & Sharar, S. R. (2001). Effectiveness of virtual reality-based pain control with multiple treatments. *The Clinical journal of pain*, 17(3), 229-235.
- Hubbard E. M. (2007). Neurophysiology of synesthesia. *Current psychiatry reports*, 9(3), 193–199. <https://doi.org/10.1007/s11920-007-0018-6>
- Hubbard, E. M., & Ramachandran, V. S. (2005). Neurocognitive mechanisms of synesthesia. *Neuron*, 48(3), 509–520. <https://doi.org/10.1016/j.neuron.2005.10.012>
- Jacobs, L., Karpik, A., Bozian, D., & Gøthgen, S. (1981). Auditory-visual synesthesia sound-induced photisms. *Archives of Neurology*, 38(4), 211-216.
- Kallio S, Koivisto M, Kaakinen JK. 2017 Synaesthesia-type associations and perceptual changes induced by hypnotic suggestion. *Sci. Rep.* 7, 17310. (doi:10.1038/s41598-017-16174-y)
- Khare, V., Fraguada, L. E., & Bigger, E. E. (2019, September). Syn (es) thetic reality: simulating synesthesia for the non synesthetic. In *Proceedings of the 2019 ACM International Symposium on Wearable Computers* (pp. 290-295).

- Kirsch, L. P., Job, X., & Auvray, M. (2020). Mixing up the senses: Sensory substitution is not a form of artificially induced synaesthesia. *Multisensory Research*, 34(3), 297-322.
- Kose, A., Tepljakov, A., Astapov, S., Draheim, D., Petlenkov, E., & Vassiljeva, K. (2018). Towards a synesthesia laboratory: Real-time localization and visualization of a sound source for virtual reality applications. *Journal of Communications Software and Systems*, 14(1), 112-120.
- Matanski, V. (2016). Exploring Synesthesia utilizing software Technologies. In *Scientific Conference Innovative ICT in Buisness and Education: Future Trends, Applications and Implementations* (pp. 55-68).
- Mattingley, J. B., Rich, A. N., Yelland, G., & Bradshaw, J. L. (2001). Unconscious priming eliminates automatic binding of colour and alphanumeric form in synaesthesia. *Nature*, 410(6828), 580-582.
- Plouznikoff, A., Plouznikoff, N., Robert, J. M., & Desmarais, M. (2006, April). Enhancing human-machine interactions: Virtual interface alteration through wearable computers. In *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems* (pp. 373-376).
- Plouznikoff, N., Plouznikoff, A., & Robert, J. M. (2005, October). Artificial grapheme-color synesthesia for wearable task support. In *Ninth IEEE International Symposium on Wearable Computers (ISWC'05)* (pp. 108-111). IEEE.
- Ramachandran, V. S., & Hubbard, E. M. (2003). Hearing Colors, Tasting Shapes. *Scientific American*, 288(5), 52–59. <http://www.jstor.org/stable/26060283>

- Reif, J. H., & Alhalabi, W. (2016). Advancing Attention Control Using VR-Induced Artificial Synesthesia.
- Ro, T., Farnè, A., Johnson, R. M., Wedeen, V., Chu, Z., Wang, Z. J., ... & Beauchamp, M. S. (2007). Feeling sounds after a thalamic lesion. *Annals of Neurology: Official Journal of the American Neurological Association and the Child Neurology Society*, 62(5), 433-441.
- Rogowska, A. (2011). Categorization of Synaesthesia. *Review of General Psychology*, 15(3), 213–227. <https://doi.org/10.1037/a0024078>
- Rolland, J. P., Holloway, R. L., & Fuchs, H. (1995, December). Comparison of optical and video see-through, head-mounted displays. In *Telem manipulator and Telepresence Technologies* (Vol. 2351, pp. 293-307). SPIE.
- Rothen N, Schwartzman DJ, Bor D, Seth AK. 2018 Coordinated neural, behavioral, and phenomenological changes in perceptual plasticity through overtraining of synesthetic associations. *Neuropsychologia* 111, 151–162. (doi:10.1016/j.neuropsychologia.2018.01.030)
- Rouw, R., & Scholte, H. S. (2010). Neural basis of individual differences in synesthetic experiences. *Journal of Neuroscience*, 30(18), 6205-6213.
- Schwartzman, D. J., Bor, D., Rothen, N., & Seth, A. K. (2019). Neurophenomenology of induced and natural synaesthesia. *Philosophical Transactions of the Royal Society B*, 374(1787), 20190030.
- Shriki, O., Sadeh, Y., & Ward, J. (2016). The emergence of synaesthesia in a neuronal network model via changes in perceptual sensitivity and plasticity. *PLoS computational biology*, 12(7), e1004959.

- Simner, J., & Bain, A. E. (2013). A longitudinal study of grapheme-color synesthesia in childhood: 6/7 years to 10/11 years. *Frontiers in human neuroscience*, 7, 603.
- Simner, J., Mulvenna, C., Sagiv, N., Tsakanikos, E., Witherby, S. A., Fraser, C., ... & Ward, J. (2006). Synaesthesia: The prevalence of atypical cross-modal experiences. *Perception*, 35(8), 1024-1033.
- Sinke, C., Halpern, J. H., Zedler, M., Neufeld, J., Emrich, H. M., & Passie, T. (2012). Genuine and drug-induced synesthesia: a comparison. *Consciousness and cognition*, 21(3), 1419-1434.
- Smilek, D., Dixon, M. J., Cudahy, C., & Merikle, P. M. (2001). Synaesthetic photisms influence visual perception. *Journal of cognitive neuroscience*, 13(7), 930-936.
- Spence, C. (2002). Multisensory attention and tactile information-processing. *Behavioural brain research*, 135(1-2), 57-64.
- Spence, C. (2011). Crossmodal correspondences: A tutorial review. *Attention, Perception, & Psychophysics*, 73, 971-995
- Spence, C. (2021). Scenting Entertainment: Virtual Reality Storytelling, Theme Park Rides, Gambling, and Video-Gaming. *i-Perception*, 12(4), 20416695211034538
- Wagar, B. M., Dixon, M. J., Smilek, D., & Cudahy, C. (2002). Colored photisms prevent object-substitution masking in digit-color synesthesia. *Brain and cognition*, 48(2-3), 606-611.
- Ward, J., & Meijer, P. (2010). Visual experiences in the blind induced by an auditory sensory substitution device. *Consciousness and cognition*, 19(1), 492-500.
- Ward, J., Field, A. P., & Chin, T. (2019). A meta-analysis of memory ability in synaesthesia. *Memory*, 27(9), 1299-1312.

Ward, R. J., Jjunju, F. P. M., Griffith, E. J., Wuerger, S. M., & Marshall, A. (2020).

Artificial odour-vision syneesthesia via olfactory sensory argumentation. *IEEE*

Sensors Journal, 21(5), 6784-6792.

Weir, P., Sandor, C., Swoboda, M., Nguyen, T., Eck, U., Reitmayr, G., & Day, A.

(2013). Burnar: Involuntary heat sensations in augmented reality (pp. 43-46).

IEEE.