



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA

Dipartimento di Psicologia dello Sviluppo e della Socializzazione

Dipartimento di Psicologia Generale

Corso di laurea Magistrale in Psicologia Clinica dello Sviluppo

Tesi di laurea Magistrale

Effetti transienti sulle abilità oculo-motorie fini di un videogioco non d'azione in bambini del primo anno di scuola primaria

Transient effects of a non-action video game on fine oculo-motor skills in first-year primary school children.

Relatore

Prof. Andrea Facoetti

Correlatori

Dott.ssa Sara Bertoni

Dott.ssa Giovanna Puccio

Dott. Sandro Franceschini

Laureanda: Zarrini Marta

Matricola: 2020978

Anno Accademico 2021/2022

INDICE

Abstract.....	3
Capitolo I.....	4
Le abilità sensorimotorie.....	4
1.1 Basi neuronali delle abilità sensorimotorie.....	9
1.2 Abilità somatosensoriali e sviluppo atipico.....	15
1.3 Il gioco e le abilità sensorimotorie.....	22
Capitolo II.....	30
Effetti a breve termine del gioco sulle abilità oculo-motorie.....	30
2.1 Obiettivi e ipotesi.....	30
2.2 Disegno sperimentale.....	30
2.3 Metodo.....	30
2.3.1 Partecipanti.....	30
2.3.2 Procedura.....	31
2.3.3 Materiali.....	32
Capitolo III.....	35
Risultati.....	35
Capitolo IV.....	39
Discussione e conclusioni.....	39
BIBLIOGRAFIA.....	42

Abstract

Il seguente progetto di tesi si pone l'obiettivo di valutare gli effetti a breve termine di un videogioco non d'azione (*Bust-a-Move*) sulle abilità sensorimotorie, in un campione di bambini frequentanti il primo anno della scuola primaria. Nell'elaborato si sono considerate le seguenti variabili: l'età, il QI verbale e visuo-spaziale, l'attenzione visuo-spaziale e l'attenzione temporale, le abilità di destrezza manuale e di mira, la memoria fonologica a breve termine, le abilità fonologiche e il funzionamento della via sublessicale. Il progetto di tesi è stato strutturato usando uno studio randomizzato controllato con doppio cieco. Ogni bambino è stato valutato in tre fasi sperimentali diverse, nelle quali poteva essere sottoposto a tre condizioni diverse, ovvero baseline, attività di gioco con un videogioco d'azione, oppure ad un videogioco non d'azione. In questo lavoro di tesi verranno presentati i risultati ottenuti immediatamente dopo l'attività di gioco con il videogioco non d'azione. Il campione è stato diviso in due gruppi (Bravi giocatori, Cattivi giocatori) sulla base della mediana dei punteggi ottenuti durante il videogioco. Dai risultati ottenuti nella prova del salvadanaio, emerge che vi è un significativo aumento della velocità di esecuzione del *task*, in entrambi i gruppi, con la mano dominante rispetto a quella non dominante, senza un decremento dell'accuratezza. Inoltre è emerso un aumento significativo della velocità di esecuzione del compito del salvadanaio nella fase post-NAVG, rispetto alla fase di baseline. Tale effetto è stato riscontrato in entrambi i gruppi del campione. Questo risultato suggerisce che il gioco utilizzato, ovvero *Bust-a-Move*, influisce sulle abilità sensorimotorie indagate potenziandole.

Capitolo I

Le abilità sensorimotorie

Vecchiato ritiene che “l’esperienza sensorimotoria è la somma di innumerevoli eventi che già nei primi giorni di vita favoriscono l’interazione tra la componente somatica, in senso biologico e neurologico, e quella psichica, che ha la sua prima sede all’interno dei complessi collegamenti tra circuiti neurovegetativi e somatosensoriali” (Vecchiato, 2007). Alla base dell’acquisizione delle abilità motorie vi è la plasticità neuronale, ciò comporta una serie di cambiamenti morfologici, come ad esempio un aumento della sostanza grigia (Engelkamp, 1998) e cambiamenti a livello sinaptico (Holtmaat & Svoboda, 2009).

Il movimento, che è inizialmente un riflesso derivante dal determinismo genetico, può essere attivato da una stimolazione proveniente da recettori sensoriali esterni o interni che direzionano l’informazione ai centri sottocorticali, favorendo un coordinamento tra sistema somatosensoriale e neurovegetativo. Ci appaiono più interessanti le stimolazioni esterne perché quelle interne, nei primi mesi di vita, sono prevalentemente di tipo fisiologico, come ad esempio il sonno o la fame, e trovano comunque risposta all’esterno del bambino. Queste esperienze sono di natura propriocettiva e cinestetica, quindi legate al sistema di raccolta delle sensazioni derivanti dal corpo e dei movimenti che si generano. Il bambino interiorizza le sequenze del tipo movimento-contatto-sensazione-movimento e le ripete per ritrovare la soddisfazione e il piacere che ne deriva. A rendere piacevole il movimento non è soltanto la sua attivazione, ma anche il sistema di collegamento tra circuiti somatosensoriali e i circuiti neurovegetativi. L’apice dell’espressività corporea del bambino viene raggiunta nel gioco sensorimotorio, in cui egli mantiene un costante collegamento tra la dimensione somatica e psichica, favorendo così lo sviluppo di una percezione globale di sé. Si viene così a formare un’unità psicofisica grazie all’unione delle sensazioni propriocettive e cinestetiche del corpo con gli stati d’animo del bambino. Il movimento diventa in questo senso la strategia privilegiata per conoscere sé stesso e il mondo che lo circonda (Vecchiato, 2007).

Le abilità sensorimotorie elaborano input provenienti da diversi canali sensoriali (Ernst & Bühlhoff, 2004), tipicamente di tipo tattile, visivo, vestibolare e propriocettivo e spesso

comprendono una risposta motoria (Guilbert, Jouen, & Molina, 2018). Sono interazioni fisiche specifiche con l'ambiente, come il parlare o lo scrivere, nuotare e camminare, guidare una bicicletta o una macchina, utilizzare un martello o un bisturi chirurgico. È un termine che racchiude in sé diverse abilità sensoriali e cognitive; spesso vi è una sovrapposizione dei processi sensoriali, motori, cognitivi e neurologici sottostanti (Diamond, 2000; Butler, James, & James, 2011; Kiefer & Pulvermüller, 2012): ad esempio, un'azione dipende da informazioni sensoriali accurate che a loro volta dipendono dall'azione e dall'esecuzione motoria (Postle, McMahon, Ashton, Meredith & de Zubicaray, 2008; Gibson, 2014). Molte delle azioni che compiamo quotidianamente sono funzioni sensorimotorie, le quali coinvolgono anche la componente cognitiva, ne è un esempio il processo di scrittura, nel quale i processi sensorimotori sono coordinati con quelli linguistici, per ciascuno dei quali sottostà l'attivazione di una regione cerebrale; l'unica abilità sensomotoria che non implica alcuna funzione cognitiva è il riflesso, quindi una risposta involontaria ad uno stimolo. L'integrazione di processi sensorimotori e cognitivi nell'esecuzione di un'azione sfuma i limiti e le differenze tra i processi stessi.

Una delle caratteristiche principali delle abilità sensorimotorie è che sono soggette a miglioramento grazie alla pratica. I cambiamenti legati all'esercizio e alla pratica possono essere osservati tramite alcune caratteristiche, in primo luogo le *performance* diventano più rapide e veloci (Crossman, 1959; Heathcote, Brown, & Mewhort, 2000), oltre che più precise e corrette nell'esecuzione; si riesce a giudicare in autonomia se una nostra prestazione è stata più veloce o più lenta rispetto a tentativi precedenti, ma per fare una valutazione dell'accuratezza si necessita di informazioni aggiuntive, come ad esempio dei risultati o feedback di terzi (Trowbridge & Cason, 1932; Sigrist, Rauter & Riener, Wolf, 2013). Le prestazioni che implicano l'attivazione di abilità sensorimotorie spesso presentano una diminuzione della variabilità e maggiore fluidità, al netto di un aumento dell'accuratezza (Schneider & Zernicke, 1932). Inoltre, spesso, i compiti motori diventano progressivamente più economici, ne è un esempio il fatto che il numero di muscoli coinvolti nell'esecuzione di un compito diminuisce a fronte di un aumento della sua pratica (Osu, Franklin, Kato, Gomi, Domen, Yoshioka & Kawato, 1989). L'automatizzazione di un'abilità implica la possibilità di eseguire diversi compiti riducendo o eliminando l'interferenza tra questi durante il loro svolgimento. Un aumento dell'automatizzazione può avere ulteriori significati, come ad esempio una riduzione

della consapevolezza cosciente durante la *performance*; direzionare l'attenzione su certi aspetti del compito sensorimotorio può spesso produrre interferenze (Wulf, McNevin & Shea, 2001; Heuer & Sülzenbrück, 2012). Un aumento della pratica è correlato sia a un decremento e ad un incremento dell'attività di alcune aree cerebrali, sia alla riorganizzazione di queste.

Le abilità sensorimotorie comprendono abilità fino-motorie e grosse-motorie, con ulteriori differenziazioni e specificazioni in merito alla velocità, forza, destrezza, coordinazione e tempismo (Krampe, 2002; Brookman, McDonald, McDonald, & Bishop 2013). Le capacità fino-motorie sono movimenti piccoli e diretti eseguiti con le mani e le dita, come ad esempio quelli che si verificano durante la manipolazione di un oggetto (Luo, Jose, Huntsinger, & Pigott, 2007). Tali abilità richiedono la capacità di percepire gli oggetti, dal punto di vista tattile e visivo, in relazione alla posizione delle dita, della mano e della parte inferiore del braccio e di integrare queste diverse informazioni, in tal senso possono essere considerate abilità sensorimotorie. In letteratura tra le abilità sensorimotorie fini vengono citate le abilità di coordinazione oculo-manuale. È noto da tempo che i movimenti rapidi degli arti dipendano in modo significativo dalle informazioni provenienti dagli occhi (Woodworth, 1899). La coordinazione oculo-manuale è un caso particolare di coordinazione (funzione sensorimotoria), in cui l'attività dell'arto si coordina con la vista, basandosi sull'integrazione tra percezione visiva e attività della mano. Le abilità di destrezza manuale sono di particolare importanza per imparare a scrivere, sono quindi fondamentali per condurre con successo il percorso scolastico. Molta della ricerca esistente si basa sulla coordinazione occhio-mano coinvolta in movimenti verso *target* visivi. I risultati di questi studi hanno evidenziato che quasi sempre gli occhi si muovono verso e raggiungono il *target* prima che lo faccia la mano, questo perché i movimenti oculari sono molto veloci. Tuttavia questi risultati sono stati ottenuti da condizioni sperimentali controllate e potrebbero non consentire inferenze sul ruolo che i movimenti oculari svolgono in circostanze più naturali e meno vincolate. Esistono due tipi di informazioni rilevanti per il controllo del movimento degli arti che possono essere ottenute dagli occhi: retinico e extraretinico. Le informazioni retiniche derivano da *pattern* di stimolazione della retina, come ad esempio la posizione e il movimento degli oggetti nell'ambiente (incluso un arto e il bersaglio di un movimento mirato). Al contrario, le informazioni extraretiniche riguardano la posizione degli occhi.

Sono segnali propriocettivi trasmessi dalle strutture anatomiche nei muscoli oculari. La localizzazione accurata degli oggetti nello spazio rispetto al proprio corpo richiede l'integrazione di questi due tipi di informazioni (von Helmholtz, 2013). Le informazioni retiniche assumono diversi ruoli nel guidare i movimenti degli arti. Ad esempio, immediatamente prima di un movimento mirato dell'arto, è possibile estrarre informazioni sulla posizione di un bersaglio periferico dalla scena che cade sulla retina. Infatti, senza tali informazioni retiniche, il soggetto potrebbe non sapere dove si trova l'obiettivo. Un altro ruolo importante delle informazioni retiniche riguarda il fornire un feedback visivo sullo stato di un movimento in corso. In particolare, tale feedback contiene informazioni non solo sullo stato attuale dell'arto in movimento (Carlton, 1981), ma anche sulla posizione del bersaglio e sulle relative posizioni dell'arto e del bersaglio (Prablanc, Pélisson, & Goodale, 1986). Nel tentativo di studiare la coordinazione oculo-motoria, in particolare quella mano-occhio, Abrams e colleghi (1990) hanno condotto un esperimento in un ambiente naturale e non vincolato. Parte dei risultati sono in linea con le evidenze sopra citate, e affermano che in quasi la totalità dei casi i movimenti oculari precedono il movimento della mano verso il bersaglio e lo sguardo dell'occhio raggiunge prima il *target* di quanto non lo faccia la mano. I ricercatori hanno poi indagato se i movimenti oculari svolgono un ruolo significativo nella guida dei movimenti degli arti e, in caso affermativo, quale possa essere tale ruolo. Dai loro esperimenti è emerso che i movimenti degli arti erano meno accurati quando ai partecipanti veniva proibito di produrre saccadi durante il movimento, nonostante i tempi per produrlo rimanessero invariati.

Le abilità oculo-motorie sono state studiate anche da Fooker e Spring (2020). I due autori si sono espressi su tali capacità definendole parte delle azioni interdipendenti necessarie per compiere delle decisioni sensorimotorie. I due ricercatori hanno indagato i processi decisionali utilizzando un compito di tipo *go/no-go* manuale, il loro scopo era di studiare i movimenti oculari come base della dinamica del processo decisionale, differenziato in esecuzione motoria e inibizione di un'azione. I ricercatori nel progetto sperimentale hanno esaminato diverse componenti dell'azione nel compito *go/no-go*, come ad esempio se muovere o meno una mano e quando muoverla, hanno inoltre considerato tali componenti come parte del processo di decisione sensorimotoria. Movimenti della mano, del braccio e del corpo diretti all'obiettivo, come quelli finalizzati

all'evitamento degli ostacoli, sono accompagnati dai movimenti degli occhi. Durante molti compiti naturali gli occhi si fissano su stimoli bersaglio, quindi i *target*, mentre la mano si avvicina e afferra il primo oggetto osservato, gli occhi si spostano sul bersaglio successivo (Ballard, Hayhoe & Whitehead, 1992; Land, Mennie, & Rusted, 1999; Johansson, Westling, Bäckström & Flanagan, 2001). Ricerche passate hanno riscontrato un'interdipendenza comportamentale tra i movimenti dell'occhio e della mano, indicando un coordinamento del controllo motorio di entrambi. Inoltre, i movimenti oculari sono correlati e influenzati dalla presa di decisioni sensorimotorie in semplici compiti di discriminazione della direzione del movimento (McSorley & McCloy, 2009; Joo, Katz & Huk, 2016). Fooken e Spering (2019) hanno dimostrato che i parametri di inseguimento e movimento oculare saccadico forniscono stime affidabili delle intercettazioni manuali go/no-go negli esseri umani. Tuttavia, è possibile che le modulazioni del movimento oculare riflettano semplicemente l'azione dei partecipanti piuttosto che la decisione percettiva sottostante, perché la decisione di agire in genere richiede un controllo visivo più accurato rispetto alla decisione di non agire. In alternativa, i movimenti oculari possono indicare una lettura anticipatoria della presa di decisione, riflettendo la risposta motoria del partecipante prima che venga eseguita. Lo studio di Fooken e Spering (2019) ha esaminato il ruolo del movimento oculare durante le due fasi del processo decisionale, quindi decidere se e quando intercettare lo stimolo bersaglio in movimento. Dai risultati della ricerca emerge che i movimenti oculari possono indicare azioni di tipo *go/no-go* prima che il movimento della mano venga eseguito, e che i movimenti di occhi e mani sono interdipendenti durante la pianificazione del movimento e la sua esecuzione. I due ricercatori evidenziano inoltre che i tempi e l'accuratezza dell'inizio dell'inseguimento con gli occhi erano correlati alle azioni go/no go; cioè, una maggiore velocità di inizio dell'inseguimento dello stimolo bersaglio era associata a una maggiore precisione della decisione di intercettazione. Va notato, tuttavia, che non evidenziano direttamente un nesso causale tra l'inizio accurato del movimento oculare e la presa di decisione di intercettazione. Un'interpretazione alternativa dei risultati, potrebbe essere che i partecipanti hanno avviato movimenti oculari di inseguimento più rapidi e fluidi perché hanno percepito ed estrapolato i segnali di movimento del bersaglio in modo più accurato. Dai risultati di Fooken e Spering emerge che i movimenti di occhi e mani siano guidati da decisioni percettive precedenti. Quando i partecipanti effettuavano delle saccadi,

guidate visivamente (Joo, Katz & Huk, 2016) o finalizzate a indicare una scelta (McSorley e McCloy 2009) subito dopo un giudizio percettivo, le saccadi che erano nella direzione congruente alla decisione venivano avviate prima e più velocemente. Quando i movimenti della mano dei soggetti sperimentali erano perturbati mentre effettuavano risposte di scelta manuale in un'attività di discriminazione del movimento, i riflessi muscolari del braccio aumentavano con la forza del movimento dello stimolo. Questa scoperta suggerisce che il controllo sensomotorio è legato al processo decisionale percettivo in corso. Ulteriori prove della stretta relazione tra elaborazione percettiva e motoria durante il processo decisionale provengono da studi sull'attività neurale nella corteccia motoria nei primati umani e non umani. Studi effettuati con la magnetoencefalografia (MEG) finalizzati a misurare l'attività neuronale in soggetti umani, hanno rilevato che tale attività era predittiva dell'esito della decisione in un compito di rilevamento del movimento, prima che i partecipanti indicassero la loro scelta (Donner, Siegel, Fries & Engel, 2009; Pape & Siegel, 2016). Inoltre, le registrazioni elettrofisiologiche della corteccia premotoria dorsale e della corteccia motoria primaria dei macachi, hanno rivelato che l'attività neurale riflette i cambiamenti mentali durante la selezione del target di raggiungimento quando la posizione dei target corretti doveva essere aggiornata di continuo (Thura & Cisek, 2014; Kaufman, Churchland, Ryu & Shenoy, 2015). Tutti questi risultati suggeriscono che l'elaborazione delle informazioni sensoriali è sempre associata all'esecuzione e preparazione motoria.

1.1 Basi neuronali delle abilità sensorimotorie

Secondo Pinel & Barnes (2018) il sistema sensorimotorio è organizzato in modo gerarchico (Graziano, 2009), i segnali passano dalla corteccia associativa ai muscoli, si parla quindi di un flusso di informazioni discendente, o *top-down*. La gerarchia del sistema sensorimotorio è caratterizzata da una segregazione funzionale in cui ogni livello della gerarchia è caratterizzato da unità diverse, quindi da strutture nervose o reparti, che svolgono funzioni specifiche e diverse tra loro.

Nel sistema sensorimotorio gli occhi, gli organi dell'equilibrio, i recettori cutanei, muscolari e articolari monitorano le risposte dell'organismo e inviano le informazioni di ritorno ai circuiti sensorimotori, si parla in questo caso di *feedback* sensoriale. Le uniche

risposte che non sono influenzate da questo *feedback* sono i movimenti balistici, cioè movimenti brevi, rapidi, di tipo tutto o nulla.

Grazie al *feedback* sensoriale i livelli inferiori della gerarchia sensorimotoria possono modificare l'*output* motorio (Deliagina, Zelenin, & Orlovsky, 2012). L'apprendimento sensorimotorio è caratterizzato da una fase iniziale in cui ogni risposta motoria è eseguita sotto il controllo cosciente. In seguito, grazie alla pratica, le risposte vengono organizzate in sequenze di azioni integrate e continue che vengono aggiustate grazie al feedback sensoriale e senza una regolazione consapevole.

Riportando il modello generale del sistema sensorimotorio descritto da Pinel & Barnes (2018) il vertice della gerarchia è occupato dalla corteccia associativa sensorimotoria, composta da due aree principali, la corteccia associativa parietale posteriore e la corteccia associativa prefrontale dorsolaterale. La corteccia associativa parietale posteriore svolge un ruolo importante nell'integrazione di diversi tipi di informazione, come ad esempio la posizione originale delle parti del corpo e degli oggetti esterni con cui il corpo deve interagire, nel guidare il comportamento fornendo informazioni spaziali e nel dirigere l'attenzione (Hutchinson, Uncapher, Weiner, Bressler, Silver, Preston, & Wagner, 2014; Kuang, Morel, & Gail, 2016). La corteccia parietale posteriore è definita associativa perché riceve segnali da più di un sistema sensoriale, in particolare da parte dei sistemi sensoriali, quali il sistema visivo, uditivo e somatosensoriale, che forniscono informazioni circa la posizione del corpo e degli oggetti nello spazio (Serenio & Huang, 2014). Un danno a carico della corteccia parietale posteriore può produrre deficit nella percezione e nella memoria delle relazioni spaziali, nella precisione di orientamento del braccio verso un oggetto, nel controllo dei movimenti oculari e nell'attenzione (Andersen, Andersen, Hwang & Hauschild, 2014; Turella & Lingnau, 2014). I deficit più significativi causati da un danno alla sopracitata corteccia sono l'aprassia e la negligenza spaziale unilaterale. L'aprassia è un disturbo del movimento volontario, spesso causata da un danno unilaterale alla corteccia parietale posteriore di sinistra o alle sue connessioni (Hoeren, Kümmerer, Bormann, Beume, Ludwig, Vry, Mader, Rijntjes, Kaller & Weiller, 2014). I pazienti che soffrono di aprassia presentano difficoltà nell'eseguire un compito motorio specifico quando viene loro richiesto, e sono invece in grado di svolgere lo stesso movimento se non prestano attenzione a ciò che stanno facendo. La negligenza spaziale unilaterale comporta un'alterata capacità di rispondere a stimoli provenienti dal lato del

corpo controlaterale, quindi opposto a quello della lesione cerebrale, in assenza di deficit sensoriali o motori. La maggior parte dei pazienti che presentano il disturbo citato presentano difficoltà nella risposta a stimoli situati a sinistra del corpo del paziente, chiamata anche sinistra egocentrica, definita dalle coordinate gravitazionali, questi implica che al ruotare della testa del paziente, il campo di negligenza non ruota con essa.

La corteccia associativa prefrontale dorsolaterale è l'altra area della corteccia associativa implicata nelle funzioni sensorimotorie (Kaller, Rahm, Spreer, Weiller, & Unterrainer, 2011). Quest'area corticale ha l'importante funzione di decidere di dare inizio a un movimento volontario, questa decisione dipende anche dall'interazione con la corteccia parietale posteriore e altre aree della corteccia frontale (Rowe, Toni, Josephs, Frackowiak, & Passingham, 2000; Tanji & Hoshi, 2001).

La corteccia motoria secondaria è una delle aree centrali nel sistema sensorimotorio. Le aree di questa corteccia ricevono segnali dalla corteccia associativa e ne inviano alla corteccia motoria primaria. Inizialmente si credeva che questa corteccia fosse costituita da due grandi aree principali, ossia l'area motoria supplementare e la corteccia premotoria, tuttavia numerose ricerche neuroanatomiche e neurofisiologiche condotte prevalentemente sulle scimmie hanno favorito l'ipotesi dell'esistenza di almeno otto aree della corteccia motoria secondaria di ciascun emisfero (Nachev, Kennard & Husain 2008), tre aree motorie supplementari, due aree premotorie e tre piccole aree, cioè le aree motorie cingolate. Nonostante la maggior parte degli studi sulla corteccia motoria secondaria siano stati effettuati sulle scimmie, recenti studi di *imaging* funzionale condotti sugli esseri umani, suggeriscono che la corteccia motoria secondaria dell'uomo abbia un'organizzazione simile (Caminiti, Innocenti, & Battaglia-Mayer, 2015). Le aree della corteccia sopracitata sono coinvolte nella programmazione di *pattern* di movimento specifici, dopo aver ricevuto istruzioni generali dalla corteccia prefrontale dorsolaterale (Pearce & Moran, 2012). Nel sistema sensorimotorio ricoprono un ruolo fondamentale i neuroni specchio, scoperti negli anni '90 dal gruppo di lavoro di Rizzolatti. Rizzolatti e colleghi stavano conducendo uno studio su una classe di neuroni dell'area premotoria ventrale di un gruppo di macachi. I neuroni studiati, chiamati poi neuroni specchio, codificavano per oggetti particolari e per l'esecuzione di compiti motori finalizzati. Durante la sperimentazione i ricercatori notarono che il gruppo di neuroni studiato si attivava anche quando la scimmia osservava lo sperimentatore afferrare un determinato

oggetto. Si è ipotizzato che i neuroni specchio possano essere la base neuronale della cognizione sociale, cioè la conoscenza delle intenzioni, delle emozioni e delle percezioni altrui. La maggior parte degli studi sui neuroni specchio condotti sugli esseri umani si è avvalsa della risonanza magnetica funzionale, ed è stato così possibile identificare alcune aree della corteccia motoria che si attivano quando un individuo guarda, esegue o immagina un'azione (Rizzolatti & Fabbri-Destro, 2008; Rodriguez, Llanos, Gonzalez & Sabate, 2008). Non esistono evidenze a sostegno del fatto che i neuroni in questione siano responsabili dell'attività osservata, ma la risonanza magnetica funzionale ha comunque evidenziato che i neuroni specchio nell'uomo si trovano nelle stesse aree della corteccia in cui sono stati individuati quelli dei macachi. Oltre alla corteccia motoria secondaria, il sistema sensorimotorio comprende anche quella primaria. È il principale punto di convergenza dei segnali sensorimotori corticali e principale punto di origine dei segnali sensorimotori in partenza dalla corteccia cerebrale. Secondo la prospettiva corrente ogni area della corteccia è in grado di produrre molti pattern di contrazione muscolare al fine di portare una parte del corpo da una qualsiasi posizione di partenza alla posizione bersaglio (Davidson, Chan, O'Dell & Schieber, 2007), la corteccia motoria primaria quindi oltre alla mappa topografica ha anche una mappa di azioni (Graziano, 2016). I neuroni della corteccia primaria svolgono un ruolo centrale nel dare avvio ai movimenti del corpo. Un danno esteso alla corteccia motoria primaria può provocare un'alterazione della capacità di muovere una parte del corpo, indipendentemente dalle altre, e ridurre la velocità, la precisione e la forza dei movimenti del paziente.

Altre due strutture che fanno parte del sistema sensorimotorio sono il cervelletto e i nuclei della base che, interagendo con diversi livelli della gerarchia sensorimotoria, coordinano e modulano le sue attività. Il cervelletto è costituito da un'elevata complessità funzionale a causa della sua struttura e delle connessioni che stabilisce con altre strutture cerebrali (Apps & Hawkes, 2009). Integrando e confrontando diversi tipi di informazioni, provenienti dalla corteccia motoria primaria e secondaria, ma anche dai sistemi somatosensoriale e vestibolare, il cervelletto riesce a modificare il movimento nel caso in cui devii dalla traiettoria prevista (Bastian, 2006; Bell, Han & Sawtell, 2008; Herzfeld & Shadmehr, 2014). Inoltre, sembra essere coinvolto nell'apprendimento motorio, soprattutto in quello di sequenze di movimenti (Pritchett & Carey, 2014). Danni a carico del cervelletto possono provocare incapacità di controllare con precisione la direzione, la

forza, la velocità e l'ampiezza dei movimenti, adattare il pattern motorio al variare delle condizioni, difficoltà nel mantenere una posizione, e l'insorgere del tremore quando si cerca di mantenerla, alterazioni dell'equilibrio, dell'andatura, del linguaggio e del controllo dei movimenti oculari, è infine alterato l'apprendimento di nuove sequenze motorie (Thach & Bastian, 2004). Diversamente da quanto si pensava in passato la funzione del cervelletto non è esclusivamente sensorimotoria e i deficit associati ad esso sono anche cognitivi, emotivi e sensoriali. Altra struttura corticale portante del sistema sensorimotorio sono i nuclei della base costituiti da un minor numero di neuroni rispetto al cervelletto e da un insieme di nuclei interconnessi, e svolgono una funzione modulatrice (Nelson & Kreitzer, 2014). Attualmente si crede che i nuclei della base siano coinvolti in funzioni cognitive (Gittis, Berke, Bevan, Chan, Mallet, Morrow, & Schmidt, 2014; Hikosaka, Kim, Yasuda, & Yamamoto, 2014; Lim, Fiez & Holt, 2014; Rektor, Bočková, Chrastina, Rektorová & Baláž, 2015), oltre che a svolgere un ruolo nella modulazione dell'output motorio. È stato inoltre dimostrato che i nuclei della base partecipano all'apprendimento degli automatismi, processo chiamato *habitat learning*, che viene generalmente appreso attraverso la pratica (Ashby, Turner & Horvitz, 2010).

Il livello inferiore della gerarchia del sistema sensorimotorio è costituito dai muscoli e dai circuiti spinali. I muscoli rendono possibile la messa in atto dei riflessi, come ad esempio la deambulazione, un complesso riflesso sensorimotorio che richiede l'integrazione di informazioni visive provenienti dai piedi, anche, ginocchia, braccia ecc., oltre che informazioni provenienti dall'orecchio interno che forniscono indicazioni sull'equilibrio. Sulla base di queste informazioni nasceranno movimenti che coinvolgono i muscoli del tronco, arti inferiori, piedi e la porzione prossimale degli arti superiori. È un programma di riflessi plastico dato che deve modificare l'output motorio in funzione di informazioni che si ottengono durante l'esecuzione stessa di un compito motorio. Grillner (1985) ha dimostrato che il midollo spinale, senza il contributo del cervello, è capace di controllare la deambulazione.

Il sistema sensorimotorio comprende una gerarchia di programmi sensorimotori centrali (Brooks, 1986; Georgopoulos, 1991); tutte le componenti del sistema sensorimotorio presentano pattern intrinseci di attività programmata e i movimenti complessi sono il risultato della combinazione di questi programmi. Ogni livello funziona sulla base del feedback sensoriale, indipendentemente dal controllo dei livelli superiori, quindi molte

delle attività motorie vengono svolte in assenza di un coinvolgimento diretto delle aree corticali e senza che ci sia piena consapevolezza delle risposte motorie (Custers & Aarts, 2010). I programmi sensorimotori centrali sono caratterizzati da equivalenza motoria, cioè il principio in base al quale lo stesso movimento può essere eseguito secondo modalità diverse coinvolgendo muscoli diversi. L'equivalenza motoria mostra la plasticità del sistema sensorimotorio, esistono quindi programmi generali situati nei livelli più elevati della gerarchia sensomotoria, che vengono adattati opportunamente alle diverse circostanze e che possono svilupparsi senza la pratica del comportamento. La pratica è comunque in grado di modificare i comportamenti o generarne di nuovi (Sanes, 2003). Ci sono due processi che favoriscono apprendimento di programmi sensorimotori centrali, il raggruppamento delle risposte e lo spostamento del controllo ai livelli inferiori del sistema sensorimotorio. Secondo l'ipotesi del raggruppamento delle risposte la pratica consente di combinare i programmi sensorimotori centrali che controllano le singole risposte motorie in sequenze di comportamento. le stesse sequenze possono essere combinate per ottenere sequenze di ordine superiore. Lo spostamento del controllo ai livelli inferiori prevede invece che durante l'apprendimento di un programma sensorimotorio centrale il controllo si sposti dai livelli più elevati della gerarchia sensorimotoria a quelli inferiori (Huber, Gutnisky, Peron, O'connor, Wiegert, J. S., Tian, & Svoboda, 2012; Bassett, Yang, Wymbs, & Grafton, 2015; Kawai, Markman, Poddar, Fantana, Dhawale, Kampff & Ölveczky, 2015). Questo processo comporta due vantaggi principali: lascia liberi i livelli superiori di occuparsi di aspetti più esclusivi della performance e permette di raggiungere un'alta velocità nell'esecuzione di una performance perché diversi circuiti dei livelli inferiori della gerarchia possono agire simultaneamente senza interferire.

Tecniche di *neuroimaging* funzionale hanno offerto l'opportunità di studiare i corrispettivi nervosi dell'apprendimento sensorimotorio. Uno dei primi studi è stato quello di Jenkins e colleghi (2014), i quali registrarono l'attività corticale di un campione di persone tramite la PET. Dai risultati emerge che nell'apprendimento sensorimotorio sono coinvolte aree sensorimotorie sopra citate, inoltre le aree associative e il cervello diminuiscono l'attività quando le sequenze sono apprese. È uno studio che ha verificato i cambiamenti delle aree cerebrali quando gli individui apprendono i compiti sensorimotori.

1.2 Abilità somatosensoriali e sviluppo atipico

Dalle ricerche empiriche è emerso che le funzioni sensorimotorie dipendono da molti ed interconnessi input sensoriali e percorsi neurobiologici (Friston, 2010). Per controllare e apprendere in modo ottimale le funzioni motorie, vengono formulate predizioni sulla base di aspettative e dati sensoriali in entrata, prima di essere trasmesse gerarchicamente alla corteccia cerebrale (Shipp, Adams & Friston, 2013). Negli ultimi decenni la ricerca ha rivolto la propria attenzione all'integrazione sensorimotoria ed è emersa un'ampia serie di prove a sostegno del ruolo dell'alterata integrazione sensorimotoria nella fisiopatologia di varie condizioni neurologiche e disturbi del movimento (Abbruzzese & Berardelli, 2003). È noto che un'alterata integrazione sensorimotoria si traduce in un deterioramento della cinematica del movimento volontario e quindi nella generazione di bradicinesia (Bologna, Paparella, Fasano, Hallett & Berardelli, 2020) Inoltre è stato dimostrato essere alterata la *Short-latency afferent inhibition (SAI)*, cioè l'inibizione della corteccia motoria indotta dalle afferenze sensoriali, e un marker dell'integrazione sensorimotoria, nel morbo di Parkinson e in altre condizioni neurodegenerative (Bologna et al. 2020; Martin-Rodriguez & Mir, 2020). Un'integrazione sensorimotoria deficitaria può contribuire a innescare un'attività oscillatoria, cioè sincrona, in varie aree del corpo che può tradursi in un'attivazione ripetitiva e alternata di gruppi muscolari antagonisti e in una conseguente comparsa di tremore (Schnitzler & Gross, 2005; Manto, 2008). Il tentativo di identificare i meccanismi che causano un deterioramento dell'integrazione sensorimotoria nei Disturbo dello sviluppo della coordinazione motoria (*DCD-Developmental Coordination Disorders*) è reso difficile dall'eterogeneità di tali deficit, pertanto è ipotizzabile che i meccanismi di un'alterata integrazione sensorimotoria varino notevolmente in ogni specifico caso. Alcune strutture corticali come il cervelletto e i gangli della base, sono coinvolte nelle abilità sensorimotorie quindi lesioni a livello di tali aree sono implicate nelle alterazioni dell'integrazione sensorimotoria e nella comparsa di alcuni disturbi del movimento (Bhatia & Marsden, 1994; Bologna & Berardelli, 2017). Le conseguenze di deficit sensorimotori su processi neuronali e fisiopatologici sono ancora poco studiate e poco conosciute. Ci sono prove empiriche secondo cui i processi neurodegenerativi modificano il controllo inibitorio e i meccanismi di plasticità essenziali per una corretta

integrazione sensorimotoria (Louis & Faust, 2020; Quartarone & Hallett, 2013). Tuttavia, per interpretare al meglio la relazione tra fenomeni neurodegenerativi e un'alterata integrazione sensorimotoria, è necessario delineare con maggiore precisione i fattori che influenzano il tipo e l'entità del coinvolgimento neurodegenerativo di specifiche aree cerebrali. Ad esempio, è stato ipotizzato che i fenomeni neurodegenerativi cerebrali possano propagarsi nel cervello seguendo determinate vie di connettività anatomiche e funzionali specifiche (Yates, 2012).

Lo sviluppo del repertorio dei movimenti, il controllo motorio e le rappresentazioni corporee nei circuiti sensorimotori sono possibili grazie ai primi movimenti spontanei e le esperienze sensorimotorie. È presumibile quindi che precoci esperienze sensorimotorie atipiche, nei bambini, possano causare l'emergere di comportamenti deficitari, difficoltà nel controllo motorio e una disorganizzazione dei circuiti sensorimotori che persistono nell'età adulta. I disturbi nella pianificazione, esecuzione e controllo dei movimenti del corpo in assenza di danno cerebrale vengono definiti Disturbi della coordinazione motoria, i quali spesso coesistono con vari deficit delle funzioni esecutive (Zwicker, Missiuna, Harris & Boyd, 2012). I pazienti con *DCD* mostrano ridotte capacità di produrre movimenti coerenti (Du, Wilmut & Barnett, 2015), scarse coordinazione motoria e acuità cinestesica (Coleman, Piek, & Livesey, 2001; Johnston, Ali, Hill & Bremner, 2017), deficit nelle rappresentazioni sensorimotorie e nella percezione (Gabbard & Bobbio, 2011; Johnston, 2017). La maggior parte dei bambini con *DCD*, ma anche con Disturbo dello spettro dell'autismo (*ASD- Autism Spectrum Disorders*), un disturbo del neurosviluppo caratterizzato da una compromissione delle capacità comunicative e sociali, oltre che da modelli ristretti e ripetitivi di comportamenti, attività o interessi), mostra disabilità sensorimotorie, ridotta attività fisica e interazioni con il loro ambiente, sviluppo motorio atipico, in particolare movimenti atipici spontanei o generali (*GM- General movements, i.e. Writhing Movements e Fidgety Movements*) (Einspieler, Peharz & Marschik, 2016; Vaivre-Douret, Lalanne & Golse, 2016). Durante lo sviluppo tipico, il repertorio dei *GM* negli arti aumenta, con il tempo, nelle variazioni, fluidità, ampiezza e complessità dei movimenti. *GM* atipici corrispondono a movimenti rigidi, sincronizzati e stereotipati che mostrano fluidità e complessità limitate con l'aumentare dell'età (Hadders-Algra, 2010). I movimenti generali atipici riflettono la connettività ridotta e la disorganizzazione funzionale nel cervello (Zuk, 2011; Einspieler, Sigafos,

Bartl-Pokorny, Landa, Marschik & Bölte, 2014; Hadders-Algra, 2018). Di conseguenza, è stato ipotizzato che modelli limitati e atipici di input somatosensoriali durante lo sviluppo possano portare a un'organizzazione anatomica e funzionale anormale dei circuiti sensorimotori nell'età adulta a causa della plasticità corticale disadattiva. Tale disorganizzazione sensorimotoria può a sua volta alterare le percezioni somatosensoriali e corporee, le risposte motorie, la struttura e la fisiologia muscolo-scheletrica. Nello studio di Delcour e colleghi (2018) hanno immobilizzato provvisoriamente gli arti posteriori di un campione di ratti e hanno dimostrato che la restrizione sensorimotoria postnatale transitoria causa un effetto a lungo termine sulla motricità degli arti interessati. Tali restrizioni non hanno avuto un impatto significativo sulla neuroanatomia cerebrale dell'adulto, ma hanno influenzato l'organizzazione funzionale della corteccia sensorimotoria. La riorganizzazione della mappa somatosensoriale conseguente alla restrizione postnatale transitoria era altamente correlata ai disturbi della locomozione, squilibrio della eccitazione ed inibizione muscolare e istopatologia muscolo-scheletrica.

L'ambito della coordinazione motoria, che è stata precedentemente definita come una funzione sensorimotoria, è stato ampiamente e approfonditamente studiato attraverso le indagini condotte su pazienti con DCD, termine accettato a livello internazionale per descrivere la Disprassia dello sviluppo. Molti ricercatori in ambito psicologico e medico si chiedono se sia più opportuno collocare la Disprassia all'interno del più ampio dominio del Disturbo dello sviluppo della coordinazione, oppure considerarla come un suo sinonimo. Secondo Sabbadini (2009) i due sistemi (DCD e Disprassia) non sono coincidenti, ma esiste una relazione di inclusione, in quanto il controllo dell'esecuzione del movimento, in gioco nel DCD, è comunque parte dell'atto motorio finalizzato, compromesso nella Disprassia. A livello internazionale tuttavia è stato adottato il termine disprassia per descrivere la condizione dei pazienti affetti da Disturbo della coordinazione, per cui come suo sinonimo. Nella più recente versione del DSM (*Diagnostic and statistical manual of mental disorders*) il Disturbo dello sviluppo della coordinazione motoria è stato definito da alcuni criteri diagnostici tra cui una difficoltà nell'acquisizione ed esecuzione delle abilità motorie coordinate, non riconducibili a disabilità intellettiva, deficit visivo, o da disabilità neurologiche. Le difficoltà motorie caratterizzanti il seguente quadro clinico vengono ricondotte a problemi percettivi, in particolar modo difficoltà visuo-spaziali e cinestetici, anche se su quest'ultimo punto la

letteratura è molto contrastante. Sono state realizzate alcune ricerche per comprendere quali fossero le funzioni e le basi corticali compromesse nel DCD. Il dominio visivo in bambini con il citato disturbo sembra essere significativamente invalidato. La meta-analisi di Wilson e colleghi (2013) ha mostrato che bambini con tale condizione clinica manifestano difficoltà nell'elaborazione delle informazioni visuo-spaziali anche quando non è coinvolta alcuna componente motoria. Studi sul sistema visivo hanno evidenziato l'esistenza di due vie distinte di elaborazione visiva, quella dorsale e quella ventrale. La prima viene considerata la via del "dove", responsabile dell'elaborazione spaziale delle informazioni, e coinvolta nel controllo visivo delle azioni, senza però avere accesso alla coscienza; la via ventrale, detta anche via del "cosa", viene ritenuta l'artefice dell'elaborazione delle caratteristiche delle informazioni e svolge un ruolo centrale nella percezione consapevole delle proprietà degli oggetti. O'Brien e colleghi (2002) hanno ipotizzato la compromissione della via ventrale in bambini con DCD. È tuttavia necessario condurre ricerche più approfondite, con il sostegno di strumenti di neuroimmagine, per valutare l'accuratezza di tali affermazioni. Con lo scopo di delineare con più precisione il quadro clinico del Disturbo dello sviluppo della coordinazione, Katschmarsky e colleghi (2001) hanno valutato le saccade in un campione di bambini con DCD. A tal fine è stato utilizzato il *Double-step saccades task*. La prova sperimentale prevedeva la comparsa di due punti, presentati uno dopo l'altro. Il secondo punto compariva poco dopo l'inizio della prima saccade. L'idea alla base di questo compito è che la posizione del secondo punto e il relativo output motorio per raggiungere la sua posizione devono essere programmati sulla base del comando motorio, o copia efferente, della prima saccade. I risultati mostrano che i bambini con DCD erano meno precisi nel controllo della seconda saccade, ciò suggerisce che non erano in grado di utilizzare la copia efferente della prima saccade per costruire una rappresentazione spaziale della posizione del secondo target, al fine di generare una saccade accurata verso di esso. Un altro dominio studiato è l'immaginazione motoria, un processo cognitivo attivo durante il quale la rappresentazione di un'azione specifica viene riprodotta internamente nella memoria di lavoro senza alcun output motorio palese. Il suo ruolo in pazienti con DCD è stato studiato in compiti di rotazione mentale. Deconinck e colleghi (2006) hanno effettuato uno studio utilizzando un paradigma di rotazione mentale sia con la mano che con le lettere, dove gli stimoli erano presentati in vari orientamenti. I

ricercatori avevano previsto che i bambini con DCD dovessero ottenere risultati peggiori nel paradigma della rotazione della mano. Hanno sorpreso, quindi, i risultati in base ai quali i bambini con DCD erano più lenti e commettevano più errori, con entrambi i tipi di stimoli, rispetto al gruppo di bambini con sviluppo tipico. Pertanto, questo studio evidenzia la possibilità che la memoria di lavoro o la componente delle immagini visive durante la simulazione motoria possano essere responsabili delle prestazioni alterate dei bambini con DCD (Alloway & Temple, 2007). Oltre alla ricerca delle funzioni motorie e cognitive compromesse nel disturbo in questione, sono stati condotti studi di neuroimmagine per identificare i deficit neurofunzionali nei bambini con DCD. Tra le strutture implicate sono state descritte il cervelletto, il lobo parietale e i gangli della base. Il cervelletto è stato indagato dato il suo coinvolgimento nella coordinazione motoria, nel controllo posturale, nell'esecuzione e nel controllo dei movimenti (Blakemore & Sirigu, 2003; Koziol et al., 2014). Nei bambini con DCD è stata ripetutamente osservata un'attivazione anormale all'interno di questa struttura durante i compiti di controllo visuo-motorio e di previsione motoria (Zwicker, Missiuna, Harris & Boyd, 2011; Debrabant, Gheysen, Caeyenberghs, Van Waelvelde & Vingerhoets, 2013). Sono state utilizzate tecniche di fMRI per studiare anche il lobo parietale, dato il suo coinvolgimento nell'elaborazione visuo-spaziale e nella previsione dell'azione. È stata riscontrata un'attività disfunzionale nei bambini con DCD testata in 6 studi fMRI correlati a compiti che coinvolgono il controllo visuo-motorio, la previsione motoria e compiti attenzionali (Zwicker et al., 2011; Debrabant et al., 2013). È stata analizzata anche l'attività neuronale dei gangli della base, perché coinvolti nell'iniziazione al movimento e nell'apprendimento del movimento; tuttavia le prove esistenti non sono sufficienti per affermare che una compromissione di queste aree sia coinvolta nel DCD.

Numerose ricerche empiriche hanno descritto deficit sensorimotori in pazienti affetti dal Disturbo dello spettro dell'autismo, come goffaggine, instabilità posturale, disturbi sensoriali e deficit della coordinazione visuo-motoria. È stato ipotizzato che la difficoltà dei pazienti autistici nel predire e anticipare le azioni e le intenzioni altrui (Pellicano & Burr, 2012; Sinha, Kjelgaard, Gandhi, Tsourides, Cardinaux, Pantazis, Diamond, & Held, 2014; Van de Cruys, Evers, Van der Hallen, Van Eysen, Boets, de-Wit & Wagemans, 2014) possa spiegare in parte il quadro sintomatologico dell'autismo, incluso il deficit sensorimotorio (Van de Cruys et al. 2014). Come con il DCD, anche in pazienti con ASD

sono state inoltre riscontrate anomalie funzionali e strutturali in regioni corticali dedite al controllo predittivo, come il cervelletto (Fatemi, Halt, Realmuto, Earle, Kist, Thuras & Merz, 2002; Allen & Courchesne, 2003), il cingolato anteriore (Dichter Felder & Bodfish, 2009), e i gangli della base (Hollander, Anagnostou, Chaplin, Esposito, Haznedar, Licalzi, Wasserman, Soorya & Buchsbaum, 2005). Ricerche hanno dimostrato che i processi predittivi non sono cronicamente deficitari in questi pazienti e che spesso dipendono dal compito svolto o dal contesto in cui si trovano (Palmer, Lawson & Hohwy, 2017). Recenti studi hanno esaminato un tipo di predizione sensorimotoria generata nella corteccia premotoria dorsale, in particolare Palmer e colleghi (2017) hanno effettuato uno studio con pazienti autistici per valutare la forza con la quale sollevavano determinati oggetti apparentemente più pesanti rispetto alla forza impiegata per sollevarne altri all'apparenza più leggeri. Nonostante i partecipanti abbiano mostrato una riduzione della percezione sensorimotoria quando interagivano con oggetti di dimensioni differenti (Buckingham, Michelakakis & Rajendran, 2016), questo effetto non è stato replicato quando gli oggetti differivano nel materiale (Arthur, Vine, Brosnan & Buckingham, 2019). Questo suggerisce che le atipie del processamento predittivo nell'autismo possano essere guidate da meccanismi, compiti o contesti specifici. I risultati sono rilevanti poiché mostrano come il controllo sensorimotorio sia sensibile a modificazioni che avvengono nel contesto. Nell'articolo di Arthur e colleghi (2020) sono stati descritti due esperimenti volti rispettivamente a indagare le associazioni tra predizione sensorimotoria e tratti autistici in una popolazione non clinica e come si manifesta il controllo sensorimotorio predittivo negli individui con una diagnosi clinica di Disturbo dello spettro dell'autismo. In entrambi gli esperimenti le azioni dei partecipanti erano fortemente guidate dalle aspettative e le previsioni sensorimotorie non sembravano essere compromesse in pazienti con *ASD*. I risultati sono importanti perché sembrano suggerire che l'autismo non è caratterizzato da un indebolimento della capacità di creare e/o utilizzare modelli d'azione predittivi, contrastando l'ipotesi di partenza secondo cui le atipicità dell'autismo emergono nei sistemi sensorimotori. I risultati tuttavia corrispondono a evidenze cliniche secondo cui le atipicità legate all'autismo nella previsione sensorimotoria sono dipendenti dal contesto.

Recentemente la ricerca si è interessata all'integrazione sensorimotoria per comprendere meglio il ruolo che hanno la responsività sensoriale e le difficoltà di coordinazione

motoria in soggetti affetti da autismo (Dowd, McGinley, Taffe & Rinehart, 2012; Siaperas, Ring, McAllister, Henderson, Barnett, Watson & Holland, 2012; Gowen & Hamilton, 2013). L'integrazione sensorimotoria può essere definita come "un processo cerebrale che consente, mediante complesse operazioni neurali, l'esecuzione di un determinato comportamento motorio volontario in risposta a specifiche richieste dell'ambiente" (Machado, Cunha, Velasques, Minc, Teixeira, Domingues, Silva, Bastos, Budde, Cagy, Basile, Piedade & Ribeiro, 2010). Lo studio di Hannant, Cassidy, Tavassoli & Mann (2016) indaga se le differenze sensoriali e motorie predicono la comunicazione sociale e le difficoltà osservate nell'autismo. Gli elevati livelli di comorbidità tra autismo e difficoltà sensoriali e motorie, che sembrano avere un impatto sul funzionamento adattivo, suggeriscono che l'integrazione sensorimotoria potrebbe svolgere un ruolo chiave nello sviluppo e nel mantenimento del disturbo. Aree corticali specifiche associate all'integrazione sensorimotoria come il cervelletto (Glickstein 1998) e i gangli della base (Nagy, Eördegh, Paróczy, Márkus & Benedek, 2006; Chukoskie, Townsend & Westerfield, 2013) hanno mostrato anomalie in pazienti autistici. La coordinazione motoria e la reattività sensoriale sono entrambi elementi chiave nell'*ASD*: spesso si verificano e influenzano il comportamento insieme. Tali difficoltà potrebbero influenzare le abilità sensorimotorie coinvolte nel linguaggio non verbale e nella comunicazione come il gesto e l'imitazione, portando di conseguenza a comportamenti idiosincratici, ad esempio avversione allo sguardo, comunicazione non verbale limitata e mimica facciale limitata. Questi comportamenti atipici nell'infanzia potrebbero successivamente avere un impatto sulle opportunità di apprendimento sociale, con un effetto a cascata sullo sviluppo di efficaci capacità di comunicazione sociale (Hannant, Tavassoli & Cassidy, 2016). Dai risultati dello studio di Hannant e colleghi (2016) emerge che i bambini con *ASD*, confrontati con un campione di bambini con stessa età e stesso quoziente intellettivo non verbale senza diagnosi di autismo, mostravano una coordinazione motoria significativa, reattività sensoriale e difficoltà linguistiche ricettive. Bambini con *ASD* presentavano specifiche menomazioni in particolari domini, le più significative per quanto concerne la reattività sensoriale sono la difficoltà nella regolazione emotiva, attenzione, e nelle abilità motorie fini, mentre i deficit riscontrati nella coordinazione motoria riguardano l'equilibrio e la destrezza manuale. I risultati hanno dimostrato che le difficoltà nella reattività sensoriale e nella coordinazione motoria

predicevano significativamente la gravità dei sintomi del disturbo dello spettro autistico. Dai risultati dello studio di Hannant et al. (2016) si può ipotizzare quindi che la comunicazione sociale, l'interazione e le difficoltà comportamentali che i bambini con *ASD* manifestano possono essere previste da deficit nelle capacità sensomotorie, suggerendo una possibile compromissione dell'integrazione sensomotoria.

Molti degli studi presenti in letteratura sulle abilità sensorimotorie sono stati effettuati su campioni di pazienti autistici perché si ipotizza che deficit in questo dominio possano essere la causa dello sviluppo e nel mantenimento dei deficit nella comunicazione e nell'interazione sociale (Bhat, Landa & Galloway, 2011). Un ritratto globale ed esauriente dei deficit sensomotori nell'*ASD* non può essere basato sui risultati di un singolo studio, ma necessita piuttosto di una sintesi quantitativa dei risultati disponibili negli studi. A tal fine, Coll, Foster, Meilleur, Brambati & Hyde (2020) hanno effettuato una meta-analisi di 139 studi che hanno confrontato le capacità sensomotorie tra *ASD* e soggetti con sviluppo tipico. I risultati confermano che le capacità sensomotorie sono fortemente e costantemente compromesse nell'*ASD* in un'ampia gamma di abilità tra cui la coordinazione fine (ad esempio la scrittura a mano), il movimento delle braccia, la velocità della camminata e l'equilibrio. I risultati supportano anche un progressivo miglioramento delle prestazioni sensomotorie con l'età in pazienti autistici, ma non confermano un'associazione tra abilità sensomotorie e gravità dei sintomi clinici.

1.3 Il gioco e le abilità sensorimotorie

Non esiste una definizione di gioco condivisa ma Huizinga (1938) lo definì “un atto volitivo, entro determinati spazio e tempo, secondo regole convincenti e volontariamente accettate [...], accompagnato da sentimenti di eccitazione e gioia, diversi dalla vita di tutti i giorni”. Recentemente Burghardt (2010) ha descritto il gioco dal punto di vista biologico stabilendo cinque criteri per riconoscerlo in tutte le specie, compreso l'uomo. I criteri affermano che il gioco non è funzionale nel contesto in cui viene svolto, è spontaneo, piacevole, gratificante o volontario, differisce da altri comportamenti più seri per forma o tempi, si ripete ma non in forma stereotipata e invariabile e infine viene avviato in assenza di stress significativo. Il gioco viene quindi, spesso, considerato come un

divertimento piuttosto che un'attività finalizzata e seria, tuttavia è fondamentale per uno sviluppo ottimale del bambino dal punto di vista sociale, fisico, cognitivo ed emotivo.

Graham e Burghardt (2010) nel loro elaborato individuano e descrivono tre categorie di gioco, quello solitario locomotorio-rotativo, il gioco con oggetti e infine il gioco sociale. Il primo viene descritto come un insieme di atti motori che vengono solitamente eseguiti in solitaria, tende a imitare i normali schemi motori ma enfatizzandoli ed esagerandoli, inoltre, come riportano gli autori, sembra che questo tipo di gioco sia la prima forma di gioco dal punto di vista dello sviluppo. Il gioco con gli oggetti può essere solitario o sociale e implica l'uso ludico o la manipolazione di oggetti inanimati, è stato ipotizzato che questo tipo di gioco fosse il precursore dell'uso di strumenti più complessi, sia dal punto di vista fisico che cognitivo. Il gioco sociale coinvolge due o più persone ed è necessario che i partecipanti sappiano leggere i segnali sociali in modo appropriato, reagire rapidamente e accuratamente ai movimenti e anticipare le risposte.

Il gioco è un'attività altamente gratificante nei bambini in età evolutiva. Dal punto di vista dello sviluppo il gioco consente ai bambini di sperimentare il proprio repertorio comportamentale e sociale e di esercitare le proprie capacità fisiche e comunicative, si presume quindi che faciliti lo sviluppo delle capacità emotive, sociali, della resilienza, della creatività e del *problem solving* (Bateson, 2015). Il gioco consente ai bambini di sperimentare ed esplorare e le attività ludiche forniscono un ambiente sicuro per testare le conseguenze di molti scenari alternativi, al fine di ampliare il repertorio comportamentale, sociale ed emotivo ricco e flessibile. In quanto tale, il gioco è uno strumento naturale per i bambini per sviluppare la resilienza, imparando a cooperare, superare le sfide e negoziare con gli altri. Il gioco in un ambiente positivo e di supporto può quindi essere considerato di importanza cruciale per lo sviluppo dei bambini in adulti sani e competenti.

Nel corso degli anni le modalità e gli strumenti utilizzati dai bambini per giocare sono cambiati molto, sempre più frequentemente vengono scelti giochi che comportano l'uso di videogiochi, *computer* e altri dispositivi elettronici. Con l'incremento dell'uso di questa tipologia di giochi è aumentata anche la ricerca sull'effetto che questi hanno sul comportamento e sulle funzioni cognitive dei bambini. La misura in cui giocare ai videogiochi influisce sul cervello e sul comportamento è incerta, è probabile che gli effetti

benefici o dannosi specifici siano determinati dalle caratteristiche sia dell'individuo che del gioco. Diversi studi hanno riportato un miglioramento della capacità visuospatiale, l'acuità visiva, il cambio di attività, il processo decisionale e il tracciamento degli oggetti, in individui sani (Han & Renshaw, 2011). Secondo Merzenich (2011) giochi che richiedono giudizi progressivamente più accurati e più impegnativi e azioni a velocità più elevate, che richiedono attenzione focalizzata e l'inibizione comportamentale nei confronti di stimoli non centrali, che aumentano la durata della memoria di lavoro, che forniscono contesti di formazione sociale e che offrono sfide cognitive sempre più difficili, ci si può aspettare che portino cambiamenti neurologici positivi nei sistemi cerebrali che supportano questi comportamenti. Poiché i cambiamenti comportamentali derivano da cambiamenti cerebrali, può non sorprendere che i miglioramenti delle prestazioni avvengano in simultanea ai cambiamenti corticali strutturali e funzionali. Vi sono prove dirette che l'uso intensivo dei videogiochi, intesi come regimi di allenamento controllati erogati in contesti comportamentali altamente motivanti, si traduce in significativi miglioramenti generalizzati della funzione cognitiva.

Quando si parla di videogiochi è necessario distinguere due tipi, quelli d'azione, (*AVG- Action VideoGames*), caratterizzati da una elevata velocità degli oggetti che entrano ed escono dal campo visivo del giocatore e dalle rapide reazioni richieste per interagire con questi oggetti (Green & Bavelier, 2012), e giochi non d'azione (*NAVG- Non-Action VideoGames*), caratterizzati da una maggiore lentezza nella conduzione del gioco e possibilità di pianificare e controllare il movimento. Ad oggi, la maggior parte degli studi ha riportato i benefici derivanti dalla riproduzione di un genere particolare: i videogiochi d'azione. Oltre a migliorare le capacità percettive e di attenzione, i giochi d'azione sono stati associati anche al miglioramento di funzioni cognitive di ordine superiore, cioè un insieme di processi *top-down* che vanno dall'aggiornamento della memoria di lavoro, al controllo delle interferenze, inibizione comportamentale e flessibilità mentale (Miyake, Friedman, Emerson, Witzki, Howerter & Wager, 2000; Diamond, 2013). Le poche ricerche empiriche presenti in letteratura, sui giochi non d'azione riportano miglioramenti sull'abilità di rotazione mentale, cioè la capacità di ruotare mentalmente la posizione di oggetti bidimensionali e tridimensionali (Okagaki & Frensch, 1994; Boot, Kramer, Simons, Fabiani, & Gratton, 2008), miglioramenti nella ricerca visiva e nella memoria di lavoro visiva (Oei & Patterson, 2013). In uno studio di Oei e Patterson (2014) è stato

utilizzato il puzzle come gioco non d'azione, che richiede pianificazione, apprendimento per prove ed errori e risoluzione di problemi. Ai giocatori del campione selezionato veniva richiesto di scartare una strategia precedentemente di successo e riformulare il problema per trovare nuove modalità per affrontare il livello. Dai risultati dello studio emerge che le funzioni esecutive di ordine superiore migliorano dopo 20 ore di allenamento con il puzzle, il che fa presumere, insieme ad altri dati scientifici, che i giochi siano dei potenti strumenti per allenare la cognizione umana. L'allenamento con giochi di puzzle ripetitivi porta al trasferimento, che però può essere favorito dal fatto che il gioco richiedeva la modifica delle strategie per ogni livello. Gli autori si interessano al trasferimento specifico e a quello generale, dove con il primo si fa riferimento al fenomeno per cui delle abilità apprese in un compito specifico vengono trasmesse ad un compito simile, e con il secondo invece si intende il processo in base al quale il trasferimento di capacità e conoscenze avviene in un ambito diverso da quello in cui sono state apprese. Dai risultati della ricerca emerge che il gioco non d'azione apporta miglioramenti nelle funzioni esecutive studiate, cioè la flessibilità, l'inibizione e la memoria di lavoro. Sebbene le ragioni esatte di questa evidenza non siano chiare, Oei e Patterson hanno ipotizzato che potesse essere dovuta al fatto che il puzzle è un gioco lento che consente di pianificare le proprie azioni e valutarle, coinvolgendo ampiamente la componente esecutiva della memoria di lavoro, la revisione e la modifica dei piani promuovono invece la componente della flessibilità; inoltre il gioco non d'azione implicava un cambiamento continuo delle regole in gioco, forzando il partecipante a inibire le strategie utilizzate per pensarne di nuove. Quindi il puzzle potrebbe aver portato a cambiamenti nelle reti di controllo cognitivo ed esecutivo nel cervello che supportano la risoluzione di problemi complessi e il funzionamento esecutivo di ordine superiore. Rilevanti sono anche i risultati di Li, Ngo, Nguyen & Levi (2011). Da una loro ricerca emerge che i videogiochi migliorano l'acuità visiva, che è il *gold standard* per misurare la visione spaziale, e affinano la visione ambliopica, oggetto di studio del loro studio. I dati che riportano suggeriscono che non solo i giochi d'azione, ma anche quelli non d'azione sono utili nel migliorare la visione spaziale ambliopica. o occhio pigro, cioè una patologia che provoca una riduzione dell'acuità visiva da un occhio e che non è determinata da una modificazione anatomica clinicamente rilevabile. Sebbene i giochi non d'azione non impongano la stessa pressione di quelli d'azione per rispondere

velocemente agli stimoli che appaiono nel campo visivo e per tracciare gli oggetti in movimento, implicano per il giocatore un'attenzione maggiore e costante ai piccoli e grossi dettagli spaziali e a diverse caratteristiche della scena visiva, il che può essere molto impegnativo per i pazienti con vista ridotta.

Boot, Kramer, Simons, Fabiani e Gratton, (2008) in un loro studio hanno valutato se i vantaggi dei videogiochi sono limitati alle attività visive e attenzionali o se i miglioramenti potrebbero essere più ampi. Oltre alle misure dell'attenzione visiva, i ricercatori hanno valutato l'effetto del gioco di videogiochi su una serie di compiti di memoria, ragionamento e controllo esecutivo, ed esaminato l'effetto del tipo di gioco su tali funzioni. I partecipanti hanno giocato a un gioco d'azione frenetico, un gioco di strategia più lento ed a un gioco di *puzzle*. Le aspettative di Boot et al. (2008) prevedevano che il gioco d'azione migliorasse le capacità visive e attentive, il gioco di strategia migliorasse le capacità di controllo esecutivo e il *puzzle game* migliorasse alcune abilità spaziali. Furono selezionati due campioni, uno composto da giocatori esperti e uno da non giocatori, e differivano tra di loro nel numero di ore trascorse a giocare. Gli esperti sono stati in grado di tracciare oggetti che si muovono a velocità maggiori, eseguire con più precisione un test visivo della memoria a breve termine, passare da un'attività all'altra più rapidamente e prendere decisioni sugli oggetti ruotati in modo più rapido e accurato. Dai risultati sembra che i videogiochi possano produrre un trasferimento generale per una serie di attività e una possibile spiegazione è che l'allenamento con i videogiochi incoraggia strategie flessibili e porta a miglioramenti generali nel controllo dell'attenzione, che a sua volta può essere applicato a una serie di compiti diversi. Tuttavia il trasferimento generale osservato potrebbe essere dovuto dal fatto che i videogiochi complessi per essere eseguiti, richiedono una varietà di abilità che devono essere applicate in una moltitudine di contesti diversi (Schmidt e Bjork, 1992). Dai risultati emerge che le ore previste dagli sperimentatori per giocare ai giochi stabiliti non producono alcun effetto se non per la funzione della rotazione mentale.

La poca ricerca esistente sull'impatto del gioco a videogiochi non d'azione ha rivelato vantaggi in termini di prestazioni su compiti percettivi e cognitivi. Non è noto, tuttavia, se giocare a tali giochi conferisca vantaggi simili nell'apprendimento sensomotorio. Per affrontare tale questione, Gozli, Bavelier, Pratt, (2014) nella loro ricerca hanno utilizzato un'attività di rilevamento del movimento manuale, una misura sensibile sia

dell'accuratezza che del miglioramento nel tempo delle abilità sensomotorie. Nel primo dei due esperimenti della ricerca veniva chiesto ai soggetti sperimentali di tracciare un punto in movimento sullo schermo del *computer* utilizzando il cursore del *mouse*. All'insaputa dei soggetti, il punto si muoveva secondo una forma d'onda complessa che veniva ripetuta entro un intervallo di tempo specifico. A causa della ripetizione, i ricercatori si aspettavano che le prestazioni di tracciamento migliorassero nel corso delle prove in base al meccanismo di apprendimento promosso dai *feedback* che i partecipanti ottenevano. Alla luce dell'evidenza che i videogiochi non d'azione migliorano la capacità di apprendimento (Bavelier et al., 2012). Gozli e colleghi (2014) prevedevano che i due campioni, uno di giocatori esperti (*VGP- Video game players*) e uno di non giocatori (*NVGP- Non-video game players*) si sarebbero comportati in modo simile all'inizio dell'attività, ma grazie a un tasso di apprendimento motorio più rapido, i *VGP* avrebbero superato i *NVGP* nel corso delle prove. Da questa prova emerge che le prestazioni dei *VGP* non sono statisticamente migliori di quelle dei *NVGP*, ciò suggerisce che giocare cronicamente ai videogiochi d'azione richiede un controllo motorio costante ma non conferisce un vantaggio affidabile in un nuovo compito sensomotorio. L'assenza di una discrepanza nelle prestazioni dei due gruppi all'inizio del *task* non è coerente con l'ipotesi iniziale secondo cui tra i due gruppi c'era una differenza nel livello del controllo sensorimotorio. Inoltre, un altro importante risultato è che alla fine della sessione sperimentale, i *VGP* erano significativamente più precisi nel seguire il movimento ripetitivo del punto rispetto ai *NVGP* e questo può essere spiegato dalla capacità superiore del *VGP* di apprendere il nuovo compito sensomotorio. Il progetto di ricerca di Gozli e colleghi (2014) era caratterizzato da due esperimenti. Il secondo aveva lo scopo di verificare se tra i due gruppi sperimentali ci fosse una differenza nel controllo sensomotorio e prevedeva di tracciare un punto in movimento sullo schermo del *computer*, un punto che però era unico in ogni prova. Dai risultati emerge che i due gruppi non differivano nelle prove suggerendo quindi che i *VGP* abbiano una maggiore capacità di apprendere un modello di movimento prevedibile. Dato che in entrambi gli esperimenti il gruppo di *VGP* non differiva in modo significativo dai *NVGP* i ricercatori hanno ipotizzato che i risultati ottenuti potessero essere spiegati sulla base di una differenza nell'apprendimento sensomotorio e non nel controllo sensomotorio. Quello che gli autori sottolineano è che nel gruppo *VGP* i soggetti sperimentali hanno appreso ad anticipare il

movimento del punto che dovevano tracciare, e a tale apprendimento hanno partecipato i sistemi percettivi e motori.

Esistono pochi studi in letteratura che hanno indagato l'influenza dei videogiochi sull'azione motoria. In uno dei loro più recenti lavori West, Al-Aidroos e Pratt (2013) hanno indagato se gli effetti dei videogiochi, in particolar modo di quelli d'azione, si ripercuotono anche sulle sistema oculomotore durante la produzione di movimenti oculare saccadici. L'efficace guida dei movimenti oculomotori si basa su un mix di meccanismi di controllo *bottom-up* e *top-down* e l'interazione di questi meccanismi può essere dedotta dalle traiettorie dei movimenti oculari saccadici che vengono effettuati in presenza di informazioni che distraggono (McSorley, Haggard & Walker, 2006). Quando le saccadi vengono avviate molto rapidamente (cioè, subito dopo la comparsa di un bersaglio visivo e di un distrattore), i segnali *bottom-up* prodotti dal bersaglio e dal distrattore saranno convergenti su mappe spaziali all'interno del sistema oculomotore dove competono attraverso l'inibizione reciproca per la risposta saccadica. Per aiutare a risolvere la competizione tra il bersaglio e il distrattore, il sistema oculomotore impiega anche l'inibizione dall'alto verso il basso dell'attività correlata al distrattore. Se l'attività correlata al distrattore è inibita al di sotto dei livelli basali, la saccade concomitante inizialmente devierà dal distrattore. Poiché il contributo dell'inibizione *top-down* alla programmazione saccadica avviene più lentamente di quello dei segnali dal basso verso l'alto, è possibile osservare un andamento temporale delle deviazioni della traiettoria saccadica (Campbell, Al-Aidroos, Pratt & Hasher, 2009; West, Al-Aidroos, Susskind & Pratt 2011). La curvatura della traiettoria delle saccadi tende inizialmente verso i distrattori, dato che le saccadi sono inizialmente guidate dai segnali guidati dallo stimolo, e poi si discosta dai distrattori quando è l'inibizione *top-down* a determinare la programmazione saccadica. Poiché il corso temporale delle deviazioni della traiettoria saccadica fornisce una misura dell'interazione *top-down* e *bottom-up* nella programmazione saccadica, West, Al-Aidroos e Pratt (2013) hanno utilizzato questo corso temporale per valutare i cambiamenti nel funzionamento oculomotorio come risultato del gioco di videogiochi d'azione. Nello studio di West et al. (2013) hanno selezionato due campioni, uno *VGP* e uno *NVGP*. I movimenti oculari saccadici sono stati registrati misurando la posizione della pupilla attraverso un *eye-tracker* con telecamera. Il compito a cui i soggetti sperimentali erano sottoposti prevedeva una prima di fissazione

dello sguardo su un certo stimolo, veniva poi calcolato il tempo impiegato dalle saccadi per spostarsi da uno stimolo target a uno distrattore. È stato esaminato l'effetto dell'esperienza del gioco ai videogiochi d'azione sul controllo oculomotorio osservando la curvatura saccadica. Dai risultati emerge che giocare ai videogiochi d'azione influisce sul controllo oculomotorio e sull'interazione sottostante tra i processi attenzionali guidati dallo stimolo e quelli *top-down*.

Capitolo II

Effetti a breve termine del gioco sulle abilità oculo-motorie

2.1 Obiettivi e ipotesi

Nel presente elaborato verrà trattato uno degli obiettivi specifici facenti parte di una ricerca sperimentale più ampia, finalizzata ad esaminare gli effetti a breve termine del gioco sui processi cognitivi in un campione di bambini frequentanti il primo anno della scuola primaria. L'argomento di cui si tratterà nel seguente lavoro è l'effetto a breve termine del gioco sulle abilità di destrezza manuale, in particolare verrà trattato l'effetto di un NAVG su tali capacità. Nel progetto sperimentale sono stati utilizzati due tipi di videogiochi, Super Mario Kart per Nintendo Switch come AVG, e Bust-a-Move per Nintendo DS come NAVG. La scelta di includere due diversi tipi di videogiochi è stata funzionale per comprendere se è l'esperienza del gioco in sé oppure il tipo di gioco ad influire sulle abilità cognitive dei bambini. L'ipotesi di partenza su cui il seguente lavoro si è basato prevede che l'effetto a breve termine degli AVG e NAVG consista in un miglioramento delle abilità sensorimotorie e in particolare in quelle di destrezza manuale.

2.2 Disegno sperimentale

In questo studio è stato utilizzato un disegno cross-over, in cui ogni bambino ha partecipato a tutte le condizioni sperimentali in ordine controbilanciato, il che significa che l'ordine con cui hanno eseguito i diversi tipi di incontri non era fisso

2.3 Metodo

2.3.1 Partecipanti

Hanno preso parte allo studio 69 bambini, con età media di 6 anni, frequentanti il primo anno della scuola primaria presso gli Istituti "Quattro Martiri", "Luigi Luzzatti", "Elena Cornaro" e "G. Ricci Curbastro" di Padova. Il campione è stato suddiviso in due gruppi, chi è stato bravo a giocare a *Bust-a-Move*, quindi coloro che hanno ottenuto un punteggio superiore alla mediana, e chi non lo è stato. Il gruppo dei bravi giocatori comprende 35 bambini, con età pari a 6.82 anni (DS= 0.61), e quello dei cattivi giocatori è costituito da

34 bambini con età di 6.60 anni (DS= 0.39). Dalle analisi emerge che i due gruppi non differiscono significativamente nell'età ($t(67)=1.724$, $p=.089$). Non sono emerse, inoltre, differenze significative tra i due gruppi nel Test del Disegno con i cubi ($t(67)=.826$, $p=.412$); Bravi giocatori: $M=11.17$; $DS=4.51$; Cattivi giocatori: $M=10,35$; $DS=3.65$; né nel test delle somiglianze ($t(67)=-.285$, $p=.777$); Bravi giocatori: $M=11.91$; $DS=4.24$; Cattivi giocatori: $M=12.23$; $DS=5.09$.

La partecipazione è stata su base volontaria, previa compilazione e firma del consenso informato da parte dei genitori o dei tutori legali dei bambini, in cui sono state esplicitate le modalità e gli obiettivi generali dello studio.

Lo scopo della ricerca era quello di misurare gli effetti a breve termine del gioco sulle funzioni cognitive e in particolare, per quanto concerne questo elaborato, ci si è concentrati sugli effetti sulle abilità di destrezza manuale in bambini con sviluppo tipico. Dato lo scopo del progetto sperimentale sono stati esclusi dal campione soggetti con disabilità, diagnosi di disturbi specifici e psicopatologie, come Disturbo specifico del linguaggio o Disturbo dello spettro dell'autismo.

2.3.2 Procedura

La fase di raccolta dati è stata suddivisa in tre momenti diversi, cioè tre incontri individuali con ciascun bambino della durata di un'ora, distanziati da una settimana l'uno dall'altro. Il primo incontro è servito a delineare il funzionamento cognitivo del bambino, mentre i successivi due incontri erano finalizzati a valutare gli effetti a breve termine di una singola sessione di gioco di 30 minuti sulle abilità cognitive. Seguendo un protocollo randomizzato, metà del campione ha giocato nella seconda sessione sperimentale a Super Mario Kart su Nintendo Switch Deluxe e nella terza a Bust-a-Move su Nintendo DS; l'altra metà del campione ha giocato invece prima al gioco non d'azione e poi a quello d'azione.

Ciascun incontro individuale con il bambino era suddiviso in due parti: nei primi 30 minuti potevano essere somministrati i due videogiochi (AVG o NAVG) oppure dei test cognitivi e motori, costituenti una batteria di valutazione neuropsicologica di baseline. Nella seconda fase, quindi nei restanti 30 minuti venivano somministrate altre prove cognitive e motorie finalizzate a valutare l'effetto a breve termine su tali abilità, delle

attività svolte nella prima fase. È stato adottato un disegno sperimentale in doppio cieco, quindi i due momenti dell'incontro venivano condotti da due sperimentatrici diverse, con lo scopo di evitare l'effetto di aspettativa sia nei partecipanti che nelle due sperimentatrici. Lo studio in doppio cieco, in questo caso prevedeva che i bambini non fossero consapevoli della differenza tra i due giochi che gli venivano presentati, quale fosse AVG e quale NAVG, nonostante conoscessero i videogiochi a cui stavano giocando; le sperimentatrici allo stesso tempo erano consapevoli della procedura sperimentale e quindi che ci sarebbero stati bambini a cui venivano sottoposti in momenti diversi i videogiochi e la batteria di valutazione neuropsicologica, ma non sapevano in quale ordine sarebbero state presentate queste tre condizioni a ciascun bambino.

2.3.3 Materiali

Le prove somministrate di nostro interesse, e somministrate nella prima fase di ciascun incontro individuale, sono le seguenti:

- Disegno con i cubi

La presente prova è un subtest della WISC-IV (Wechsler Intelligence Scale for Children-IV), scala di intelligenza Wechsler tarata per bambini di età compresa tra i 6 e 16 anni e 11 mesi. È un test fondamentale per indagare le funzioni cognitive in questa fascia di età. Nella prova del Disegno con i cubi venivano forniti al soggetto nove cubi con le facce colorate (rosse, bianche, bianche e rosse) che doveva disporre, entro un certo limite di tempo, secondo il pattern raffigurato su dei cartoncini che gli venivano fatti vedere. Avanzando con le prove, al bambino veniva richiesto di ricreare con i cubi le figure che la sperimentatrice aveva riprodotto con gli stessi sul tavolo, anche in questo caso la prova doveva essere svolta entro un certo tempo. Il punteggio veniva attribuito in base alla correttezza e alla velocità d'esecuzione. Il test veniva interrotto nel momento in cui il bambino effettuava tre prove invalide consecutive, cioè se impiegava più tempo di quello previsto e/o se commetteva errori nel ricreare il disegno. Prima di dare inizio alla prova era necessario che la sperimentatrice si accertasse che il bambino avesse ben chiaro il lavoro che doveva svolgere. Il test del Disegno con

i cubi ha fornito informazioni circa l'organizzazione visiva, il ragionamento logico e le abilità visuoperceptive (Giunti O.S., 2008).

- Test delle somiglianze

Il test di seguito trattato è un indice di comprensione verbale, facente parte della WISC-IV. In questo compito al bambino veniva chiesto di spiegare in cosa fossero simili due parole che gli venivano presentate. Il test è composto da 23 coppie di item, le cui parole vanno da quelle più concrete ad astratte. Ciò che si misura è la capacità del bambino di individuare relazioni significative fra concetti utilizzando appropriatamente i processi di categorizzazione. Il punteggio veniva attribuito in base al livello di appropriatezza delle risposte e forniva informazioni rispetto al grado di estensione della capacità di concettualizzazione su base verbale, sulla capacità di attuare processi di astrazione su base verbale, di distinguere fra dati essenziali e non essenziali, oltre che a valutare la conoscenza lessicale e la comprensione verbale uditiva.

- Lancio del sacchetto

La presente prova è un test del Movement ABC-2 (*Movement Assessment Battery for Children*- seconda edizione, Henderson, Sugden & Barnett, 2007). Il lancio del sacchetto, è una delle prove motorie somministrate nella valutazione di *baseline*. Prevedeva che il bambino si posizionasse in un punto specifico della stanza, precedentemente preparato dalla sperimentatrice e posizionato ad 1,80 metri di distanza, e che lanciasse un sacchetto verso un bersaglio, con un movimento del braccio dal basso verso l'alto. Per ciascun bambino erano previsti un totale di dieci lanci con ciascuna mano. Nella valutazione del compito sono stati tenuti in considerazione il numero di centri conseguiti senza uscire dallo spazio entro cui si trovava il bambino, e se il bersaglio è stato raggiunto con successo. La somministrazione di questo test è stata fondamentale per indagare le abilità grosso-motorie.

Oltre alle prove cognitive e motorie i bambini, come precedentemente affermato, hanno giocato a due tipi di videogiochi diversi. Nel seguente elaborato tratteremo gli effetti del

NAVG, per cui di seguito verrà descritto il videogioco somministrato. Per Bust-a-Move è stata utilizzata la Nintendo DS. La *mission* dei bambini, in questo caso, era far scoppiare il maggior numero di palline colorate all'interno dell'area di gioco, puntando con un piccolo cannone, posizionato nella parte inferiore della stessa area, una pallina dello stesso colore di quelle che intendevano far scoppiare. Per ogni partita di Bust-a-Move è stato segnato il numero di palline scoppiate e il punteggio corrispondente.

Gli effetti prodotti dal NAVG sono stati analizzati su abilità sensorimotorie, la prova di nostro interesse e che verrà descritta è il Salvadanaio. Il seguente test è stato somministrato durante la seconda fase degli incontri con i bambini, dalla seconda sperimentatrice. È subtest della batteria Movement- ABC 2 (Movement Assessment Battery for Children seconda edizione, Henderson, Sugden & Barnett, 2007), finalizzato a valutare la coordinazione sensorimotoria, in particolare la velocità e la precisione del movimento compiuto da ciascuna delle due mani, la coordinazione delle mani nell'esecuzione di una sola operazione e la coordinazione mano-occhio. I bambini dovevano inserire sei monetine nella sessione di prova, e poi dodici monete nella prova sperimentale, all'interno di un salvadanaio di cartone posizionato perpendicolarmente rispetto al tavolo e con la fessura parallela rispetto al bordo del tavolo. La prova veniva svolta due volte, la prima con la mano dominante e la seconda con quella non dominante. Il compito doveva essere svolto il più rapidamente possibile, prendendo una sola moneta alla volta e tenendo fermo il salvadanaio con la mano opposta a quella con cui stava svolgendo la prova. Durante la prova formale il bambino veniva cronometrato e venivano annotati il tempo parziale, quello impiegato per inserire sei monetine all'interno del salvadanaio, e il tempo totale, ossia il tempo speso per inserire tutte le 12 monete. Il cronometro veniva interrotto quando l'ultima moneta toccava il fondo del salvadanaio. Venivano annotati gli errori commessi dai bambini, quindi se prendevano più di una moneta alla volta dal tavolo, se la facevano cadere fuori dal salvadanaio o per terra, o se cambiavano la mano durante l'esecuzione del compito o se venivano usate entrambe.

Capitolo III

Risultati

Le analisi effettuate per quanto concerne la prima fase di *baseline* hanno dimostrato che i due gruppi del campione, bravi e cattivi a Bust-a-Move, non differiscono in modo significativo nei test della scala WISC-IV, come riportato precedentemente.

Non sono emerse differenze significative nelle abilità motorie di mira, valutate tramite somministrazione del test del lancio del sacchetto sia con la mano dominante ($t(67)=.091$, $p=.928$; Buoni giocatori: $M=6,63$; $DS=3.34$ dei canestri; Cattivi giocatori: $M=6.56$; $DS=3.04$) né con la mano non dominante ($t(67)=.409$, $p=.684$; Buoni giocatori: $M=6.37$; $DS=3.00$; Cattivi giocatori: $M=6.09$; $DS=2.73$) e abilità di destrezza manuale studiate grazie al test del salvadanaio. I due gruppi hanno commesso lo stesso numero di errori (errori con mano dominante Bravi giocatori: $M= 0.66$, $DS= 2.13$; Cattivi giocatori: $M= 0.65$, $DS= 1.12$, $p= .981$; errori con mano non dominante (Bravi giocatori: $M= 0.60$, $DS= 1.31$; Cattivi giocatori: $M= 1.06$, $DS= 1.63$, $p= .202$) e hanno impiegato lo stesso tempo per portare a termine il compito, sia con la mano dominante che con quella non dominante (tempo nel con mano dominante Bravi giocatori: $M= 23.23$, $DS= 5.25$; Cattivi giocatori: $M= 24.77$, $DS= 6.27$, $p= .271$; tempo con mano non dominante Bravi giocatori: $M= 25.01$, $DS= 4.70$; Cattivi giocatori: $M= 27.33$, $DS= 7.86$, $p= .140$).

Nella fase di *baseline* i due gruppi studiati non si sono differenziati nemmeno nelle prove che hanno indagato la fonologia e la memoria a breve termine, quindi la lettura di parole (tempo nella lista di parole Bravi giocatori: $M= 186.39$, $DS= 149.60$ Cattivi giocatori: $M= 160.69$, $DS = 105.68$, $p= .424$; errori nella Lista di parole Bravi giocatori: $M= 6.51$, $DS = 7.22$; Cattivi giocatori: $M= 4.71$, $DS = 4.63$, $p= .238$) e la Prova di memoria a breve termine di non-parole (fonemi corretti della lista di non parole Bravi giocatori: $M = 26.60$, $DS = 9.32$; Cattivi giocatori: $M= 27.12$, $DS = 14.53$, $p = .860$), né nella Ricerca visiva per quanto riguarda il numero di item individuati (Bravi giocatori: $M= 4.40$, $DS= 1.14$, Cattivi giocatori: $M= 4.71$, $DS= 0.52$, $p= .160$) e il tempo impiegato (Bravi giocatori: $M= 25.67$, $DS= 11.84$; Cattivi giocatori: $M = 28.69$, $DS = 10.88$, $p = .274$).

Per analizzare gli effetti a breve termine indotti dal NAVG sulle abilità di destrezza manuale, è stata condotta una analisi della varianza (ANOVA) con disegno 2x2x2: due variabili entro i soggetti, cioè i due tempi delle valutazioni (*baseline* e post-NAVG) e il tipo di mano impiegata per svolgere il compito (dominante o non dominante); e una variabile tra i soggetti, cioè bravi e cattivi giocatori al NAVG. La variabile dipendente era il tempo impiegato dai bambini per svolgere il compito

Dalle analisi emerge un effetto del tempo della valutazione ($F(1,67)= 4.683, p=.034$), le prestazioni al test del salvadanaio differiscono quindi tra la fase di *baseline* e quella di NAVG, indipendentemente dal gruppo dei bravi e dei cattivi giocatori (si veda la Figura 1). Nella fase di *baseline* i partecipanti hanno eseguito il compito più lentamente ($M=25.08$ sec; $DS=.68$) rispetto a quanto fatto nella fase post-NAVG ($M=23.91$ sec.; $DS=.46$).

Oltre a tale evidenza è emerso anche un effetto significativo della mano utilizzata ($F(1,67)=40.243, p<0.001$), quindi le prestazioni al test del salvadanaio sono risultati differenti se eseguiti con la mano dominante oppure con quella non dominante (si veda la Figura 2). Anche in questo caso l'effetto è indipendente dal gruppo, oltre che dal momento di valutazione. Tali risultati indicano che i partecipanti effettuano una prestazione migliore, in termini di velocità, con la mano dominante (Buoni giocatori: $M=23.22$; $DS=5.24$; Cattivi giocatori: $M=24.76$; $DS=6.27$), rispetto alla mano non dominante (Buoni giocatori: $M=25.00$; $DS=4.69$; Cattivi giocatori: $M=27.32$; $DS=7.85$) indipendentemente da quale gruppo appartenessero (i.e buoni o cattivi giocatori) e da quale sessione avevano affrontato precedentemente (i.e *baseline* o NAVG).

La stessa analisi è stata condotta sugli errori commessi durante l'esecuzione del compito, e non è emerso alcun effetto significativo del tempo della valutazione ($F(1,66)=0.195, p=0.660$) o della mano utilizzata ($F(1,66)=1.791, p=0.185$).

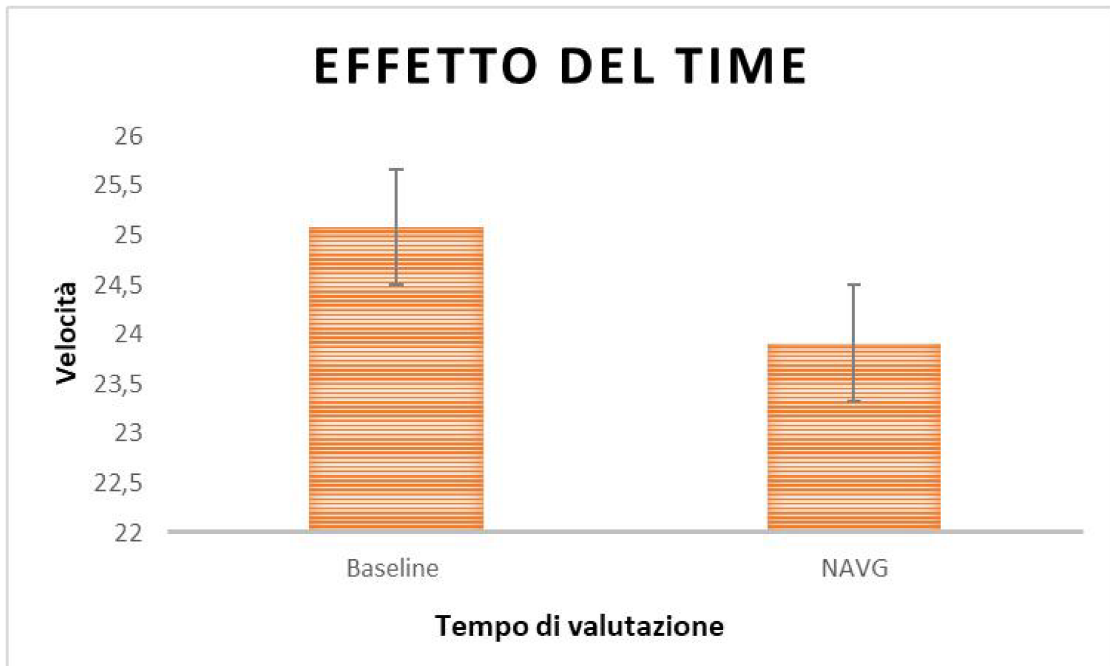


Figura 1. Sono state riportate le medie della velocità di esecuzione del Compito del Salvadanaio nelle due diverse fasi di valutazione considerate (*Baseline* vs. *NAVIG*). Le barre d'errore rappresentano l'errore standard. È significativo l'effetto del *NAVIG* sul tempo con cui il compito è stato eseguito dall'intero campione.

Grazie alle analisi è emerso che l'effetto principale del tempo di somministrazione riguarda una riduzione del tempo di esecuzione del compito del salvadanaio. Come riportato sopra i partecipanti hanno eseguito il compito più lentamente nella fase di baseline ($M=25.08$ sec; $DS=.68$) rispetto a quanto fatto nella fase post-*NAVIG* ($M=23.91$ sec.; $DS=.46$).

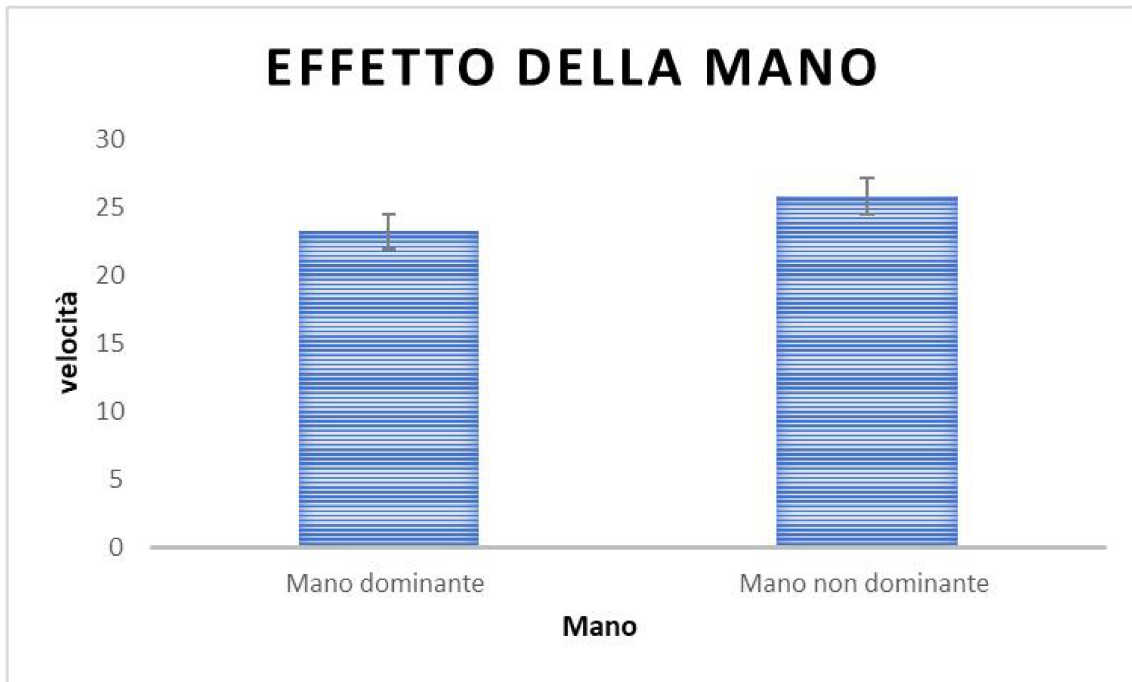


Figura 2. Sono state riportate le medie della velocità della mano dominante e non dominante nell'esecuzione del Compito del Salvadanaio. È significativo l'effetto della mano dominante sui tempi di esecuzione del compito

L'effetto principale della mano mostra una riduzione dei tempi nello svolgimento del compito con la mano dominante ($M=23.19$; $DS=.54$) rispetto alla mano non dominante ($M=25.79$; $DS=.56$).

Capitolo IV

Discussione e conclusioni

L'obiettivo del progetto di ricerca era di indagare gli effetti a breve termine di due diverse tipologie di gioco, un AVG (Super Mario Kart) e un NAVG (Bust-a-Move) sulle funzioni cognitive di bambini in età scolare. A tal fine è stato selezionato un campione di bambini frequentanti il primo anno della scuola primaria a cui è stata somministrata una batteria neuropsicologica, costruita selezionando prove che consentissero di ottenere un profilo di funzionamento più completo possibile. Sono state indagate le abilità fonologiche, di lettura, quelle sensorimotorie, il quoziente intellettivo e la memoria a breve termine. Nel seguente elaborato sono stati riportati esclusivamente i dati inerenti alle abilità sensorimotorie.

I risultati ottenuti dalle analisi statistiche evidenziano un incremento della velocità nello svolgimento del test del salvadanaio dopo aver giocato con Bust-a-Move. È noto da tempo che i movimenti rapidi degli arti dipendano in modo significativo dalle informazioni provenienti dagli occhi (Woodworth, 1899). La capacità di integrare la percezione visiva, cioè l'elaborazione delle informazioni catturate tramite gli occhi e processate a livello corticale, e l'azione delle mani, per compiere movimenti di diversi gradi di complessità è chiamata coordinazione oculo-manuale. Nel seguente progetto di tesi, la coordinazione occhio-mano è stata valutata somministrando il test del salvadanaio, un subtest della batteria Movement-ABC 2 (Movement Assessment Battery for Children seconda edizione, Henderson, Sugden & Barnett, 2007). Avendo riscontrato nell'intero campione, bravi e cattivi giocatori, un miglioramento nell'esecuzione del compito del salvadanaio, si può dedurre che giocare al videogioco in questione, influisce sulle abilità fino-motorie e quindi di destrezza manuale.

Non essendoci letteratura scientifica sugli effetti a breve termine di un NAVG sulle abilità sensorimotorie nel presente elaborato si è cercato di muovere i primi passi per comprendere tale fenomeno e i processi che ne sottostanno. Si può presupporre che il tempo impiegato a giocare a Bust-a-Move possa aver influito positivamente sulla coordinazione occhio-mano. Dato il coinvolgimento del cervelletto nella coordinazione motoria, nell'esecuzione e nel controllo dei movimenti, si potrebbe ipotizzare che nel

campione studiato, giocare a Bust-a-Move abbia indotto una maggiore attivazione del cervelletto determinando così una migliore *performance* nel Test del Salvadanaio che si è susseguita. Il cervelletto è una struttura coinvolta nelle prestazioni motorie, è responsabile dell'apprendimento motorio, dell'equilibrio e più in generale del controllo motorio. In letteratura esistono dati che affermano l'efficacia dell'uso di videogiochi d'azione, AVG, sulle prestazioni motorie e quindi anche sull'attivazione del cervelletto. Questa ricerca potrebbe rappresentare un primo segnale per indirizzare l'attenzione sull'efficacia dei NAVG nell'attivare il cervelletto e favorire così un miglioramento di destrezza manuale che stiamo analizzando nel presente elaborato. Tuttavia è necessario condurre ulteriori e più approfondite ricerche per fondare una solida base scientifica che sostenga queste prime evidenze. Potrebbe essere utile servirsi anche di strumenti di neuroimaging, per valutare dal punto di vista funzionale e strutturale l'attivazione del cervelletto durante il gioco e comprendere se l'effetto che abbiamo osservato del NAVG su tale struttura è riscontrabile in popolazioni di età diverse da quella del nostro campione.

Il NAVG, in cui i bambini erano chiamati a prendere delle decisioni, potrebbe aver attivato il centro decisionale a livello nervoso, cioè la corteccia orbito-frontale, situata in prossimità del sistema della ricompensa e del sistema limbico. Ogni decisione presa produce un'emozione e questo determina il rilascio di dopamina, un neurotrasmettitore endogeno facente parte della famiglia delle catecolamine, dal nucleo accumbens (Bateman, 2009). Questo processo avviene quando il giocatore è prossimo alla vincita o all'obiettivo che deve raggiungere, in cui tuttavia prova un senso di frustrazione dato dalla tendenza del nucleo accumbens a perseverare nel comportamento per rinforzare il comportamento in corso (Bateman e Nacke, 2010). L'esperienza di gioco dei bambini, inteso come un episodio che genera una risposta di stress (Bateman e Nacke, 2010) e un aumento del livello di arousal, potrebbe aver prodotto il rilascio di altri neurotrasmettitori oltre alla dopamina, come ad esempio la noradrenalina, rilasciata dal locus ceruleus quando si verificano una serie di cambiamenti fisiologici e implicata nei processi di allerta, e la serotonina, nota come "ormone della felicità".

Alcuni di questi neurotrasmettitori vengono rilasciati all'attivazione di alcuni network come il *Saliency Network* (SN- Network della Salienza) e il Central Executive Network (CEN- Network Esecutivo Centrale). È plausibile pensare quindi al coinvolgimento di questi due network durante l'esperienza di gioco NAVG. L'interazione dei due network

supporta la memoria di lavoro e l'attenzione, in particolare, il SN riceve e fornisce un'amplificazione selettiva delle informazioni salienti, quindi genera un segnale di controllo top-down che attiva la risposta del CEN alle informazioni salienti, determinando lo spostamento dell'attenzione e l'esecuzione del controllo. Il SN consente di orientarsi tra stimoli esterni ed interni, focalizzando nel modo corretto l'attenzione (Menon e Uddin, 2010); comprende diverse strutture, l'insula anteriore (AI), la corteccia cingolata anteriore dorsale (DACC) che insieme costituiscono uno specifico network ed elaborano stimoli salienti, che si differenziano da altri e catturano l'attenzione (Baghdadi, Towhidkhah, e Rajabi, 2021), e il talamo (Th). Il CEN, teorizzato da Posner nel 1985, è implicato nei processi legati all'elaborazione degli stimoli esterni, nel controllo volontario del comportamento, nella regolazione delle emozioni, grazie alle strutture che lo compongono, quali la corteccia prefrontale dorsolaterale (DLPFC), la corteccia prefrontale dorsomediale (DMPFC), la corteccia parietale posteriore dorsale (DPPC) e i campi oculari frontali (FEF). Si può supporre che l'attivazione di tali network abbia incrementato la capacità di dirigere l'attenzione verso stimoli target e di riconoscere le nuove informazioni, peculiarità che permetterebbe di agire e reagire alla sfida che il NAVG ha presentato. Il rilascio dei neurotrasmettitori citati e l'attivazione di network quali il SN e il CEN coinvolti nei processi attentivi, grazie al NAVG potrebbero spiegare la riduzione dei tempi nel test del salvadanaio nella fase post-NAVG rispetto alla fase di baseline.

Dalle analisi statistiche effettuate emerge un ulteriore dato significativo, l'effetto della mano sul compito del Salvadanaio. Ciò che è emerso è una differente modalità di esecuzione del compito in base alla mano usata, che si traduce in un aumento della velocità senza che si verifichi un decremento significativo dell'accuratezza. Dai risultati ottenuti, e quindi il solo aumento della velocità di esecuzione del compito del Salvadanaio possiamo ipotizzare che il NAVG non influisca sui movimenti oculari poiché i due gruppi del campione (*i.e.* Buoni e Cattivi giocatori) non differiscono significativamente negli errori commessi, e quindi nella precisione dell'esecuzione del compito.

Sulla base dei risultati ottenuti possiamo affermare che una breve sessione di gioco con il videogioco non d'azione sembra potenziare le abilità motorie-fini, sia nei bravi giocatori che nei cattivi giocatori. È necessario approfondire la ricerca sugli effetti dei videogiochi non d'azione sulle funzioni cognitive e motorie, in particolare sulle abilità sensorimotorie

per poter creare basi solide scientifiche su cui basare progetti di ricerca futuri. Potrebbe essere interessante valutare, e comprendere quindi l'efficacia dell'uso di questa tipologia di videogiochi, come strumento per potenziare determinate abilità in bambini con sviluppo atipico e tipico.

BIBLIOGRAFIA

- Abrams, R. A., Meyer, D. E., & Kornblum, S. (1990). Eye-hand coordination: oculomotor control in rapid aimed limb movements. *Journal of experimental psychology. Human perception and performance*, 16(2), 248–267.
- American Psychiatric Association. (2013). *Diagnostic and Statistical Manual of Mental Disorders*. 5th Edn. Washington, DC: American Psychiatric Association
- Abbruzzese, G., & Berardelli, A. (2003). Sensorimotor integration in movement disorders. *Movement disorders*, 18(3), 231-240.
- Alloway, T. P., & Temple, K. J. (2007). A comparison of working memory skills and learning in children with developmental coordination disorder and moderate learning difficulties. *Applied Cognitive Psychology*, 21(4), 473-487.
- Andersen, R. A., Andersen, K. N., Hwang, E. J., & Hauschild, M. (2014). Optic ataxia: from Balint's syndrome to the parietal reach region. *Neuron*, 81(5), 967-983.
- Arthur, T., Vine, S., Brosnan, M., & Buckingham, G. (2019). Exploring how material cues drive sensorimotor prediction across different levels of autistic-like traits. *Experimental brain research*, 237(9), 2255–2267.
- Apps, R., & Hawkes, R. (2009). Cerebellar cortical organization: a one-map hypothesis. *Nature Reviews Neuroscience*, 10(9), 670-681.
- Baghdadi, G., Towhidkhah, F., & Rajabi, M. (2021). *Neurocognitive Mechanisms of Attention: Computational Models, Physiology, and Disease States*. Academic Press.
- Ballard, D. H., Hayhoe, M. M., Li, F., & Whitehead, S. D. (1992). Hand-eye coordination during sequential tasks. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series B: Biological Sciences*, 337(1281), 331-339.
- Bateman, C. (2009). *Beyond game design: Nine steps toward creating better videogames*. Cengage Learning
- Bateman, C., & Nacke, L.E. (2010). *The neurobiology of play*. Future Play.

- Bastian, A. J. (2006). Learning to predict the future: the cerebellum adapts feedforward movement control. *Current opinion in neurobiology*, *16*(6), 645-649.
- Bateson P. (2015). Playfulness and creativity. *Current biology : CB*, *25*(1), R12–R16.
- Bedford, R., Pickles, A., & Lord, C. (2016). Early gross motor skills predict the subsequent development of language in children with autism spectrum disorder. *Autism research*, *9*(9), 993-1001.
- Bavelier, D., Green, C. S., Han, D. H., Renshaw, P. F., Merzenich, M. M., & Gentile, D. A. (2011). Brains on video games. *Nature reviews neuroscience*, *12*(12), 763-768.
- Bhat, A. N., Landa, R. J., & Galloway, J. C. (2011). Current perspectives on motor functioning in infants, children, and adults with autism spectrum disorders. *Physical therapy*, *91*(7), 1116-1129.
- Bhat, A. N., Galloway, J. C., & Landa, R. (2012). Relation between early motor delay and later communication delay in infants at risk for autism. *Infant Behavior and Development*, *35*(4), 838-846.
- Bhatia, K. P., & Marsden, C. D. (1994). The behavioural and motor consequences of focal lesions of the basal ganglia in man. *Brain*, *117*(4), 859-876.
- Bell, C. C., Han, V., & Sawtell, N. B. (2008). Cerebellum-like structures and their implications for cerebellar function. *Annu. Rev. Neurosci.*, *31*, 1-24.
- Bertenthal, B., & Von Hofsten, C. (1998). Eye, head and trunk control: The foundation for manual development. *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*, *22*(4), 515-520.
- Blakemore, S. J., & Sirigu, A. (2003). Action prediction in the cerebellum and in the parietal lobe. *Experimental Brain Research*, *153*(2), 239-245.
- Bloch, H., & Carchon, I. (1992). On the onset of eye-head coordination in infants. *Behavioural brain research*, *49*(1), 85-90.
- Bologna, M., Paparella, G., Fasano, A., Hallett, M., & Berardelli, A. (2020). Evolving concepts on bradykinesia. *Brain*, *143*(3), 727-750.
- Bologna, M., & Berardelli, A. (2017). Cerebellum: an explanation for dystonia?. *Cerebellum & ataxias*, *4*(1), 1-9.

- Boot, W. R., Kramer, A. F., Simons, D. J., Fabiani, M., & Gratton, G. (2008). The effects of video game playing on attention, memory, and executive control. *Acta psychologica, 129*(3), 387–398.
- Borreggine, K. L., & Kaschak, M. P. (2006). The action–sentence compatibility effect: It's all in the timing. *Cognitive Science, 30*(6), 1097–1112.
- Brookman, A., McDonald, S., McDonald, D., & Bishop, D. V. M. (2013). Fine motor deficits in reading disability and language impairment: Same or different? *PeerJ, 1* (3), Article e217. <https://doi.org/10.7717/peerj.217>
- Brooks, V. B. (1986). *The Neural Basis of Motor Control*. New York: Oxford University Press Inc.
- Buckner, R. L. (2013). The cerebellum and cognitive function: 25 years of insight from anatomy and neuroimaging. *Neuron, 80*(3), 807-815.
- Butler, A. J., James, T. W., & James, K. H. (2011). Enhanced multisensory integration and motor reactivation after active motor learning of audiovisual associations. *Journal of Cognitive Neuroscience, 23*, 3515–3528.
- Burghardt, G. M. (2001). Attributes and neural substrates. *Handbook of behavioral neural biology, 13*, 327-366.
- Caminiti, R., Innocenti, G. M., & Battaglia-Mayer, A. (2015). Organization and evolution of parieto-frontal processing streams in macaque monkeys and humans. *Neuroscience & Biobehavioral Reviews, 56*, 73-96.
- Campbell, K. L., Al-Aidroos, N., Pratt, J., & Hasher, L. (2009). Repelling the young and attracting the old: examining age-related differences in saccade trajectory deviations. *Psychology and Aging, 24*(1), 163.
- Carlton, L. G. (1981). Visual information: The control of aiming movements. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology, 33*(1), 87-93.
- Cheng, C. H., Chan, P. Y. S., Hsu, S. C., & Liu, C. Y. (2018). Meta-analysis of sensorimotor gating in patients with autism spectrum disorders. *Psychiatry research, 262*, 413-419.

- Chukoskie, L., Townsend, J., & Westerfield, M. (2013). Motor skill in autism spectrum disorders: a subcortical view. *International review of neurobiology*, *113*, 207-249.
- Coleman, R., Piek, J. P., & Livesey, D. J. (2001). A longitudinal study of motor ability and kinaesthetic acuity in young children at risk of developmental coordination disorder. *Human movement science*, *20*(1-2), 95-110.
- Coll, S. M., Foster, N. E., Meilleur, A., Brambati, S. M., & Hyde, K. L. (2020). Sensorimotor skills in autism spectrum disorder: A meta-analysis. *Research in Autism Spectrum Disorders*, *76*, 101570.
- Crossman, E. R. (1959). A theory of the acquisition of speed-skill*. *Ergonomics*, *2*(2), 153-166.
- Cui, L., Wang, Y., Wang, H., Tian, S., & Kong, J. (2000). Human brain sub-systems for discrimination of visual shapes. *Neuroreport*, *11*(11), 2415-2418.
- Custers, R., & Aarts, H. (2010). The unconscious will: How the pursuit of goals operates outside of conscious awareness. *Science*, *329*(5987), 47-50.
- Debrabant, J., Gheysen, F., Caeyenberghs, K., Van Waelvelde, H., & Vingerhoets, G. (2013). Neural underpinnings of impaired predictive motor timing in children with developmental coordination disorder. *Research in developmental disabilities*, *34*(5), 1478-1487.
- Delcour, M., Russier, M., Castets, F., Turle-Lorenzo, N., Canu, M. H., Cayetanot, F., ... & Coq, J. O. (2018). Early movement restriction leads to maladaptive plasticity in the sensorimotor cortex and to movement disorders. *Scientific reports*, *8*(1), 1-15.
- Deliagina, T. G., Zelenin, P. V., & Orlovsky, G. N. (2012). Physiological and circuit mechanisms of postural control. *Current opinion in neurobiology*, *22*(4), 646-652.
- Diamond, A. (2000). Close interrelation of motor development and cognitive development and of the cerebellum and prefrontal cortex. *Child Development*, *71*, 44-56.
- Diamond, A. (2013). Executive functions. *Annual review of psychology*, *64*, 135.

Dichter, G. S., Felder, J. N., & Bodfish, J. W. (2009). Autism is characterized by dorsal anterior cingulate hyperactivation during social target detection. *Social cognitive and affective neuroscience*, 4(3), 215–226.

Donner, T. H., Siegel, M., Fries, P., & Engel, A. K. (2009). Buildup of choice-predictive activity in human motor cortex during perceptual decision making. *Current Biology*, 19(18), 1581-1585.

Dowd, A. M., McGinley, J. L., Taffe, J. R., & Rinehart, N. J. (2012). Do planning and visual integration difficulties underpin motor dysfunction in autism? A kinematic study of young children with autism. *Journal of autism and developmental disorders*, 42(8), 1539–1548

Du, W., Wilmut, K., & Barnett, A. L. (2015). Level walking in adults with and without developmental coordination disorder: an analysis of movement variability. *Human movement science*, 43, 9-14.

Edition, F. (2013). Diagnostic and statistical manual of mental disorders. *Am Psychiatric Assoc*, 21(21), 591-643.

Einspieler, C., Sigafos, J., Bartl-Pokorny, K. D., Landa, R., Marschik, P. B., & Bölte, S. (2014). Highlighting the first 5 months of life: General movements in infants later diagnosed with autism spectrum disorder or Rett syndrome. *Research in Autism Spectrum Disorders*, 8(3), 286-291.

Einspieler, C., Peharz, R., & Marschik, P. B. (2016). Fidgety movements—tiny in appearance, but huge in impact. *Jornal de Pediatria*, 92, 64-70.

Ernst, M. O., & Bühlhoff, H. H. (2004). Merging the senses into a robust percept. *Trends in Cognitive Sciences*, 8(4), 162–169.

Fatemi, S. H., Halt, A. R., Realmuto, G., Earle, J., Kist, D. A., Thuras, P., & Merz, A. (2002). Purkinje cell size is reduced in cerebellum of patients with autism. *Cellular and molecular neurobiology*, 22(2), 171-175.

Fooken, J., & Spering, M. (2020). Eye movements as a readout of sensorimotor decision processes. *Journal of Neurophysiology*, 123(4), 1439-1447.

Friston K. (2010). The free-energy principle: a unified brain theory?. *Nature reviews. Neuroscience*, 11(2), 127–138.

Friston, K. J., Daunizeau, J., Kilner, J., & Kiebel, S. J. (2010). Action and behavior: a free-energy formulation. *Biological cybernetics*, 102(3), 227-260.

Gabbard, C., & Bobbio, T. (2011). The inability to mentally represent action may be associated with performance deficits in children with developmental coordination disorder. *International Journal of Neuroscience*, 121(3), 113-120.

Georgopoulos, A. P. (1991). Higher order motor control. *Annual review of neuroscience*, 14(1), 361-377.

Gibson, J. J. (2014). *The ecological approach to visual perception: classic edition*. Psychology press.

Gittis, A. H., Berke, J. D., Bevan, M. D., Chan, C. S., Mallet, N., Morrow, M. M., & Schmidt, R. (2014). New roles for the external globus pallidus in basal ganglia circuits and behavior. *Journal of Neuroscience*, 34(46), 15178-15183.

Glickstein, M. (2007, September). Cerebellum and the sensory guidance of movement. In *Novartis Foundation Symposium 218-Sensory Guidance of Movement: Sensory Guidance of Movement: Novartis Foundation Symposium 218* (pp. 252-271). Chichester, UK: John Wiley & Sons, Ltd..

Gori, M., Del Viva, M., Sandini, G., & Burr, D. C. (2008). Young children do not integrate visual and haptic form information. *Current Biology*, 18(9), 694-698.

Gowen, E., & Hamilton, A. (2013). Motor abilities in autism: a review using a computational context. *Journal of autism and developmental disorders*, 43(2), 323-344.

Gozli, D. G., Bavelier, D., & Pratt, J. (2014). The effect of action video game playing on sensorimotor learning: Evidence from a movement tracking task. *Human movement science*, 38, 152-162.

Graham, K. L., & Burghardt, G. M. (2010). Current perspectives on the biological study of play: signs of progress. *The Quarterly Review of Biology*, 85(4), 393-418.

Graziano, M. (2008). *The intelligent movement machine: An ethological perspective on the primate motor system*. Oxford University Press.

Graziano, M. S. (2016). Ethological action maps: a paradigm shift for the motor cortex. *Trends in cognitive sciences*, 20(2), 121-132.

Green, C. S., & Bavelier, D. (2012). Learning, attentional control, and action video games. *Current biology*, 22(6), R197-R206.

Grillner, S. (1985). Neurobiological bases of rhythmic motor acts in vertebrates. *Science*, 228(4696), 143-149.

Guenther, F. H. (2016). *Neural control of speech*. MIT Press.

Hadders-Algra, M. (2010). Variation and variability: key words in human motor development. *Physical therapy*, 90(12), 1823-1837.

Hadders-Algra, M. (2018). Neural substrate and clinical significance of general movements: an update. *Developmental Medicine & Child Neurology*, 60(1), 39-46.

Han, J., Waddington, G., Adams, R., Anson, J., & Liu, Y. (2016). Assessing proprioception: a critical review of methods. *Journal of Sport and Health Science*, 5(1), 80-90.

Hannant, P., Cassidy, S., Tavassoli, T., & Mann, F. (2016). Sensorimotor difficulties are associated with the severity of autism spectrum conditions. *Frontiers in integrative neuroscience*, 10, 28.

Hannant, P., Tavassoli, T., & Cassidy, S. (2016). The role of sensorimotor difficulties in autism spectrum conditions. *Frontiers in neurology*, 7, 124.

Heathcote, A., Brown, S., & Mewhort, D. J. (2000). The power law repealed: The case for an exponential law of practice. *Psychonomic bulletin & review*, 7(2), 185-207.

Henderson, S.E., Sugden, D.A., & Barnett, A. (2007). *The movement Assessment Battery for Children 2*. London: Pearson Assessment.

Herzfeld, D. J., & Shadmehr, R. (2014). Cerebellum estimates the sensory state of the body. *Trends in Cognitive Sciences*, 18(2), 66-67.

- Hickok, G. (2012). Computational neuroanatomy of speech production. *Nature reviews neuroscience*, *13*(2), 135-145.
- Heuer, H., & Sülzenbrück, S. (2012). Mind and movement. *Psychological research*, *76*(2), 159–170.
- Hoeren, M., Kümmerer, D., Bormann, T., Beume, L., Ludwig, V. M., Vry, M. S., ... & Weiller, C. (2014). Neural bases of imitation and pantomime in acute stroke patients: distinct streams for praxis. *Brain*, *137*(10), 2796-2810.
- Hollander, E., Anagnostou, E., Chaplin, W., Esposito, K., Haznedar, M. M., Licalzi, E., Wasserman, S., Soorya, L., & Buchsbaum, M. (2005). Striatal volume on magnetic resonance imaging and repetitive behaviors in autism. *Biological psychiatry*, *58*(3), 226–232.
- Holtmaat, A., & Svoboda, K. (2009). Experience-dependent structural synaptic plasticity in the mammalian brain. *Nature Reviews Neuroscience*, *10*(9), 647-658.
- Houde, J. F., & Nagarajan, S. S. (2011). Speech production as state feedback control. *Frontiers in human neuroscience*, *5*, 82.
- Huber, D., Gutnisky, D. A., Peron, S., O’connor, D. H., Wiegert, J. S., Tian, L., ... & Svoboda, K. (2012). Multiple dynamic representations in the motor cortex during sensorimotor learning. *Nature*, *484*(7395), 473-478.
- Huizinga, J. (1938). *Homo ludens: A study of the play-element in culture*.
- Hutchinson, J. B., Uncapher, M. R., Weiner, K. S., Bressler, D. W., Silver, M. A., Preston, A. R., & Wagner, A. D. (2014). Functional heterogeneity in posterior parietal cortex across attention and episodic memory retrieval. *Cerebral Cortex*, *24*(1), 49-66.
- Iverson, J. M., & Braddock, B. A. (2011). Gesture and motor skill in relation to language in children with language impairment.
- Johansson, R. S., Westling, G., Bäckström, A., & Flanagan, J. R. (2001). Eye–hand coordination in object manipulation. *Journal of neuroscience*, *21*(17), 6917-6932.

- Johnston, J. S., Ali, J. B., Hill, E. L., & Bremner, A. J. (2017). Tactile localization performance in children with developmental coordination disorder (DCD) corresponds to their motor skill and not their cognitive ability. *Human Movement Science, 53*, 72-83
- Joo, S. J., Katz, L. N., & Huk, A. C. (2016). Decision-related perturbations of decision-irrelevant eye movements. *Proceedings of the National Academy of Sciences, 113*(7), 1925-1930.
- Kabakoff, H., Gritsyk, O., Harel, D., Tiede, M., Preston, J. L., Whalen, D. H., & McAllister, T. (2022). Characterizing sensorimotor profiles in children with residual speech sound disorder: a pilot study. *Journal of Communication Disorders, 106*230.
- Kaji, R., Bhatia, K., & Graybiel, A. M. (2018). Pathogenesis of dystonia: is it of cerebellar or basal ganglia origin?. *Journal of Neurology, Neurosurgery & Psychiatry, 89*(5), 488-492.
- Kaller, C. P., Rahm, B., Spreer, J., Weiller, C., & Unterrainer, J. M. (2011). Dissociable contributions of left and right dorsolateral prefrontal cortex in planning. *Cerebral cortex, 21*(2), 307-317.
- Katschmarsky, S., Cairney, S., Maruff, P., Wilson, P. H., & Currie, J. (2001). The ability to execute saccades on the basis of efference copy: impairments in double-step saccade performance in children with developmental co-ordination disorder. *Experimental Brain Research, 136*(1), 73-78.
- Kaufman, M. T., Churchland, M. M., Ryu, S. I., & Shenoy, K. V. (2015). Vacillation, indecision and hesitation in moment-by-moment decoding of monkey motor cortex. *elife, 4*, e04677.
- Kawai, R., Markman, T., Poddar, R., Ko, R., Fantana, A. L., Dhawale, A. K., ... & Ölveczky, B. P. (2015). Motor cortex is required for learning but not for executing a motor skill. *Neuron, 86*(3), 800-812.
- Kiefer, M., & Pulvermüller, F. (2012). Conceptual representations in mind and brain: Theoretical developments, current evidence and future directions. *cortex, 48*(7), 805-825.

- Koziol, L. F., Budding, D., Andreasen, N., D'Arrigo, S., Bulgheroni, S., Imamizu, H., ... & Yamazaki, T. (2014). Consensus paper: the cerebellum's role in movement and cognition. *The Cerebellum*, *13*(1), 151-177.
- Krampe, R. T. (2002). Aging, expertise and fine motor movement. *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*, *26*(7), 769-776.
- Kuang, S., Morel, P., & Gail, A. (2016). Planning movements in visual and physical space in monkey posterior parietal cortex. *Cerebral cortex*, *26*(2), 731-747.
- Land, M., Mennie, N., & Rusted, J. (1999). The roles of vision and eye movements in the control of activities of daily living. *Perception*, *28*(11), 1311-1328.
- Lawrence, D. G., & Kuypers, H. G. (1968). The functional organization of the motor system in the monkey. II. The effects of lesions of the descending brain-stem pathways. *Brain : a journal of neurology*, *91*(1), 15-36.
- LeBarton, E. S., & Iverson, J. M. (2013). Fine motor skill predicts expressive language in infant siblings of children with autism. *Developmental science*, *16*(6), 815-827.
- Li, R. W., Ngo, C., Nguyen, J., & Levi, D. M. (2011). Video-game play induces plasticity in the visual system of adults with amblyopia. *PLoS Biology*, *9*(8).
<https://doi.org/10.1371/journal.pbio.1001135>
- Libertus, K., & Violi, D. A. (2016). Sit to talk: Relation between motor skills and language development in infancy. *Frontiers in psychology*, *7*, 475.
- Lim, S. J., Fiez, J. A., & Holt, L. L. (2014). How may the basal ganglia contribute to auditory categorization and speech perception?. *Frontiers in neuroscience*, *8*, 230.
- Liu, J., Wang, X. Q., Zheng, J. J., Pan, Y. J., Hua, Y. H., Zhao, S. M., ... & Zhong, J. G. (2012). Effects of Tai Chi versus proprioception exercise program on neuromuscular function of the ankle in elderly people: a randomized controlled trial. *Evidence-based complementary and alternative medicine*, *2012*.
- Louis, E. D., & Faust, P. L. (2020). Essential tremor pathology: neurodegeneration and reorganization of neuronal connections. *Nature Reviews Neurology*, *16*(2), 69-83.

- Luo, Z., Jose, P. E., Huntsinger, C. S., & Pigott, T. D. (2007). Fine motor skills and mathematics achievement in East Asian American and European American kindergartners and first graders. *British Journal of Developmental Psychology*, 25(4), 595–614
- MacDonald, M., Lord, C., & Ulrich, D. (2013). The relationship of motor skills and adaptive behavior skills in young children with autism spectrum disorders. *Research in autism spectrum disorders*, 7(11), 1383-1390.
- Machado, S., Cunha, M., Velasques, B., Minc, D., Teixeira, S., Domingues, C. A., ... & Ribeiro, P. (2010). Sensorimotor integration: basic concepts, abnormalities related to movement disorders and sensorimotor training-induced cortical reorganization. *Rev Neurol*, 51(7), 427-436.
- Malhi, P., & Singhi, P. (2014). A retrospective study of toddlers with autism spectrum disorder: Clinical and developmental profile. *Annals of Indian Academy of Neurology*, 17(1), 25.
- Manto, M. (2008). Tremorgenesis: a new conceptual scheme using reciprocally innervated circuit of neurons. *Journal of translational medicine*, 6(1), 1-6.
- Martin-Rodriguez, J. F., & Mir, P. (2020). Short-afferent inhibition and cognitive impairment in Parkinson's disease: A quantitative review and challenges. *Neuroscience Letters*, 719, 133679.
- McSorley, E., Haggard, P., & Walker, R. (2006). Time course of oculomotor inhibition revealed by saccade trajectory modulation. *Journal of Neurophysiology*, 96(3), 1420-1424.
- McSorley, E., & McCloy, R. (2009). Saccadic eye movements as an index of perceptual decision-making. *Experimental brain research*, 198(4), 513-520.
- Menon, V., & Uddin, L. Q. (2010). Saliency, switching, attention and control: A network model of insula function. *Brain Structure and Function*, 214(5e6), 655e667.
- Miyake, A., Friedman, N. P., Emerson, M. J., Witzki, A. H., Howerter, A., & Wager, T. D. (2000). The unity and diversity of executive functions and their contributions to

complex “frontal lobe” tasks: A latent variable analysis. *Cognitive psychology*, 41(1), 49-100.

Mort, D. J., Malhotra, P., Mannan, S. K., Rorden, C., Pambakian, A., Kennard, C., & Husain, M. (2003). The anatomy of visual neglect. *Brain*, 126 (9), 1986-1997.

Mostofsky, S. H., Dubey, P., Jerath, V. K., Jansiewicz, E. M., Goldberg, M. C., & Denckla, M. B. (2006). Developmental dyspraxia is not limited to imitation in children with autism spectrum disorders. *Journal of the International Neuropsychological Society*, 12(3), 314-326.

Nachev, P., Kennard, C., & Husain, M. (2008). Functional role of the supplementary and pre-supplementary motor areas. *Nature Reviews Neuroscience*, 9(11), 856-869.

Nagy, A., Eördegh, G., Paróczy, Z., Márkus, Z., & Benedek, G. (2006). Multisensory integration in the basal ganglia. *European Journal of Neuroscience*, 24(3), 917-924.

Nelson, A. B., & Kreitzer, A. C. (2014). Reassessing models of basal ganglia function and dysfunction. *Annual review of neuroscience*, 37, 117.

O'Brien, J., Spencer, J., Atkinson, J., Braddick, O., & Wattam-Bell, J. (2002). Form and motion coherence processing in dyspraxia: evidence of a global spatial processing deficit. *Neuroreport*, 13(11), 1399-1402.

Oei, A. C., & Patterson, M. D. (2013). Enhancing cognition with video games: a multiple game training study. *PloS one*, 8(3), e58546.

Oei, A. C., & Patterson, M. D. (2014). Playing a puzzle video game with changing requirements improves executive functions. *Computers in Human Behavior*, 37, 216-228.

Okagaki, L., & Frensch, P. A. (1994). Effects of video game playing on measures of spatial performance: Gender effects in late adolescence. *Journal of applied developmental psychology*, 15(1), 33-58.

Oldenburg, I. A., & Sabatini, B. L. (2015). Antagonistic but not symmetric regulation of primary motor cortex by basal ganglia direct and indirect pathways. *Neuron*, 86(5), 1174-1181.

- Osu, R., Franklin, D. W., Kato, H., Gomi, H., Domen, K., Yoshioka, T., & Kawato, M. (2002). Short-and long-term changes in joint co-contraction associated with motor learning as revealed from surface EMG. *Journal of neurophysiology*, 88(2), 991-1004.
- Palmer, C. J., Lawson, R. P., & Hohwy, J. (2017). Bayesian approaches to autism: Towards volatility, action, and behavior. *Psychological bulletin*, 143(5), 521.
- Pape, A. A., & Siegel, M. (2016). Motor cortex activity predicts response alternation during sensorimotor decisions. *Nature communications*, 7(1), 1-10.
- Pearce, T. M., & Moran, D. W. (2012). Strategy-dependent encoding of planned arm movements in the dorsal premotor cortex. *Science*, 337(6097), 984-988.
- Pellicano, E., & Burr, D. (2012). When the world becomes ‘too real’: a Bayesian explanation of autistic perception. *Trends in cognitive sciences*, 16(10), 504-510.
- Pinel, J., & Barnes, S. J. (2018, April). *Psicobiologia*. Edra.
- Postle, N., McMahon, K. L., Ashton, R., Meredith, M., & de Zubicaray, G. I. (2008). Action word meaning representations in cytoarchitectonically defined primary and premotor cortices. *Neuroimage*, 43(3), 634-644.
- Prablanc, C., Pélisson, D., & Goodale, M. A. (1986). Visual control of reaching movements without vision of the limb. *Experimental Brain Research*, 62(2), 293-302.
- Pritchett, D. L., & Carey, M. R. (2014). A matter of trial and error for motor learning. *Trends in neurosciences*, 37(9), 465-466.
- Quartarone, A., & Hallett, M. (2013). Emerging concepts in the physiological basis of dystonia. *Movement Disorders*, 28(7), 958-967.
- Rektor, I., Bočková, M., Chrastina, J., Rektorová, I., & Baláž, M. (2015). The modulatory role of subthalamic nucleus in cognitive functions—A viewpoint. *Clinical Neurophysiology*, 126(4), 653-658.
- Rizzolatti, G., & Fabbri-Destro, M. (2008). The mirror system and its role in social cognition. *Current opinion in neurobiology*, 18(2), 179-184
- Rodriguez, M., Llanos, C., Gonzalez, S., & Sabate, M. (2008). How similar are motor imagery and movement?. *Behavioral neuroscience*, 122(4), 910.

- Rowe, J. B., Toni, I., Josephs, O., Frackowiak, R. S., & Passingham, R. E. (2000). The prefrontal cortex: response selection or maintenance within working memory?. *Science*, 288(5471), 1656-1660.
- Sadnicka, A., & Hamada, M. (2020). Plasticity and dystonia: a hypothesis shrouded in variability. *Experimental Brain Research*, 238(7), 1611-1617.
- Sanes, J. N. (2003). Neocortical mechanisms in motor learning. *Current opinion in neurobiology*, 13(2), 225-231.
- Schneider, K., & Zernicke, R. F. (1989). Jerk-cost modulations during the practice of rapid arm movements. *Biological Cybernetics*, 60(3), 221-230.
- Schnitzler, A., & Gross, J. (2005). Normal and pathological oscillatory communication in the brain. *Nature reviews neuroscience*, 6(4), 285-296.
- Sereno, M. I., & Huang, R. S. (2014). Multisensory maps in parietal cortex. *Current opinion in neurobiology*, 24, 39-46.
- Shipp, S., Adams, R. A., & Friston, K. J. (2013). Reflections on agranular architecture: predictive coding in the motor cortex. *Trends in neurosciences*, 36(12), 706–716.
- Siaperas, P., Ring, H. A., McAllister, C. J., Henderson, S., Barnett, A., Watson, P., & Holland, A. J. (2012). Atypical movement performance and sensory integration in Asperger's syndrome. *Journal of autism and developmental disorders*, 42(5), 718-725.
- Sigrist, R., Rauter, G., Riener, R., & Wolf, P. (2013). Augmented visual, auditory, haptic, and multimodal feedback in motor learning: a review. *Psychonomic bulletin & review*, 20(1), 21-53.
- Sinha, P., Kjelgaard, M. M., Gandhi, T. K., Tsourides, K., Cardinaux, A. L., Pantazis, D., ... & Held, R. M. (2014). Autism as a disorder of prediction. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 111(42), 15220-15225.
- Tanji, J., & Hoshi, E. (2001). Behavioral planning in the prefrontal cortex. *Current opinion in neurobiology*, 11(2), 164-170.
- Thura, D., & Cisek, P. (2014). Deliberation and commitment in the premotor and primary motor cortex during dynamic decision making. *Neuron*, 81(6), 1401-1416.

- Whyatt, C. P., & Craig, C. M. (2012). Motor skills in children aged 7–10 years, diagnosed with autism spectrum disorder. *Journal of autism and developmental disorders*, 42(9), 1799-1809.
- Wilson, P. H., Ruddock, S., Smits-Engelsman, B. O. U. W. I. E. N., Polatajko, H., & Blank, R. (2013). Understanding performance deficits in developmental coordination disorder: a meta-analysis of recent research. *Developmental Medicine & Child Neurology*, 55(3), 217-228.
- Woodworth, R. S. (1899). Accuracy of voluntary movement. *The Psychological Review: Monograph Supplements*, 3(3), i.
- Wulf, G., McNevin, N., & Shea, C. H. (2001). The automaticity of complex motor skill learning as a function of attentional focus. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology Section A*, 54(4), 1143-1154.
- Yates, D. (2012). Neurodegenerative networking. *Nature Reviews Neuroscience*, 13(5), 289-289.
- Zuk, L. (2011). Fetal and infant spontaneous general movements as predictors of developmental disabilities. *Developmental disabilities research reviews*, 17(2), 93-101.
- Zwicker, J. G., Missiuna, C., Harris, S. R., & Boyd, L. A. (2011). Brain activation associated with motor skill practice in children with developmental coordination disorder: an fMRI study. *International Journal of Developmental Neuroscience*, 29(2), 145-152.
- Zwicker, J. G., Missiuna, C., Harris, S. R., & Boyd, L. A. (2012). Developmental coordination disorder: a review and update. *European Journal of Paediatric Neurology*, 16(6), 573-581.