



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI TRIESTE

**XXIX CICLO DEL DOTTORATO DI RICERCA IN
INGEGNERIA E ARCHITETTURA**

**ANALISI CINEMATICA DELLA SCRITTURA
NELLA VALUTAZIONE DI ANOMALIE
MOTORIE DOVUTE A DISGRAFIA O
PATOLOGIE**

Settore scientifico-disciplinare: **BIOINGEGNERIA ELETTRONICA E INFORMATICA**

**DOTTORANDA
FLAVIA COSTA**

Flavia Costa

**COORDINATORE
PROF. DIEGO MICHELI**

Diego Micheli

**SUPERVISORE
PROF. AGOSTINO ACCARDO**

Agostino Accardo

ANNO ACCADEMICO 2015/2016

INDICE

INDICE DELLE FIGURE	III
INDICE DELLE TABELLE	V
INTRODUZIONE	VI
<i>1 - LA SCRITTURA E LE SUE ANOMALIE MOTORIE</i>	8
1.1 LA SCRITTURA: UN'ABILITÀ COMPLESSA	8
1.1.1 LE FASI PRE-ALFABETICHE	8
1.1.2 LA SCRITTURA ALFABETICA: ASPETTI FONOLOGICI, LESSICALI ED ORTOGRAFICI	10
1.1.3 ASPETTI VISUO-PERCETTIVI DELLA SCRITTURA	10
1.1.4 ASPETTI VISUO-SPAZIALI DELLA SCRITTURA	12
1.1.5 ESECUZIONE MOTORIA E PROGRAMMAZIONE DELLA SCRITTURA A MANO	13
1.1.6 LINEE DI RICERCA NELLO STUDIO DELLA SCRITTURA	16
1.2 ANOMALIE MOTORIE	20
1.2.1 LA DISGRAFIA	20
1.2.2 LA MALATTIA DI PARKINSON	22
1.3 LA VALUTAZIONE DELLA GRAFIA	23
1.4 LE UNITÀ D'ANALISI DELLA TRACCIA SCRITTA	24
1.4.1 MODELLO DI GENERAZIONE DELLA SCRITTURA	25
1.4.2 ANALISI DELLE TRAIETTORIE GRAFICHE	28
<i>2 - STRUMENTI DI ANALISI</i>	31
2.1 CHECK-LIST E PARAMETRI ANALIZZATI: APPROCCIO ORIENTATO AL PRODOTTO	31
2.1.1 INDICI GRAFO-MOTORI	31
2.1.2 INDICI POSTURALI	34
2.2 ANALISI CINEMATICA DELLA SCRITTURA IN ETÀ EVOLUTIVA	34
2.3 TAVOLETTA GRAFICA DIGITALE PER L'ANALISI SECONDO L'APPROCCIO ORIENTATO AL PROCESSO	36
2.4 ELABORAZIONE DEI DATI DELLA TAVOLETTA DIGITALE	38
2.5 SOFTWARE PER L'ANALISI DELLA GRAFIA	39
<i>3 - ANALISI CINEMATICA DELLA SCRITTURA NELLA VALUTAZIONE DELL'EFFICACIA DEL TRATTAMENTO DI RECUPERO DEI BAMBINI DISGRAFICI</i>	43
3.1 IL TRATTAMENTO (METODO TERZI)	44
3.2 MATERIALI E METODI	47
3.3 RISULTATI	50
3.3.1 TEST LE	50
3.3.2 TEST A ED F	50
3.3.3 CHECK-LIST NEI COMPITI A ED F	52
3.3.4 ALTRI PROTOCOLLI DI VALUTAZIONE	54
3.4 DISCUSSIONE	56
3.5 CONCLUSIONE	59
<i>4 - SONIFICAZIONE DELLA SCRITTURA</i>	61

4.1	I FEEDBACK DELLA SCRITTURA	61
4.1.1	FEEDBACK VISIVO	61
4.1.2	FEEDBACK PROPRIOCETTIVO	62
4.1.3	FEEDBACK SONORO	62
4.2	MATERIALI E METODI	70
4.3	RISULTATI	72
4.4	CONCLUSIONI	75
	<i>5 - ANALISI CINEMATICA DELLA SCRITTURA NEI SOGGETTI AFFETTI DA MORBO DI PARKINSON</i>	
		76
5.1	LA MALATTIA DI PARKINSON	76
5.1.1	PARKINSONISMI	77
5.1.2	LA BRADICINESIA	77
5.1.3	IL TREMORE	77
5.2	DIAGNOSI DEL PARKINSON: STATO DELL'ARTE	79
5.3	MISURA E QUANTIFICAZIONE DEL TREMORE	80
5.4	I TEST IN LETTERATURA	80
5.5	MATERIALI E METODI	83
5.5.1	TEST UTILIZZATI	85
5.5.2	SOFTWARE DI ANALISI	86
5.6	RISULTATI	90
5.7	DISCUSSIONE	99
5.8	CONCLUSIONE	100
	<i>6 - CONCLUSIONI E SVILUPPI FUTURI</i>	
		101
	BIBLIOGRAFIA	103
	PUBBLICAZIONI	110

INDICE DELLE FIGURE

FIGURA 1: RAPPRESENTAZIONE DELLE LETTERE DELL'ALFABETO SECONDO QUATTRO SISTEMI GRAFICI.....	11
FIGURA 2: TRATTI DISTINTIVI DELLE LETTERE DELL'ALFABETO, SECONDO LO STAMPATELLO MAIUSCOLO.....	11
FIGURA 3: TRATTI DISTINTIVI DELLE LETTERE DELL'ALFABETO SECONDO IL CORSIVO.....	12
FIGURA 4: CLASSIFICAZIONE DELLE LETTERE, IN STAMPATELLO MINUSCOLO E CORSIVO MINUSCOLO, IN A) MEDIE, B) ASCENDENTI E C) DISCENDENTI.....	13
FIGURA 5: ESEMPLIFICAZIONE DELL'ORDINE E DELLA DIREZIONALITÀ NEI MOVIMENTI NECESSARI PER LA REALIZZAZIONE EFFICIENTE DI ALCUNI CARATTERI IN STAMPATELLO MAIUSCOLO E MINUSCOLO.....	14
FIGURA 6: ESEMPLIFICAZIONE DEI TRATTI NEL CORSIVO DA ESEGUIRE CON MOVIMENTI ROTATORI ORARI O CON MOVIMENTI ROTATORI ANTIORARI, INCLUSA L'ECCEZIONE COSTITUITA DALLA LETTERA "S".....	14
FIGURA 7: ESEMPLIFICAZIONE DEI TRATTI DA ESEGUIRE CON MOVIMENTI DIRETTI DALL'ALTO VERSO IL BASSO.....	14
FIGURA 8: ESEMPLIFICAZIONE DEI TRATTI DA ESEGUIRE CON MOVIMENTI DIRETTI DA SINISTRA VERSO DESTRA.....	15
FIGURA 9: ESEMPLIFICAZIONE DEI TRATTI DI USCITA DIAGONALI PER IL COLLEGAMENTO TRA LETTERE.....	15
FIGURA 10: ESEMPLIFICAZIONE DI COLLEGAMENTI ORIZZONTALI, IN CUI SI MODIFICA LA LETTERA SUCCESSIVA.....	15
FIGURA 11: SCHEMA RIASSUNTIVO DELLE COMPONENTI IMPLICATE NEL PROCESSO DI SCRITTURA [25].....	17
FIGURA 12: MODELLO A DUE VIE DEL PROCESSO DI SCRITTURA (ADATTAMENTO DA [29]).....	18
FIGURA 13: PARTE FINALE DEL MODELLO DI ELLIS ([29]).....	19
FIGURA 14: MODELLO A DUE GENERATORI DI VELOCITÀ (TRATTA DA [37]).....	26
FIGURA 15: SINGOLO MOVIMENTO O STROKE.....	27
FIGURA 16: SIMULAZIONE DELLA SOVRAPPOSIZIONE DI DUE STROKE: TRAIETTORIA (A), VELOCITÀ CURVILINEA (B) E ANGOLARE (C).....	29
FIGURA 17: IL PANNELLO A ILLUSTRA IL PRINCIPIO DI ISOGONIA IN UN SEMPLICE MODELLO CHIUSO. IL PANNELLO C MOSTRA L'ANDAMENTO NEL TEMPO DELL'ANGOLO $A(T)$ CHE LA TANGENTE ALLA TRAIETTORIA FORMA CON UN RIFERIMENTO ARBITRARIO (PANNELLO B).....	30
FIGURA 18: ESEMPLIFICAZIONE DELLA CONFIGURAZIONE RICHIESTA E GRAFICO DELLA VELOCITÀ ANGOLARE IN FUNZIONE DELLA CURVATURA.....	30
FIGURA 19: CHECK-LIST.....	33
FIGURA 20: ESEMPI DI: A) BUONA GRAFIA, B) GRAFIA POVERA CON I RISPETTIVI GRAFICI DELLE VELOCITÀ REGISTRATE NEI TRATTI DELLA PAROLA "BROWN". FONTE: FREEMAN (1921).....	36
FIGURA 21: RAPPRESENTAZIONE SCHEMATICA DEL FUNZIONAMENTO DI UNA TAVOLETTA GRAFICA.....	37
FIGURA 22: RAPPRESENTAZIONE DEL FUNZIONAMENTO DELLA TAVOLETTA GRAFICA.....	39
FIGURA 23: FINESTRA DI VISUALIZZAZIONE DEGLI STROKES.....	41
FIGURA 24: FINESTRA DI VISUALIZZAZIONE DELLE COMPONENTI.....	42
FIGURA 25: RIPRODUZIONE DELLA LETTERA IN SISTEMI ELLITTICI SEMPRE PIÙ PICCOLI.....	47
FIGURA 26: IDENTIFICAZIONE DELLE COMPONENTI E DEGLI STROKE.....	49
FIGURA 27: ESEMPIO DI TRACCIA SCRITTA PER IL TEST LE, PRIMA E DOPO LA RIABILITAZIONE.....	52
FIGURA 28: ESEMPIO DI LAVORO SCRITTO PER I TEST A ED F PRIMA E DOPO LA RIABILITAZIONE.....	54
FIGURA 29: VALORI MEDI E DI DEVIAZIONE STANDARD DEL NUMERO DI ERRORI PRIMA E DOPO IL TRATTAMENTO.....	55
FIGURA 30: VALORI MEDI PRIMA E DOPO TRATTAMENTO DEL TEST V.M.I. E CORRISPONDENTI P-VALUE.....	55
FIGURA 31: QUATTRO SIMBOLI DELLA LINGUA TAMIL USATI NELL'ESPERIMENTO.....	64
FIGURA 32: COME APPARIVA IL TEST AI SOGGETTI. DOVEVANO RIPRODURRE IL CARATTERE ALL'INTERNO DEI RETTANGOLI.....	65
FIGURA 33: PROFILO DI VELOCITÀ CURVILINEA DELLE QUATTRO FIGURE UTILIZZATE NELL'ESPERIMENTO.....	68
FIGURA 34: UN PERIODO DEL PROFILO DI VELOCITÀ CURVILINEA RELATIVO ALLE FIGURE UTILIZZATE NELL'ESPERIMENTO.....	69
FIGURA 35: RISULTATI ASSOCIAZIONE SUONI POST RIABILITAZIONE.....	72
FIGURA 36: CONFRONTO TRA SCRITTURA POST E PRE RIABILITAZIONE DEL BAMBINO 10 E RELATIVE VELOCITÀ.....	73
FIGURA 37: % DI CORRETTO RICONOSCIMENTO DEI SUONI ASSOCIATI ALLA RIABILITAZIONE PRE O POST IN TUTTI I TEST ESEGUITI.....	73
FIGURA 38: RAPPRESENTAZIONE DELLA TRACCIA SCRITTA COMPLETA E DEL RELATIVO GRAFICO DEL PROFILO DI VELOCITÀ.....	74

FIGURA 39: % DI CORRETTO RICONOSCIMENTO DEL SUONO ASSOCIATO ALLA RIABILITAZIONE PRE O POST NEL TEST A (FRASE ACCURATA).....	74
FIGURA 40: % DI CORRETTO RICONOSCIMENTO DEL SUONO ASSOCIATO ALLA RIABILITAZIONE PRE O POST NEL TEST NUM (NUMERI IN LETTERE).....	75
FIGURA 41: FREQUENZE DEL TREMORE IN LETTERATURA.....	79
FIGURA 42: DIVERSI MODI DI DISEGNARE LA SPIRALE. PARTENDO DA SINISTRA: SU LINEA PRE-TRACCIATA CON MANO SUPPORTATA E NON, FRA LE DUE LINEE CON MANO SUPPORTATA E NON, A MANO LIBERA CON MANO SUPPORTATA E NON.	81
FIGURA 43: MODELLO DI COORDINAMENTO EQUIVALENTE (SIMULTANEA FLESSIONE ED ESTENSIONE DEL POLSO E DELLE DITA) ED IL MODELLO DI COORDINAMENTO NON EQUIVALENTE (FLESSIONE DEL POLSO CON ESTENSIONE DELLE DITA E VICEVERSA).....	82
FIGURA 44: TEST DEL CERCHIO: PROPOSTO DA DOUNSKAIA ET AL [6], EFFETTUATO A DUE DIVERSI LIVELLI DI VELOCITÀ DA ELEMENTI DI CONTROLLO E PARKINSONIANI.	83
FIGURA 45: LINEE CON MODELLO DI COORDINAMENTO EQUIVALENTE E NON NELLA MODALITÀ VELOCE EFFETTUATE DA CONTROLLI E PAZIENTI.....	84
FIGURA 46: LINEE DA TRACCIARE TRA 5 COPPIE DI PUNTI.	85
FIGURA 47: SPIRALE DA TRACCIARE TRA LE LINEE.	86
FIGURA 48: CERCHIO.....	86
FIGURA 49: CASI CONTEMPLATI NEL PROGRAMMA PER IL RICONOSCIMENTO DELLE PAROLE.	89
FIGURA 50: ESECUZIONE DEL TEST RIGHE ORIZZONTALI DA PARTE DI UN SOGGETTO PARKINSONIANO.....	91
FIGURA 51: VISUALIZZAZIONE DELLE COMPONENTI E DEI TRATTI ASCENDENTI E DISCENDENTI DEL TEST RIGHE ORIZZONTALI EFFETTUATO DA UN SOGGETTO PARKINSONIANO.....	91
FIGURA 52: ESECUZIONE DEL TEST CERCHIO DA PARTE DI UN SOGGETTO PARKINSONIANO.	92
FIGURA 53: VISUALIZZAZIONE DELLE COMPONENTI E DEI TRATTI ASCENDENTI E DISCENDENTI DEL TEST CERCHIO EFFETTUATO DA PARTE DI UN SOGGETTO PARKINSONIANO.....	92
FIGURA 54: VISUALIZZAZIONE VALORI MEDI DEGLI SPETTRI (MODULO) DELLE VELOCITÀ ORIZZONTALE, VERTICALE E CURVILINEA E DELL'ACCELERAZIONE VERTICALE DEL TEST CERCHIO EFFETTUATO DA PARTE DI UN SOGGETTO PARKINSONIANO.	93
FIGURA 55: VISUALIZZAZIONE VALORI MEDI DELLA DENSITÀ SPETTRALE DI POTENZA DELLE VELOCITÀ ORIZZONTALE, VERTICALE E CURVILINEA E DELL'ACCELERAZIONE VERTICALE DEL TEST CERCHIO EFFETTUATO DA PARTE DI UN SOGGETTO PARKINSONIANO.....	94
FIGURA 56: : ESECUZIONE DEL TEST SPIRALE DA PARTE DI UN SOGGETTO PARKINSONIANO.....	95
FIGURA 57: VISUALIZZAZIONE DELLE COMPONENTI E DEI TRATTI ASCENDENTI E DISCENDENTI DEL TEST SPIRALE EFFETTUATO DA UN SOGGETTO PARKINSONIANO.	95
FIGURA 58: VISUALIZZAZIONE VALORI MEDI DEGLI SPETTRI (MODULO) DELLE VELOCITÀ ORIZZONTALE, VERTICALE E CURVILINEA E DELL'ACCELERAZIONE VERTICALE DEL TEST SPIRALE EFFETTUATO DA PARTE DI UN SOGGETTO PARKINSONIANO.	96
FIGURA 59: : VISUALIZZAZIONE VALORI MEDI DELLA DENSITÀ SPETTRALE DI POTENZA DELLE VELOCITÀ ORIZZONTALE, VERTICALE E CURVILINEA E DELL'ACCELERAZIONE VERTICALE DEL TEST SPIRALE EFFETTUATO DA PARTE DI UN SOGGETTO PARKINSONIANO.....	97
FIGURA 60: ESEMPIO DI HSL, AS E C TEST EFFETTUATI DA UN PAZIENTE PD (RIGA SUPERIORE) ED UN CONTROLLO (RIGA INFERIORE).....	98

INDICE DELLE TABELLE

TABELLA 1: CARATTERISTICHE TECNICHE DELLA TAVOLETTA GRAFICA.....	37
TABELLA 2: VALORI MEDI (\pm SD) DEI PARAMETRI E LORO P-VALUE E VALORI STATISTICI (ASV) PRIMA E DOPO IL TRATTAMENTO NEL TEST LE.	51
TABELLA 3: VALORI MEDI (\pm SD) DEI PARAMETRI E LORO P-VALUE E VALORI STATISTICI (ASV) PRIMA E DOPO IL TRATTAMENTO NEI TEST F ED A.	53
TABELLA 4: MEDIA VALORI DEI PARAMETRI CINEMATICI CALCOLATI IN PAZIENTI PD E CONTROLLI PER HSL, AS E C TEST INSIEME AI P-VALUE DELLE LORO DIFFERENZE (N.S. = NON SIGNIFICATIVO).	97
TABELLA 5: MEDIA (\pm SD) VALORI DEL RAPPORTO PSDH/PSDt IN PAZIENTI PD E CONTROLLI DELLE VELOCITÀ MEDIE ORIZZONTALI, VERTICALI E CURVILINEI E IN ACCELERAZIONE MEDIA VERTICALE NEI TRE TEST E P-VALUE DELLE DIFFERENZE DEI DUE GRUPPI.	98

INTRODUZIONE

La scrittura è un'abilità complessa, che richiede la capacità di organizzare in sequenza una serie di movimenti fini. Saper scrivere significa poter organizzare i propri pensieri secondo uno stile che segue le regole di composizione specifiche del compito, sia esso un tema, un articolo o una poesia. D'altra parte, padroneggiare tale abilità non è per niente semplice: bisogna integrare numerose conoscenze di base, siano esse lessicali, ortografiche o sintattiche, e abilità grafo-motorie per la realizzazione delle lettere a mano. Nonostante la bassa capacità di tracciare i grafemi sulla carta costituisca spesso motivo di difficoltà e di ritardo nell'acquisizione del linguaggio scritto, quest'ultimo aspetto è quello che in ambito di ricerca appare come il meno approfondito.

La scrittura può essere vista come un particolare compito motorio, nel quale la persona prepara ed esegue specifiche sequenze di movimenti, che si realizzano sotto precisi vincoli spaziali e temporali.

Ogni lettera viene realizzata grazie a movimenti armonici della mano che svolge una funzione di sostegno e di guida dello strumento di scrittura che ha bisogno della collaborazione contemporanea di polso, braccio e spalla per avanzare lungo il foglio. Pertanto, ogni tratto della penna non va considerato semplicemente come un segno, ma rappresenta la traccia visibile di un movimento complesso.

La qualità della grafia ha una ricaduta significativa sulla futura competenza degli studenti nella composizione di uno scritto, sulle loro performance scolastiche e su altri importanti aspetti legati alla sfera emotiva e relazionale. Da qui nasce l'importanza di identificare le difficoltà della grafia e di proporre interventi mirati per la valutazione e lo sviluppo delle capacità grafo-motorie del bambino già in fase d'apprendimento.

La difficoltà legata all'aspetto grafomotorio di produzione della scrittura è nota come *disgrafia*. Un bambino disgrafico scrive in modo molto irregolare, la sua mano scorre a fatica sul piano di scrittura e l'impugnatura della penna è spesso scorretta; non possiede adeguati punti di riferimento, non rispetta i margini del foglio, lascia spazi irregolari tra i grafemi e tra le parole, non regola la pressione della mano sul foglio in maniera adeguata.

Scopo del mio progetto di dottorato riportato in questa tesi è stato quello di sviluppare uno strumento per la valutazione delle anomalie motorie dovute alla disgrafia o ad altre patologie, quali ad esempio il morbo di Parkinson.

Per la riabilitazione della scrittura a mano dei bambini in età scolare sono stati utilizzati molti approcci terapeutici differenti, soprattutto negli ambiti percettivo-motorio, visivo-motorio e di controllo motorio. Gli effetti di questi trattamenti sono generalmente valutati utilizzando check-list di controllo ad hoc, così come alcuni protocolli di test standard come test Movement ABC, test di integrazione visivo-motoria (V.M.I.), etc.

Recentemente, le tavolette grafiche hanno permesso lo studio delle caratteristiche cinematiche della scrittura e di individuare una serie di parametri concernenti la scrittura, compresa quella corsiva dei bambini italiani che frequentano la scuola primaria e secondaria.

Il lavoro svolto nel corso del dottorato è stato prevalentemente incentrato sulla valutazione dell'influenza del protocollo riabilitativo seguito dal Metodo Terzi sulla cinematica della scrittura corsiva e sull'applicazione dell'analisi cinematica nella valutazione del movimento di soggetti parkinsoniani. I risultati hanno mostrato che il programma di riabilitazione di Terzi è capace di modificare alcuni parametri cinematici correlabili a significativi miglioramenti in materia d'integrazione visivo-motoria (test VMI), controllo motorio (test Movement ABC) e di leggibilità della scrittura (check-list). Inoltre nell'analisi cinematica dei movimenti di soggetti parkinsoniani sono stati individuati una serie di test e di parametri in grado di distinguere tali soggetti da quelli normali.

La tesi è suddivisa in cinque capitoli. Il primo delinea le fasi dell'apprendimento della scrittura, dal disegno del periodo pre-alfabetico alla traduzione dei singoli fonemi nei corrispettivi grafemi, con particolare attenzione a quelle che sono le difficoltà grafo-motorie dei soggetti disgrafici e alle linee di ricerca in tale ambito.

Il secondo capitolo descrive i modelli del sistema grafo-motorio e le unità di analisi della traccia scritta, soffermandosi sui parametri che vengono generalmente valutati nell'analisi cinematica della scrittura, con particolare attenzione per quelli non valutabili attraverso un semplice esame visivo del tracciato. Inoltre, vengono descritti brevemente alcuni modelli di generazione della scrittura che sono stati presentati in letteratura.

Nel terzo capitolo viene analizzato lo studio che ha riguardato la valutazione dell'influenza del protocollo di riabilitazione basato sul Metodo Terzi sulle caratteristiche dinamiche della scrittura di bambini disgrafici.

Il quarto capitolo propone una nuova tecnica per la valutazione della grafia, utile anche nella valutazione di un programma di riabilitazione, basata sulla sonificazione della scrittura. Questa tecnica è adatta per movimenti silenziosi come la scrittura ed è in grado di aiutare un esaminatore esterno a valutare le caratteristiche nascoste, al fine di comprendere meglio le specifiche di movimento.

Il quinto capitolo, infine, affronta le tematiche legate alla malattia di Parkinson ed ai suoi effetti, in particolar modo il tremore e gli altri sintomi legati alla cinesi. Lo studio verte sull'analisi delle realizzazioni grafiche di soggetti parkinsoniani acquisite tramite tavoletta grafica e sul confronto fra queste e quelle prodotte da un gruppo di soggetti di controllo. Partendo dalle acquisizioni tramite tavoletta grafica degli esercizi grafici prodotti da soggetti parkinsoniani, vengono individuati i test maggiormente significativi per lo studio di tali soggetti ed una serie di parametri che permettono di identificare le differenze esistenti rispetto ai soggetti normali.

1 - *La scrittura e le sue anomalie motorie*

1.1 La scrittura: un'abilità complessa

La comparsa della scrittura all'interno del percorso di sviluppo individuale è un evento relativamente tardo: nelle civiltà letterate, i bambini iniziano a scrivere più o meno all'età di sei anni, ma questo avviene molto tempo dopo aver iniziato a parlare, camminare e persino a suonare uno strumento musicale [1]. La scrittura rappresenta un'abilità complessa che implica l'integrazione e la sinergia di diverse reti neurali e lo scolaro ha bisogno di tempo per acquisire le competenze necessarie per affrontare con successo le richieste che essa pone.

In italiano, “saper scrivere” può significare sia essere in grado di tracciare i grafemi sulla carta, sia esser capaci di creare un'opera letteraria di valore. Al contrario, nella lingua inglese non è presente tale ambiguità: esistono termini molto precisi per distinguere rispettivamente la scrittura come capacità comunicativa globale (writing) dalla sua sola realizzazione motoria a mano (handwriting).

Saper scrivere significa riuscire a gestire un compito complesso, frutto della maturazione e dell'integrazione di numerose competenze, appartenenti ad ambiti funzionali distinti: capacità di elaborazione dell'informazione fonologica e visiva, conoscenza delle regole ortografiche, padronanza della conoscenza semantica e lessicale e delle regole grammaticali, abilità motoria per la realizzazione di configurazioni grafiche che necessitano di gradi via via crescenti di stabilità ed automatismo [2].

Tuttavia, nella letteratura, gli aspetti grafo-motori del compito, e cioè le componenti effettrici coinvolte nella realizzazione grafica a mano della scrittura, non sono considerati parte del vero e proprio processo di scrittura. Il motivo è legato al fatto che la scrittura può essere realizzata con effettori diversi dalla mano: in ambito patologico, è possibile utilizzare i movimenti del piede o scegliere i grafemi da una tastiera, con un gesto del capo o con un qualsiasi movimento del corpo, con uno sguardo o, ancora, mediante comandi vocali [3].

Pur tenendo conto dell'uso sempre più diffuso della moderna tecnologia, si deve riflettere sul fatto che, in ambito scolastico, la scrittura manuale è richiesta ancora in modo quasi esclusivo.

Per essere uno strumento di registrazione efficace, la scrittura deve essere rapida, di semplice esecuzione, ma soprattutto deve essere formata da una sequenza di grafemi chiaramente leggibili dal destinatario oltre che dallo scrivente stesso.

1.1.1 Le fasi pre-alfabetiche

Imparare a scrivere, come insegna l'esperienza, non è un processo discontinuo, un brusco passaggio dal non sapere al sapere. Infatti, quando i bambini si avvicinano per la prima

volta all'istruzione formale, essi si trovano a possedere, in una certa misura, delle conoscenze acquisite durante le precedenti esperienze: l'acquisizione del concetto stesso di scrittura alfabetica costituisce il punto d'arrivo di un lungo percorso cognitivo, che ricalca in modo stupefacente l'evoluzione della scrittura nella specie [4].

All'interno di questo processo sono stati identificati tre passaggi fondamentali che precedono la scolarizzazione del bambino [5].

Il bambino attraversa il *primo periodo pre-sillabico*, in cui comincia a distinguere il disegno dalla scrittura: i segni scritti trasmettono il nome dell'oggetto, una caratteristica che il disegno, in sé, non può rappresentare. Tracciando linee frastagliate orizzontali, i bambini imitano il movimento della scrittura dell'adulto (con regolarità e orientamento da sinistra verso destra). All'interno di questa fase sono incluse anche delle produzioni che si collocano tra il disegno e la scrittura, come l'utilizzo di forme stilizzate che fanno in qualche modo riferimento alle caratteristiche figurali dell'oggetto rappresentato; si tratta di una sorta di scrittura ideografica.

Il *secondo periodo*, di **differenziazione grafica**, è caratterizzato dall'elaborazione di due principi che regolano l'organizzazione di questi segni. Il bambino non considera ancora la relazione dei grafemi con i corrispettivi suoni, ma presta solo interesse nei confronti delle caratteristiche visive della produzione. In questa fase, compaiono le pseudo-lettere, la cui somiglianza alle lettere dell'alfabeto testimonia lo sforzo di adattamento del bambino al modello visivo. Da un punto di vista qualitativo, il bambino elabora il concetto di *quantità minima*, secondo il quale una traccia scritta è adeguata se è composta da un numero minimo di segni (tre, per la maggior parte dei bambini in tutte le lingue). In questa fase, è possibile che il bambino mantenga ancora un legame con alcune caratteristiche concrete del referente, variando in base a queste la quantità di segni che ne compongono il nome: /treno/ sarà scritto con più segni perché è lungo, /zanzara/ con pochi perché è piccola. Dal punto di vista qualitativo, elabora il principio della *variazione interna*, secondo il quale in una traccia scritta tutti i segni devono essere diversi tra loro. Se i caratteri di cui dispone il bambino sono ancora pochi, può scegliere di differenziare le parole cambiando l'ordine che questi occupano in esse.

L'*ultimo periodo* è quello della **fonetizzazione**, in cui il bambino scopre che la scrittura è una rappresentazione dei suoni della lingua e, in esso, sono distinguibili tre momenti:

- una fase iniziale, detta **sillabica**, in cui il bambino stabilisce di usare per ogni sillaba della parola un segno;
- una fase **sillabico-alfabetica**, in cui affianca all'ipotesi sillabica quella alfabetica;
- una fase **alfabetica**, in cui il bambino fa corrispondere un segno ad ogni fonema della parola.

1.1.2 La scrittura alfabetica: aspetti fonologici, lessicali ed ortografici

La capacità di tradurre i singoli fonemi nei corrispondenti grafemi è legata all'abilità del bambino di compiere un'analisi fonologica dello stimolo verbale cui viene sottoposto. Alla base di questo, ovviamente, sta la capacità di scomporre una parola (costituita da un flusso continuo di suoni linguistici) nei fonemi che la compongono, ordinati nel tempo. Pertanto, l'abilità della scrittura richiede la coordinazione di una serie di operazioni basate sulla struttura fonologica del linguaggio orale (analisi, segmentazione e sintesi fonemica) cui, nel tempo, si aggiunge una sempre maggiore padronanza delle regole ortografiche, che descrivono l'esatta trascrizione di parole per le quali non sono sufficienti le regole fonologiche, come ad esempio i gruppi “gn”, “gh”, “gl”, “sc”. A completamento del processo evolutivo, si sommano le conoscenze lessicali, grammaticali e sintattiche (ad esempio nel riconoscimento dell'omofonia, nelle parole omofone e non omografe, come “l'ago” e “lago”).

Gli errori che s'incontrano più frequentemente nei primi periodi di scrittura dei bambini riguardano sostituzioni di lettere fra loro fonologicamente simili (di solito confonde /f/ /v/, suoni sordi o sonori /p/ /b/ e /t/ /d/, labiali /b/ /p/, oppure dentali /d/ /t/), il mantenere in memoria l'intera sequenza di fonemi da produrre (con conseguente omissione di lettere), numerosi errori ortografici e lessicali (che lo portano a scrivere, ad esempio, “focaccine”, “quocere” e “celo”, in quanto utilizza in prevalenza il sistema di conversione fonema-grafema, insufficiente per parole che richiedono una specificità ortografica e lessicale).

Frequenti sono inoltre gli errori che producono l'assimilazione di due parole (per lo più un articolo, una preposizione o una congiunzione semplice unite alla parola che segue, come in “lasera” o “nelcielo”), l'eliminazione dell'apostrofo (“dellorologio”, “lagnello”, “lerba”) o lo sdoppiamento di un'unica parola in unità separate, che possono anche acquisire un significato diverso rispetto al termine originale (come ad esempio “prima vera”)[6].

1.1.3 Aspetti visuo-percettivi della scrittura

Una volta che il bambino ha compreso il legame esistente tra il linguaggio orale e la scrittura, si trova ad affrontare il problema di memorizzare la corrispondenza tra ciascun fonema ed il segno grafico che lo rappresenta.

A complicare questo compito, in Italia come in gran parte dell'Europa, è consuetudine insegnare già nelle prime classi due modelli di scrittura e, quindi, quattro sistemi grafici mediante i quali possono essere rappresentate le lettere dell'alfabeto: **stampatello maiuscolo** e **minuscolo**, **corsivo maiuscolo** e **minuscolo** (Figura 1).

Per ciascun fonema si hanno così ben quattro forme alternative, dette allografi, con cui esso può essere rappresentato nei diversi sistemi grafici. L'alunno deve quindi imparare le caratteristiche visive che contraddistinguono il singolo grafema nei diversi sistemi ed iniziare a padroneggiare le corrispondenze che permettono di trascrivere le lettere da un sistema grafico all'altro [2].



Figura 1: Rappresentazione delle lettere dell'alfabeto secondo quattro sistemi grafici.

Prerequisito essenziale, affinché il bambino sappia affrontare questi compiti, costituisce lo sviluppo di adeguate abilità visuo-percettive. Generalmente, rientrano in questa categoria, un certo numero di abilità specifiche; tra queste, sono particolarmente coinvolte nell'apprendimento della scrittura la discriminazione visiva, ovvero l'abilità di discriminare una configurazione visiva da un'altra, e il completamento visivo, in altre parole l'abilità di percepire una configurazione intera quando ne viene mostrata solo una parte, e la percezione dei rapporti spaziali.

I bambini che mostrano una maturazione non adeguata di queste abilità possono trovarsi ad affrontare varie difficoltà nel formare accuratamente le lettere e di conseguenza la leggibilità della loro scrittura può risultare compromessa. Ad esempio, se un bambino non è in grado di discriminare accuratamente la lettera “b” dalla lettera “d” scritte in stampatello minuscolo, non sarà nemmeno capace di riprodurre queste stesse lettere in modo affidabile a richiesta, mentre se ha delle difficoltà nel gestire il completamento visivo, può scrivere la lettera “o” con uno spazio sulla sommità (rendendola quindi molto simile ad una “u”) e percepirla, al contrario, come chiusa.

Lo stampatello maiuscolo è il sistema appreso con maggiore facilità dai bambini e per questo viene spesso proposto loro come primo modello di scrittura. Nello stampatello maiuscolo le lettere sono spazialmente ben separate le une dalle altre e hanno pochi tratti distintivi, semplici e discreti: barre verticali, orizzontali e diagonali, cerchi e semicerchi (Figura 2).

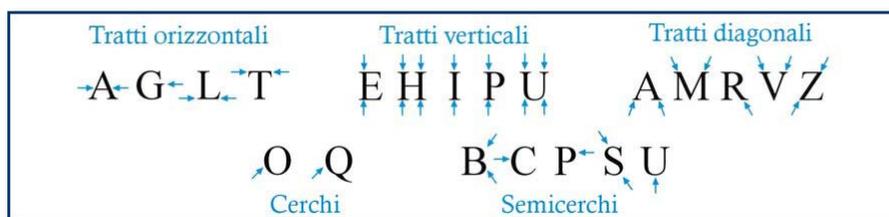


Figura 2: Tratti distintivi delle lettere dell'alfabeto, secondo lo stampatello maiuscolo.

Contrariamente ai tratti che costituiscono le lettere in corsivo, quali aste, occhielli, asole (Figura 3), quelli relativi alle lettere in stampatello sono più facili da ricordare e riprodurre.

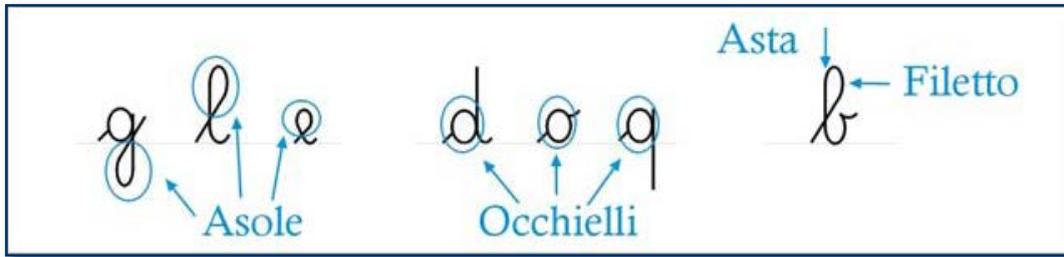


Figura 3: Tratti distintivi delle lettere dell'alfabeto secondo il corsivo.

Nel corsivo, le lettere non sono separate all'interno delle parole: esse sono legate le une alle altre mediante tratti, la cui posizione e direzione cambiano in base alle caratteristiche grafiche delle lettere stesse. A causa di tali differenze, il passaggio dall'apprendimento dello stampatello a quello del corsivo può rivelarsi un compito non facile per il bambino [2].

1.1.4 Aspetti visuo-spaziali della scrittura

Conoscere i grafemi e il movimento necessario per riprodurli rappresenta soltanto una parte delle acquisizioni essenziali per saper scrivere bene; infatti, è fondamentale che il bambino rispetti delle regole di scrittura riguardo alla disposizione spaziale di lettere e parole all'interno della pagina.

E' possibile raggruppare le lettere in base alle loro proporzioni; tra le minuscole del corsivo e dello stampatello possiamo individuare tre famiglie principali (Figura 4 a, b, c), all'interno delle quali i tratti delle lettere hanno dimensioni simili: lettere formate da un unico corpo centrale, dette *lettere medie*; lettere con tratti (o allungamenti) ascendenti, dette *lettere ascendenti*; lettere con tratti (o allungamenti) discendenti, dette *lettere discendenti*. Ogni grafema è un elemento a sé stante, che non deve sovrapporsi a quelli attigui, ma non deve nemmeno distaccarsi eccessivamente da essi all'interno di una stessa parola: uno spazio, pari circa a quello di una "o" tipica del bambino, deve essere utilizzato proprio per indicare la fine di una parola e l'inizio di un'altra. La percezione delle relazioni spaziali e la pianificazione spaziale sono fenomeni complessi: il bambino che ha difficoltà in questo non riesce ad organizzare la pagina in modo appropriato e riscontra difficoltà notevoli nel rimanere all'interno dei margini laterali del foglio e nel rispettare la direzione orizzontale sulle righe; produce lettere sproporzionate e lascia poco spazio tra grafemi e tra parole all'interno della frase oppure, al contrario, tende ad aumentare in modo esagerato la distanza man mano che procede [2].

a) Lettere medie	a c e i m n o r s u v z a c e i m n o r s u v z
b) Lettere ascendenti	b d f h l t b d f h l t
c) Lettere discendenti	g p q f g p q

Figura 4: Classificazione delle lettere, in stampatello minuscolo e corsivo minuscolo, in a) medie, b) ascendenti e c) discendenti.

1.1.5 Esecuzione motoria e programmazione della scrittura a mano

Non appena il bambino apprende come riconoscere e distinguere i diversi grafemi e le loro varianti allografiche, deve contemporaneamente imparare a riprodurli graficamente a mano. Il grafema non è un simbolo paragonabile ad una qualsiasi icona o disegno, che può essere tracciato senza particolari criteri riguardanti ordine di esecuzione o direzionalità dei tratti. La scrittura è il risultato di atti motori molto rapidi e precisi, caratterizzati da frequenti cambi di direzione e da un'organizzazione sequenziale nel tempo.

Un obiettivo centrale che il bambino dovrebbe raggiungere al più presto nella sua carriera scolastica è l'automatizzazione dei diversi movimenti necessari allo scrivere; in particolare facciamo riferimento ai *movimenti d'iscrizione* ed a quelli di *progressione*. I primi contribuiscono alla tracciatura delle singole lettere ed avvengono a polso fermo attraverso il movimento fine delle dita, mentre i secondi consentono lo scorrimento della penna lungo il rigo, richiedendo la coordinazione tra movimenti fini, avanzamento del polso, dell'avambraccio e della spalla [7]. L'esecuzione automatica di questi movimenti permette al bambino di diventare sempre più veloce e regolare nell'esecuzione dei tratti.

Non esiste, in realtà, una definizione univoca di quali movimenti si debbano considerare “corretti” e quali meno per tracciare una lettera: è possibile affermare solamente che un movimento è adeguato quando appare essenziale per la produzione di una scrittura efficiente, scorrevole e leggibile.

Per quanto riguarda il corsivo, il discorso è decisamente più complesso, poiché è necessario un armonioso movimento curvilineo della penna non solo per realizzare le singole lettere, ma anche per congiungerle fra loro all'interno della parola [2][8].

Il gesto con cui si eseguono i tratti costituenti le lettere dipende sia dalla forma del grafema in sé, sia dal modo (possibilmente il più economico, in termini di cambi di direzione) con cui s'intende legarlo al successivo, procedendo da sinistra verso destra. Esistono numerosi schemi sostanzialmente simili per lo stampatello maiuscolo e minuscolo [9], che mostrano quale dovrebbe essere la direzione ottimale del gesto nel tracciare le lettere (Figura 5).

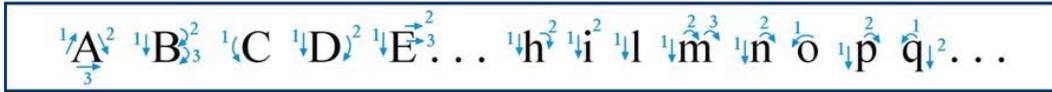


Figura 5: Esempificazione dell'ordine e della direzionalità nei movimenti necessari per la realizzazione efficiente di alcuni caratteri in stampatello maiuscolo e minuscolo.

Dalla letteratura [10] [11] sono state ricavate **tre regole** necessarie e sufficienti a produrre un movimento fluido nella scrittura di lettere in corsivo minuscolo:

- a) Occhielli, asole rivolte verso l'alto e tratti curvilinei che non hanno la convessità rivolta verso il basso, devono essere prodotti con un movimento rotatorio antiorario. Invece, tratti curvilinei che hanno la convessità rivolta verso il basso ed asole discendenti devono essere prodotti con un movimento rotatorio orario. Fa eccezione la lettera "s", che non appartiene a nessuna delle categorie elencate (Figura 6).

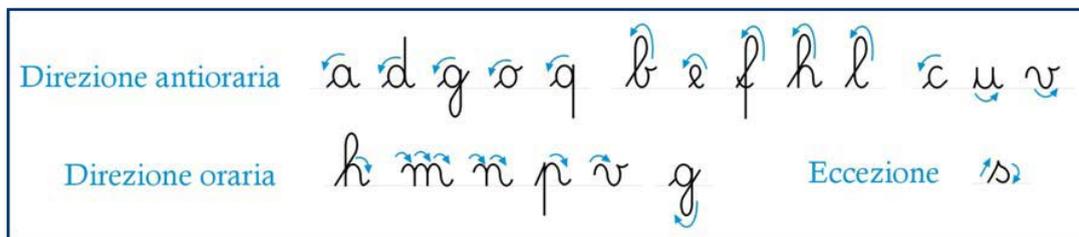


Figura 6: Esempificazione dei tratti nel corsivo da eseguire con movimenti rotatori orari o con movimenti rotatori antiorari, inclusa l'eccezione costituita dalla lettera "s".

- b) Le aste verticali devono essere tracciate con un movimento che procede dall'alto verso il basso (Figura 7).

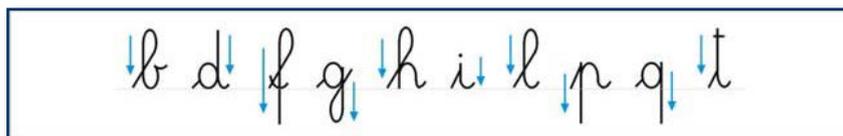


Figura 7: Esempificazione dei tratti da eseguire con movimenti diretti dall'alto verso il basso.

- c) I tratti orizzontali devono essere prodotti nella medesima direzione di progressione della scrittura, dunque da sinistra verso destra (Figura 8). In questo modo anche i tratti che collegano una lettera alla successiva all'interno di una parola, i cosiddetti tratti d'uscita, possono essere tracciati rapidamente e con una spesa minima, in termini di cambi di direzione del gesto.

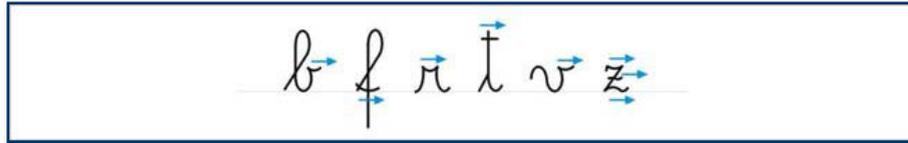


Figura 8: Esempificazione dei tratti da eseguire con movimenti diretti da sinistra verso destra.

- d) Ogni lettera il cui movimento di esecuzione termina vicino alla riga di base o con un tratto discendente al di sotto di essa, può essere collegata alla successiva tramite un tratto diagonale, tracciato dal basso verso l'alto e da sinistra verso destra (Figura 9).



Figura 9: Esempificazione dei tratti di uscita diagonali per il collegamento tra lettere.

- e) Le lettere il cui movimento di esecuzione termina con un tratto orizzontale che non tocca la riga di base, non necessitano di ulteriori forme di collegamento, ma richiedono una modifica della lettera successiva (forma di “coarticolazione” grafica tra le due lettere consecutive - Figura 10).

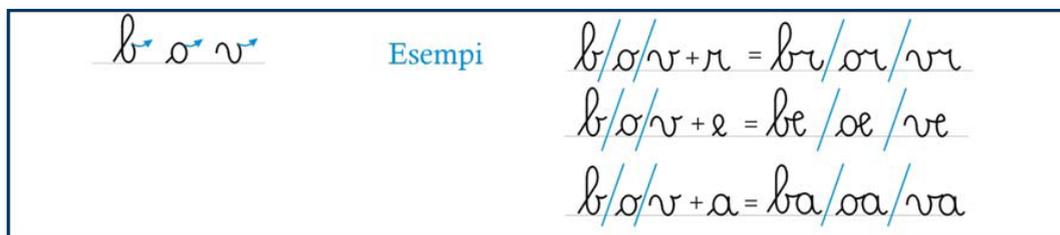


Figura 10: Esempificazione di collegamenti orizzontali, in cui si modifica la lettera successiva.

Si comprende quindi che la scrittura è un particolare compito motorio, nel quale la persona prepara ed esegue specifiche sequenze di movimenti che si realizzano sotto precisi vincoli temporali e spaziali [12] [13]. Pertanto, per il suo svolgimento, richiede un'adeguata programmazione ed un'esecuzione coordinata di sequenze motorie integre [2]. La scrittura è un'abilità che funziona al meglio quando diventa automatizzata [14], cioè quando lo scrittore è in grado di eseguire gli atti fino-motori richiesti come un'unità o come una sequenza integrata [15]: questo permette alla persona, ad esempio, di concentrare più facilmente la propria attenzione sugli aspetti della scrittura legati al contenuto. Con molta pratica, la capacità si affina ed i movimenti necessari a produrre i grafemi richiedono un'attenzione conscia sempre più limitata. Tuttavia, un comportamento motorio

automatico, ma errato o non efficiente, una volta acquisito e divenuto stabile, è notevolmente difficile da correggere o eliminare [16].

Numerosi sono i fattori che caratterizzano un atto motorio, tra i quali troviamo l'*intensità* (forte vs. piano), il *tempo* (rapido vs. lento), la *tipologia* (flessione, rotazione...), la *direzione* (avanti, alto...). Questi elementi costituiscono, insieme, lo **schema motorio**.

E' necessario che i bambini raggiungano un certo livello di maturità fisica prima che sia loro possibile gestire i suddetti aspetti. I più piccoli, dovendo inizialmente focalizzare la loro attenzione sulla realizzazione di ogni lettera, s'impegnano in modo considerevole durante la produzione della scrittura. La capacità di apprendere e di eseguire movimenti volontari seriali varia in rapporto all'età e questo incide in modo sostanziale sulla fluidità della scrittura e in parte anche sulla sua qualità grafica [17].

Un contributo alla realizzazione del movimento viene fornito anche dalle componenti sensoriali che coinvolgono sia il sistema cinestesico, sia quello visivo. Questi sistemi hanno il compito di monitorare il movimento dell'arto durante la scrittura e di confrontarlo con la sequenza di movimenti registrata in memoria. Il feedback che si genera informa il cervello sulla precisa localizzazione e sul movimento delle varie parti del corpo nello spazio [18] [19]; se il confronto tra l'informazione trasmessa dagli impulsi afferenti e la configurazione prevista dal piano motorio presente in memoria, rileva una discrepanza, comandi motori adeguati intervengono al fine di correggere il movimento in atto [20].

Le difficoltà riscontrate nell'integrare informazioni sensoriali e motorie [21] [22] [23], nell'implementare il piano motorio [19] o nel recupero delle sequenze motorie necessarie alla formazione della lettera [24] sono ben visibili nel prodotto scritto: i tratti sono tremolanti, imprecisi o addirittura frammentati a causa dell'interruzione del movimento regolare della mano; l'ordine di esecuzione dei grafemi è sovvertito oppure compaiono delle perseverazioni, il movimento non si ferma quando dovrebbe e alcuni tratti vengono esageratamente allungati o interrotti troppo presto.

1.1.6 Linee di ricerca nello studio della scrittura

Diverse sono le direzioni nelle quali è possibile intraprendere l'analisi della scrittura, in quanto ci si trova ad affrontare un ambito di studi così ampio e vario, in cui non sempre è chiaro come orientarsi (Figura 11).

La natura di questa capacità complessa ha portato vari gruppi di ricerca a concentrarsi solamente su alcune delle numerose componenti della scrittura, senza tuttavia offrire una visione completa dei processi cognitivi che stanno alla base dell'apprendimento della scrittura ed in particolare del corsivo [26].

I dati disponibili nella letteratura italiana possono essere suddivisi a seconda che si tratti di ricerche incentrate sugli aspetti linguistici o grafo-motori. I primi presentano un valore tanto teorico quanto pratico, poiché hanno una ricaduta diretta in ambito clinico e scolastico;

infatti, permettono di individuare precocemente bambini prescolari a rischio o di programmare un recupero mirato per quelli in età scolare che presentano, ad esempio, disturbi di tipo disortografico.

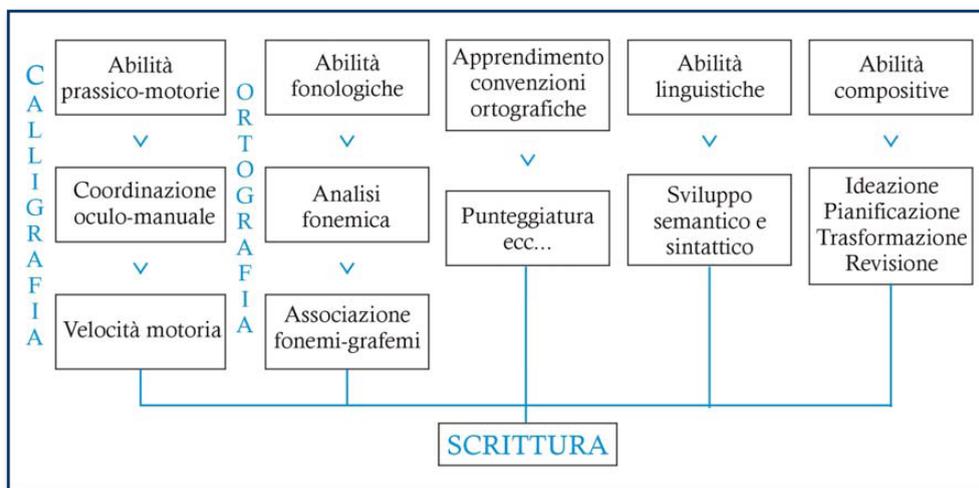


Figura 11: Schema riassuntivo delle componenti implicate nel processo di scrittura [25].

In Italia, la ricerca nel campo degli aspetti grafo-motori della scrittura e dei problemi legati al loro sviluppo è quasi totalmente assente.

1.1.6.1 La ricerca incentrata sugli aspetti linguistici

Nell'ultimo ventennio, la ricerca sugli aspetti linguistici ha concentrato i propri interessi sugli aspetti fonologici, di correttezza ortografica, sintattica e lessicale e su quelli relativi all'organizzazione del discorso nella produzione di un testo scritto.

Questo è l'indirizzo di ricerca che continua a riscuotere maggiore attenzione da parte dei ricercatori italiani e dà luogo a studi particolarmente coerenti e a modelli teorici [2].

I modelli adottati dagli studiosi che si occupano di competenze fonologiche, ortografiche e lessicali, per studiare le normali fasi di apprendimento della scrittura sono fondamentalmente due, nati per descrivere, in origine, rispettivamente il processo di lettura e la sua acquisizione nel tempo, e successivamente estesi anche al compito di scrittura.

Il primo sistema descrittivo appartiene alla famiglia dei modelli a doppia via ed è noto come **modello di Ellis**. Questo modello rappresenta un contributo della neuropsicologia cognitiva dell'adulto, in quanto deriva da studi su pazienti adulti che avevano perduto la capacità di lettura e/o scrittura a causa di una lesione cerebrale (Figura 12) [27].

Il modello prevede che nel processo di scrittura siano contemplate due diverse procedure:

a) la *procedura lessicale-semantica*, consente di recuperare l'ortografia necessaria per scrivere parole note, la cui rappresentazione ortografica è contenuta all'interno di un lessico di uscita grafemico. Tale processo è mediato sia dal sistema semantico che dal lessico d'uscita fonologico. Una volta recuperate nel lessico d'uscita grafemico le

rappresentazioni ortografiche astratte, queste vengono inviate ad un buffer grafemico d’uscita.

Questo sistema di memoria di lavoro mantiene le rappresentazioni ortografiche degli stimoli che devono essere scritti, prima che vengano specificati i processi più periferici per la computazione scritta o orale [28]:

b) la *procedura fonologica, non lessicale*, che utilizza un meccanismo di conversione suono-scritto (fonema-grafema), indipendente dalla procedura lessicale-semanticale [30] [31], che riceve informazioni dal buffer di uscita fonemico e le invia al buffer grafemico.

Le operazioni cognitive coinvolte nella scrittura sono state suddivise in **processi centrali** e **processi periferici**; questi ultimi rappresentano la parte in causa nei problemi associati all’esecuzione del tratto grafico.

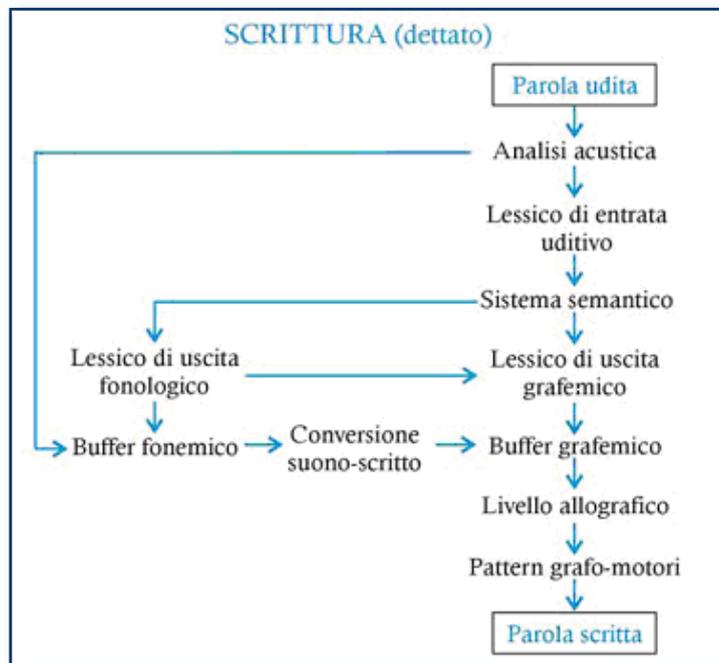


Figura 12: Modello a due vie del processo di scrittura (adattamento da [29]).

I processi centrali coinvolgono operazioni semantiche, sintattiche e fonologiche che consentono di recuperare l’ortografia di una parola nota e familiare, oppure di associare una struttura ortografica plausibile alla forma fonologica di una parola sconosciuta.

Sono poi i processi periferici a tradurre tali rappresentazioni grafemiche astratte nelle realizzazioni pratiche di varia natura: dalla scrittura a mano a quella a macchina.

Ellis [31] [32] ha sviluppato un modello che, nella parte riguardante tali aspetti periferici, prevede uno stadio di elaborazione periferico collocato dopo il buffer grafemico di uscita, che coinvolge specificamente la selezione di un appropriato *allografo*, ossia consente di

scegliere la forma del grafema dalla memoria dei diversi tipi di lettere conosciuti (Figura 13).

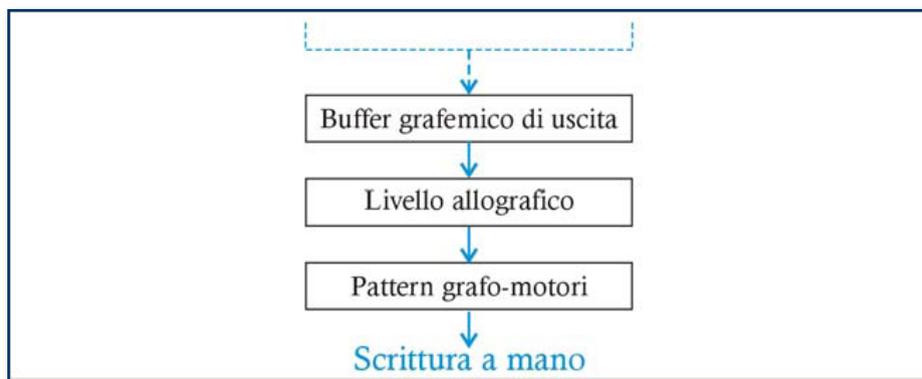


Figura 13: Parte finale del modello di Ellis ([29]).

Secondo l'autore, alcuni errori compiuti frequentemente dai soggetti normali, come l'omissione di lettere che si ripetono due volte all'interno della parola, o la sostituzione di una lettera con un'altra simile allograficamente, (ad esempio, "m" ed "n") possono essere dovuti a malfunzionamenti temporanei in tale sistema.

Il recupero dei pattern grafo-motori è una componente che permette di attivare quei movimenti che consentiranno la rappresentazione delle diverse forme grafemiche (tipo di lettera e tipo di font), per mezzo di un meccanismo di rievocazione motorio: l'espressione dell'inefficienza di tale componente è rappresentata da una irregolarità più o meno accentuata della forma dei grafemi [3].

1.1.6.2 La ricerca incentrata sugli aspetti grafo-motori

La scrittura comporta un iter d'apprendimento piuttosto lungo, suddiviso in tappe, ognuna delle quali prevede l'acquisizione sia di abilità cognitive sia di competenze grafo motorie sempre più sofisticate.

Diversi autori riconoscono che eventuali problemi legati alla grafia rappresentano uno scoglio importante nel progresso scolastico di un bambino, in quanto influenzano negativamente anche l'acquisizione di regole ortografiche e sintattiche, a causa della frequente impossibilità di rilettura e d'autocorrezione [33].

Le ricerche italiane sono tutte finalizzate principalmente alla valutazione e al recupero della disgrafia, tuttavia, non forniscono una descrizione del normale percorso evolutivo della scrittura, quale capacità grafo-motoria che si affina nell'arco dello sviluppo. È naturale rilevare un certo grado di errori o imprecisioni nella scrittura dei bambini agli inizi di questo apprendimento, ma non si è ancora in grado di definire chiaramente qual è il limite, sia quantitativo che qualitativo, oltre il quale si è autorizzati ad affermare che non stiamo osservando più una difficoltà fisiologica, ma un disturbo degno di nota.

Alcuni autori sostengono che l'esperienza clinica e riabilitativa sembra dimostrare la sensibilità delle produzioni disgrafiche a vari elementi del contesto; ad esempio, è emerso da alcuni studi che la calligrafia risulta sensibile al grado d'affaticamento dello scrivente, agli strumenti utilizzati (la penna e la superficie di scrittura, che può essere un foglio a righe, a quadretti o completamente bianco) ed alla situazione di scrittura stessa.

Ulteriori contributi alla definizione degli aspetti, sia comportamentali che di esecuzione grafica, derivano da due griglie di osservazione simili, fornite rispettivamente da Tressoldi & Cornoldi [34] e da Giovanardi Rossi & Malaguti [2].

Tressoldi & Cornoldi definiscono delle check-list, quali mezzo di approfondimento diagnostico. L'elenco consta di trentacinque variabili che riguardano l'aspetto delle lettere, l'assetto globale della scrittura prodotta, la postura, caratteristiche del gesto di scrittura.

Giovanardi Rossi & Malaguti hanno determinato una griglia d'osservazione incentrata sulla produzione grafica e su atteggiamenti posturali tipici.

Negli studi di Pratelli [33] si trovano una serie di proposte concrete per diagnosi e intervento. Oltre ad aver fornito una descrizione del problema, l'autore ha definito delle metodologie per la valutazione delle abilità di base coinvolte nella realizzazione della scrittura a mano ed ha proposto dei percorsi per il recupero graduale e tempestivo delle difficoltà individuate.

Pratelli sostiene che la scrittura, nelle sue componenti grafo-motorie, non sempre costituisce un compito facile per il bambino, quindi ritiene indispensabile spiegare la corretta impostazione dei grafemi per favorire una grafia più scorrevole e pertanto più consapevole.

Più specifiche risultano poi le osservazioni di Biancardi [7] sulle modalità e sugli obiettivi di una corretta riabilitazione del bambino disgrafico. Una riabilitazione adeguata deve essere basata sull'allenamento e sul perfezionamento del gesto di scrittura allo scopo di automatizzare i movimenti necessari allo scrivere.

1.2 Anomalie motorie

1.2.1 La disgrafia

Secondo un certo orientamento teorico, i disturbi di tipo disgrafico, che coinvolgono esclusivamente gli aspetti di realizzazione manuale dei grafemi, vengono presi in considerazione nell'ambito di quadri patologici più ampi solo in quanto dato clinico rilevante. Molto spesso, il termine disgrafia viene sovraccaricato di significati impropri; non è raro, infatti, il caso in cui viene utilizzato come sinonimo di disortografia.

La **disgrafia** è un disturbo correlato al linguaggio scritto che riguarda le abilità esecutive della scrittura e rappresenta una difficoltà legata alla configurazione del segno grafico e non all'uso adeguato di regole ortografiche e sintattiche.

Secondo il parere di Giovanardi Rossi & Malaguti [2], le disgrafie si possono classificare in due gruppi:

- **Disgrafie semplici:** si riscontrano nelle fasi iniziali dell'apprendimento della scrittura, durante il primo ciclo elementare (primo e secondo anno). Sono da considerarsi difficoltà “fisiologiche” per l'età, poiché sono legate a fattori maturativi e tendono a riassorbirsi spontaneamente. La scrittura del bambino presenta alcune caratteristiche peculiari: è lenta e tremolante; le singole lettere sono esageratamente grandi e, di rado, troppo piccole, ma comunque tendono ad essere sproporzionate; gli spazi tra le lettere non sono adeguati (troppo stretti o troppo dilatati) e c'è una difficoltà nel procedere da sinistra verso destra mantenendosi sul rigo, con conseguente fluttuazione delle lettere al di sopra ed al di sotto del rigo stesso.

Sono da intendersi come incertezze nella padronanza del segno grafico, legate agli stadi iniziali dell'apprendimento della scrittura. I bambini affetti da disgrafie semplici migliorano gradualmente e traggono beneficio sia da esercizi di apprendimento delle caratteristiche grafiche delle singole lettere, sia dall'organizzazione spaziale del foglio. Alcune disgrafie semplici si mantengono tali negli anni: i bambini continueranno a mostrare negli anni una grafia incerta, discontinua, con sproporzioni fra lettere, ma perfettamente leggibile.

- **Disgrafie specifiche:** presentano inizialmente caratteristiche strutturali analoghe a quelle delle disgrafie semplici, ma si caratterizzano per la loro evoluzione, in bambini con normale livello intellettivo che non presentano deficit neurologici. Sono disturbi persistenti che si cronicizzano anche durante la scuola media, al punto che alcuni bambini, nonostante lievi miglioramenti, possono rimanere disgrafici gravi nell'età adulta. Si possono classificare vari livelli di gravità e si possono distinguere, inoltre, *disgrafie pure* (non associate a disturbi di scrittura di tipo fonologico od ortografico-lessicale) e *disgrafie associate*.

Alla base di una “brutta” grafia possiamo trovare:

- **Difficoltà prevalentemente visuo-spaziali:** gli spazi tra lettere e parole sono inadeguati, non sono rispettati i margini del foglio, le lettere sono inclinate in modo incoerente, di grandezza irregolare, fluttuanti sopra e sotto il rigo.
- **Difficoltà principalmente posturali e motorie:** la scrittura è lenta, tremolante ed il tratto ha una pressione variabile. Questa categoria comprende difficoltà motorie e posturali; il bambino fatica a mantenere una postura corretta, non tiene fermo il foglio con la mano che non scrive e utilizza prensioni alternative problematiche. Non sempre è possibile trovare una soluzione a tali difficoltà.

- **Apprendimento ed automatizzazione di strategie inappropriate:** le lettere sono eseguite secondo una direzione non funzionale, o addirittura opposta, a quella di progressione della scrittura; i collegamenti tra i grafemi appaiono difficili e inoltre sono presenti alcune deformazioni che rendono alcune lettere addirittura illeggibili.
- **Difficoltà di pianificazione e recupero degli schemi motori:** le caratteristiche disgrafiche incluse in questa categoria sono associate al corretto recupero dei grafemi, che comporta confusione tra lettere graficamente simili (es. m/n, i/e, e/l, etc.) o tra allografi simili (lettere appartenenti a codici differenti, come corsivo e script) e frequenti autocorrezioni.
- **Difficoltà nel controllo motorio durante l'esecuzione del movimento:** sono presenti errori di misurazione nell'esecuzione delle traiettorie (dismetrie) e perseverazioni motorie (mancata inibizione di un'azione per produrne una successiva); il bambino non riesce a fermare in tempo la penna per passare alla lettera seguente. Tali difficoltà implicano l'incapacità di controllo “in corso d'opera” della scrittura. Esse possono essere legate ad una difficoltà del sistema motorio nell'utilizzare le informazioni visive disponibili per controllare e dirigere la traiettoria del movimento, a difficoltà di attenzione o ad un'eccessiva impulsività nello scrivere.

1.2.2 La malattia di Parkinson

La malattia di Parkinson rappresenta un disordine neurodegenerativo tradizionalmente attribuito alla degenerazione progressiva di neuroni dopaminergici nella sostanza nigra e, più recentemente, di altri sistemi non dopaminergici dei gangli della base e di altre regioni del sistema nervoso centrale.

Sebbene i pazienti affetti da malattia di Parkinson riportino sintomi motori e non, il tremore, la bradicinesia, l'instabilità posturale e i disturbi dell'andatura hanno un alto impatto nella vita di tutti i giorni e possono ridurre severamente la qualità di vita dei pazienti.

I soggetti con Parkinson mostrano tipicamente modelli di andatura caratterizzati da aumento della cadenza e da riduzione della lunghezza e della velocità [35].

Sebbene la scrittura sia un compito importante della vita di ogni giorno, non è chiaro se il riapprendimento ed il consolidamento (ad esempio l'immagazzinamento nella memoria motoria) di questa abilità sia possibile per la malattia di Parkinson [36]. La micrografia, definita come perdita di abilità motoria, che si manifesta principalmente come riduzione progressiva o stabile in ampiezza durante un compito di scrittura, è spesso uno dei segni della malattia di Parkinson.

1.2.2.1 Scale per la quantificazione del Parkinson

Una classificazione della stadiazione della malattia di Parkinson nel tempo è stata fornita dalla scala di Hoehn & Yahr, che nel 1967 classificarono i pazienti in 6 livelli di evoluzione:

0. Nessun sintomo visibile;
1. Sintomi ad un solo lato del corpo;
2. Sintomi ad entrambi i lati del corpo ma senza difficoltà a camminare;
3. Sintomi ad entrambi i lati del corpo, rallentamento dei movimenti e compromissione dell'equilibrio con conseguente difficoltà nel camminare;
4. Grave disabilità, può camminare in misura limitata, il tremore può però essere minore rispetto alle fasi precedenti;
5. Invalidità completa.

Nel 2001 Shenkman vi aggiunse 2 stadi intermedi creando la “Hoehn & Yahr Modified Scale”. Nel 1987 un gruppo internazionale di esperti, al fine di avere uno strumento clinico per la quantificazione e la valutazione terapeutica dei parkinsoniani, propose la “Unified Parkinson’s Disease Rating Scale” (UPDRS) che fu poi revisionata nel 2007 dalla Società dei Disordini Motori (MDS). La MDSUPDRS consiste in una divisione in 4 gruppi a seconda del livello di patologia.

In letteratura si trova anche traccia della Webster scale, ove viene valutata la limitazione dei movimenti e l'autonomia mediante un punteggio suddiviso in gruppi di gravità (0-normale/assente, 3-grave).

Infine vi è il Mini Mental State che valuta orientamento spazio temporale, memoria, attenzione e capacità di calcolo, rievocazione e linguaggio.

1.3 La valutazione della grafia

Esistono due approcci diversi per fronteggiare l'esigenza di rendere quanto più oggettiva possibile la valutazione della grafia.

La modalità di analisi manuale utilizza griglie osservative per la valutazione clinica degli aspetti grafo-motori e delle caratteristiche posturali coinvolte nell'attività di scrittura. È uno strumento derivato dall'analisi di una cospicua mole di dati teorici ed empirici presenti in letteratura e dall'esperienza maturata nella routine clinica di psicologi dell'età infantile, logopedisti e neuropsicomotricisti.

L'altro approccio, di tipo digitale, si avvale per la raccolta di dati dell'uso di una tavoletta grafica, che rappresenta un ausilio nella definizione e nella diagnosi delle disgrafie in ambito clinico, nonché nella valutazione di metodi per il recupero del processo grafo-motorio.

Queste due tipologie di analisi, proprio per la loro diversità, perseguono il più delle volte obiettivi distinti, fornendo risultati non sempre facili da confrontare. Spesso, entrambe le valutazioni sono necessarie per avere un quadro completo delle caratteristiche del prodotto scritto.

Contrariamente ai disturbi dell'apprendimento come dislessia e disortografia, per i quali il clinico ha ormai a disposizione un repertorio vastissimo di strumenti standardizzati per la

loro individuazione, per quanto riguarda la diagnosi della disgrafia, ottenere una valutazione esaustiva del problema che sia utile per la successiva riabilitazione, è un discorso quanto mai aperto.

Poter discriminare in modo non ambiguo un semplice ritardo nell'acquisizione dell'abilità grafo-motoria di scrittura da una compromissione più grave, che tende ad aggravarsi col tempo, è di fondamentale importanza. Purtroppo, però, quasi tutti gli strumenti disponibili per l'analisi rappresentano solamente spunti per l'esecuzione di indagini più approfondite. Alcuni strumenti non consentono di fare una valutazione oggettiva dell'abilità di scrittura, poiché mancano parametri oggettivi di confronto; altri, sembrano rivolti ad approfondire solamente una delle componenti implicate nel processo di scrittura; altri ancora sono legati ad uno specifico modello di scrittura, di comune utilizzo all'estero, ma del tutto incompatibile con il corsivo proposto in Italia a partire dalla scuola elementare.

Una scrittura può essere definita efficiente secondo due modalità distinte, dietro alle quali si celano differenti modi di intendere il prodotto scritto e la sua qualità:

- a) l'**analisi orientata al prodotto** (o *approccio off-line*), che analizza la scrittura valutando esclusivamente le caratteristiche statiche, rilevabili a posteriori da un osservatore umano, quali velocità globale di esecuzione del compito, grandezza della scrittura, spazi tra parole e lettere, allineamento rispetto al rigo, scelta degli allografi, etc.);
- b) l'**analisi cinematica della scrittura** (o *approccio on-line*), che utilizza informazioni di origine dinamica, raccolte in tempo reale con strumentazioni adeguate ed è finalizzata ad individuare l'organizzazione del movimento attraverso lo studio della programmazione, del controllo e delle dinamiche del movimento stesso.

1.4 Le unità d'analisi della traccia scritta

L'analisi della traccia scritta richiede la sua segmentazione in unità significative, disposte in ordine crescente in base alla loro complessità:

Strokes: sono considerati le unità fondamentali della scrittura umana. Si tratta dei singoli tratti che, sovrapponendosi, danno origine alla traccia grafica, secondo una precisa sequenza temporale.

Componenti: sono costituite dalla sequenza di tratti (strokes) prodotti durante un percorso tracciato senza staccare la penna dalla superficie di scrittura. Una componente rappresenta il percorso più lungo che può essere tracciato dalla penna senza staccarsi dalla superficie di scrittura. Il numero di sollevamenti dal foglio prende il nome di staccate.

I movimenti complessi possono quindi essere frazionati in unità semplici fondamentali e sono prodotti in modo efficiente quando il sistema è ben allenato, come ad esempio negli adulti non patologici, che hanno oramai appreso, ottimizzato e personalizzato il movimento per formare ogni singolo allografo. Viceversa, il bambino che si avvicina alla scrittura in

corsivo, non è ancora in grado di tracciare i grafemi con una quantità di tratti funzionalmente ottimizzata; pertanto, è normale che ricorra, per esempio, all'utilizzo di più strokes per realizzare una traccia che lo scrittore esperto otterrebbe con uno stroke unico.

1.4.1 Modello di generazione della scrittura

La caratterizzazione degli strokes è stata oggetto di molti approfondimenti negli anni, da parte dei ricercatori. Infatti, uno dei problemi di fondamentale importanza nello studio dei movimenti più complessi è quello della loro decomposizione in unità fondamentali o strokes, tenendo conto della sovrapposizione parziale nel tempo, necessaria ai fini della generazione di movimenti fluidi.

La teoria cinematica proposta da Plamondon agli inizi degli anni Novanta consente di descrivere formalmente i movimenti semplici, mentre i movimenti complessi sono visti come la sovrapposizione vettoriale di strokes semplici.

1.4.1.1 Movimenti rapidi semplici

I movimenti semplici possono essere descritti nel dominio della velocità come una risposta all'azione sinergica di una rete neuromuscolare agonista e di una antagonista, ognuna delle quali risulta composta da un elevato numero di sottosistemi (coppie di muscoli).

In ambito cinematico, lo stroke viene prodotto effettuando il controllo della velocità della punta della penna grazie all'attivazione sincronizzata dei due sistemi neuromuscolari paralleli (uno agonista e l'altro antagonista), le cui risposte impulsive individuali sono asintoticamente descritte da una legge lognormale. Pertanto, per ogni stroke sono necessari due comandi applicati in t_0 , D_1 e D_2 .

La velocità istantanea \vec{v} della punta della penna è ottenuta dalla somma delle velocità vettoriali di tutti gli stroke realizzati fino all'istante t :

$$\vec{v}(t) = \sum_{i=1}^n \vec{v}_i(t - t_{0i}) \quad (1.1)$$

dove t_{0i} indica l'istante di inizio dell' i -esimo stroke.

La scelta della curva di risposta neuromuscolare all'impulso di tipo lognormale proviene dalle osservazioni effettuate da Plamondon [37]. Il modello utilizzato per giungere a questa conclusione è riportato in Figura 14.

Il modello funziona come un generatore di velocità ed il sistema nervoso centrale controlla entrambe le componenti di questo vettore: curvilinea ($V_{(i)}(t)$, in $\frac{mm}{s}$) ed angolare ($V_{\theta(i)}(t)$, in $\frac{rad}{s}$). L'integrazione finale della traiettoria è ottenuta dal contatto penna foglio.

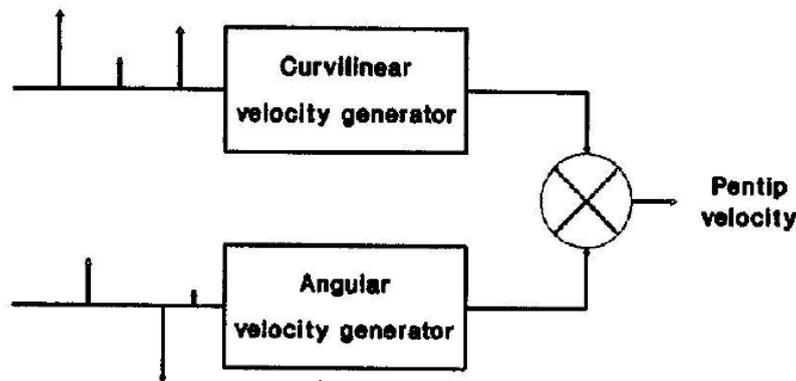


Figura 14: Modello a due generatori di velocità (Tratta da [37])

Ogni sistema neuromuscolare reagisce ad un comando in ingresso $D_1U_o(t - t_o)$, per l'agonista, o $D_2U_o(t - t_o)$, per l'antagonista con una risposta impulsiva che può essere descritta da una funzione lognormale del tipo $\Lambda(t; t_0; \mu_i; \sigma_i^2)$. Questa funzione è caratterizzata da tre parametri: il tempo di attivazione t_0 , il parametro μ_i che riflette il ritardo del sistema neuromuscolare nel tempo e σ_i^2 che rappresenta il tempo di risposta della rete neuromuscolare.

L'uscita del sistema agonista (o antagonista) è pertanto la convoluzione di $D_1U_o(t - t_o)$ o di $D_2U_o(t - t_o)$, con una risposta impulsiva lognormale e il modulo della velocità curvilinea risultante $|\vec{v}|$ di un singolo movimento è dato dalla sottrazione della risposta impulsiva della rete antagonista da quella della rete agonista:

$$|\vec{v}| = |\vec{D}_1\Lambda(t; t_0; \mu_1; \sigma_1^2) - \vec{D}_2\Lambda(t; t_0; \mu_2; \sigma_2^2)| \quad (1.2)$$

dove

$$\Lambda(t; t_0; \mu_i; \sigma_i^2) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_i(t-t_0)} e^{-\frac{1}{2\sigma_i^2}(\ln(t-t_0)-\mu_i)^2} \quad (1.3)$$

L'equazione (1.2) è definita **legge delta-lognormale**. Questa legge costituisce la base del modello vettoriale delta-lognormale, un modello di generazione del movimento che descrive i movimenti bidimensionali individuali.

I parametri t_0, D_1 e D_2 costituiscono una descrizione del comando d'ingresso, mentre μ_1 e σ_1 caratterizzano la risposta temporale della struttura neuromuscolare coinvolta nel movimento [39]. Questa funzione è quella che descrive in modo migliore i profili di velocità dei singoli strokes [40].

Conformemente a questo modello, una sinergia neuromuscolare controlla il vettore velocità, che segue una legge delta-lognormale.

Oltre ai sette parametri della funzione lognormale ($t_0, D_1, \mu_1, \sigma_1^2, D_2, \mu_2, \sigma_2^2$), ogni vettore velocità è caratterizzato da altri tre parametri statici che riflettono, a livello globale, le

proprietà geometriche dei muscoli e delle articolazioni usati nell'esecuzione di un particolare movimento: il punto di applicazione P_0 , la direzione iniziale θ_0 e la curvatura complessiva C_0 . La curvatura è considerata positiva se il movimento avviene in senso orario, negativa nell'altro caso.

La direzione angolare del vettore velocità può essere dedotta dalla relazione intrinseca che lega la velocità angolare con quella curvilinea:

$$\theta(t) = \theta_0 + C_0 \int_{t_0}^t V(\tau) d\tau \quad (1.4)$$

L' i -esimo stroke, quindi, può essere rappresentato nel dominio dello spazio da un percorso curvilineo di lunghezza $D_{1(i)} - D_{2(i)}$ con curvatura costante $C_{0(i)}$ e nel dominio della velocità da un vettore velocità che ha inizio al tempo $t_{0(i)}$ nel punto $P_{0(i)}$ con direzione iniziale $\theta_{0(i)}$.

Il movimento descritto da questo modello “colpirà il bersaglio” in un tempo proporzionale al rapporto dei comandi agonisti e antagonisti $\frac{D_1}{D_2}$ in ingresso (Figura 15).

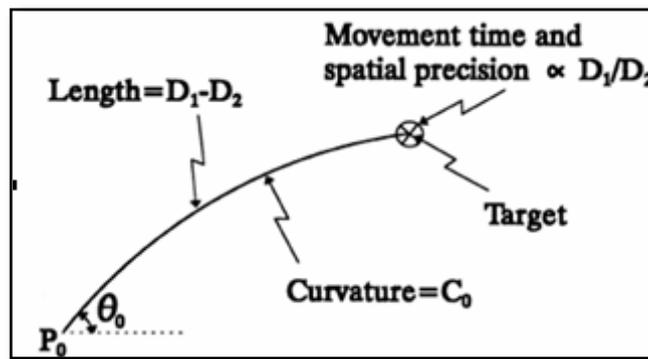


Figura 15: Singolo movimento o stroke.

1.4.1.2 Movimenti rapidi complessi

Il modello vettoriale delta lognormale considera solo il singolo stroke come un vettore che si muove lungo una traiettoria circolare con un profilo di velocità lognormale.

I movimenti complessi non sono altro che il risultato della sovrapposizione nel tempo di due o più vettori. Il vettore risultante della velocità curvilinea, in un determinato istante, ha come modulo la somma dei moduli dei singoli vettori che descrivono lo stroke,

$$|\vec{v}(t)| = |\sum_{i=1}^n \vec{v}_{(i)}(t)| \quad (1.5)$$

e come direzione

$$\theta(t) = \arctan \left(\frac{\sum_{i=1}^n \vec{v}_{(i)}(t) \sin(\theta_{(i)}(t))}{\sum_{i=1}^n \vec{v}_{(i)}(t) \cos(\theta_{(i)}(t))} \right) \quad (1.6)$$

L'espressione analitica della velocità angolare può essere ottenuta derivando l'equazione (1.6). Il modello di Plamondon non spiega l'origine, la forma e le proprietà del segnale velocità angolare, ma mostra solo come questo emerge da un processo di sommazione vettoriale e non viene controllato in modo indipendente.

La Figura 16 mostra la simulazione di un movimento a due stroke. Le crocette, nel dominio dello spazio, mostrano il tratto nascosto di ogni singolo stroke nel caso in cui questi vengano considerati separatamente; i puntini evidenziano invece la traiettoria risultante generata dalla sovrapposizione temporale dei due movimenti. I due grafici a destra mostrano i profili della velocità curvilinea e della velocità angolare per i singoli stroke (linea tratteggiata) e quello risultante dall'intero movimento (linea continua). Come si vede dai tracciati, la forma della velocità angolare è strettamente correlata alla discontinuità angolare tra due stroke successivi oltre che alla loro sovrapposizione temporale nel profilo di velocità curvilinea. Si osserva infatti che il massimo della velocità angolare coincide con il minimo della velocità curvilinea e questo darebbe una spiegazione allo spostamento di fase tra questi due segnali.

Degna di nota è inoltre la somiglianza della forma dei due segnali (curve tratteggiate). Questo è dovuto alla semplice relazione che intercorre tra velocità curvilinea e angolare nel caso in cui la curvatura $C_{\theta(i)}$ sia costante:

$$C_{\theta(i)} = \frac{v_{\theta(i)}(t)}{v_{(i)}(t)} \quad (1.7)$$

Per movimenti complessi (più di uno stroke), la relazione tra velocità angolare e curvilinea diventa più complessa, e la curvatura non è necessariamente costante lungo la traiettoria, ma è funzione del tempo $C(t)$.

1.4.2 Analisi delle traiettorie grafiche

Per potere effettuare un'analisi della traccia scritta, sia essa statica o dinamica, è necessario che questa venga segmentata in unità maneggevoli significative. Dal punto di vista motorio, le unità che si sono dimostrate più interessanti sono le singole lettere ed i singoli tratti, mentre da un punto di vista cinematico, i tratti devono essere considerati la più piccola unità rilevante del movimento di scrittura.

Normalmente, negli adulti, tali movimenti sono eseguiti in modo balistico, poiché sono caratterizzati da un singolo picco nel profilo di velocità [38] ed hanno una tipica durata di 100 ms; una volta iniziato non è possibile correggerne la traiettoria mediante feedback visivo. I tratti sono solitamente delimitati da punti di bassa velocità ed elevata curvatura nella traccia scritta.

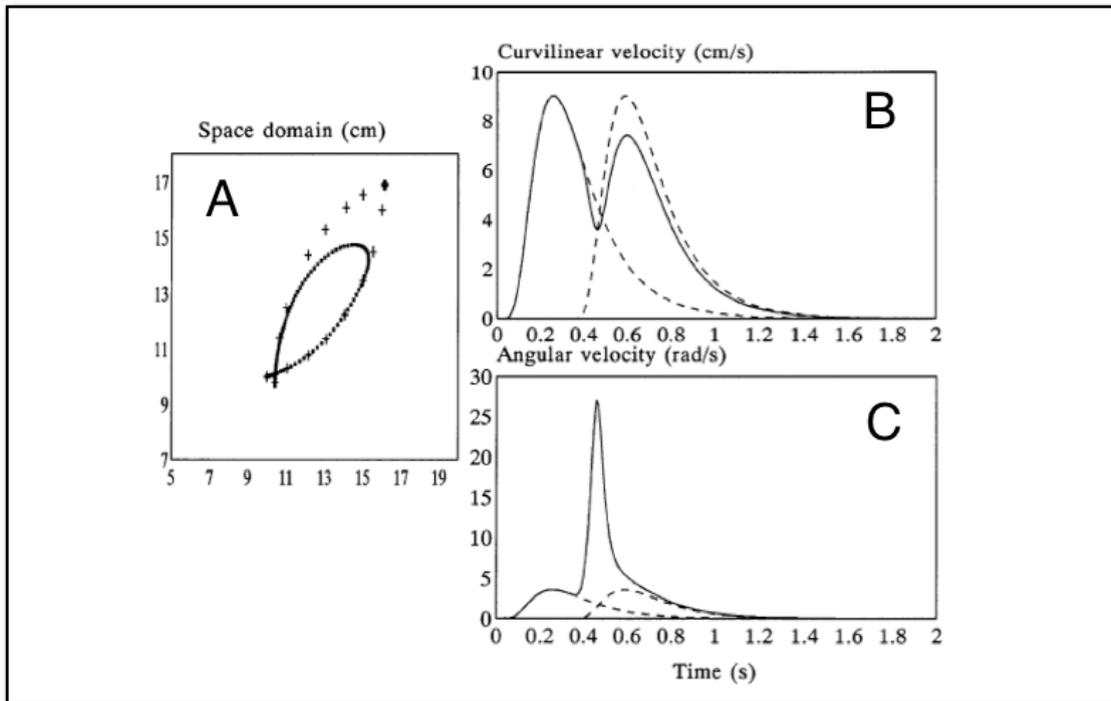


Figura 16: Simulazione della sovrapposizione di due stroke: traiettoria (A), velocità curvilinea (B) e angolare (C).

Un modo di studiare l'esecuzione dei tratti grafici è quello di fare disegnare alle persone più e più volte semplici configurazioni grafiche. In uno studio di questo tipo [41], si chiedeva ai soggetti di tracciare un otto su una tavoletta grafica (Figura 17).

Osservando i dati ottenuti, gli autori hanno visto come la velocità angolare media con cui erano tracciati l'occhiello superiore ed inferiore fosse approssimativamente costante, dimostrando che angoli uguali sono descritti in tempi uguali, contrariamente all'idea che il tempo necessario per disegnare ciascun tratto venisse condizionato dalla sua lunghezza lineare. Questa regola ha preso il nome di Principio di Isogonia.

Successive ricerche, condotte da Lacquaniti et al., [41] [42] hanno coinvolto la produzione di scarabocchi spontanei (Figura 18a) ed hanno portato alla scoperta di un'ulteriore, importante, regolarità.

Dal grafico rappresentante la velocità angolare nel tempo, si ricava una relazione: durante l'esecuzione dello scarabocchio, la velocità varia in modo irregolare, e ciò apparentemente non fornisce un risultato significativo; quando, però, la velocità angolare della penna viene riportata in un grafico come funzione della curvatura della linea eseguita (Figura 18b), ne risulta una distribuzione dei dati estremamente regolare, descrivibile attraverso la seguente equazione matematica:

$$\omega(t) = kC(t)^{\frac{2}{3}} \quad (1.8)$$

dove $\omega(t)$ denota la velocità angolare nell'istante t , k è una costante empirica e $C(t)$ rappresenta l'indice di curvatura (che aumenta via via che la curva diventa più stretta).

Questa equazione è stata chiamata dagli autori Two-Third Power Law, ovvero legge dell'esponente due terzi.

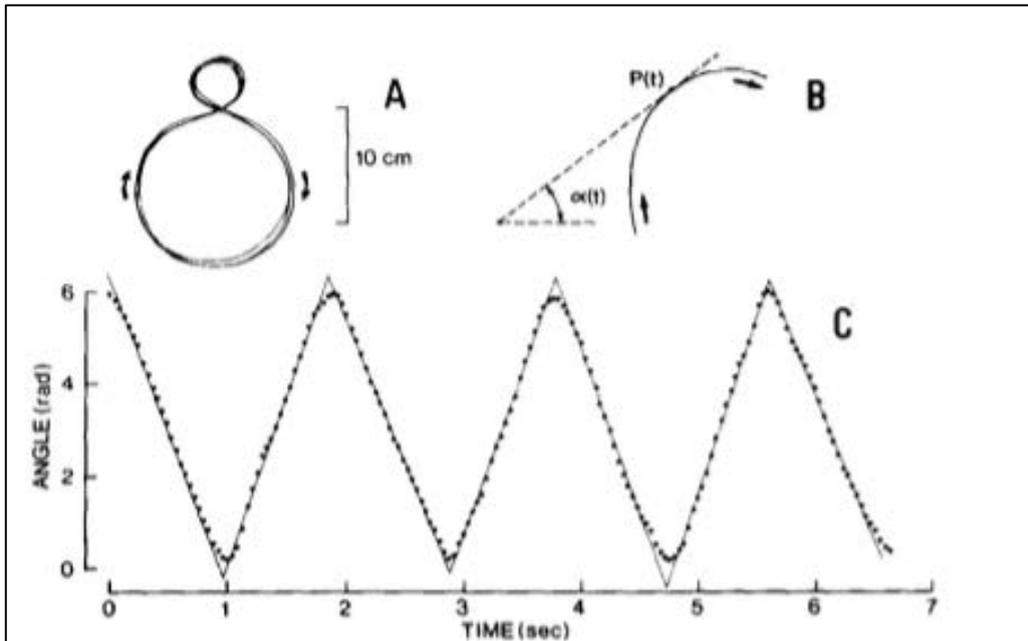


Figura 17: il pannello A illustra il principio di Isogonia in un semplice modello chiuso. Il pannello C mostra l'andamento nel tempo dell'angolo $\alpha(t)$ che la tangente alla traiettoria forma con un riferimento arbitrario (pannello B).

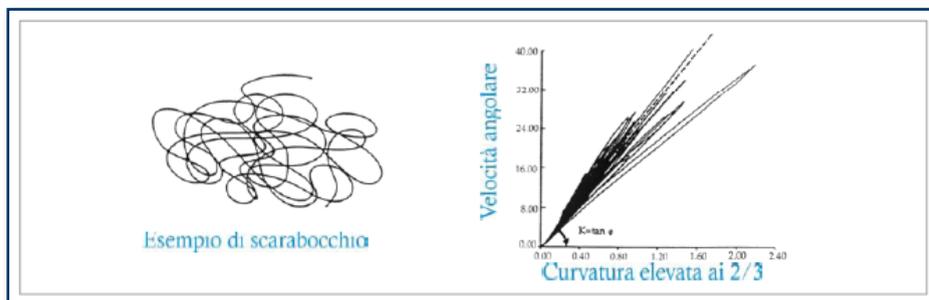


Figura 18: Esempificazione della configurazione richiesta e grafico della velocità angolare in funzione della curvatura.

La Two-Third Power Law afferma che la velocità angolare della penna aumenta linearmente con la curvatura del tratto elevata ai 2/3; in sintesi, la penna rallenta sempre più all'aumentare della curvatura della linea.

2 - Strumenti di analisi

Il panorama della ricerca italiana è piuttosto carente per quanto concerne la valutazione delle disabilità di tipo grafo-motorio, in quanto non esiste una modalità di analisi che permetta di verificare l'efficienza dei processi motori richiesti nella produzione della scrittura.

Un primo tentativo per fronteggiare questa esigenza di oggettivazione, riguarda un'analisi orientata al prodotto ed è rappresentato da una griglia osservativa che viene utilizzata per la valutazione clinica di aspetti grafo-motori e delle caratteristiche posturali coinvolte nell'attività di scrittura [58] [120].

Questo strumento deriva dall'analisi di una cospicua mole di dati teorici ed empirici presenti in letteratura e si caratterizza, pertanto, per la sua esaustività.

Un secondo tentativo proposto riguarda un'analisi orientata al processo che, per la raccolta di dati di tipo dinamico, si avvale dell'utilizzo di una tavoletta grafica, che rappresenta un ausilio nella definizione e nella diagnosi delle disgrafie in ambito clinico, nonché nella valutazione di metodi per il recupero del processo grafo-motorio [6].

L'indagine orientata al prodotto e quella orientata al processo, proprio a causa della loro diversa natura, perseguono il più delle volte obiettivi distinti; portano a tipologie d'analisi differenti e, di conseguenza, forniscono risultati complementari non sempre facili da confrontare.

2.1 Check-list e parametri analizzati: approccio orientato al prodotto

Lo scopo principale della check-list è quello di analizzare la scrittura in corsivo, che nelle scuole italiane viene insegnata ai bambini che frequentano la prima elementare.

Per facilitare tale compito, sono state organizzate due differenti schede di codifica: la prima da utilizzare mentre il bambino scrive e la seconda a performance avvenuta (Figura 19). La check-list contiene un insieme di variabili che vengono rilevate direttamente da parte dell'osservatore, mentre il bambino sta scrivendo. Tra queste, troviamo ad esempio: il tempo globale di esecuzione di ciascun compito, le correzioni del tratto grafico ed alcune informazioni posturali (mano utilizzata per scrivere, posizione del tronco, delle spalle, della mano che non scrive, etc.).

2.1.1 Indici grafo-motori

Le variabili che riguardano l'automatizzazione del gesto di scrittura e la qualità del tratto grafico sono:

- *Numero totale di lettere trascritte;*
- *Tempo totale impiegato per l'esecuzione del compito;*

- *Velocità di scrittura*: espressa in lettere al secondo ed è definita come il rapporto tra il numero totale di lettere trascritte ed il tempo impiegato per trascriverle;
- *Correzioni*: numero di lettere che il bambino ritocca o cancella, dopo aver eseguito uno o più tratti;
- *Aggiunte*: numero di lettere presenti nella trascrizione oltre a quelle previste;
- *Omissioni*: numero di lettere omesse nella trascrizione;
- *Direzione e/o ordine nella formazione delle lettere*: numero di lettere eseguite con movimenti inversi alla progressione della scrittura;
- *Collegamenti tra lettere*: numero di lettere collegate in modo inappropriato all'interno delle parole;
- *Confusione tra lettere graficamente simili*: numero di lettere sostituite da un'altra lettera, simile graficamente (o per movimento di formazione) nello stesso codice corsivo (es.: "e"/"l", "r"/"u", "d"/"a");
- *Collassamenti*: numero di spaziature insufficienti tra due lettere attigue;
- *Dismetrie*: numero di lettere in cui è evidente un'esecuzione imperfetta nella traiettoria del movimento programmato, con il mancato passaggio della punta della penna in punti "obbligati" (ad esempio, negli occhielli in cui parte iniziale e finale del tratto non sono chiusi);
- *Tremori*: numero di lettere che presentano tratti eseguiti con mano evidentemente tremolante, caratterizzati da bordi molto frastagliati o ripetutamente interrotti;
- *Lettere irricoscibili/illeggibili*: numero di lettere non identificabili;
- *Errori di proporzione tra parti nelle lettere*;
- *Incoerenza nell'inclinazione della scrittura*: numero di lettere ascendenti e discendenti che mostrano una inclinazione incoerente rispetto a quella prevalente nella scrittura;
- *Lettere fluttuanti*: numero di lettere la cui base si discosta in maniera visibile al di sopra o al di sotto del rigo;
- *Ampiezza della fluttuazione (o massimo distacco della scrittura dal rigo)*;
- *Altezza massima e minima delle lettere*;
- *Variazione massima dell'altezza della scrittura*;
- *Allografi (script)*: numero di lettere realizzate in un codice diverso dal corsivo (script).

2.1.2 Indici posturali

Nella ricerca di Borean [6], è stato rilevato come atteggiamenti posturali specifici possano effettivamente costituire delle variabili significative nel processo di scrittura. Ad esempio, dai suoi studi, è emerso che la tipologia di prensione influenza significativamente la quantità di tremori nella scrittura; inoltre, sulla base delle differenze osservate, nella quantità di tremori e nella pressione esercitata sul foglio durante l'attività di scrittura, si è visto che sia l'inclinazione laterale del tronco sia la contrazione delle spalle influiscono sul controllo motorio.

A partire da queste considerazioni, si è ritenuto di fondamentale importanza l'inserimento di una griglia di osservazione per gli atteggiamenti posturali del bambino.

Gli indici posturali rilevati sono i seguenti:

- *Tipo di prensione della penna*: palmare; a 2 dita; a 3 dita; statica; etc...
- *Posizione della mano che non scrive*: sul foglio per tenerlo fermo; la mano sorregge il capo; etc...
- *Posizione del foglio*: diritto; leggermente ruotato; etc...
- *Inclinazione frontale e laterale del tronco*: diritto, perpendicolare; etc...
- *Posizione delle spalle*.

2.2 Analisi cinematica della scrittura in età evolutiva

Nell'ultimo decennio, studi rivolti più specificamente alla scrittura e al disegno dei bambini hanno riconsiderato il tema del confronto tra scrittori che mostrano gravi difficoltà di grafia e scrittori abili.

Per creare un collegamento tra differenze nella qualità d'esecuzione del compito ed i tre specifici stadi psicomotori descritti nel modello di Van Galen ([43] [44] [1]) si è visto che variando sistematicamente le richieste nei compiti proposti, gli scrittori in difficoltà e gli scrittori normali impiegano lo stesso tempo per eseguire il movimento, ma il gruppo con buona grafia utilizza movimenti più brevi, con picchi di velocità meno elevata, presenta meno tremori e riesce ad adeguare meglio il livello di rumore neuromotorio (naturale grado di variabilità del movimento) alla presenza di richieste di maggiore accuratezza.

La scrittura di parole e frasi rappresenta un compito che richiede una certa sequenzialità e la programmazione degli strokes successivi durante l'esecuzione dello stroke corrente. Negli adulti, la produzione dei movimenti di scrittura rappresenta una procedura ormai consolidata, che viene eseguita in modo automatico. Gli adulti non patologici eseguono movimenti veloci in quanto, una volta che il movimento per la generazione di ogni singolo allografo è stato appreso ed ottimizzato in funzione delle caratteristiche individuali, è semplice riprodurlo in modo automatico; pertanto, l'attenzione dello scrittore si sposta dalla

realizzazione del tratto ad altri aspetti, quali ad esempio quelli grammaticali, sintattici e semantici.

Al contrario, il bambino che si accinge ad apprendere il corsivo non possiede ancora quell'automatizzazione che permette all'adulto di tracciare l'allografo con una quantità di strokes ottimizzata; deve pianificare e monitorare la formazione e la sequenzialità delle lettere individuali e scegliere i parametri più appropriati per l'esecuzione dei movimenti di scrittura. E' pertanto normale che ricorra all'utilizzo di più strokes per realizzare una traccia che lo scrittore esperto otterrebbe con uno stroke unico.

Generalmente, quindi, gli scrittori meno abili impiegano più tempo per eseguire gli stessi compiti di quelli abili e tale discrepanza si fa tanto più evidente quanto maggiore è la complessità della prova proposta.

Da sempre, la scrittura deficitaria è stata interpretata come parte di una condizione neuromotoria più ampia, caratterizzata da mancanza d'inibizione di movimenti involontari, veloci e bruschi, abilità con poca coordinazione fino-motoria durante l'esecuzione di compiti grafici di precisione.

Il primo metodo pioneristico che ha consentito di avviare la raccolta di informazioni dinamiche sulla scrittura è stato quello della videoregistrazione della stessa. Questo ha rivolto l'interesse degli studiosi verso lo studio comparativo dei movimenti realizzati da scrittori più o meno efficienti.

E' proprio utilizzando la videoregistrazione che Freeman (1921) ha fornito, in uno dei suoi studi, dei dati specifici sulle differenze esistenti tra scrittori abili e scrittori con difficoltà di scrittura. Infatti, filmando la mano di bambini che scrivevano la frase "A quick brown fox jumps over the lazy dog", ed esaminando in una fase successiva i cambiamenti di velocità nel movimento di scrittura e la posizione della punta della penna sui tratti delle lettere ad ogni venticinquesimo di secondo, ha determinato la velocità di scrittura come distanza percorsa dalla punta della penna in ogni successiva unità di tempo.

I risultati ottenuti da questo studio hanno stabilito che, in condizioni di massima efficienza, la scrittura di una parola consiste in una successione di tratti (strokes) abbastanza distinti, ciascuno separato dal precedente da una piccola pausa. Tali pause si collocano nei punti di naturale curvatura del tratto, cioè quelli in cui il cambiamento nella direzione del movimento è marcato. Si è visto inoltre che la velocità nei tratti più lunghi è maggiore di quella nei tratti brevi e, solitamente, la velocità in un dato tratto aumenta gradualmente dall'inizio verso la fine oppure rimane abbastanza regolare e costante (Figura 20a). Viceversa, la scrittura prodotta da soggetti che presentano difficoltà grafo-motorie è caratterizzata da pattern di movimento alquanto irregolari nella successione di tratti e pause e nella modulazione della velocità (si veda Figura 20b).

Successivamente, negli anni '80-'90, grazie allo sviluppo della tecnologia informatica, la videoregistrazione è stata sostituita da una tecnica relativamente semplice ed estremamente efficace, basata sulla registrazione dei movimenti della punta della penna lungo il foglio, per mezzo di una tavoletta grafica controllata da un computer (Figura 21).

Il campionamento dei dati avviene con una notevole risoluzione spaziale (0,2 mm) e ad un'elevata frequenza (100Hz), pertanto è possibile rilevare le caratteristiche spaziali e temporali della penna in movimento al fine di derivare, in ogni punto della traccia, informazioni precise su geometria e dinamiche dei movimenti di scrittura: velocità, durata, accelerazione, regolarità, ampiezza, curvatura e pressione. Tale strumento consente quindi di monitorare la scrittura in tempo reale e di immagazzinare tali informazioni in un formato disponibile per compiere analisi cinematiche e cinetiche sofisticate a posteriori.

L'elevata incidenza dei disturbi di tipo grafo-motorio nella scrittura, rende indispensabile la realizzazione di studi e la progettazione di strumenti finalizzati all'analisi del prodotto scritto in modo approfondito, sia nei suoi aspetti statici che in quelli dinamici.

2.3 Tavoletta grafica digitale per l'analisi secondo l'approccio orientato al processo

Per l'acquisizione della scrittura in forma digitale è stata utilizzata una normale tavoletta grafica, prodotta dalla Wacom, in possesso della S.C. di Neuropsichiatria Infantile dell'I.R.C.C.S. Burlo Garofolo.

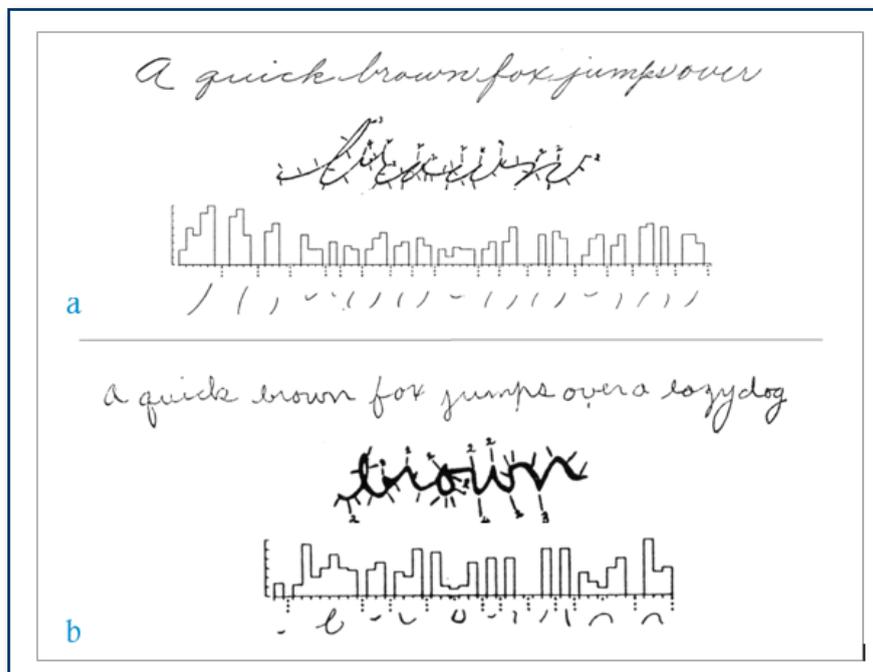


Figura 20: Esempi di: a) buona grafia, b) grafia povera con i rispettivi grafici delle velocità registrate nei tratti della parola "brown". Fonte: Freeman (1921).

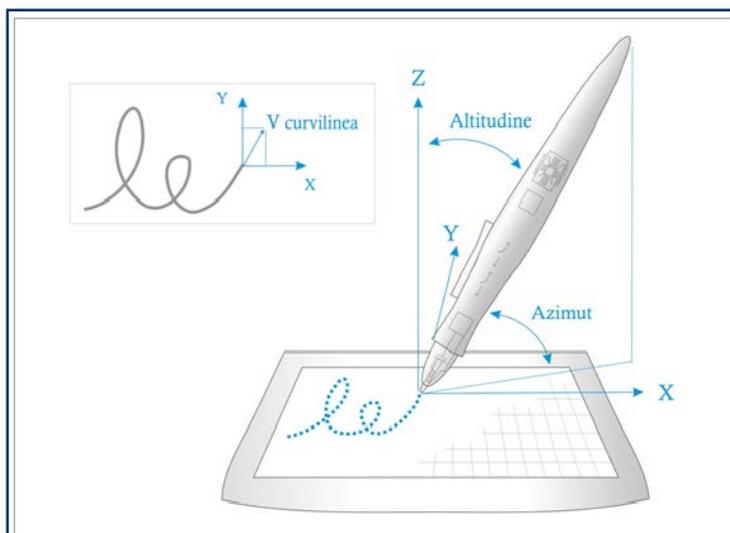


Figura 21: Rappresentazione schematica del funzionamento di una tavoletta grafica.

Gli scopi che il programma d'analisi si pone, sono strettamente collegati con la ricerca avviata da Borean [6] e da Borean et al. [10] [11]; infatti, è possibile effettuare sulla tavoletta grafica gli stessi compiti di scrittura valutabili mediante check-list.

Le caratteristiche tecniche del dispositivo sono riportate nella Tabella 1:

Dimensione della tavoletta	225 x 210 x 7,5 mm
Area attiva	127 x 106 mm
Livelli di pressione	1024 livelli
Accuratezza	+/- 0,25 mm
Risoluzione	2540 lpi (100 lpmm)
Reading height	10 mm
Massima velocità di trasferimento dati	100 pps

Tabella 1: Caratteristiche tecniche della tavoletta grafica.

Le rilevazioni non sono state effettuate con la normale penna grafica di cui è corredata la tavoletta, in quanto essa è dotata di una punta in materiale plastico che non lascia alcuna traccia sul foglio posto tra la superficie attiva e la penna stessa.

Questo problema che per gli adulti può essere aggirato con l'utilizzo del feed-back visivo dello schermo del computer sul quale l'applicativo di acquisizione è in esecuzione, per i bambini è stato risolto con l'utilizzo di una penna (*Intuos Ink pen*) che presenta le stesse caratteristiche tecniche di quella standard, ma è dotata di cartucce sostituibili, che lasciano sul foglio la traccia di una biro.

La tecnologia sviluppata da Wacom è basata sulla risonanza elettromagnetica; questo permette alla penna di non avere batterie o cavi di collegamento: le onde elettromagnetiche, inviate alla penna, vengono successivamente riflesse per un controllo continuo della stessa.

Nella fase attiva una griglia di fili, disposti sotto la superficie della tavoletta, passa, all'incirca ogni 20 ms, da uno stato di trasmissione ad uno di ricezione.

Così facendo viene indotta un'oscillazione nel circuito magnetico risonante posto nelle vicinanze della punta della penna; in questo modo, si fornisce energia al dispositivo; la stessa circuiteria viene poi utilizzata anche per la trasmissione dalla penna alla tavoletta.

Un chip posto all'interno della penna fornisce indicazioni relative alla pressione e al dispositivo utilizzato; tali informazioni vengono inviate al modulatore che si occupa poi della trasmissione alla tavoletta. Quest'ultima determina la posizione della punta della penna ed invia tutti i dati al computer (Figura 22). Il dispositivo ha lo stesso peso di una penna normale, circa quaranta grammi, in quanto non è provvisto di vincoli e di batterie.

Per l'acquisizione delle informazioni è stato utilizzato un programma, Sypress, tratto dal S.D.K. (Software development kit) realizzato da LCS/Telegraphics [45] ed ottimizzato per gli scopi della ricerca dalla Dott.ssa Chenda [46] e dal Dott. Zin [47] in precedenti tesi. Tale programma genera un file di tipo *.asl contenente tutti i dati raccolti dalla tavoletta relativi alla posizione ed alla pressione della penna, e permette di acquisire le grafie, impostando eventualmente dei limiti massimi di tempo, di rivederle scorrere, di ingrandire tutta la traccia e di visualizzare il numero ed alcune caratteristiche delle componenti e delle staccate.

Il programma Sypress genera un file *.m, che verrà poi interpretato direttamente in ambiente MATLAB, contenente tutti i dati raccolti dalla tavoletta, relativi al campione *i*-esimo: posizione, pressione e inclinazione della penna.

Il sistema computerizzato appena descritto è stato impiegato per effettuare l'acquisizione dei dati prima e dopo il trattamento riabilitativo.

2.4 Elaborazione dei dati della tavoletta digitale

La tavoletta digitale è diventata ormai lo strumento più utilizzato per la registrazione dell'attività grafo-motoria. Quella utilizzata nella raccolta dei dati ha una frequenza di campionamento di 100 Hz, e possiede una risoluzione spaziale di 0.01 mm.

Le componenti sono state precedentemente individuate attraverso la determinazione dei punti che si trovano ad una distanza temporale maggiore di 30 ms; tali punti rappresentano la fine dell'*i*-esima componente e l'inizio di quella successiva.

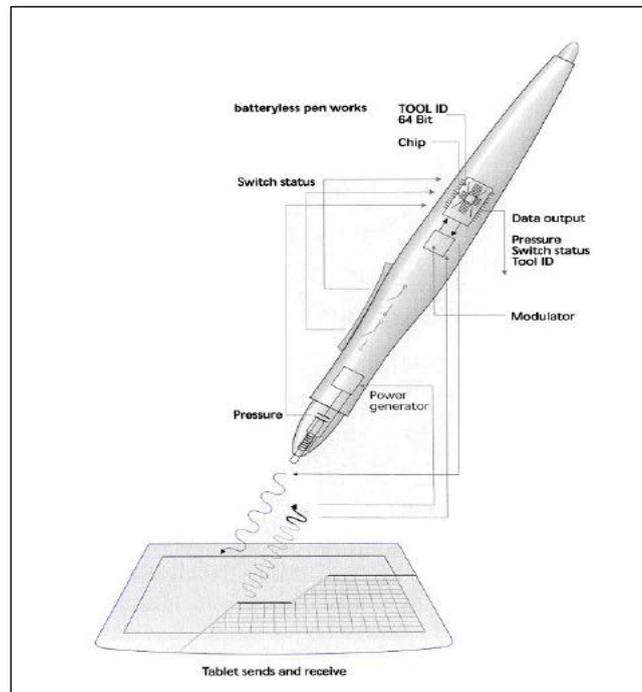


Figura 22: Rappresentazione del funzionamento della tavoletta grafica.

Gli strokes, invece, sono stati determinati mediante la ricerca dei punti di minimo della velocità curvilinea; pertanto, per la loro valutazione, sono stati utilizzati i valori di velocità e di accelerazione.

Lo spostamento lungo la curva è stato ricavato sommando progressivamente le distanze tra due punti successivi, mentre la velocità curvilinea è stata ottenuta dalla derivata di tali valori.

Allo stesso modo, sono state ricavate le velocità lungo gli assi X e Y, derivando le curve delle distanze secondo le due direzioni e le accelerazioni lungo gli assi X e Y derivando le rispettive velocità.

Ai segnali di velocità e accelerazione è stato applicato un filtro passa-basso di Butterworth del secondo ordine; con compensazione di fase e con frequenza di taglio pari a 10 Hz. La scelta del filtro è ricaduta sul filtro passa-basso di Butterworth per le sue buone prestazioni riscontrabili dalle ricerche riportate in letteratura [48].

Tuttavia, nei bambini, specialmente durante l'acquisizione di un compito motorio fine, si è rivelata più adatta una frequenza di 5 Hz.

2.5 Software per l'analisi della grafia

Un primo software utilizzato per l'analisi cinematica della scrittura è stato realizzato dalla Dott.ssa Alessandra Chiap [49], in ambiente MATLAB, al fine di realizzare un prodotto di facile utilizzo, ma allo stesso tempo efficiente ed affidabile.

Questo strumento offre la possibilità di indagare su determinati aspetti dinamici della scrittura che altrimenti non sarebbe possibile cogliere.

Il programma consente di selezionare un file per volta in formato .mat, .txt, o .m, relativo ad una delle cinque rilevazioni, effettuate per ogni singolo soggetto. Le funzioni a disposizione dell'utente sono le seguenti:

- Riproduzione del testo: permette di visualizzare la dinamica della generazione grafica e di analizzare il tracciato a posteriori. Durante la riproduzione si possono osservare le staccate della penna dal foglio e si può prestare maggiore attenzione ai particolari.
- Operazioni manuali: permettono di selezionare una zona ben precisa del tracciato e di rivederla tramite la funzione di riproduzione del testo precedentemente illustrata. Rappresenta una funzione molto utile nei casi in cui si desideri analizzare solamente alcune parti del testo, di particolare interesse clinico, senza che si renda necessario rivedere l'intera riproduzione dello scritto.
- Operazioni automatiche: offrono la possibilità di visualizzare le informazioni relative agli strokes e alle componenti. Inoltre, si possono vedere anche gli istogrammi della velocità e dell'accelerazione, delle durate e delle distanze e si possono eliminare anche gli strokes indesiderati.
- Salvataggio e stampa: tutti i dati elaborati dal software possono essere salvati o in un file *.mat o in un file *.txt.

Per ogni stroke il software visualizza il valore di seguenti parametri:

- Durata (ms)
- Velocità curvilinea media e di picco (mm/s)
- Accelerazione curvilinea media e di picco (mm/s/s)
- Velocità media e di picco rispetto all'asse X e Y (mm/s)
- Accelerazione media e di picco rispetto all'asse X e Y (mm/s/s)
- Pressione media (0-1023) e Deviazione Standard
- Deviazione standard della pressione
- Altitudine media (°)
- Azimuth medio (°)
- Larghezza secondo l'asse X (mm)
- Altezza secondo l'asse Y (mm)
- Distanza lungo la curva (mm)

L'azimuth e l'altitudine rappresentano gli angoli, espressi in decimi di gradi, che la penna forma rispetto alla tavoletta, secondo un sistema di riferimento sferico, centrato nel punto di contatto della penna. La pressione, invece, è stata valutata utilizzando una scala da 0 a 1023 livelli.

La Figura 23 mostra la finestra di visualizzazione degli strokes.

Le informazioni relative alle componenti sono del tutto simili a quelle visualizzate per gli strokes e anche in questo caso ci si può spostare di componente in componente semplicemente cliccando sulla barra di scorrimento orizzontale.

La Figura 24 mostra la finestra di visualizzazione delle componenti.

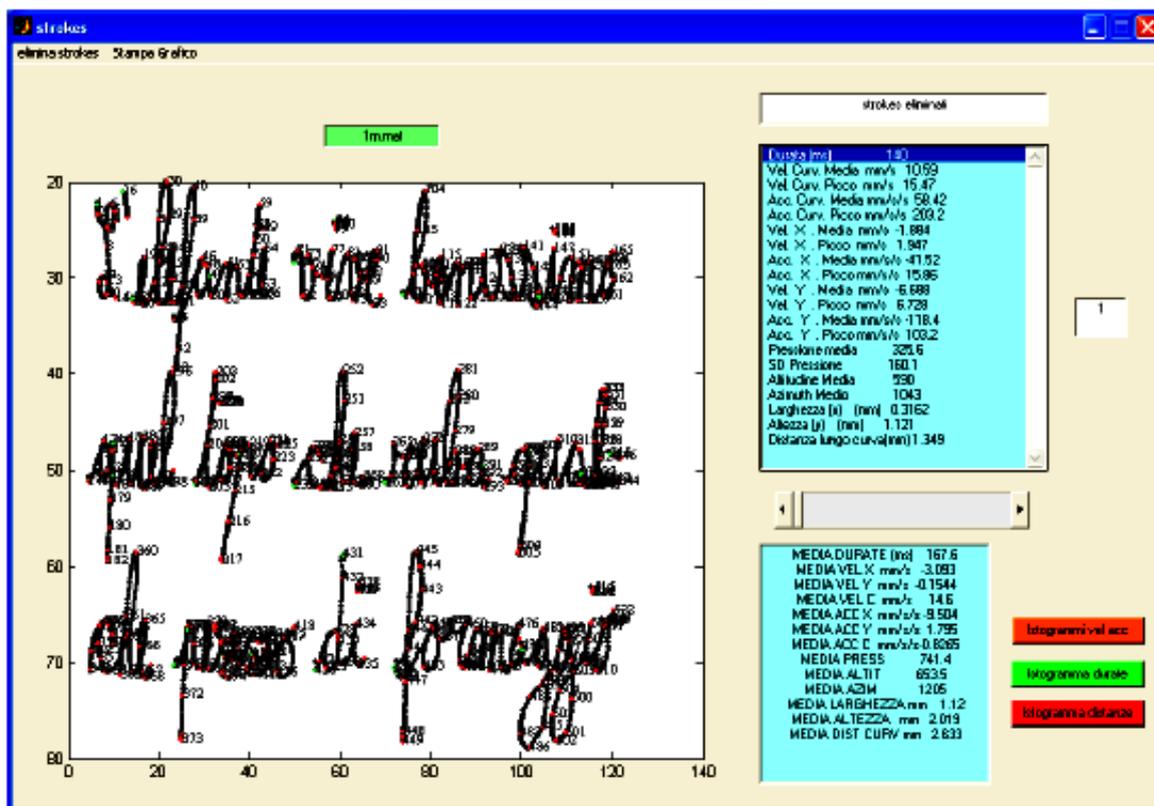


Figura 23: Finestra di visualizzazione degli strokes.

Il programma precedentemente sviluppato permette di visualizzare gli istogrammi delle durate delle componenti e delle staccate; queste ultime sono state calcolate come differenze tra l'istante di inizio di una componente e l'istante in cui termina la componente precedente.

Il numero di staccate della penna dal foglio è importante in quanto rappresenta un indicatore grossolano del grado di fluidità del corsivo.

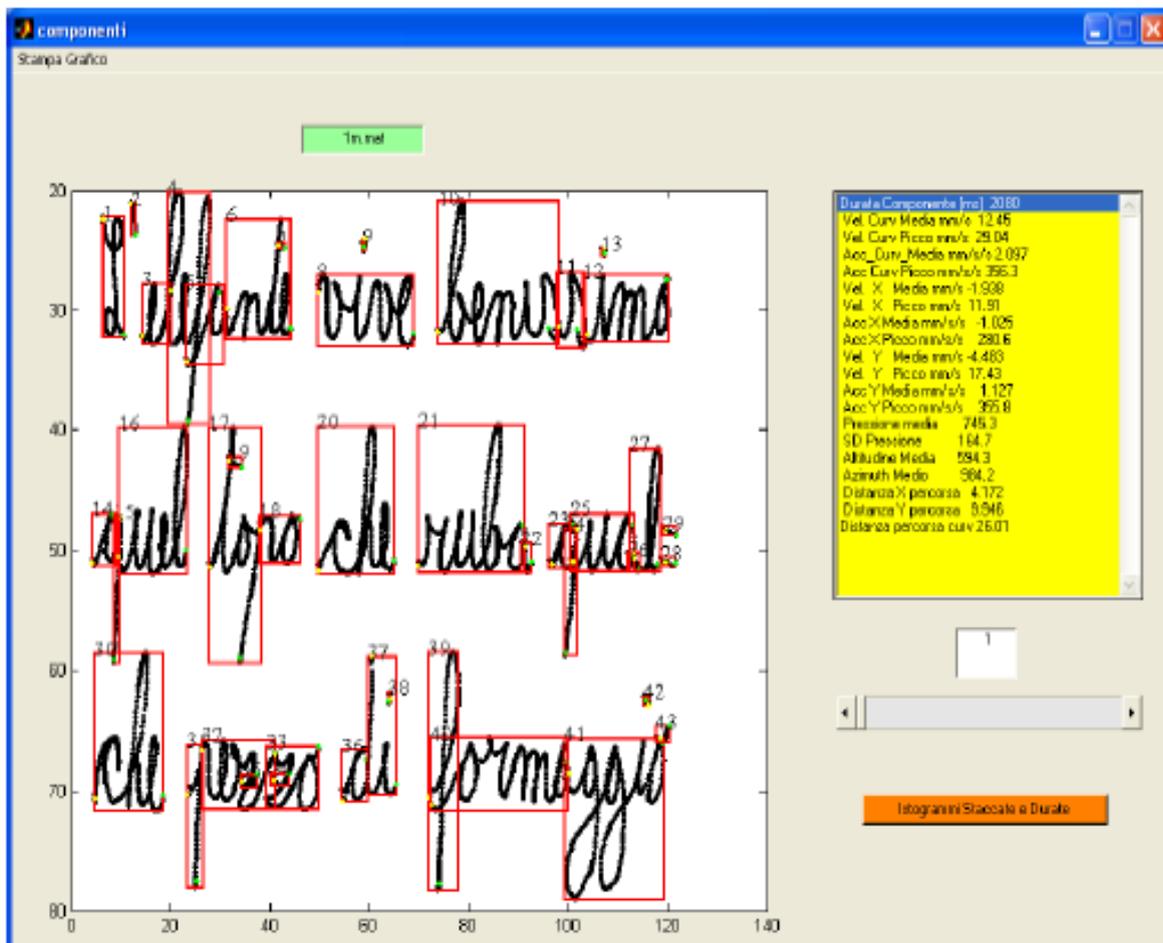


Figura 24: Finestra di visualizzazione delle componenti.

Il software visualizza poi inoltre i profili di velocità e di accelerazione, rispetto agli assi X e Y e lungo la curva e calcola gli spettri delle tre velocità (in X, in Y e curvilinea) valutati sull'intero tracciato. Infine, fornisce informazioni anche sulla pressione, evidenziando il tracciato completo in una gradazione di sette possibili colori, e tracciando il relativo istogramma della pressione riferita all'intera esecuzione scritta, il suo valore medio e la deviazione standard.

3 - Analisi cinematica della scrittura nella valutazione dell’efficacia del trattamento di recupero dei bambini disgrafici

(risultati pubblicati nell’articolo “Influence of the Spatio-Temporal Terzi’s Treatment on Kinematics of Cursive Writing of Dysgraphic Subjects” [A])

La scrittura a mano è un compito motorio specifico in cui la realizzazione del movimento richiede una precisa pianificazione delle sequenze spazio-temporali. Nonostante l’introduzione del PC, la scrittura a mano è ancora la forma più immediata di comunicazione grafica [50], nonché la maggiore abilità necessaria nelle situazioni quotidiane. Essa coinvolge molte componenti motorie e visuo-spaziali come la propriocezione, il controllo motorio, l’integrazione visuo-motoria, la percezione visiva, il livello di attenzione, etc [51] [52] [53]. Disturbi di questa capacità potrebbero influenzare la correttezza e il contenuto della scrittura [54] [55] [56] interferendo negativamente sul rendimento scolastico e sull’autostima [57]. Hamstra-Bletz et al. hanno definito la disgrafia come un disturbo o una difficoltà nella produzione della lingua scritta relativa alla scrittura meccanica [58]. In Italia, i disturbi specifici dell’apprendimento (tra cui anche la disgrafia) colpiscono tra il 2,5% e il 3,5% dei bambini in età scolare [59] ed è ampiamente accettato che almeno il 10-30% della popolazione scolastica ha difficoltà con la scrittura a mano [58] [60] [61] [62]. La scarsa qualità della scrittura a mano nei bambini è caratterizzata da scarso controllo delle dimensioni (incoerenza della parametrizzazione [63]), variabilità nella forma, dimensioni e orientamento [64] [65], movimenti veloci e imprecisione spaziale [66]. Wing et al. hanno suggerito che l’inesattezza spaziale nella scrittura a mano potrebbe essere dovuta alla mancanza di una strategia ottimale per la gestione del rumore neuromotorio nel sistema neuromuscolare [67].

Altri studi hanno dimostrato che lo sviluppo motorio è caratterizzato dall’incremento dell’efficienza nell’inibire il rumore dei sistemi neuromotorio e muscolare [68]. Denton et al. hanno condotto uno studio clinico randomizzato relativo ad interventi riabilitativi sulla scrittura a mano; il gruppo di pratica terapeutica ha lavorato sulle competenze della scrittura a mano attraverso la copia, la dettatura e la scrittura a partire dalla memoria, mentre l’intervento sensomotorio ha riguardato la percezione visiva, l’integrazione visivo-motoria (V.M.I), la propriocezione/cinestesia e la capacità di manipolazione [69]. Zwicker et al. hanno dimostrato che gli studenti più vecchi che avevano ricevuto interventi multisensoriali/sensorimotori non presentavano alcun miglioramento nella loro scrittura, mentre la tecnica cognitiva/terapeutica aveva prodotto risultati positivi [70]. Altre prove di approccio cognitivo di intervento sulla scrittura sono state dimostrate in [71] [72] [73] [74].

L'aumento dell'uso di tavolette grafiche ha permesso un migliore studio delle caratteristiche cinematiche della scrittura [75] [76] [77] [78]. Molti studi hanno applicato l'analisi cinematica ad alcune patologie per esempio per la quantificazione degli effetti collaterali (EPS) [79] dell'extrapiramidale indotta da neurolettici nonché per il monitoraggio degli effetti collaterali motori indotti da farmaci nei pazienti schizofrenici [80] e nella valutazione del parkinsonismo indotto da farmaco [81]. Tuttavia, fino ad ora l'influenza sulla cinematica di scrittura di un trattamento riabilitativo di disgrafia è stata esaminata solo per la lingua cinese [82] [83] che usa simboli molto diversi da quelli dell'alfabeto latino.

In questo lavoro, sono stati valutati gli effetti cinematici sulla scrittura a mano del Metodo Spazio Temporale di Terzi, basato sugli aspetti cognitivi e usato per il recupero delle difficoltà grafomotorie e della disgrafia in soggetti italiani di età scolare. L'analisi effettuata ha preso in esame una serie di parametri cinematici estratti dalla scrittura di alcuni test di base corsivi.

3.1 Il trattamento (Metodo Terzi)

Il Metodo Terzi fu ideato nella prima metà del Novecento da Ida Terzi, insegnante elementare all'istituto per ciechi di Reggio Emilia, allo scopo di sviluppare nei suoi alunni la percezione del corpo in movimento nello spazio, affinché gli stessi potessero elaborare e integrare correttamente le informazioni spazio-temporali provenienti da diversi input sensoriali (cinestetico, vestibolare, propriocettivo, tattile, visivo) con le informazioni provenienti dal corpo, facilitando così la coerenza percettiva e il passaggio da un utilizzo inconscio a un uso consapevole del corpo in movimento [84].

Si tratta di un metodo utilizzato per migliorare la percezione e l'integrazione dello schema corporeo e per organizzare l'orientamento e la rappresentazione mentale dello spazio; esso agisce sull'organizzazione cerebrale e, servendosi del movimento del corpo, arriva ad una rappresentazione mentale corretta di ciò che il corpo stesso ha compiuto.

L'insegnamento delle lettere non segue l'ordine alfabetico, ma un ordine che le accomuna per analisi geometrico-spaziale e per movimenti che ne costituiscono lo schema grafico. Tutti gli esercizi hanno anche una componente temporale, che facilita l'apprendimento: i movimenti sono eseguiti con un determinato ritmo e con sequenze ben precise.

Il Metodo Terzi aiuta l'individuo a integrare le informazioni provenienti dagli spazi in cui egli si muove:

- lo spazio personale, costituito dall'idea che la persona ha del proprio corpo;
- lo spazio peripersonale, più vicino al corpo, che si usa per manipolare gli oggetti;
- lo spazio extra-personale.

Tale metodo segue la teoria della cognizione incorporata [85], che sottolinea come lo sviluppo cognitivo si evolve a partire dall'autopercezione, insieme con lo sviluppo ed il controllo delle funzioni motorie.

Le aree di applicazione del metodo spazio temporale sono, principalmente, l'area riabilitativa e l'area didattica; l'area riabilitativa comprende l'applicazione del metodo in pazienti affetti da particolari patologie e la cura dei disturbi di apprendimento, mentre nell'area didattica il metodo è utilizzato in bambini che non presentano problematiche particolari.

Oltre a essere utilizzato nel caso di cecità congenita o acquisita, il Metodo Terzi viene applicato in alcuni ospedali e centri di riabilitazione su bambini affetti da patologie dell'età evolutiva, paralisi cerebrali e cromosomopatie. Negli adulti è applicato in patologie neurologiche come morbo di Parkinson, ictus, sclerosi multipla e in caso di gravi cerebrolesioni.

Inoltre, il metodo descritto è utilizzato anche per aiutare bambini che soffrono di disturbi dell'apprendimento, come disprassia, disgrafia, disortografia, disturbi da deficit di attenzione. E' stato dimostrato infatti che qualsiasi intervento sul linguaggio non deve focalizzarsi solo sull'aspetto finale della produzione, ma anche sugli aspetti percettivi, attivando i processi di elaborazione consapevole dei dati percettivi propriocettivo-cinestesici, uditivi e visivi.

In ambito educativo, il Metodo Terzi può essere utilizzato nella scuola dell'infanzia, primaria e secondaria di primo grado, anche in assenza di disturbi, come valido strumento d'aiuto per l'apprendimento della scrittura, della lettura e dell'aritmetica.

In ambito didattico il Metodo Terzi può essere anche utilizzato per l'insegnamento della grafia in corsivo. Il metodo ha l'obiettivo di favorire le costruzioni di rappresentazioni mentali delle lettere e la successiva trasformazione nel corretto schema grafo motorio, attraverso l'analisi geometrica spazio-temporale di ogni simbolo alfabeto-grafico in corsivo, la sua costruzione deambulatoria a occhi bendati e la successiva riproduzione dell'immagine mentale della lettera sul muro con ampi movimenti del braccio.

Il Metodo Terzi consiste di un sistema di esercizi sensomotori basato sulla classificazione delle lettere dell'alfabeto in sottoinsiemi di elementi geometrici euclidei (linee rette, curve e rotazioni) quantificati e integrati in sequenze spazio-temporali corrette. Gli esercizi vengono presentati al soggetto in uno spazio aperto, chiaro e tranquillo, con luce soffusa, al fine di concentrare la sua attenzione sulle informazioni somatosensoriali (cinestetiche, propriocettive e tattili) senza distrazioni visive. Al fine di mettere a fuoco l'attenzione del soggetto sul feedback del suo corpo, gli esercizi vengono eseguiti in un primo momento a piedi nudi e bendati; dopo aver eseguito un esercizio, il bambino bendato deve ripetere l'azione utilizzando dapprima i movimenti della mano e rappresentandolo successivamente su una tavoletta. La rappresentazione consente la valutazione del grado

di coscienza e della capacità di integrare informazioni su diversi livelli. Il bambino apprende la specifica sequenza dei movimenti all'interno dei vincoli del tempo e dello spazio, seguendo sei misure specifiche che rappresentano la transizione dalla rappresentazione vissuta a quella grafica.

Le sei fasi consistono di:

- 1) prestazione guidata ambulatoriale: il soggetto, bendato nella stanza, è guidato nella ricostruzione geometrica ambulatoriale dei simboli grafici dell’alfabeto;
- 2) prestazione ambulatoriale vissuta: costruzione autonoma ambulatoriale della lettera, bendato;
- 3) rappresentazione su parete: con ampi movimenti di spalla, braccio e polso, il soggetto riproduce il percorso che è stato precedentemente eseguito da bendato;
- 4) rappresentazione del grafico utilizzando un pennello: il soggetto, dapprima bendato e poi con gli occhi aperti, riproduce su un grande foglio un’immagine visuo-spaziale (il percorso) della lettera;
- 5) costruzione della lettera: utilizzando una corda di plastilina, dapprima con gli occhi bendati e poi con gli occhi aperti, il soggetto replica la forma della lettera;
- 6) rappresentazione ellittica di Lamanna e sullo schema quadrato/allineato: il soggetto, con gli occhi aperti, riproduce la lettera in schemi ellittici che diventano sempre più piccoli, fino a raggiungere le dimensioni della carta a righe utilizzate nella classe di scuola di appartenenza (Figura 25). La fase di rappresentazione trasforma gli elementi geometrici analitici che appartengono alla costruzione ambulatoriale delle lettere, in una forma più armonica tipica della scrittura a mano. In questo studio, il trattamento con il Metodo di Terzi è stato effettuato da un terapeuta per 15 sessioni di 45 minuti ciascuno, due volte settimana per il primo mese, poi una volta a settimana per un altro mese e poi bimestralmente per gli ultimi due mesi. Durante il processo riabilitativo, al bambino è stato richiesto di mostrare un coinvolgimento attivo soprattutto nell’autovalutazione della scrittura e nella stesura di un contratto di impegno per i compiti a casa (10 min a giorno) volto a migliorare la postura, la presa della penna e la scrittura.

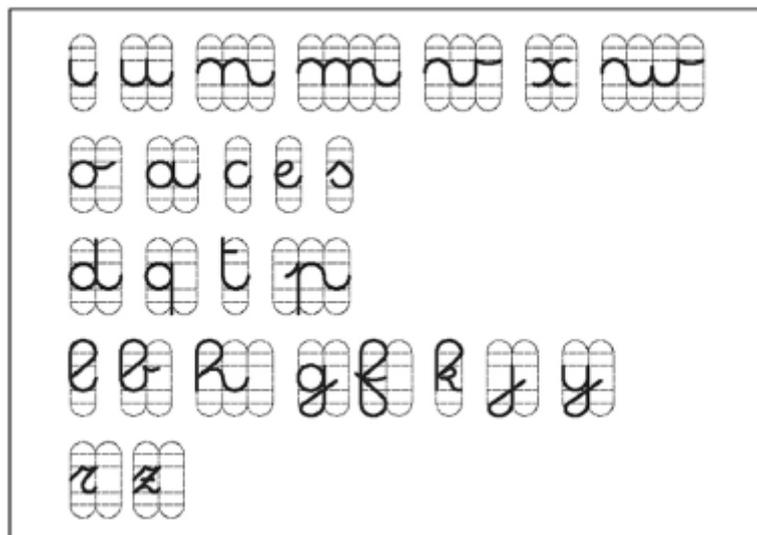


Figura 25: Riproduzione della lettera in sistemi ellittici sempre più piccoli.

3.2 Materiali e metodi

In questo studio è stata esaminata la scrittura di 22 bambini in età scolare (20 ragazzi e 2 ragazze, di età compresa tra 8 e 13 anni, 16 dei quali destrimani) seguiti dal Servizio di Sviluppo dell’età presso l’ULSS 7 del Pieve di Soligo (TV, Italia).

Per circa 18 mesi i bambini hanno seguito un programma di riabilitazione basato sul Metodo di Terzi e la loro scrittura è stata registrata prima e dopo il trattamento. Diciotto bambini della scuola primaria (4 di classe II, 4 di classe III, 7 di classe IV, 3 di classe V) e quattro provenienti dalla scuola secondaria che presentavano livelli cognitivi medi e disturbi grafo motori o disgrafia.

Uno psichiatra infantile, in collaborazione con un terapeuta neuropsicomotorio, un logopedista e una psicologa, hanno fatto la diagnosi usando una batteria di protocolli di valutazione. Prima della somministrazione dei compiti di scrittura è stato acquisito il consenso informato dei genitori. I dati sono stati acquisiti tramite una tavoletta digitale commerciale (Wacom, Inc., Vancouver, WA, modello Intuos 2.0), sulla base delle modalità e degli strumenti descritti nel capitolo 2.

TEST DI SCRITTURA

Al fine di studiare la possibile dipendenza dei parametri sulle competenze linguistiche, i bambini hanno effettuato un gruppo di tre esercizi che coinvolgono le abilità motorie di base. La prima prova (test LE) era indipendente dagli aspetti linguistici e richiedeva agli alunni di scrivere più rapidamente possibile una sequenza in corsivo di lelele per un minuto [86]. Nella seconda e nella terza prova, in cui sono richieste adeguate competenze linguistiche, è stato chiesto agli studenti di copiare in corsivo, il più accuratamente possibile (test A) e il più velocemente possibile (test F), una frase foneticamente bilanciata (“In pochi giorni il bruco diventa una bellissima farfalla che svolazzava sui prati in cerca di

margherite e qualche quadrifoglio”). La frase contiene tutte le lettere dell'alfabeto italiano e qualche combinazione specifica problematica (come la doppia 'l', 's', 'z', e gli schemi 'br' e 'pr'). Questi test sono stati utilizzati per la valutazione della leggibilità e della velocità della scrittura a mano.

PROTOCOLLI DI VALUTAZIONE E ANALISI CINEMATICA DELLA SCRITTURA

Allo scopo di individuare l'integrazione visuo-motoria e le caratteristiche della prassi motoria di ciascun soggetto, due classici protocolli di valutazione sono stati usati prima e dopo il trattamento: il test V.M.I. e di coordinazione supplementare visiva e motoria [87] e il test del movimento completo ABC [88]. Nel test V.M.I. il bambino deve copiare una sequenza ordinata di forme geometriche di complessità progressivamente crescente; nei test supplementari di coordinazione motoria e visiva, il bambino deve identificare, tra un certo numero di alternative, la forma identica allo stimolo presentato e, entro cinque minuti, lui/lei deve disegnare le forme senza uscire dal bordo di un percorso pre-stampato.

Nel Movimento ABC, una batteria di test viene utilizzata per valutare le abilità/disabilità motorie dei bambini, esaminando le abilità manuali, le abilità con una palla e il loro equilibrio statico e dinamico. Inoltre, nelle prove A e F, è stata utilizzata una check-list di lettere proprietarie. Grazie all'utilizzo di cinque elementi, viene misurato il numero di errori sia nelle aree grafomotorie sia nelle aree del rapporto metrico. I quattro elementi nell'area grafomotoria sono il numero di collegamenti errati (collegamento errato o spazio tra le lettere), il numero di auto-correzioni (tracciando il tratto già disegnato), il numero di direzioni errate (direzione sbagliata all'inizio della lettera) e il numero di modelli grafomotori errati (scambio di lettere simili, lettere incomplete). Il numero di dimensioni non corrette (lettere che non mantengono le dimensioni corrette: troppo grandi o troppo piccole rispetto allo spazio tra le righe) rappresenta l'elemento dell'area del rapporto metrico.

Al fine di valutare l'influenza del programma di riabilitazione sulle caratteristiche dinamiche della scrittura, è stata esaminata una serie di parametri estratti dal segnale di movimento curvilineo, registrato prima e dopo il trattamento [60]. In primo luogo, sono state identificate le componenti, vale a dire i tratti scritti tra due alzate di penna consecutivi, e gli stroke, considerati come i tratti delimitati dai punti di velocità curvilinea minima (Figura 26), ipotizzando che ogni minimo di velocità corrisponda a un diverso tratto motorio, come sostenuto dalla teoria del profilo di velocità a campana [89].

Per ogni test, durante lo studio effettuato, sono state calcolate e analizzate la seguenti caratteristiche di scrittura a mano per tutta la durata del test e per ogni componente e stroke, utilizzando un software ad hoc: numero di lettere (#L), durata dell'attività (TD), lunghezza complessiva del prodotto scritto (WL), velocità media curvilinea (CV), il numero di lettere per cm (#L_cm) e al secondo (#L_s), durata media di sollevamento della penna (PLD), durata media della componente (CD) e lunghezza (CL), numero di stroke per ogni lettera (#SL) e al secondo (#S_s), durata media dello stroke (SD) e lunghezza orizzontale

(SL), velocità di picco dello stroke orizzontale, verticale e curvilinea (SHVp, SVVP e SCVP rispettivamente).

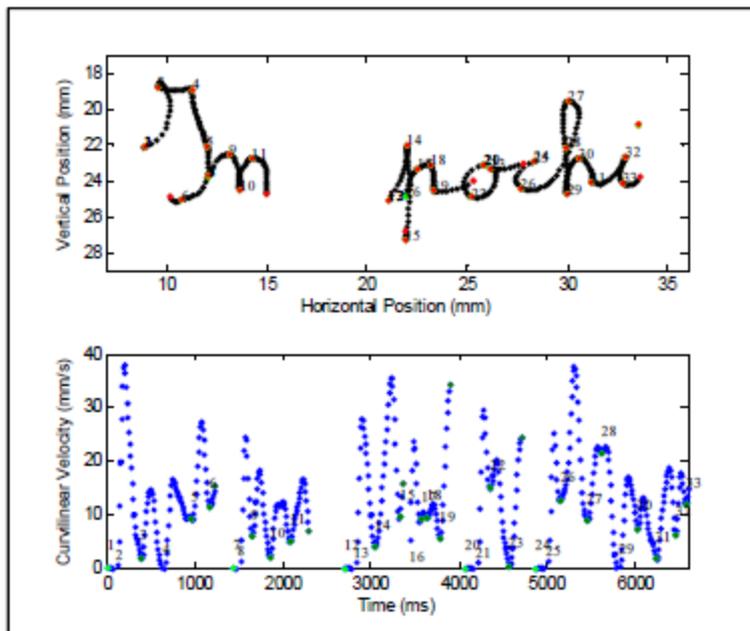


Figura 26: Identificazione delle componenti e degli stroke.

Analogamente ad altri studi [60] [90] i parametri calcolati sono stati legati ad alcuni settori del movimento della scrittura:

- 1) Velocità: la caratteristica più descritta in letteratura [91] [92] è stata esaminata per mezzo di CV, #L_s, SHVp, SVVP ed i parametri SCVP nonché dalla #L e WL nella prova LE (Compito a tempo fisso) e il TD in entrambi i test A ed F (compiti a lettere fisse). Questi parametri sono stati utilizzati per misurare le caratteristiche di velocità e la fluidità della produzione scritta (maggiore fluidità corrisponde alla crescita della velocità orizzontale e curvilinea e ad un movimento più efficiente cioè un tempo più breve per completare un compito).
- 2) Disposizione spaziale: si riferisce alla lunghezza curvilinea necessaria a creare una lettera ed è misurata dal #L_cm; se questo parametro aumenta il soggetto è in grado di scrivere più lettere nello spazio, riducendo lo spazio necessario per ciascuna lettera e aumentando così l'efficienza della scrittura. Inoltre, SL e CL potrebbero essere associati anche a questo dominio.
- 3) Automazione: questo aspetto rappresenta l'inverso del grado di frammentazione misurato dal #SL (l'automazione si traduce in un minor numero di stroke per lettera e consente un riduzione del tempo necessario per scrivere un testo, ottenendo così prestazioni migliori).
- 4) Pianificazione motoria del tempo: è stata misurata dal PLD e dai parametri CD che rappresentano il tempo necessario per tracciare una unità [93]. Anche la SD e #S_s potrebbero essere utilizzati per caratterizzare i tempi di pianificazione

motoria, vale a dire la capacità di pianificare l’azione motoria più rapidamente, producendo così un testo in modo più efficiente.

Al fine di valutare l’influenza del trattamento su queste caratteristiche nonché sui parametri delle lettere della check-list e sui risultati V.M.I. e del Movimento ABC, la significatività delle differenze prima e dopo la riabilitazione di ogni caratteristica è stata calcolata mediante il test t di Student per dati appaiati con 21 gradi di libertà.

3.3 Risultati

3.3.1 Test LE

Nella Tabella 2 sono riportati i valori dei parametri per il compito LE prima e dopo il trattamento insieme ai valori significativi (p-value) delle principali differenze del trattamento.

Nel dominio della velocità, il #L_s, il WL, il CV così come SHVp, SVVP e SCVP aumentano significativamente dopo la riabilitazione. Nel dominio spaziale, il CL e SL aumentano significativamente mentre il #L_{cm} rimane invariato. Nel dominio dell’automazione, la #SL diminuisce in modo significativo e nel dominio della pianificazione motoria solo il #S_s cambia in modo significativo mostrando un piccolo aumento dopo il trattamento, mentre il PLD, CD e SD rimangono invariati.

La Figura 27 mostra un esempio di traccia scritta per il test LE prima e dopo la riabilitazione: c’è un evidente incremento del numero di lettere: da 76 lettere prima della riabilitazione a 95 lettere dopo il trattamento, con una durata fissa del test di 60s; inoltre, un migliore utilizzo dello spazio disponibile con una maggiore larghezza e fluidità che permette una migliore leggibilità nonostante il fatto che la velocità di scrittura sia più alta.

3.3.2 Test A ed F

La Tabella 3 presenta i valori dei parametri cinematici calcolati nei compiti A e F. Nel dominio della velocità, quasi tutti i parametri (WL, TD, CV, #L_s, SHVp) non presentano variazioni significative dopo il trattamento né in modalità veloce né in quella accurata. Solo il SVVP in entrambi i compiti e la SCVP nel test F mostrano un leggero calo significativo. Nel dominio territoriale, la SL e la #L_{cm} rimangono invariati, mentre il CL aumenta significativamente in entrambe le prove. Nel dominio dell’automazione, a differenza del compito LE, il #SL aumenta in modo significativo nel test accurato, mentre rimane invariato nel compito veloce.

Infine, nella progettazione del dominio motorio, la durata media dello stroke (SD) e la durata medica della componente (CD) in entrambi i test e il #S_s nel test accurato aumentano significativamente dopo la riabilitazione, mentre il PLD non cambia.

MEAN VALUES ($\pm 1SD$) OF THE PARAMETERS AND THEIR P-VALUES AND ABSOLUTE STATISTIC VALUES (ASV) BEFORE (PRE) AND AFTER (POST) THE TREATMENT, IN THE LE TEST.					
LE Test					
		<i>Pre</i>	<i>Post</i>	<i>p-value</i>	<i>ASV</i>
# of letters (-)	#L	65 \pm 18	84 \pm 20	0.0002	4.52
Overall length (cm)	WL	99 \pm 23	130 \pm 41	0.004	3.26
Mean curvilinear velocity (cm/s)	CV	1.66 \pm 0.38	2.17 \pm 0.68	0.004	3.29
# of letters/cm (1/cm)	#L_cm	0.66 \pm 0.15	0.68 \pm 0.15	0.63	0.50
# of letters/s (1/s)	#L_s	1.09 \pm 0.30	1.41 \pm 0.33	0.0002	4.53
Pen lift mean duration (ms)	PLD	770 \pm 310	730 \pm 280	0.93	0.09
Component mean duration (s)	CD	7.2 \pm 6.6	8.3 \pm 3.2	0.48	0.73
Component mean length (cm)	CL	13.2 \pm 12.4	19.6 \pm 9.2	0.020	2.46
# of strokes/letter (-)	#SL	3.5 \pm 0.9	2.8 \pm 0.7	0.0002	4.59
# of strokes/s (1/s)	#S_s	3.6 \pm 0.8	3.9 \pm 0.8	0.03	2.27
Stroke mean duration (ms)	SD	247 \pm 45	246 \pm 44	0.	0.21
Stroke mean length (mm)	SL	4.7 \pm 1.0	5.8 \pm 1.8	0.010	2.85
Horizontal peak velocity of stroke (mm/s)	SHVp	14.4 \pm 4.4	19.6 \pm 7.1	0.010	2.82
Vertical peak velocity of stroke (mm/s)	SVVp	22.3 \pm 7.5	28.8 \pm 9.4	0.016	2.62
Curvilinear peak velocity of stroke (mm/s)	SCVp	26.0 \pm 7.9	33.5 \pm 10.4	0.012	2.74

Tabella 2: Valori medi (\pm SD) dei parametri e loro p-value e valori statistici (ASV) prima e dopo il trattamento nel test LE.

La Figura 28 mostra un esempio di lavoro scritto per i test A ed F prima e dopo la riabilitazione. Come nel test LE, è presente un migliore utilizzo dello spazio disponibile con una maggiore larghezza di ciascuna lettera nonché miglioramento della qualità/leggibilità.

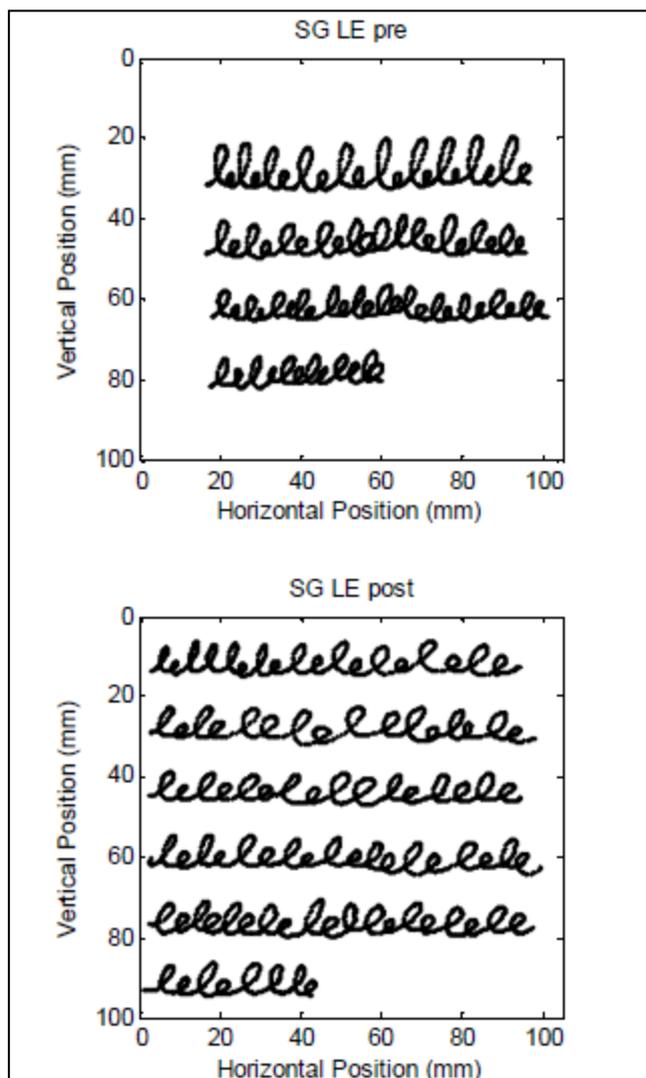


Figura 27: Esempio di traccia scritta per il test LE, prima e dopo la riabilitazione.

3.3.3 Check-list nei compiti A ed F

Prima della riabilitazione, la scrittura a mano dei bambini era spesso incomprensibile, presentando variazioni di pressione irregolari nel corso dei test, spazio irregolare tra lettere, collasso delle lettere (cioè una lettera dietro l'altra senza un adeguato spazio tra di loro), modelli grafomotori errati, collegamenti errati, proporzioni dimensionali errate, direzioni inesatte e molte autocorrezioni del tratto. In questo studio, la qualità della scrittura nei compiti A e F è stata misurata mediante il numero di errori degli ultimi cinque elementi correlati all'area grafomotoria e all'area del rapporto metrico, quantificate mediante la check-list delle lettere.

MEAN VALUES ($\pm 1SD$) OF THE PARAMETERS AND THEIR P-VALUES AND ABSOLUTE STATISTIC VALUES (ASV) BEFORE (PRE) AND AFTER (POST) THE TREATMENT, IN THE FAST AND ACCURATE TASKS.									
		Fast test				Accurate Test			
		Pre	Post	p-value	ASV	Pre	Post	p-value	ASV
Total duration (s)	TD	185 \pm 178	183 \pm 111	0.95	0.06	215 \pm 110	224 \pm 90	0.62	0.50
Overall length (cm)	WL	172.3 \pm 46.2	171.0 \pm 46.2	0.89	0.14	170.2 \pm 62.3	178.2 \pm 52.6	0.54	0.62
Mean curvilinear velocity (cm/s)	CV	1.27 \pm 0.59	1.11 \pm 0.44	0.16	1.45	0.88 \pm 0.28	0.86 \pm 0.26	0.77	0.29
# of letters/cm (1/cm)	#L_cm	0.67 \pm 0.19	0.68 \pm 0.21	0.77	0.29	0.70 \pm 0.21	0.66 \pm 0.19	0.25	1.19
# of letters/s (1/s)	#L_s	0.83 \pm 0.35	0.74 \pm 0.32	0.14	1.53	0.62 \pm 0.27	0.56 \pm 0.22	0.23	1.25
Pen lift mean duration (ms)	PLD	0.72 \pm 0.63	0.89 \pm 0.65	0.20	1.33	0.88 \pm 0.48	0.86 \pm 0.44	0.88	0.16
Component mean duration (s)	CD	0.86 \pm 0.32	1.50 \pm 0.73	0.0009	3.85	1.03 \pm 0.33	1.90 \pm 0.84	0.0001	4.69
Component mean length (mm)	CL	15.8 \pm 4.0	23.0 \pm 9.9	0.002	3.45	14.8 \pm 4.0	21.9 \pm 8.8	0.001	3.75
# of strokes/letter (-)	#SL	5.5 \pm 4.6	5.7 \pm 2.9	0.85	0.19	5.9 \pm 2.3	7.5 \pm 3.7	0.014	2.69
# of strokes/s (1/s)	#S_s	3.5 \pm 1.0	3.6 \pm 1.3	0.56	0.59	3.3 \pm 1.1	3.7 \pm 1.1	0.007	3.01
Stroke mean duration (ms)	SD	173 \pm 34	190 \pm 51	0.031	2.31	182 \pm 40	203 \pm 58	0.003	3.30
Stroke mean length (mm)	SL	3.6 \pm 1.4	3.2 \pm 1.1	0.061	1.98	2.8 \pm 0.8	2.6 \pm 1.0	0.24	1.22
Horizontal peak velocity of stroke (mm/s)	SHVp	13.3 \pm 5.2	11.4 \pm 4.6	0.098	1.73	10.0 \pm 3.5	8.3 \pm 3.3	0.09	1.76
Vertical peak velocity of stroke (mm/s)	SVVp	20.8 \pm 9.2	16.6 \pm 7.5	0.020	2.53	15.0 \pm 6.1	11.7 \pm 4.8	0.040	2.19
Curvilinear peak velocity of stroke (mm/s)	SCVp	24.2 \pm 9.8	19.9 \pm 8.1	0.033	2.28	17.8 \pm 6.8	14.4 \pm 5.4	0.06	1.98

Tabella 3: Valori medi (\pm SD) dei parametri e loro p-value e valori statistici (ASV) prima e dopo il trattamento nei test F ed A.

La Figura 29 presenta i valori medi e di deviazione standard del numero di errori prima e dopo il trattamento. In entrambi i test si evidenzia una significativa diminuzione degli errori ($p < 0,05$ per tutti i parametri). Infatti, dopo il trattamento sono stati trovati miglioramenti nella postura, nella funzionalità dei segmenti (precisione e fluidità dei movimenti di incisione, iscrizione e progressione), e nella qualità della scrittura (diminuzione significativa del numero di errori nei collegamenti errati, nelle auto-correzioni e nei modelli grafomotori). Inoltre, si è osservata una migliore capacità di organizzare lo spazio grafico sulla carta, il mantenimento del rapporto proporzionale tra le parti del grafema, insieme ai grafemi e tra i grafemi (diminuzione significativa del numero di errori nelle proporzioni dimensionali), e le linee del notebook, nonché un maggiore attenzione per i punti di partenza di destra e la direzione dell’orientamento (diminuzione significativa del numero di errori di orientamento) dei grafemi.

In ogni caso, il numero di errori dopo il trattamento era più basso di quello trovato nei bambini normali [94].

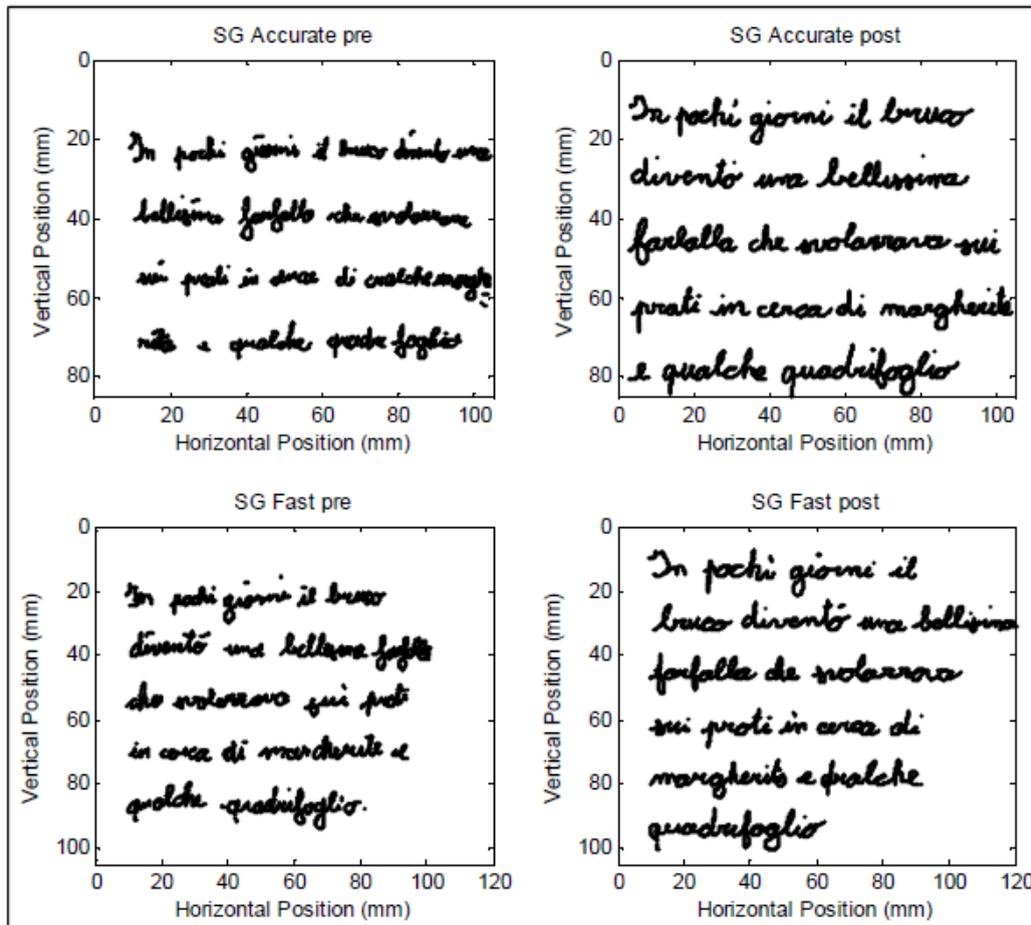


Figura 28: Esempio di lavoro scritto per i test A ed F prima e dopo la riabilitazione.

3.3.4 Altri protocolli di valutazione

Il test V.M.I. e il test Movimento ABC hanno presentato quantitativamente miglioramenti significativi nel campo visivo-motorio, della memoria visuo-spaziale e dell’organizzazione della prassi motoria. La Figura 30 mostra i valori medi prima e dopo trattamento del test V.M.I. ed i corrispondenti p-value. Il V.M.I. di base, misurando l’integrazione visivo motoria, mostra un significativo aumento percentile ($p = 0,0003$) nonché il corrispondente coordinamento visivo ($p = 0,013$) e motorio ($p = 0,015$) dei test supplementari. L’organizzazione della prassi motoria, testata dalla scala del protocollo Movimento ABC, sottolinea un significativo miglioramento percentile ($P = 0,004$) nelle capacità motorie dopo il trattamento, nonostante una grande variabilità tra i soggetti (Figura 29).

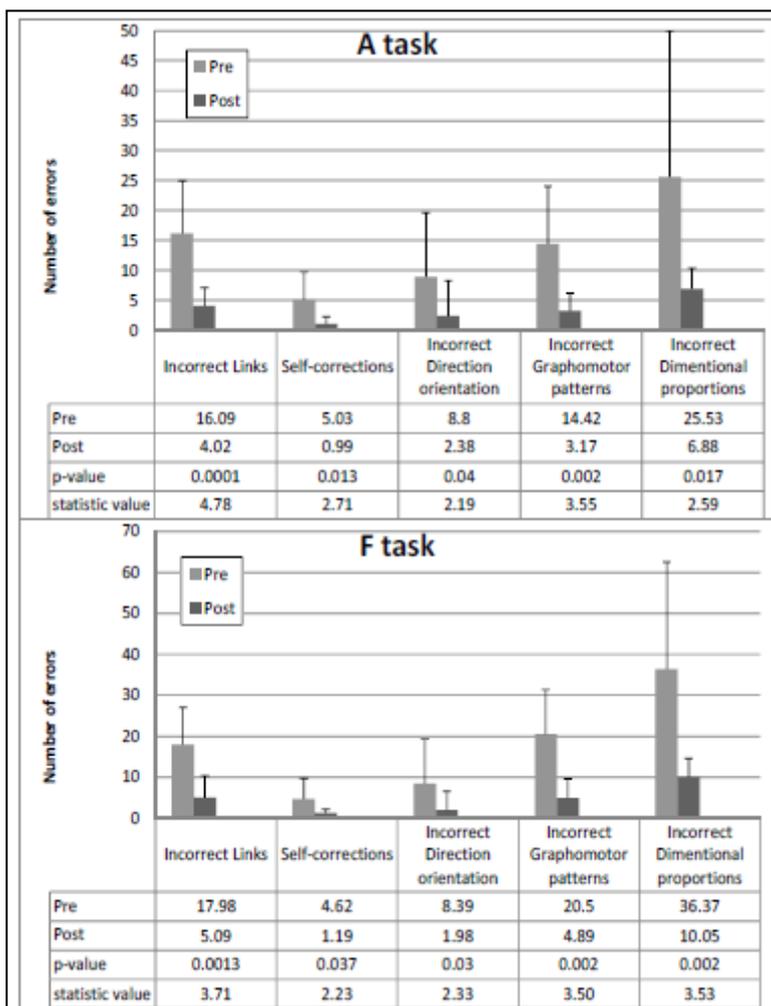


Figura 29: Valori medi e di deviazione standard del numero di errori prima e dopo il trattamento.

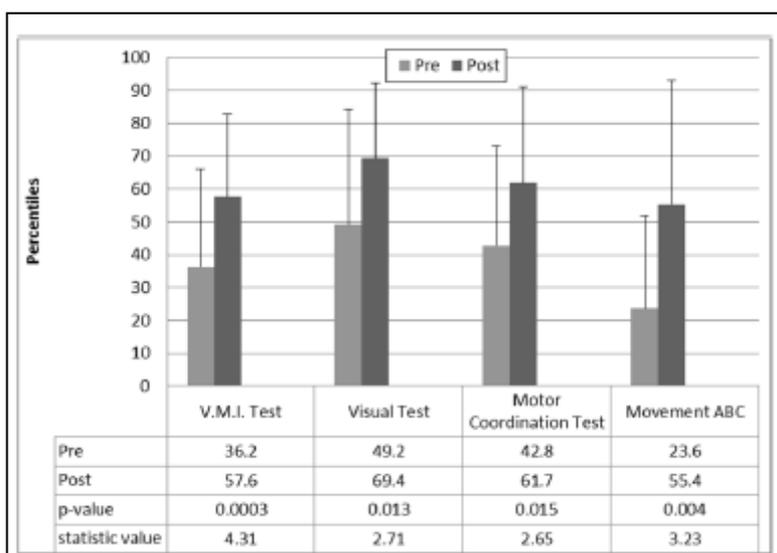


Figura 30: Valori medi prima e dopo trattamento del test V.M.I. e corrispondenti p-value.

3.4 Discussione

I principali risultati cinematici di tale studio, svolto nel corso del dottorato, hanno mostrato che nel Test LE (che non richiede il coinvolgimento linguistico), il trattamento riabilitativo ha prodotto un aumento significativo della velocità, un maggior numero di stroke/s ed un numero inferiore di stroke/lettera, segni di una migliore performance e una ridotta frammentazione. D'altra parte, nella copia della frase utilizzata nel test A ed F (che richiedevano un maggior livello di attenzione), si è trovata una lieve riduzione della velocità, una maggiore durata dello stroke e un maggior numero di stroke necessario per il completamento della lettera, in quanto era necessario un tempo più lungo per scrivere la lettera al fine di ottenere un risultato più leggibile.

In letteratura, alcuni parametri cinematici sono particolarmente promettenti per discriminare buone performance motorie della mano da quelle cattive [75] [77]. In particolare, durata, lunghezza, velocità [47] e numero di colpi o componenti sono stati identificati come i tipici parametri cinematici dei movimenti della mano in grado di fornire informazioni sul livello di sviluppo raggiunto dai movimenti della stessa. Zwicker nel 2011 ha sottolineato che il tempo su carta, il tempo in aria e la pressione media hanno mostrato differenze significative tra i bambini con disordini del coordinamento dello sviluppo e bambini con sviluppo tipico. Negli ultimi documenti [60] [78] il nostro gruppo ha esaminato le caratteristiche della cinematica della scrittura a mano di un gran numero di bambini italiani dal secondo grado della scuola primaria al terzo grado della scuola secondaria mostrando come alcuni di questi parametri cambiassero in tutte le classi. In particolare, il numero di lettera / cm e le velocità orizzontali e curvilinee medie e di picco delle componenti e degli stroke presentavano valori più alti negli ultimi anni di scuola nei test che comportano o meno uno sforzo linguistico [60]. Al contrario, il numero di stroke per lettera e la lunghezza media dello stroke è diminuita in tutti i test e la durata del test e la lunghezza del percorso si è ridotta nel test di copia della frase sia accurata che veloce [11]. Il numero di stroke al secondo aumenta e satura dopo il terzo grado della scuola primaria, mentre la durata media del tempo di penna in aria decresce leggermente in tutte le prove [60]. La durata media della componente e dello stroke era abbastanza costante dopo il secondo grado [60] [78]. In questo lavoro, il test LE che è privo di coinvolgimento linguistico, ma richiede un grande sforzo motorio, ha mostrato un significativo incremento di tutti i valori dei parametri nel dominio della velocità: un maggior numero di lettere e di lettere / s, una maggiore lunghezza totale e media e velocità di picco dello stroke.

Tutti i valori misurati dopo la riabilitazione sono stati simili a quelli riportati in [78] per il 2 ° grado della scuola di secondo livello nella stessa prova (vale a dire circa 90 lettere, 130 centimetri di lunghezza globale, 22 mm/s e 36 mm/s di velocità di picco dello stroke, curvilinee e verticali, rispettivamente). L'incremento della velocità è un indice della maggiore fluidità nel movimento a causa della riabilitazione, ottenuto sia lungo le direzioni di trascinamento della penna orizzontale che verticale. Inoltre, nel dominio della

pianificazione motoria, il numero di stroke al secondo aumenta verso valori prossimi a quelli riportati in [78] per il 2 ° grado del secondo livello, di circa 4.6 stroke/s, il che suggerisce un chiaro sviluppo della pianificazione motoria durante il trattamento. Inoltre, la significativa riduzione degli stroke/lettera verso valori normali di 3 stroke/lettera riportati in [78] suggerisce un miglioramento anche nell’automazione motoria (inferiore frammentazione) raggiunta dal bambino. Infine, nel dominio spaziale, il numero di lettere per cm è rimasto invariato e simile a quello riportato in [78], indicando un’invarianza nella dimensione della lettera. In questo campo, l’incremento della lunghezza media dello stroke trovato in questa prova, che diminuisce quando i bambini progrediscono attraverso il sistema scolastico, di 3.4 millimetri, come riportato in [78], può essere dovuto più ad una minore frammentazione e ad un corrispondente aumento della velocità piuttosto che ad un ingrandimento della lettera, anche se il Metodo di Terzi potrebbe generare un allargamento della lettera al fine di ottenere una migliore leggibilità. La frammentazione ridotta così come l’aumento di velocità sono confermate dal significativo incremento della lunghezza media della componente, con durata media della componente quasi invariata. In sintesi, questo test mostra che alterazioni dei parametri cinematici dovute al trattamento sembrano produrre risultati positivi in tutti i settori presi in esame, dal punto di vista clinico, almeno nel test di velocità senza coinvolgimento linguistico, una migliore performance (con valori vicini a quelli dei bambini normali della stessa età [78]) ottenuta dal programma di riabilitazione. L’analisi cinematica della scrittura nelle prove A e F, che coinvolge competenze linguistiche, ha mostrato nel dominio della velocità solo un leggero, a volte significativo, rallentamento nello stroke verticale e curvilineo della velocità di picco, mentre tutti gli altri parametri inclusi in questo campo sono rimasti invariati. Questi risultati sono in contrasto con quelli trovati nel test LE in cui gli aspetti motori sono prevalenti. Al contrario, le caratteristiche grammaticali e linguistiche presenti nelle prove A e F sembrano richiedere maggiori livelli di attenzione e di impegno del soggetto che producono un rallentamento del movimento, almeno come primo segno nella fase di apprendimento del trattamento. In particolare, nel dominio spaziale, i risultati hanno mostrato un significativo aumento della lunghezza media delle componenti, simile a quella presente nel compito LE, ma con una corrispondente ridotta velocità che produce una maggiore durata media della componente. In sintesi, il soggetto ha bisogno di più tempo per la costruzione di una lettera quando dovrebbe assolvere al compito sia in modo veloce che preciso. Inoltre, rimane invariato il numero di lettere/cm con valori simili al test corrispondente a lievi cambiamenti nella dimensione della lettera e ad una diminuzione significativa della lunghezza media dello stroke con un andamento simile (con valori più bassi) a quanto riportato in [60] con la scolarizzazione, potrebbe suggerire che l’intervento riabilitativo stia andando nella direzione desiderata.

Nel dominio dell’automazione, il numero maggiore di stroke/lettera presenta un comportamento opposto a quello mostrato in [60] con la scolarizzazione e con i valori (5.5-6) allontanandosi da quelle normali (circa 3-4, [11]). Inoltre, nel dominio della

pianificazione motoria, le durate medie delle componenti e dello stroke aumentano significativamente presentando, valori superiori rispetto a quelli (130-150ms) riportati in [60]; anche il numero di stroke/s aumenta significativamente, ma solo nel task accurato con i valori prossimi a quelli normali (circa 4,5, [11]). Noi sottolineiamo che alcune differenze riscontrate tra i risultati di questo lavoro e quelli riportati in [60] potrebbero essere in parte dovuti alla diversa frase usata nelle prove A e F. In sintesi, i soggetti erano in grado di produrre una scrittura che era più leggibile riducendo leggermente la velocità di picco e aumentando la durata degli stroke producendo un maggior numero di stroke necessari per completare una lettera. Questo sembra essere il risultato di un cambio nella strategia per copiare una frase sia in A e F, modalità causata dal programma di riabilitazione, corrispondente alla costruzione di nuove sequenze grafomotorie non ancora completamente consolidate, come dimostra l’elevato numero di stroke per lettera. I risultati forniti dai parametri della check-list in questi due test (Figura 29) sostengono questa ipotesi. In realtà hanno mostrato come, in entrambi i casi, tutti i tipi di errori (in particolare il numero di collegamenti errati, modelli grafomotori e proporzioni dimensionali) sono diminuiti in modo significativo ($p < 0,02$ in tutti i casi) dopo il trattamento, confermando l’idea che le strategie basate su un migliore controllo ed una maggiore attenzione nella produzione di stroke è stata necessaria per realizzare nuove sequenze motorie corrette. Rallentamento e maggiore precisione sono le principali conseguenze di queste nuove strategie che, a lungo termine, quando le nuove sequenze motorie hanno raggiunto completa automazione, dovrebbe portare ad un aumento della velocità mantenendo alta leggibilità e un basso numero di errori. La ricerca futura dovrebbe ripetere il test dopo un tempo più lungo (uno o due anni).

In contrasto con i risultati del test LE in cui l’abilità motoria è principalmente richiesta, nelle prove A e F, in cui oltre ai requisiti motori sono necessarie anche competenze linguistiche e grammaticali, una completa automazione dei movimenti della scrittura sembra non essere stata ancora raggiunta. Infatti, le differenze tra i risultati nel test LE e nei test A ed F possono essere attribuite al diverso coinvolgimento necessario per la loro realizzazione. Nel test LE, la semplice attività motoria ripetitiva non richiede particolari attenzioni. Invece, nei test A ed F la necessità di prestare maggiore attenzione al compito è prevalente, soprattutto nel programma di riabilitazione di Terzi in cui solo dopo l’acquisizione di nuova corretta sequenza, il processo di accelerazione può iniziare a muoversi verso una corretta automazione. In questo modo, durante la fase di trattamento, è possibile migliorare la qualità e la leggibilità della scrittura, come evidenziato non solo dai parametri della lista di controllo ma anche dai risultati della batteria V.M.I. e del Movimento ABC. In particolare, il test V.M.I. ha mostrato significativi miglioramenti su tutti gli aspetti valutati, ossia sulla riproduzione grafica di forme geometriche di difficoltà crescente, sulla coordinazione motoria e sulla precisione del tratto grafico e sulla percezione visiva (Figura 30) che rappresentano specifiche aree di intervento del programma di riabilitazione. Inoltre, il Movimento ABC, che testa l’organizzazione pratica motoria, mostra (Figura 30) un

significativo ($p = 0,004$) miglioramento anche nelle capacità motorie, fino a valori normali. Ipotizziamo che il trattamento di Terzi, che non fa uso della vista, potrebbe migliorare la percezione e la coscienza della posizione spaziale, stimolando l'elaborazione di input vestibolari con effetti sulla maturazione di competenze neuro-motorie coinvolte nella statica e nell'equilibrio dinamico utile anche nella risoluzione dei problemi di scrittura. Da un punto di vista clinico, questi miglioramenti confermano che l'integrazione visiva-motoria può essere ottenuta non solo utilizzando dati visivi ma anche contributi tattili e cinestetici come quelli forniti in molte fasi del Metodo di Terzi.

Principali limitazioni del progetto di ricerca del presente studio riguardano il piccolo campione eterogeneo di soggetti e la mancanza di un corrispondente gruppo di controllo. Per superare quest'ultimo problema, i nostri risultati sono stati confrontati con quelli presenti nella letteratura sui bambini della stessa età coinvolti in compiti simili a quelli utilizzati in questo lavoro.

Altre limitazioni nello studio riguardano l'affidabilità della valutazione digitale. In particolare, non è stato possibile valutare l'affidabilità con una procedura test-retest in quanto la specifica struttura sanitaria che ha seguito i bambini, non era in grado di ripetere i test più volte, prima e dopo riabilitazione.

Circa la validità delle misure ottenute dalla digitalizzazione della scrittura, si è fatto riferimento ai risultati riportati in altri studi [60] [90] [91] [92] [93] in cui i parametri utilizzati in questo documento sono stati collegati ad alcuni domini del movimento della scrittura, come descritto nella sezione Metodi. D'altra parte, le misurazioni della check-list potrebbe dipendere dal valutatore anche se in questo lavoro un gruppo di esperti ha esaminato la scrittura, garantendo una buona validità. Questa pratica, anche se è quella comunemente usata, deve essere resa meno personale attraverso lo sviluppo di un software interattivo adatto, che potrebbe sostenere l'operatore in una valutazione più rapida e obiettiva degli errori.

3.5 Conclusione

L'analisi cinematica di scrittura è un potenziale strumento per determinare l'efficacia di un programma di riabilitazione quantificando i cambiamenti in alcuni domini del movimento di scrittura dopo il trattamento. L'analisi dei parametri cinematici permette la valutazione di aspetti che vanno oltre lo studio della 'buona scrittura' esaminando anche i processi alla base della scrittura. Questo studio esamina l'influenza di un programma di riabilitazione specifico, basato sul Metodo di Terzi, sulle caratteristiche cinematiche di scrittura a mano dei bambini che presentano difficoltà di scrittura.

Il metodo cerca di migliorare la scrittura attraverso il consapevole uso di movimenti del corpo in grado di produrre cambiamenti mentali e visuo-spaziali nella pianificazione motoria dei movimenti.

L'uso di tavolette per l'analisi cinematica nel processo di riabilitazione di Terzi ci dà la possibilità di esaminare (ad esempio, utilizzando un rallentatore) le dinamiche di costruzione delle lettere e le connessioni tra le lettere fornendo agli operatori informazioni sul programma costruttivo utilizzato dal soggetto, utili a comprendere meglio i processi e le strategie coinvolte nel trattamento. In questo modo, è possibile identificare errori ed altri fattori su cui lavorare con il Metodo di Terzi (ad esempio punti di partenza, sequenze errate e montaggio di elementi) che consentono la progettazione di un programma di intervento migliore. Inoltre, la parametrizzazione della cinematica permette ai logopedisti da seguire non solo qualitativamente ma anche quantitativamente (e di conseguenza obiettivamente) i progressi causati dalla terapia per promuovere quelle azioni che migliorino aspetti/domini i cui risultati attesi non sono ancora stati sufficientemente raggiunti. In sintesi, tutti i protocolli di valutazione e l'analisi dinamica della scrittura in un semplice compito motorio sottolineano i miglioramenti ottenuti con tale trattamento, in particolare nelle caratteristiche della velocità e dello stroke. Le attività che richiedevano competenze linguistiche e grammaticali hanno sottolineato il ruolo dell'attenzione, producendo un rallentamento necessario a costruire nuovi programmi motori in grado di generare una scrittura corretta. Il progresso misurato con l'analisi cinematica è confermato sia dalla riduzione degli errori nei parametri della lettera riportati nella check-list sia dal miglioramento del test della V.M.I. e del M-ABC.

In conclusione, una batteria di parametri cinematici, in particolare quelli riguardanti le caratteristiche dello stroke (velocità, durata, numero per secondo e per lettera) e della componente (durata e lunghezza), associate a compiti specifici, può essere proposta per lo sviluppo di un sistema computerizzato per la valutazione della scrittura a mano. In futuro, gli effetti del programma di riabilitazione dovrebbero essere studiati su un periodo più lungo (di uno o due anni) al fine di verificare se le modifiche causate dal trattamento si sono consolidate e se la velocità è cresciuta come previsto. In ogni caso, l'analisi cinematica della scrittura potrebbe contribuire a monitorare gli effetti del trattamento al fine di quantificare le variazioni prodotte.

4 - Sonificazione della scrittura

(risultati pubblicati negli atti del V Congresso Nazionale di Bioingegneria, 2016 [C])

4.1 I feedback della scrittura

L'abilità di controllare i movimenti ha un notevole impatto sulla qualità della scrittura. Considerando le abilità motorie in generale, si possono distinguere due modalità di controllo: controllo preventivo, basato sulla memorizzazione e controllo retroattivo basato su un feedback sensoriale. Il primo dei due, quello preventivo, si riferisce alle componenti del movimento che sono anticipate e preparate prima che il movimento abbia inizio. Il ruolo del feedback sarà solamente quello di confermare o meno se tutto ciò che era previsto sia andato a buon fine. Invece, il controllo retroattivo, si riferisce a tutti quegli aspetti del movimento che non sono stati programmati prima dell'esecuzione del movimento e che devono essere controllati durante l'esecuzione del movimento sulle basi del feedback sensoriale. Tuttavia, il feedback sensoriale può anche essere usato durante l'apprendimento per migliorare la pianificazione del movimento successivo e quindi essere considerato come una componente preventiva. La scrittura in particolare, riguarda entrambi i tipi di controllo: nella prima fase di apprendimento (5-6 anni), l'acquisizione della scrittura è basata su un controllo preventivo, in quanto il bambino deve appunto prendere prima familiarità con i grafemi, nella seconda fase, quando la forma dei grafemi e la modalità di esecuzione di questi è stata acquisita, si passa ad un controllo retroattivo, poi, verso i 10 anni quando i bambini hanno piena conoscenza della scrittura, si usa una modalità di controllo mista.

Due tipi di feedback sensoriali sono naturalmente usati nella scrittura, visivo e propriocettivo.

4.1.1 Feedback visivo

Il feedback visivo dà informazioni sulle caratteristiche spaziali della traccia scritta: dove e come la traccia viene prodotta. Per provare a capire il ruolo della visione, molti autori hanno studiato i cambiamenti della scrittura causati dall'assenza o dal deterioramento della vista. Due tipi di vincoli devono essere affrontati nella riproduzione della scrittura: quelli relativi all'esecuzione della forma della lettera e quelli relativi alla disposizione e sequenza delle lettere sul foglio. Uno scrittore esperto conosce perfettamente ed ha già acquisito a figura delle lettere; le componenti morfo-cinetiche sono quasi indipendenti dal controllo visivo. Invece, quelle che riguardano la disposizione spaziale del testo sul foglio, lo spazio tra lettere e parole, la sistemazione della punteggiatura, etc. richiedono il feedback visivo. La maggior parte degli autori sono d'accordo che scrivere senza visione cambia la traccia scritta, ma influenza anche la cinematica dei movimenti della scrittura? Analizzando il profilo di velocità [95], sia con che senza feedback visivo, si

dimostrò che il feedback visivo non è richiesto per produrre e controllare automaticamente il movimento della scrittura, ma per i vincoli spaziali della traccia.

In conclusione, la visione gioca un ruolo cruciale nel controllo della traccia scritta e permette allo scrittore di collegare correttamente le parole, lettere, e i tratti all'interno delle lettere. Comunque, l'assenza della visione non influisce in modo significativo sul processo di scrittura, cioè sul movimento in tempo reale che genera la traccia. Piuttosto, trattenere la vista mentre si scrive può promuovere un controllo preventivo per aiutarsi a scrivere in maniera più fluente anche senza vista, correndo il rischio di essere meno accurati e, conseguentemente, meno leggibili.

4.1.2 Feedback propriocettivo

Il feedback propriocettivo nasce dai muscoli, dai tendini e dai recettori delle articolazioni che danno informazioni sulla posizione e sul movimento dell'arto. In realtà, la percezione tattile proveniente dai recettori cutanei non è inclusa nella propriocezione, tuttavia per semplicità non la considereremo separatamente dalla propriocezione, in particolare perché quando un paziente è deafferentato (sindrome da manifestazione sensoriale o motoria causata dall'interruzione delle vie nervose che collegano l'encefalo alla periferia [96]) perde la propriocezione e anche la percezione tattile. Nella scrittura, il feedback propriocettivo può informare sulle caratteristiche dei movimenti della scrittura spaziali, cinematiche e/o dinamiche, invece il feedback tattile dei recettori della pelle può dare informazioni sulla pressione esercitata dalle dita sulla penna e quindi sulla forza esercitata durante la scrittura. Negli scrittori esperti, il feedback propriocettivo non è fondamentale per controllare né la forma delle lettere né la loro disposizione spaziale sul foglio: dovrebbe prima essere controllato con un feedback propriocettivo e poi da un feedback visivo. E' stato dimostrato che i movimenti della scrittura sono chiaramente influenzati dalla mancanza di propriocezione [97]. Più precisamente, tre variabili (numero delle alzate di penna, numero delle inversioni del profilo di velocità e frequenza media dei tratti) cambiano senza feedback propriocettivo, qualsiasi siano le condizioni visive. Pertanto, il feedback propriocettivo non sembra dare informazioni riguardo alle caratteristiche spaziali della traccia scritta, ma è utile per controllare la cinematica e la dinamica dei movimenti della scrittura.

4.1.3 Feedback sonoro

Associare suoni ai movimenti sembra migliorare sia la percezione che la ripetizione di essi. La vicinanza delle connessioni neurali tra l'area uditiva e quella motoria può spiegare le interazioni audio-motorie. Inoltre, un crescente numero di studi riporta che la percezione audiovisiva di movimenti associati a suoni modula l'attività delle aree multisensoriali del cervello che può comportare una maggiore accuratezza nell'esecuzione dei movimenti. Tuttavia essendo la scrittura un movimento silenzioso, per insegnare ai bambini a scrivere si usa la propriocezione o la visione e non il suono. Però la propriocezione ha dei limiti:

- ha maggiore efficacia verso compiti motori semplici e non su compiti più complessi come la scrittura;
- i dispositivi di correzione sono costosi e di difficile implementazione;
- guidare la penna di chi scrive nella direzione corretta porta lo studente ad uno stato di passività.

La domanda che ci si è posta è stata quindi quella di scoprire come, e applicati a cosa, i suoni possano migliorare il controllo motorio o aiutare ad imparare di nuovo a scrivere, senza ovviamente rinunciare ai feedback principali visivi e propriocettivi. Storicamente, il feedback sonoro è stato usato solamente nel trattamento di un particolare deficit neurologico chiamato il crampo dello scrittore [98]. Per questo trattamento si provò a convertire l'esame elettromiografico in suoni ma non si ebbero risultati convincenti. Una limitazione di questa tecnica era che la scrittura coinvolge molti muscoli, a volte piccoli e localizzati in profondità la cui attività non è facile da registrare con l'elettromiografia. Più recentemente per il trattamento del crampo dello scrittore è stato usato un feedback sonoro applicato alla forza compiuta dalle dita per tenere la penna in mano. Questo feedback sonoro consiste in un tono continuo a bassa frequenza quando la forza media usata per la presa della penna non supera i 5 N durante la scrittura. La frequenza del tono aumenta di quattro gradini in accordo al livello della forza usata: i pazienti sono istruiti per compiere gli esercizi di scrittura in modo tale da ascoltare un suono piacevole a bassa frequenza. Dopo sette ore di esercizio, la forza e la pressione applicate dalla penna sulla carta è diminuita, ma la velocità e la scorrevolezza della scrittura non è cambiata in modo significativo. Questi risultati furono dunque incoraggianti per la riabilitazione del crampo dello scrittore, ma non per il miglioramento dei movimenti usati per la scrittura di per sé.

Era necessario verificare se era possibile associare suoni alle variabili della scrittura in modo da produrre variazioni di suono che, a loro volta, potessero essere capaci di ricordare un movimento grafico [99].

Se si ascolta attentamente si può sentire il rumore che fa la penna quando essa si muove sul foglio mentre si scrive, soprattutto se la superficie su cui si scrive è ruvida. L'attrito tra penna e foglio produce variazioni di suono riguardanti la cinematica della scrittura, che possono comunicare informazioni su cosa si stia scrivendo. Per verificare l'importanza di associare un suono alla scrittura per la sua valutazione, fu eseguito un esperimento nel quale dei soggetti adulti dovevano riconoscere una determinata scrittura associata a suoni solamente ascoltando questi suoni senza vedere la scrittura. Furono associate al suono tre variabili: 1 - Velocità istantanea, 2 - Scorrevolezza, 3 - pressione della penna assiale sulla tavoletta. I risultati dimostrarono che la scrittura di bambini con difficoltà a scrivere venne valutata in maniera peggiore rispetto agli scrittori abili (adulti e bambini) da chi ascoltava i suoni. La conclusione fu che associare un suono a queste tre variabili era sufficiente per far capire ad un ascoltatore esterno la

correttezza o meno della scrittura che tali suoni produceva. In un secondo esperimento, essi provarono a valutare l'effetto di un feedback sonoro in tempo reale su bambini disgrafici in modo da aiutarli a correggersi durante il movimento. Sette bambini si esercitarono in questo modo per sessioni di quattro settimane e migliorarono la velocità e la scorrevolezza nello scrivere. Tuttavia, in questo studio preliminare, non sono stati valutati i bambini senza feedback quindi, lo studio, non portò nessuna conclusione definitiva e non si sa se il miglioramento sia dato dall'allenamento o dal feedback di per sé.

Alcuni autori dimostrarono che soggetti in età adulta sono capaci di intuire ad orecchio ciò che è stato disegnato in base, solamente, ai suoni generati dall'attrito tra penna e foglio. A questo esperimento parteciparono 32 adulti, divisi in due gruppi, i quali impararono 4 nuovi caratteri con la mano non dominante. I caratteri appartenevano alla lingua Tamil e nessuno dei partecipanti aveva alcuna conoscenza a riguardo.

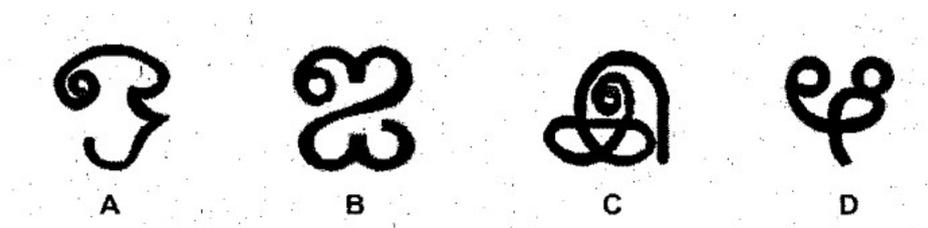


Figura 31: Quattro simboli della lingua Tamil usati nell'esperimento.

Due caratteri furono acquisiti con il feedback sonoro in tempo reale e altri due senza. Ai partecipanti fu chiesto di scrivere con penne d'inchiostro su fogli di carta appoggiati su una tavoletta grafica. Su ogni foglio veniva rappresentato in alto in carattere da apprendere, la parte sottostante del foglio era divisa in quadrati entro i quali scrivere la ripetizione del carattere. L'esperimento include un pre-test, una sessione di allenamento e due post-test, dei quali uno subito dopo la sessione di allenamento e l'altro dopo 24 ore. Il pre-test e i due post-test furono esattamente gli stessi in modo tale da poterli confrontare: il compito era quello di scrivere una volta ogni carattere. L'allenamento consisteva nello scrivere il carattere 16 volte. La differenza tra i due gruppi era che il primo gruppo ha acquisito prima i due caratteri senza suono e poi i due caratteri col suono, mentre il secondo gruppo fece il contrario. Associarono alla scrittura corretta un suono di sfregamento che fosse simile al suono prodotto dal gesso sulla lavagna. Quando il soggetto scriveva troppo piano, il suono di sfregamento cambiava in un suono di cigolio. Questa seconda strategia di associazione di un suono deriva dal fatto che quando una persona che sta scrivendo sente il cigolio di una porta tende ad aumentare la velocità di scrittura per evitare questo suono spiacevole. Poi vennero aggiunti suoni di collisione, che ricordavano suoni di qualcosa che si rompe quando la scrittura era 'a scatti'. Ascoltando i suoni prodotti dai soggetti dal primo all'ottavo tentativo, si può percepire un

progressivo cambiamento: maggiore velocità (il tempo che intercorreva da un suono di sfregamento ad uno di cigolio diminuì) e un miglioramento nella scorrevolezza (i suoni di collisione diminuirono).

In questo studio, la scrittura fu considerata troppo lenta quando la velocità tangenziale istantanea era più bassa di 1.5 cm s⁻¹ mentre fu considerata troppo veloce quando il tempo tra due picchi di velocità era minore di 40 ms e quando la differenza di velocità tra questi due picchi era inferiore a 1.0 cm/s. Queste soglie furono determinate empiricamente e validate dalla grande correlazione tra il numero di picchi di velocità sopra-soglia determinati da questo metodo a tempo reale e quelli determinati dalla differenza di velocità di picco segnale-rumore, indice di movimento in scioltezza.

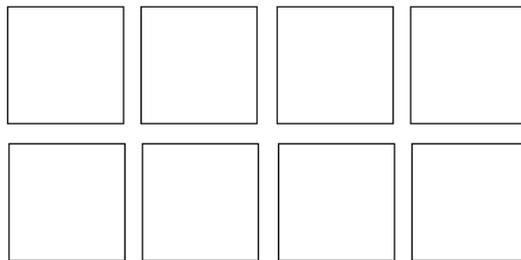


Figura 32: Come appariva il test ai soggetti. Dovevano riprodurre il carattere all'interno dei rettangoli.

Due diversi tipi di variabili furono calcolate: variabili cinematiche sul movimento eseguito per scrivere e variabili spaziali sulla traccia scritta.

- Variabili cinematiche: furono calcolate la velocità media e la differenza di velocità di picco segnale-rumore. La velocità media corrisponde alla media della velocità tangenziale dal momento in cui la penna è a contatto con la tavoletta fino a che si stacca, quando il carattere è completato. La differenza di velocità di picco segnale-rumore è la differenza tra il numero di picchi della velocità dopo aver filtrato la velocità tangenziale con la frequenza di taglio di 10 Hz e il numero di picchi della velocità dopo aver filtrato la velocità tangenziale con una frequenza di taglio di 5 Hz.
- Variabili spaziali: sono state calcolate la lunghezza della traccia e la distanza del Dynamic Time Warping (DTW). La lunghezza della traccia corrisponde alla traiettoria completa seguita dalla penna per scrivere il carattere. DTW è la misurazione della distanza Euclidea tra il carattere scritto dai partecipanti e il carattere prototipo usato come riferimento.

Paragonando la performance del post test a breve termine con quella del post-test, emersero due risultati principali. In primo luogo l'applicazione di suoni alla scrittura

mentre si stanno acquisendo caratteri sconosciuti migliora la scorrevolezza e la velocità con cui vengono prodotti, a discapito di una lieve riduzione della loro accuratezza spaziale a breve termine. In secondo luogo i caratteri acquisiti senza il feedback furono scritti con velocità e scorrevolezza inferiori rispetto ai caratteri acquisiti con feedback. Questa osservazione fu valida solo per il primo gruppo nel quale il feedback fu applicato per apprendere gli ultimi due caratteri. Nel gruppo due, che acquisì prima i caratteri con feedback e poi senza, invece, la performance dei caratteri acquisiti con e senza feedback fu abbastanza simile. In altre parole, l'effetto del feedback sulla scrittura fu trasferito ai caratteri acquisiti senza feedback.

La cosa interessante è che questo trasferimento sembra concernere solo le variabili cinematiche (velocità e scorrevolezza), mentre l'accuratezza spaziale rimase identica per i caratteri appresi con e senza feedback, indifferentemente dall'ordine di presentazione del feedback. Quando i soggetti scrissero i quattro caratteri dopo 24 ore dalla fine dell'allenamento, essi continuarono a scrivere più velocemente e con più scorrevolezza rispetto al pre-test ma senza una diminuzione nella loro accuratezza spaziale. Inoltre non ci fu più differenza tra i caratteri acquisiti con o senza il feedback. L'assenza di un effetto a lungo termine del feedback può essere dovuto al numero limitato di ripetizione della scrittura di ciascun carattere (16 per ogni carattere) e anche che l'effetto del feedback fu trasferito verso i caratteri acquisiti senza esso. In conclusione, il seguente studio mostrò che applicare un suono alla scrittura durante l'apprendimento di caratteri sconosciuti migliora la scorrevolezza e la velocità della loro produzione, a discapito di una minor accuratezza spaziale a breve termine. In un altro studio [100] s'indagò sulle abilità umane di comprendere i movimenti biologici attraverso i suoni di attrito prodotti da qualcuno che disegna e, inoltre, l'abilità di riconoscere le figure disegnate dai suoni generati dall'attrito. Si utilizzò un suono sintetico che simulasse il suono che produce la penna sul foglio quando si scrive. Il modello per la ruvidità della superficie era un suono il cui spettro era:

$$S(f) = \frac{1}{f^b} \quad (4.1)$$

dove b variava in un range che va da 0 a 2 e f è la frequenza. Se $b=0$, il rumore è bianco e corrisponde ad una superficie ruvida, all'aumentare di b la superficie si leviga. Il suono poi fu generato filtrando questo rumore con un filtro passa basso con una frequenza di taglio che varia in accordo con il profilo di velocità della penna. Vennero condotti 3 esperimenti, come primo approccio per studiare la nostra capacità di riconoscere specifiche figure attraverso suoni, fu chiesto ai partecipanti di aggiustare la velocità di un punto affinché il suo movimento sembrasse uniforme, cioè affinché venisse percepita una velocità costante.

A questo primo esperimento presero parte 20 partecipanti (3 donne e 17 uomini) di età media 29.42; fu chiesto loro di ascoltare un suono sintetizzato e di modificarlo

con due pulsanti per renderlo il più naturale e scorrevole possibile cioè che assomigliasse quanto più al rumore di una penna che scrive su una superficie ruvida. Il suono era prodotto generando in maniera casuale delle traiettorie di un punto che si muove $(x(t), y(t))$ definite sulla base dei seguenti parametri:

$$\begin{cases} x(t) = A_0 \sum_{k=0}^3 a_k \sin(\omega_{x,k} t) \\ y(t) = B_0 \sum_{k=0}^3 b_k \sin(\omega_{y,k} t) \end{cases} \quad (4.2)$$

Ogni 15 secondi i valori cambiavano arbitrariamente con eccezione dei valori $A_0 = 7$, $B_0 = 5$, $a_0 = 1$ e $b_0 = 1$. In particolare, i valori di $\omega_{x,k}$ e $\omega_{y,k}$ assunsero valori random tra 0 e 0.6 Hz e a_k e b_k assunsero valori random tra 0.5 e 0.9. A loro fu detto che quel suono era prodotto da qualcuno che disegnava una figura con una forma non geometrica su un pezzo di carta con la penna.

Il movimento di questo punto era vincolato dalla legge di potenza espressa da:

$$vt = KC^{-\beta} \quad (4.3)$$

dove vt è la velocità tangenziale, C i radianti della traiettoria e K il fattore di guadagno della velocità collegata alla velocità totale del movimento. La principale scoperta di questo esperimento fu che, quando fu chiesto di aggiustare il suono, i soggetti aggiustarono il suono in modo tale che il profilo della velocità seguisse la legge di 1/3 di potenza, cioè pur non sapendo che stessero modificando β , tutti **associarono** a β un valore vicino a 1/3. In altre parole, il timbro del suono del movimento della penna sembra variare in accordo con la legge della cinematica che governa i movimenti grafici reali. Questo risultato rivelò che siamo capaci di immaginare un gesto naturale, ossia, movimenti biologici, dalle variazioni del timbro di un suono in accordo con le precedenti scoperte collegate al riconoscimento di una prova acustica attraverso specifici modelli acustici.

Nel secondo esperimento l'obiettivo era quello di investigare ulteriormente se suoni di attrito possono anche dare informazioni sulla figura disegnata. Presero parte 20 partecipanti (9 donne e 11 uomini) di età media 30.65, 8 di loro avevano partecipato anche al primo esperimento. Fu chiesto loro di associare una tra quattro figure a cui loro pensavano corrispondere un suono ascoltato. Preliminari test informali misero in evidenza che sono più facilmente distinguibili suoni che rappresentano figure con cuspidi da quelle senza cuspidi quindi, le quattro figure erano: un cerchio, un'ellisse, una linea e una serie di archi.

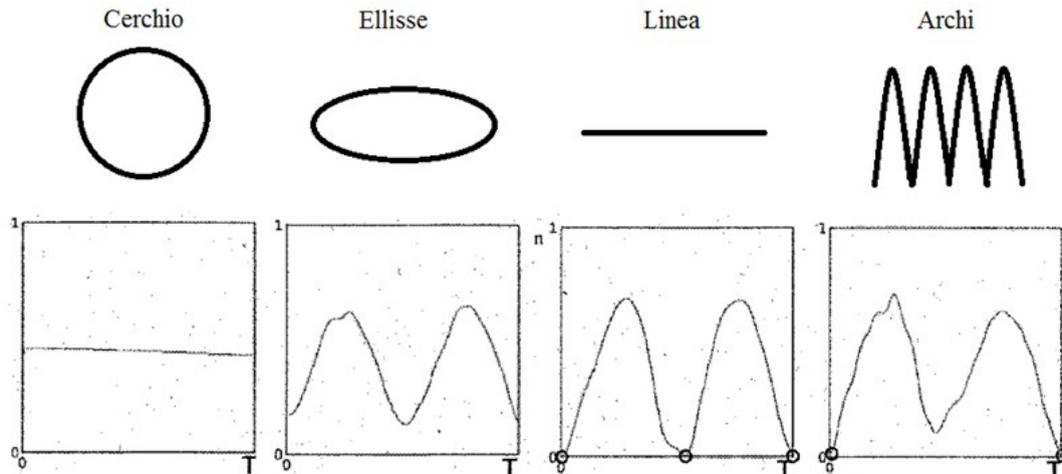


Figura 33: Profilo di velocità curvilinea delle quattro figure utilizzate nell'esperimento.

In ascisse è rappresentato un periodo. Il profilo di velocità è filtrato con un filtro passa basso a 10Hz e normalizzato in ampiezza. I cerchietti neri rappresentano quando il grafico tocca l'ascissa (velocità nulla).

Un membro dello staff disegnò queste quattro figure su una tavoletta Wacom Graphic Intuos 3 senza staccare la penna per 25 secondi, in modo tale che i suoni registrati associati alle quattro figure avessero più di un periodo. Vennero acquisite sequenze di durata di 5 secondi che corrispondevano a quattro periodi per l'ellisse, per la linea e per gli archi e solo due periodi per il cerchio. Venne poi eseguito lo stesso esperimento, ma con quattro suoni sintetizzati. Il risultato di questo esperimento mostrò che i soggetti erano in grado di associare un determinato suono dato di attrito (uno dei quattro) ad una corretta figura. Il punteggio di successo era alto per tutte le figure. Inoltre, il punteggio ottenuto con i suoni sintetizzati non era significativamente diverso da quello ottenuto dai suoni registrati, sebbene i suoni sintetizzati erano modulati solamente dal profilo di velocità. Infatti, i due tipi di suoni differivano dal fatto che le altre variabili, cioè la pressione, l'orientazione della punta della penna e l'irregolarità della superficie erano implicitamente contenute nelle tracce registrate.

Al terzo esperimento parteciparono 18 soggetti (8 donne e 10 uomini) di età media 31.56; sette di loro avevano partecipato al primo esperimento e 17 parteciparono al secondo esperimento. Furono prese in considerazione quattro figure: cerchio, lemniscate, ellisse, occhielli.

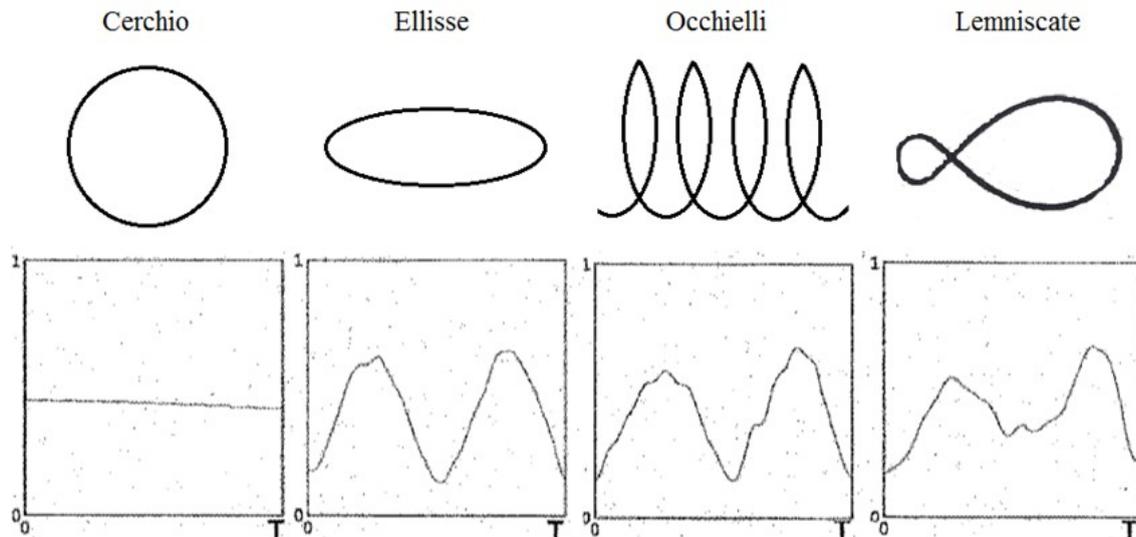


Figura 34: Un periodo del profilo di velocità curvilinea relativo alle figure utilizzate nell'esperimento.

Il profilo di velocità curvilinea è filtrato con un filtro passa basso a 10Hz e normalizzato in ampiezza. I risultati di questo esperimento confermarono alcune cose ottenute nell'esperimento due: il cerchio fu ancora perfettamente associato al giusto suono. Tuttavia, il punteggio di successo per l'ellisse fu più basso di quello ottenuto nell'esperimento due perché creò confusione con gli occhielli. Il lemniscate fu ben associato sebbene ci fu un po' di confusione con gli occhielli e l'ellisse perché hanno grafici del profilo di velocità simili. Sebbene la differenza tra suoni registrati e sintetizzati non fosse notevole tuttavia, i suoni sintetizzati portavano sempre un punteggio più alto di quelli registrati, in particolar modo per l'ellisse, i lemniscate e gli occhielli, per i quali la differenza di punteggio fu più grande del 10%. Questi risultati rinforzarono la supposizione che il profilo di velocità costituisce un'appropriata percentuale d'informazione per il compito di associazione e il gesto che sta alla base.

In un altro esperimento [101] per la sonificazione della scrittura furono usate due tecniche. La prima modellò la ruvidità della superficie con un rumore mentre il profilo di velocità venne modellato filtrando con un filtro passa basso un rumore con una frequenza di taglio che variasse in accordo con il profilo di velocità. Questa è la stessa tecnica già spiegata in precedenza, qui però si tenne conto anche della pressione della penna sul foglio: la pressione della penna fu linearmente associata al volume del suono prodotto, in questo modo, maggiore pressione corrisponde a maggiore intensità di suono. Per evitare grandi differenze di volume, la pressione fu normalizzata dividendo il valore di pressione con il valore massimo di ciascuna prova. Durante le alzate della penna non ci fu suono, quindi la durata del silenzio informava direttamente sulla durata delle alzate. La seconda strategia di sonificazione fu diversa e usata per i movimenti non fluidi che è un indice artificiale di qualità. L'obiettivo fu quello di tener conto dei

momenti in cui i movimenti non fossero fluenti e in questi momenti di far suonare un 'allarme sonoro'. In pratica, quando la scrittura era irregolare, veniva emesso un suono. Questi suoni ricordavano il rompersi di un vinile, quindi, migliore era la scrittura, meno suoni di rottura venivano emessi.

4.2 Materiali e metodi

L'adozione di feedback sonoro per il recupero della disgrafia potrebbe rappresentare un metodo alternativo e complementare a quelli precedenti.

La sonificazione (cioè l'uso di un suono per rappresentare una quantità fisica diversa da un suono), analogamente alla visualizzazione, può essere applicata a molti tipi di dati. In particolare, essa può essere uno strumento prezioso nella valutazione/trasformazione di un movimento, nonché nella percezione dello stesso, supportando la possibilità di usarlo accanto al feedback di visualizzazione per il training fisico e per la riabilitazione [102]. Inoltre, l'associazione di un suono ad alcuni parametri cinematici di un movimento come, per esempio, velocità, fluidità o pressione potrebbe essere utilizzato anche per discernere una buona da una cattiva scrittura (Disgrafia). In letteratura vengono proposte molte tecniche per la sonorizzazione di una grandezza fisica e [102], sono principalmente basate sulla modulazione del pitch. Grazie alla sonificazione della scrittura potremmo aiutare sia i terapeuti che gli insegnanti a valutare la scrittura dei bambini, basandosi solo sull'ascolto, supportando così una più precisa identificazione dei soggetti disgrafici. Fino ad oggi, pochi esperimenti sono stati effettuati per verificare gli effetti della sonificazione sul movimento della scrittura a mano; tuttavia, i risultati preliminari hanno mostrato che la sonificazione della scrittura di un bambino senza problemi di scrittura genera un suono più fluido e regolare [103].

Dato che il profilo di velocità curvilineo è considerato uno dei parametri più significativi nel distinguere una cattiva traccia da una buona, in questo studio si è deciso di sonificare questo parametro cinematico. Per verificare se la sonificazione può essere un utile supporto nella discriminazione fra la buona e la cattiva scrittura, un gruppo di valutatori ha ascoltato il suono riprodotto dalla scrittura di alcuni bambini disgrafici, prima e dopo un programma riabilitativo.

Nel lavoro svolto nel corso del dottorato, è stata esaminata la scrittura di 10 bambini disgrafici (di scuola primaria) registrata prima e dopo un trattamento riabilitativo, per un totale di 100 suoni.

Successivamente, ogni valutatore ha confrontato la coppia di suoni prodotti per lo stesso esercizio di scrittura prima e dopo la riabilitazione.

Cinque tipi di test di scrittura sono stati utilizzati nel seguente ordine: LE, UNO, NUM, task A e task F. Il test LE richiedeva agli allievi di scrivere il più rapidamente possibile una sequenza corsiva di lelele per un minuto; il compito UNO chiedeva agli studenti di scrivere il più rapidamente possibile, per un minuto, una ripetitiva sequenza in corsivo della parola

UNO; il compito NUM chiedeva al bambino di scrivere in corsivo, il più velocemente possibile, i numeri (in lettera) in ordine crescente, per un minuto.

Nei test A ed F gli alunni devono copiare in corsivo la frase italiana: “L'elefante vide benissimo Quel topo Che rubava Qualche pezzo di formaggio”. Nel test A il bambino ha dovuto scrivere in maniera più precisa possibile, mentre nel compito F il più velocemente possibile. Anche in questo caso, i dati sono stati acquisiti tramite una tavoletta digitale commerciale (Wacom, Inc., Vancouver, WA, modello Intuos 2.0), sulla base delle modalità e degli strumenti descritti nel capitolo 2.

La sonificazione del suono è stata generata utilizzando una modulazione di frequenza; la gamma di frequenze è stata ottenuta sulla base della seguente equazione:

$$\text{Frequenza} = \text{velocità curvilinea} * 30 + 200 \quad (4.4)$$

E' stata moltiplicata la velocità curvilinea per un fattore 30 e sommato un numero pari a 200 per creare una gamma di possibili frequenze comprese tra 200 Hz e 2200 Hz. Per ciascun valore di velocità istantanea, è stata creata un'onda sinusoidale con frequenza ricavata dall'Equazione 4.4, con una durata corrispondente a un singolo intervallo di campionamento della grafia (5ms); in questo modo è stata prodotta una sequenza di suoni, variabili in conformità al profilo di velocità, tra 200 Hz (relativa alla velocità nulla) e 2200 Hz (che rappresenta la velocità massima). Così, un suono ad alta frequenza corrisponde a una maggiore velocità, mentre un suono a frequenza bassa rappresenta una velocità scrittura a mano più bassa.

Per valutare la differenziazione della grafia mediante il metodo di sonificazione proposto, è stato chiesto a un gruppo di 13 volontari adulti (7 femmine e 6 maschi, età media 30.2 anni) di ascoltare, per ogni bambino e per ogni prova i due suoni corrispondenti alla scrittura prima e dopo il trattamento.

La coppia dei due suoni è stata fatta ascoltare ai valutatori casualmente (prima/dopo o dopo/prima del trattamento) e il suono poteva anche essere lo stesso. Ogni suono aveva la stessa durata totale della corrispondente traccia scritta.

Ai valutatori non fu fatta vedere la traccia scritta; inoltre, gli stessi non erano a conoscenza del progetto e nessuno di loro era portatore di handicap uditivi. I partecipanti dovevano valutare il suono identificando quale dei due suoni sembrava loro più armonioso.

E' stato detto loro che:

- i suoni erano associati alla velocità di scrittura quindi velocità elevate e tasso regolare sono considerati indici di una buona scrittura;
- i silenzi corrispondono alle alzate di penna.

Il loro compito era quello di dire se era presente una differenza tra i due suoni ascoltati (e quali sembravano più o meno fluenti); hanno potuto esprimere solo quattro tipi di giudizio:

più fluente, meno fluente, uguali e non.

4.3 Risultati

Più della metà dei suoni sono stati ben associati, cioè i suoni post riabilitazione sono stati valutati più fluenti:

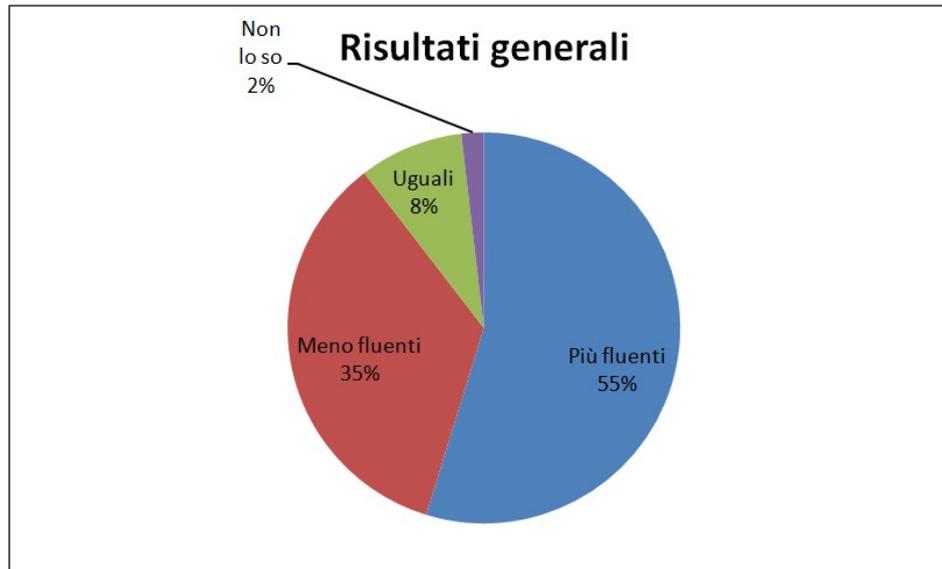


Figura 35: Risultati associazione suoni post riabilitazione.

La Figura 35 mostra che il 55% dei suoni è stato ben associato, cioè è stata riconosciuta la scrittura maggiormente fluente, il 35% dei suoni è stato associato alla scrittura meno fluente e il 10% dei partecipanti o non sapeva dire perché i suoni fossero diversi o non ha notato differenze.

I bambini disgrafici analizzati sono in totale 10 e per ognuno di essi sono state analizzate 5 coppie di scritture, una pre riabilitazione ed una post riabilitazione, per un totale di 100 suoni. La coppia di suoni pre e post riabilitazione da valutare si riferisce alla stessa identica scrittura.

I risultati dimostrano che scritture nettamente diverse (una parecchio migliore dell'altra) sono molto riconoscibili; ad esempio, nel test del bambino 10 (Figura 36), il 68% dei suoni (Figura 37) è stato correttamente identificato come più fluente; invece, scritture simili (nessuna delle due nettamente migliore dell'altra) sono maggiormente riconoscibili solo negli ultimi test eseguiti dal soggetto, quando evidentemente il partecipante ha acquisito una certa padronanza del metodo. Questi risultati evidenziano che scritture molto illeggibili sono discriminate da quelle molto leggibili, tuttavia le scritture con lievi differenze non sono ben discriminate.

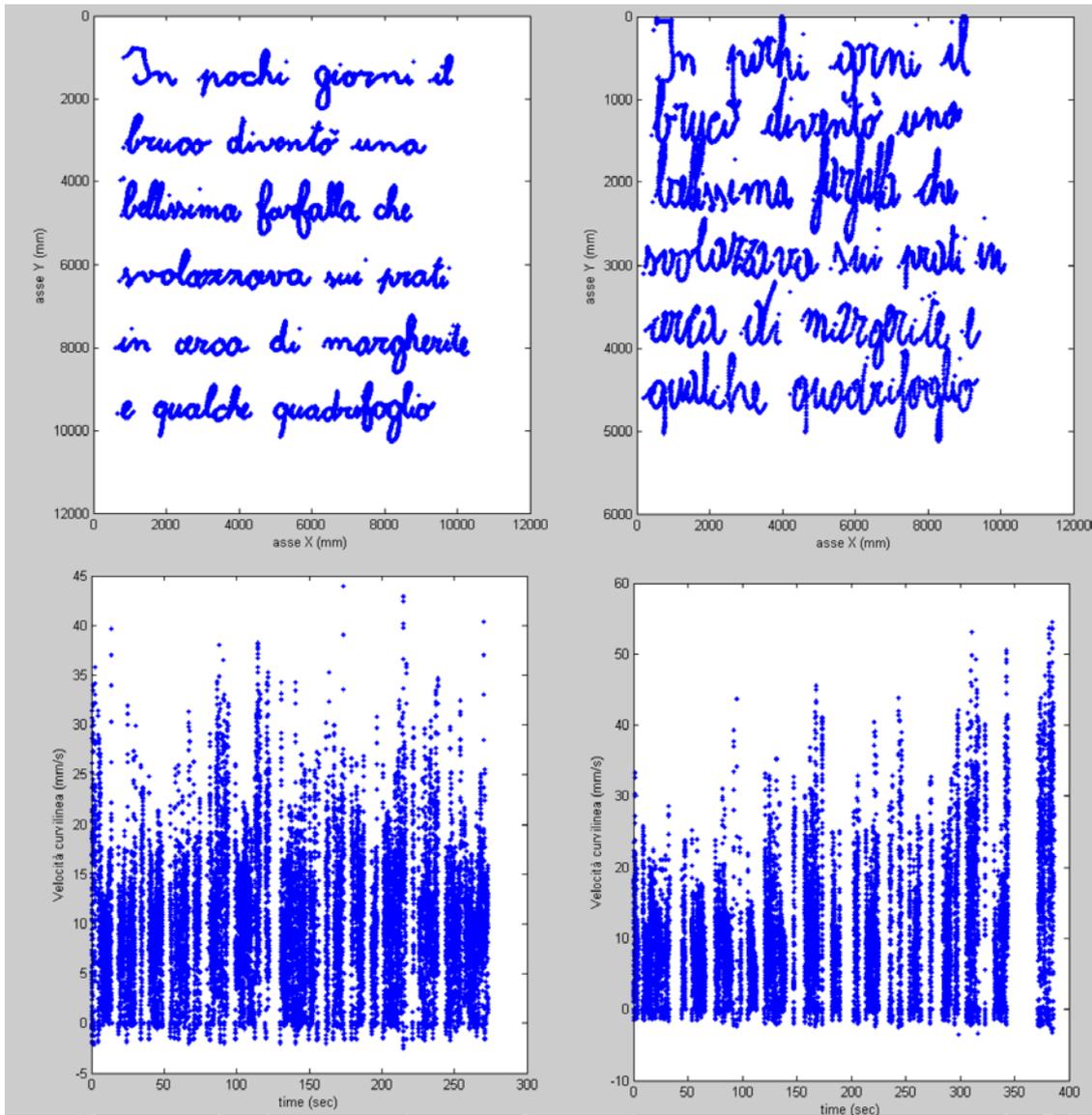


Figura 36: confronto tra scrittura post e pre riabilitazione del bambino 10 e relative velocità.

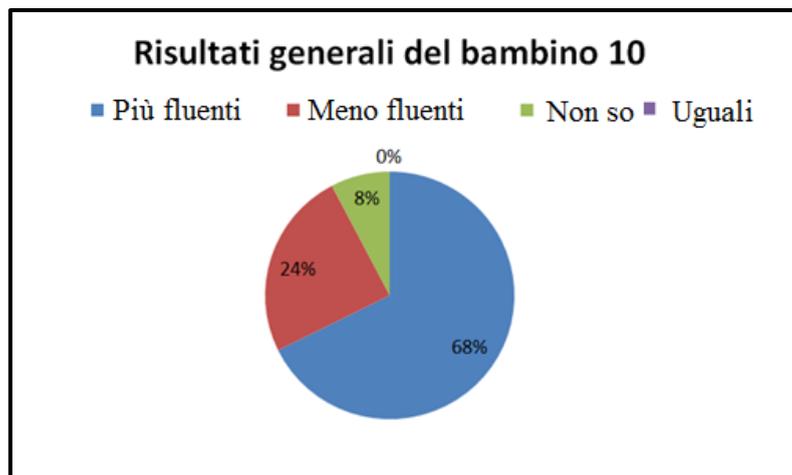


Figura 37: % di corretto riconoscimento dei suoni associati alla riabilitazione pre o post in tutti i test eseguiti.

La Figura 38 mostra un esempio di produzione scritta nel Test UNO con il corrispondente profilo alla velocità curvilinea. Il test A è il più riconosciuto; infatti, il 62% dei suoni è stato correttamente associato alla riabilitazione pre o post (Figura 39), mentre la prova NUM, con il 47% di suoni correttamente associati (Figura 40) risulta essere la meno riconosciuta.

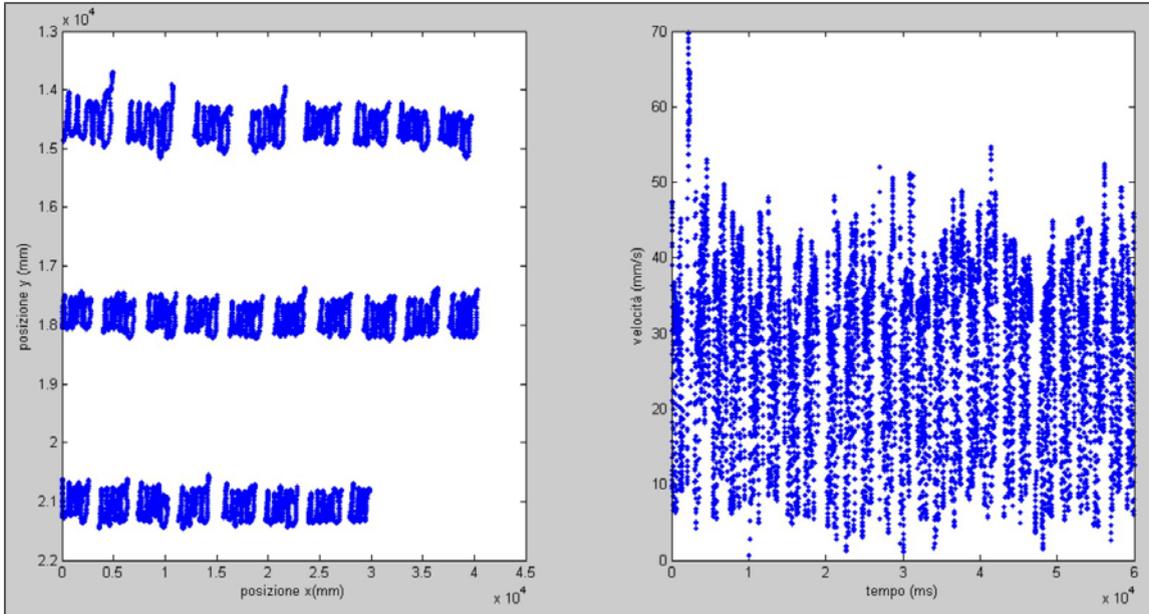


Figura 38: Rappresentazione della traccia scritta completa e del relativo grafico del profilo di velocità.

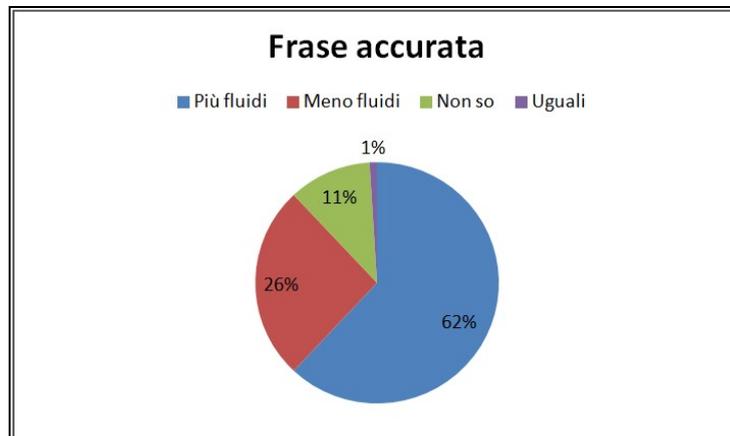


Figura 39: % di corretto riconoscimento del suono associato alla riabilitazione pre o post nel test A (Frase Accurata).

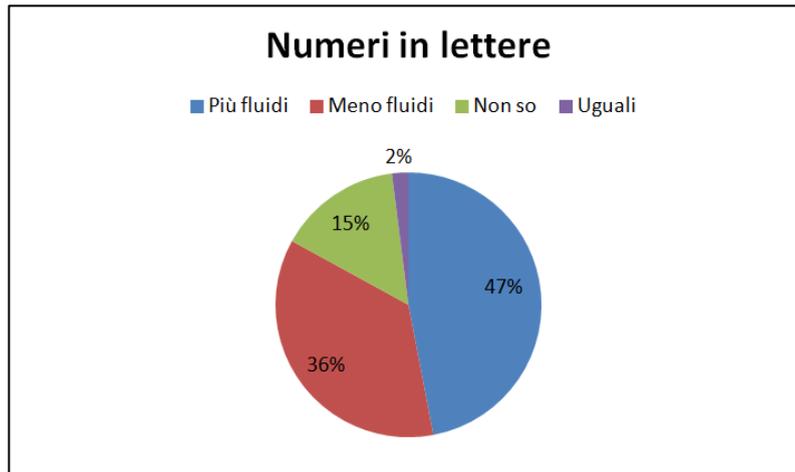


Figura 40: % di corretto riconoscimento del suono associato alla riabilitazione pre o post nel test NUM (Numeri in lettere).

Le altre prove hanno evidenziato una percentuale di associazione maggiore del 50%, in particolare il compito F presenta il 60% di successo, il test LE 53% e il test UNO 52%.

I risultati hanno dimostrato chiaramente che, in alcuni test, la differenza prima e dopo la riabilitazione è ben riconoscibile, a dimostrazione che i suoni derivati dagli scritti meno leggibili sono discriminati da quelli leggibili; tuttavia, gli scritti con lievi differenze non sono ancora ben discriminati.

Principale limitazione del progetto di ricerca del presente studio riguarda il piccolo campione eterogeneo di soggetti.

4.4 Conclusioni

Lo scopo di questo studio è stato quello di studiare come tradurre caratteristiche dinamiche della scrittura a mano in suoni e se questi suoni possono essere utilizzati per identificare diversi tipi di scrittura. Il suono potrebbe essere impiegato per migliorare la diagnosi di problemi grafo-motorie, come disgrafia.

I risultati hanno mostrato che i suoni sono in grado di fornire informazioni sulla scrittura e di discriminare una scrittura fluida da una non fluida, fornendo certamente un contributo alla diagnosi di disgrafia, soprattutto nei casi dubbi. Inoltre, la sonificazione potrebbe essere uno strumento molto utile per valutare i progressi effettuati dal soggetto dopo aver seguito un percorso riabilitazione da disgrafia.

5 - Analisi cinematografica della scrittura nei soggetti affetti da morbo di Parkinson

(articolo accettato per la presentazione al Convegno Internazionale IGS 2017 e per la pubblicazione nei relativi atti [D])

5.1 La malattia di Parkinson

La malattia di Parkinson (PD) è una malattia neurodegenerativa complessa che colpisce gran parte della popolazione mondiale, con tassi di prevalenza attuali, che vanno da 10 a 800 persone ogni 100.000 [104] [105]. I disturbi del controllo motorio nella malattia di Parkinson, caratterizzati da tremore, rigidità, lentezza dei movimenti (bradicinesia) e perdita dei riflessi posturali a riposo, comportano l'elaborazione della pianificazione motoria, della programmazione motoria, del sequenziamento motorio, dell'iniziazione ed esecuzione del movimento [106].

Tali effetti sono il risultato dell'inclusione di agglomerati proteici noti con il nome di *corpi di Lewy*. La degenerazione neuronale conseguente colpisce in una prima fase il sistema nervoso autonomo periferico, il sistema olfattivo e il nucleo motore dorsale del nervo vago, estendendosi poi sequenzialmente al tronco cerebrale superiore e agli emisferi cerebrali. I sintomi dopaminergici, quelli definiti come sintomi cardinali, sono preceduti quindi dall'esordio di altri disturbi, come la stipsi, l'anosmia (perdita della capacità di percepire gli odori), il disturbo comportamentale nel sonno REM.

Nella maggior parte dei casi, circa l'85-90 %, i fattori responsabili della malattia non sono noti. Si ritiene che l'insorgere della malattia nei soggetti in età superiore ai 50 anni sia dovuto a cause ambientali, mentre nei soggetti più giovani vengono ritenuti rilevanti i fattori genetici.

Recentemente, l'analisi digitale della scrittura è diventata uno strumento clinico per lo studio della disfunzione motoria dell'arto superiore in pazienti con tremore essenziale, morbo di Parkinson e disturbi correlati [107]. Il test di scrittura più usato per la valutazione del tremore è la spirale euclidea che è stato ampiamente utilizzato per valutare le prestazioni motorie in vari disturbi del movimento compreso il morbo di Parkinson [108]. Poiché le caratteristiche del disegno a spirale cambiano dall'inizio alla fine del compito, sono stati analizzati alcuni esercizi di scrittura, in cui le caratteristiche dei movimenti della mano sono generalmente più stabili durante la scrittura di parole. Alcune caratteristiche cinematiche (come velocità e accelerazione) estratte dalla scrittura di una frase hanno mostrato differenze significative tra pazienti parkinsoniani e soggetti normali nei test di scrittura [109], mentre la pressione esercitata sulla superficie durante l'esecuzione dei vari test, così come la velocità dello stroke e la durata, ha mostrato cambiamenti significativi nel test della spirale [108] e nel test di copia di un indirizzo [110].

La progressiva diminuzione della dimensione delle lettere (micrografia), che colpisce il 60% dei pazienti con malattia di Parkinson, rappresenta un'altra caratteristica di questa patologia utilizzata per differenziare soggetti con PD da soggetti di controllo [36]. Tuttavia, lo spettro delle

anomalie della grafia osservate in PD è più complesso rispetto alla semplice riduzione della dimensione delle lettere e comprende deficit che coinvolgono disfunzioni di altri componenti quali forza, velocità o fluidità di scrittura [111].

In un precedente lavoro [112] in cui i soggetti PD e controllo hanno effettuato semplici figure geometriche (quadrato, triangolo, etc), accanto al test di spirale, sono state esaminate alcune caratteristiche cinematiche (ad esempio velocità, durata, curvatura, frequenze dominanti) sia su tutto l'esercizio che sul singolo stroke. Nel test spirale di Archimede, molti parametri (numero di colpi, numero di tratti ascendenti/discendenti, etc) hanno mostrato differenze significative tra i due gruppi, mentre nelle altre prove le differenze sono meno evidenti e solo a volte significative. Al fine di verificare se alcuni test grafici, più semplici delle figure geometriche, possano consentire una facile identificazione ed analisi del tremore sovrapposto ad attività motorie volontarie, in questo studio, oltre al test spirale, i pazienti PD ed i soggetti di controllo furono sottoposti a due prove elementari (rette orizzontali e linee curvilinee realizzate con una serie di cerchi sovrapposti). I parametri cinematici calcolati sulle registrazioni sono stati esaminati per stabilire quali test e quali parametri fossero più sensibili al tremore ed appropriati per l'identificazione della patologia.

5.1.1 Parkinsonismi

Sotto il nome di parkinsonismi vengono citati il parkinsonismo atipico, il parkinsonismo secondario, il tremore essenziale, la malattia di Alzheimer con parkinsonismo. Il parkinsonismo atipico presenta rigidità e bradicinesia, ma si distingue dal morbo di Parkinson per assenza di tremore a riposo, mancanza di asimmetria e scarsa risposta alla levodopa. In questo caso la degenerazione nervosa avviene in assenza dei corpi di Lewy. I parkinsonismi secondari, manifestano gli stessi sintomi ma possono essere correlati all'uso di farmaci che bloccano la dopamina, a tumori, infezioni o esposizione a tossine come il monossido di carbonio. Per quanto riguarda il tremore essenziale, il disturbo del movimento più diffuso, esso si manifesta tipicamente in forma simmetrica, con marcata componente cinetica, ad una frequenza più alta, tipicamente di 8-10 Hz.

5.1.2 La bradicinesia

Il sintomo, associabile sia al Parkinson che agli altri disturbi del gruppo dei parkinsonismi, consiste nella bassa velocità di adempimento dei movimenti ed è strettamente collegato al livello di carenza di dopamina. La difficoltà per i pazienti non risulta solo nell'esecuzione dell'atto motorio, ma anche nella sua pianificazione ed iniziazione. Secondo alcuni studi [113], il task di esecuzione del metodo motorio resterebbe intatto nel paziente ma egli avrebbe difficoltà ad accedervi senza un trigger esterno, come ad esempio un forte rumore o un segnale visivo.

5.1.3 Il tremore

Assieme alla bradicinesia, il tremore rappresenta uno dei sintomi principali della malattia di Parkinson e dei parkinsonismi: si tratta del disturbo più comune del moto e consiste in movimenti ripetitivi e stereotipati. Esso è dovuto a contrazioni involontarie, ritmiche, oscillatorie di muscoli agonisti e antagonisti. La classificazione può essere fatta in base all'eziologia, alla distribuzione, alla frequenza, alla disfunzione neurologica correlata, e alle condizioni in cui si verifica. Ad esempio per quest'ultimo caso si usa distinguere fra tremore a riposo e tremore

d'azione, che implica cioè la contrazione muscolare volontaria e racchiude altri sotto-tipi di tremore: tremore cinetico, tremore posturale e tremore per task specifici. Il tremore parkinsoniano è tipicamente considerato un tremore unilaterale a riposo, e diminuisce la sua intensità con il movimento [114]. Nei soggetti normali si può manifestare il cosiddetto tremore fisiologico di cui si riassumono le caratteristiche:

- intensità lieve
- alta frequenza (8-12 Hz per i giovani, 6-7 Hz nei soggetti di età superiore a 60 anni),
- posturale o d'azione,
- apprezzabile solo con un accelerometro,
- privo di significato clinico.

Talvolta esso può presentarsi in forma accentuata specialmente associato a ansia, fatica, uso di farmaci o tossine quali ad esempio l'alcool.

Le cause alla base delle varie manifestazioni non sono completamente note e direttamente associabili alle disfunzioni di cui sopra, ma vengono generalmente riassunte in tre gruppi principali: oscillazioni meccaniche, riflesse e centrali. Il termine meccanico è frequentemente associato al tremore fisiologico e consiste nella modellizzazione del sistema di muscoli, tendini ed articolazioni con l'oscillatore armonico di frequenza ω , realizzato da un sistema di masse e molle e governato dall'equazione:

$$\frac{d^2x}{dt^2} = -\omega^2 x \quad (5.1)$$

Se le oscillazioni riflesse consistono nella propagazione del disturbo dal sistema periferico alla spina dorsale ed ai segmenti sovra-spinali, la tesi dell'oscillatore centrale prevede una attività neuronale ritmica generata ai livelli di corteccia cerebrale, nuclei del tronco encefalico, cervelletto e gangli basali, oltretutto rilevabile tramite EEG. Nella distinzione fra la frequenza caratteristica delle varie forme di tremore, va sottolineato che secondo [115] gli studi recenti offrono opinioni piuttosto discordanti (Figura 41) Nel presente lavoro si farà fede alla corrente di pensiero che limita la banda del tremore tipicamente Parkinsoniano fra i 4 e i 6 Hz [113].

Work	Physiological Tremor	Parkinson's Disease	Essential Tremor
Wyne ¹	7-12 Hz	4-6 Hz	4-12 Hz
Anouti and Koller ²	8-12 Hz	4-8 Hz	4-8 Hz
Bhidayasiri ¹⁶		3-6 Hz	5-12 Hz
Cichaczewski and Cunha ²²	8-12 Hz	3-6 Hz	4-10 Hz
Charles et al. ²³	8-12 Hz	4-6 Hz	4-11 Hz
Mattos ²⁴	8-13 Hz	3-6 Hz	5-7 Hz
Rao et al. ¹³	8-12 Hz	4-6 Hz	
Bain ²⁵	7-12 Hz	3-10 Hz	4-12 Hz
Louis ⁷			4-12 Hz
Habib-ur-Rehman ⁴	8-12 Hz		4-8 Hz
Köster et al. ²⁶	8-12 Hz		
Gonçalves et al. ²⁷			4-8 Hz
Murray ²⁸			6-12 Hz
Benito-León and Louis ²⁰			4-12 Hz
Bhomrah et al. ²⁹			4-12 Hz (hands); 2-8 Hz (head)
Taylor and Counsell ³⁰		3-5 Hz	
Kraus et al. ¹⁵		3-6 Hz	
Klockgether ³¹		4-7 Hz	
Smaga ³²	8-12 Hz	4-6 Hz	4-10 Hz
Hern ³³	6-12 Hz	4-5 Hz	

Note: Blank cells indicate that the values were not reported.

Figura 41: Frequenze del tremore in letteratura.

5.2 Diagnosi del Parkinson: stato dell'arte

La diagnosi del Parkinson avveniva originariamente quando si osservavano almeno due dei tre sintomi principali (tremore, bradicinesia, rigidità). È stato dimostrato che un'analisi di questo tipo produce una percentuale d'errore del 24%. Successivamente si è associata alla malattia l'osservazione di parkinsonismi accompagnati da tremore a riposo, asimmetria e buona risposta alla levodopa, un profarmaco della dopamina. Questi criteri portano ad una conferma neuropatologica del 99% dei casi. Test neurofisiologici, stimolazione nervosa, e farmacologici, specialmente il test dell'apomorfina (dopamino-agonista), offrono indicazioni indirette su alcune delle componenti della malattia; componenti che peraltro risultano spesso sovrapposte fra malattia di Parkinson e le varie forme di parkinsonismi.

Attualmente non esiste una terapia in grado di modificare il decorso della malattia e pertanto non sono comunemente utilizzate le tecniche di diagnosi più avanzate e che permettono una valutazione precoce. Fra queste si segnalano in particolare la tomografia ad emissione di positroni (PET) e la tomografia a emissione di singolo fotone (SPECT), meno costosa e più facile da utilizzare, che offrono immagini del sistema dopaminergico cerebrale. Un tracciante, la fluorodopa viene captato dalle terminazioni dopaminergiche della substantia nigra e metabolizzata a dopamina. In tal modo la quantità di tracciante osservato riflette l'attività dello striato ed è in grado di fornire informazioni sulla malattia anche in una fase anteriore alle manifestazioni cliniche, che corrispondono ad una captazione del tracciante circa del 30 - 50 %, ben al di sopra della sensibilità dello strumento [116]. Circoscritti all'ambito di ricerca sono anche i test genetici con i quali si vuole individuare la probabilità dell'insorgere della malattia per soggetti a rischio.

5.3 Misura e quantificazione del tremore

Stando a [115], i metodi principalmente utilizzati per la misura del tremore sono l'accelerometria, l'elettromiografia (EMG) e la spirografia. Nel primo caso degli accelerometri sono costituiti da sensori in grado di misurare l'accelerazione lineare nelle tre direzioni ortogonali come conseguenza di una forza agente su un corpo, come la forza di gravità, o la forza muscolare ed in particolar modo quella alla base del tremore.

L'elettromiografia si basa sull'utilizzo di elettrodi superficiali posti solitamente sui muscoli dell'avambraccio che sono in grado di registrare l'attività muscolare e sono utilizzati in ambito clinico per diagnosticare diversi disturbi di carattere neuromuscolare.

La realizzazione grafica di una spirale, detta spirale di Archimede, permette la valutazione del tremore in termini di accuratezza del disegno realizzato entro contorni prestabiliti.

Altri studi sono stati effettuati con l'intento di mettere in relazione i gradi di libertà coinvolti nel gesto con la difficoltà del movimento e di conseguenza con gli effetti deterioranti della malattia sulla grafia. È stato dimostrato che realizzazioni grafiche che richiedono la coordinazione di dita e polsi evidenziano i deficit motori nei soggetti affetti da morbo di Parkinson, specialmente nei casi in cui viene richiesta una rapidità di esecuzione massimale [117].

Visto il carattere oscillatorio del tremore, molto spesso le metodologie di elaborazione prevedono la valutazione dei parametri spettrali delle serie di dati temporali basati su FFT, Fast Fourier Transform, con l'intento di osservare sia la frequenza del tremore, sia la forma del picco corrispondente in un grafico di densità spettrale di potenza.

In alcune applicazioni trovano spazio algoritmi più sofisticati come il WFLC, Weighted Fourier Linear Combiner, o il BMFLC, Band-limited Multiple Fourier Linear Combiner. Oltre che per l'identificazione del tremore, essi sono largamente utilizzati per la possibilità di stimarne frequenza dominante e ampiezza, con lo scopo di eseguire una compensazione anche in applicazioni real-time [118].

5.4 I test in letteratura

Ad oggi non c'è una metodologia univoca per la misura del tremore, nè test o parametri migliori di altri. In passato si eseguivano le valutazioni mediante l'osservazione; in seguito si è adottato l'uso di accelerometri ed elettrodi per misure elettromiografiche, infine ha preso sempre più piede l'uso della tavoletta grafica. Le tavolette hanno permesso di sottoporre i soggetti a test grafici.

Uno dei test ricorrenti in letteratura è quello della Spirale di Archimede (Figura 42). Dagli studi di tale test, oltre che il picco di frequenza principale, sono state tratte considerazioni sull'asse di direzione del tremore.

Non vi è una modalità obbligatoria per effettuare tale test, bisognerebbe quindi tener in considerazione, nel confrontare i risultati, la modalità con cui il test viene eseguito [116]; oppure effettuare diverse misure una per ogni modalità (disegno rapido e/o accurato, braccio appoggiato o no, disegno copiato o ricalcato etc..).

Un altro test interessante, suggerito da Dounskaia ed altri [117], riguarda l'analisi di movimenti ciclici del polso e delle dita, cioè disegni ripetuti più volte uno sopra l'altro. In questo caso l'interesse è riposto sugli effetti che può avere la non coordinazione delle diverse articolazioni

che entrano in gioco nel gesto della scrittura sulla grafia stessa. Per la prova è necessario far effettuare ai soggetti un cerchio e due linee

Dai loro studi emerge che, aumentando la frequenza dei cicli, il cerchio tende a diventare un ovale inclinato verso destra (sinistra per chi disegna con la mano sinistra), questa è maggiore nei parkinsoniani (Figura 43).

Lo stesso accade nelle linee (Figura 44) per il modello di coordinamento non equivalente; il che dimostra una difficoltà nel coordinamento fra polso e dita in questi ultimi.

Gli studi più recenti pubblicati sul Parkinson hanno riguardato l'andatura valutando anche l'efficacia di trattamenti riabilitativi e acquisendo i parametri legati alla velocità di camminamento, alla cadenza, alla lunghezza e larghezza del passo, prima e dopo il trattamento riabilitativo.

Il test di scrittura più popolare per la valutazione del tremore è la spirale euclidea; il disegno della spirale è stato molto utilizzato per valutare la performance motoria in vari disordini del movimento incluso il Parkinson [108].

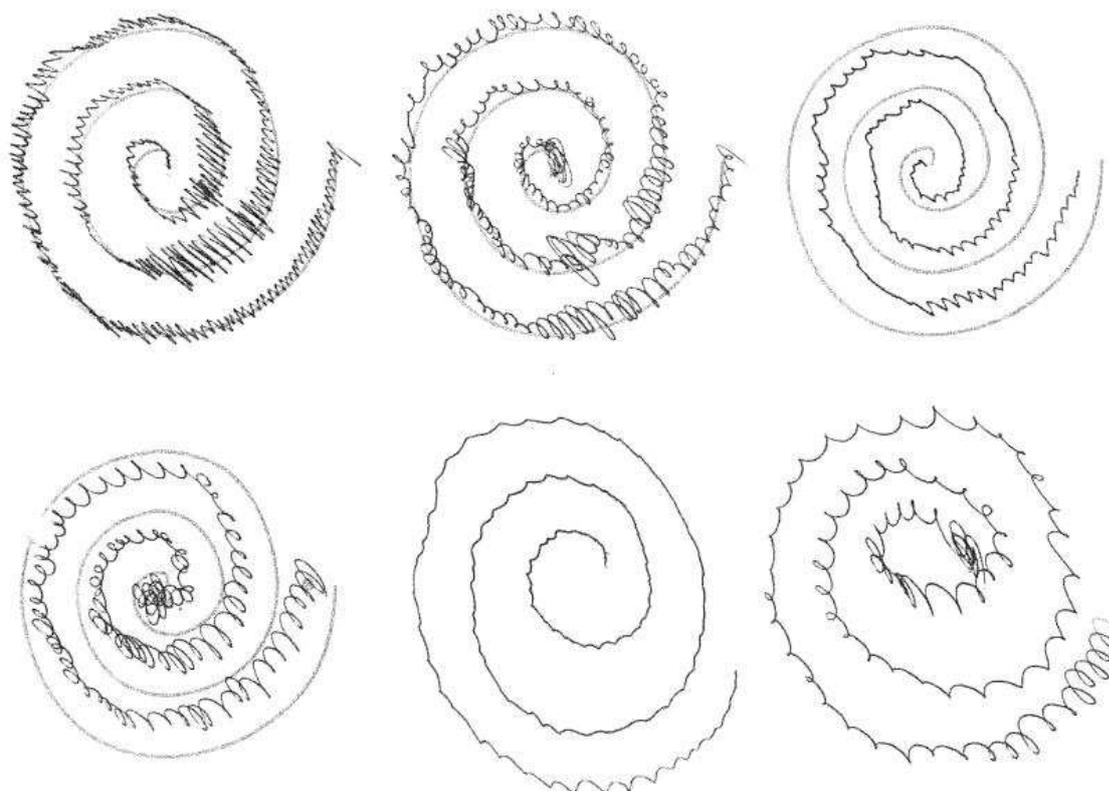


Figura 42: Diversi modi di disegnare la spirale. Partendo da sinistra: su linea pre-tracciata con mano supportata e non, fra le due linee con mano supportata e non, a mano libera con mano supportata e non.

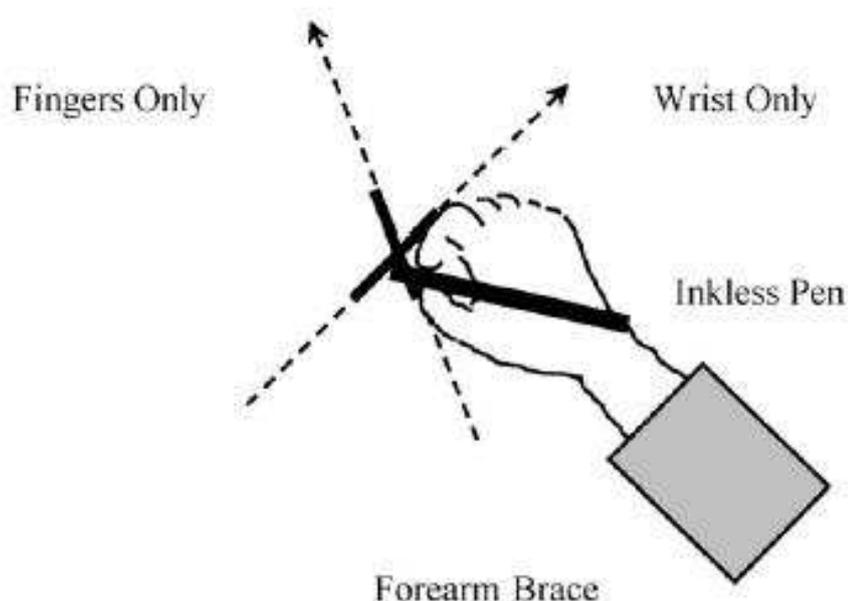


Figura 43: Modello di coordinamento equivalente (simultanea flessione ed estensione del polso e delle dita) ed il modello di coordinamento non equivalente (flessione del polso con estensione delle dita e viceversa).

I test utilizzati in [108] sono spirale, lettera *l*, gruppo di lettere *le*, gruppo di lettere *les*, la scrittura di 3 parole diverse (1 per ogni test), scrittura di una frase. Quello più promettente è relativo alla scrittura della frase. Inoltre, per il test spirale (l'unico in comune) non sono state trovate differenze significative per le caratteristiche cinematiche, ma solo per la pressione della scrittura.

La pressione esercitata sulla superficie durante la scrittura gioca anche un ruolo significativo. Inoltre, in tale studio è stato mostrato che le caratteristiche cinematiche e pressorie nella scrittura possono essere usate per la diagnosi differenziale del Parkinson.

Anche in [119] viene riportato che l'analisi della spirale rappresenta un metodo valido per quantificare il tremore nella coorte di pazienti con tremore essenziale, basato sulla valutazione delle componenti ritmiche del tremore dentro la spirale. Le modifiche più rilevanti per il gruppo sottoposto a riabilitazione della scrittura erano una maggiore ampiezza della prima lettera nella frase, una maggiore superficie utilizzata per la firma ed un maggiore margine superiore. Due caratteristiche osservate nel gruppo di parkinsoniani erano la progressiva decrescita delle dimensioni della lettera e la direzione ascendente della frase rispetto all'orizzontale.

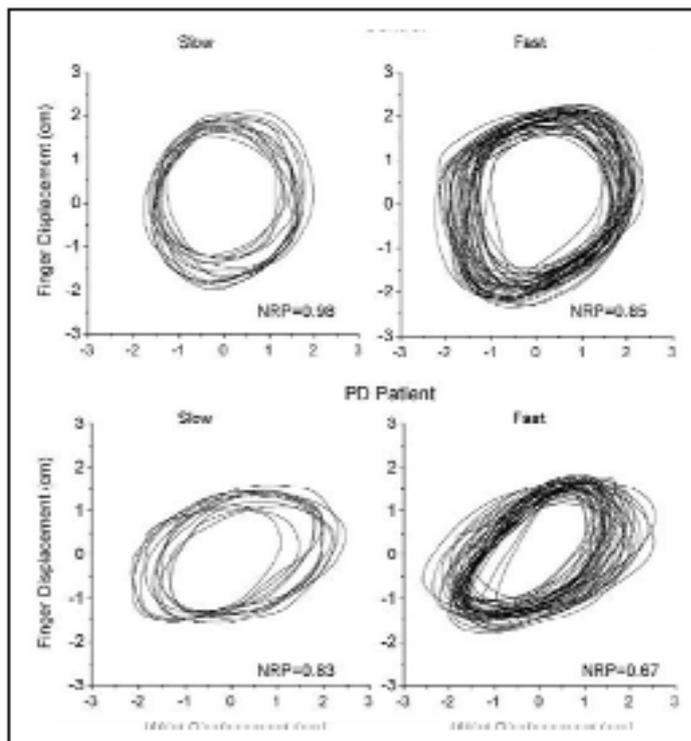


Figura 44: Test del cerchio: proposto da Dounskaia et al [6], effettuato a due diversi livelli di velocità da elementi di controllo e parkinsoniani.

5.5 Materiali e metodi

E' stata esaminata la scrittura di 22 pazienti con malattia di Parkinson (di età compresa tra 55-85, stadiazione della malattia 1 o 2 della scala di Hoehn & Yahr, insorgenza della malattia entro 4 anni prima della registrazione) e 17 soggetti di controllo (55-78) Tutti i soggetti erano destrimani e senza altre patologie che influenzano i movimenti/disegni di scrittura. Tutti i soggetti, dopo aver fornito il consenso informato, hanno eseguito tre diversi esercizi grafici che dovevano essere disegnati il più velocemente possibile: cinque linee rette orizzontali (HSL), Spirale di Archimede (AS) e cerchi sovrapposti della durata di 15 secondi, senza sollevamenti di penna dal foglio (C).

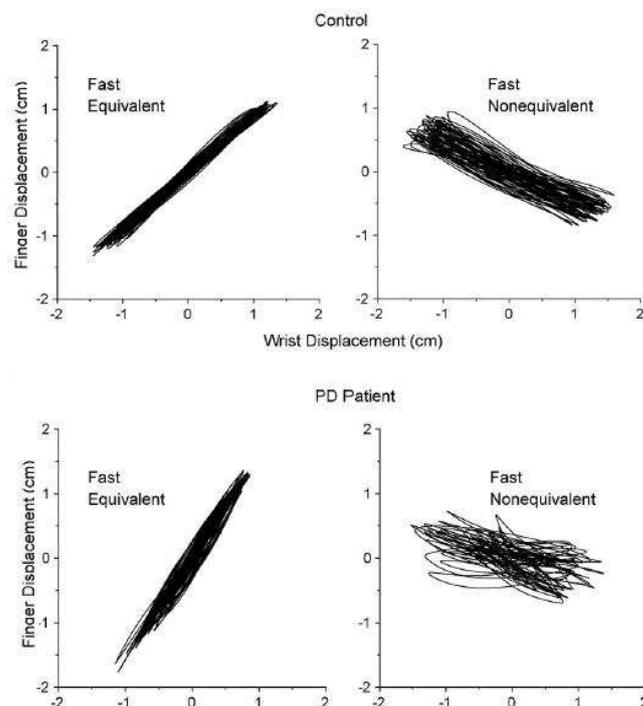


Figura 45: Linee con modello di coordinamento equivalente e non nella modalità veloce effettuate da controlli e pazienti.

I dati sono stati acquisiti per mezzo di una tavoletta grafica commerciale (Wacom, Inc., Vancouver, WA, modello Intuos 3,0), utilizzando una penna a inchiostro. Lo spostamento della penna è stato campionato a 200Hz e rilevato con una risoluzione spaziale di 0,02 mm. Le posizioni orizzontali e verticali della penna sono state filtrate separatamente per mezzo di un filtro passa-basso del secondo ordine di Butterworth (10Hz frequenza di taglio) e il segnale di movimento curvilineo è stato derivato insieme alla velocità corrispondente. Per ogni test, sono state calcolate e analizzate per l'intera durata nonché su ogni componente (cioè il tratto scritto tra due alzate di penna consecutive) e su ogni stroke (cioè il tratto delimitato da punti di minimo della velocità curvilinea), con idoneo programma ad hoc di proprietà scritto in MATLAB (Accardo et al, 2007), le seguenti caratteristiche di grafia:

- numero di stroke al secondo (# stroke/s),
- numero di stroke per cm (# stroke/cm),
- lunghezza media dello stroke (L)
- durata (D),
- rapporto percentuale tra la durata di penna giù su durata complessiva (Dpg/DT),
- velocità curvilinea media (V_c)
- accelerazione verticale media (A_y) su tutta la traccia,
- velocità di picco orizzontale, verticale e curvilinea (V_{px} , V_{py} , V_{pc}) degli strokes.

In tale lavoro di ricerca, è stata stimata la frequenza dominante relativa al tremore (nell'intervallo 3.2-8.0Hz) e il rapporto tra la densità spettrale di potenza (PSD) nell'intervallo 3.2 - 8.0Hz (PSDH) e la PSD nella larghezza di banda totale, 0.4-8.0Hz (PSDt), sulla velocità media orizzontale (V_x), verticale (V_y) e curvilinea nonché sull'accelerazione media verticale dell'intera traccia.

I valori dei parametri sono stati confrontati tra i due gruppi al fine di individuare quali test e quali parametri fossero in grado di identificare meglio il tremore e, pertanto, possano essere utilizzati per l'identificazione della patologia. A causa del numero limitato di soggetti considerati, per ciascuna prova e per ogni parametro è stato utilizzato un test statistico non parametrico (Test di Wilcoxon della somma dei ranghi) per confrontare i valori nei due gruppi. Al fine di individuare quali test consentono di differenziare la scrittura di un soggetto parkinsoniano da quella di un soggetto normale, sono state analizzate le acquisizioni di un gruppo di soggetti parkinsoniani e di un gruppo di soggetti di controllo.

5.5.1 Test utilizzati

Ogni soggetto è stato sottoposto ai seguenti test grafici:

- tracciare cinque linee rette orizzontali tra coppie di punti prestampate (HSL) (Figura 46)
- disegnare una Spirale di Archimede (AS) restando all'interno di una spirale pretracciata (AS) (Figura 47)
- disegnare cerchi sovrapposti per una durata di 15 secondi, senza sollevamenti di penna dal foglio (C) (Figura 48).

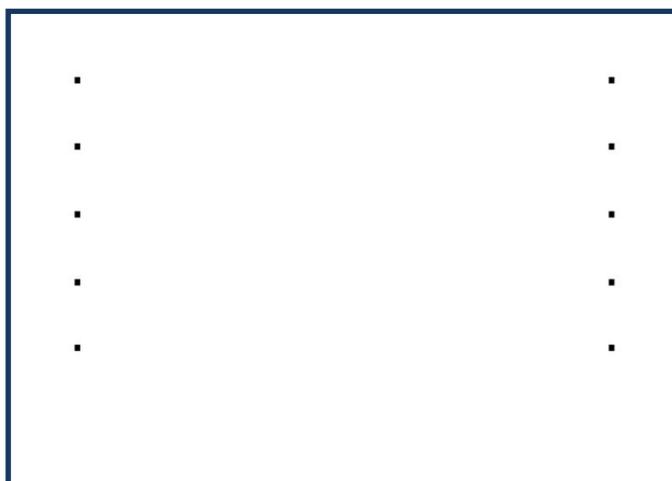


Figura 46: Linee da tracciare tra 5 coppie di punti.

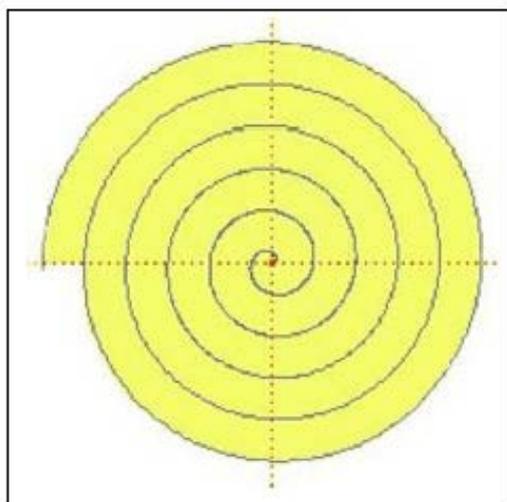


Figura 47: Spirale da tracciare tra le linee.

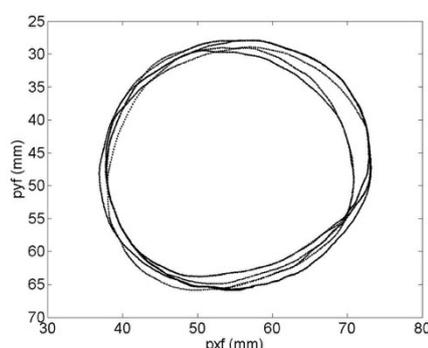


Figura 48: Cerchio.

I soggetti sono stati invitati ad assumere la postura più rilassata e confortevole possibile. Laddove non era richiesta una determinata posizione per il singolo test, è stata permessa l'inclinazione a piacere della tavoletta. I test sono stati svolti in due modalità d'esecuzione: in un primo momento si è cercato di realizzare le figure nella maniera più veloce possibile. Successivamente si è cercato di prediligere l'accuratezza e la precisione del gesto a scapito della velocità d'esecuzione.

5.5.2 Software di analisi

Il programma sviluppato per questo lavoro di tesi è stato realizzato in MATLAB. Innanzitutto è stata predisposta una procedura in grado di leggere in maniera automatica tutti i file .m relativi ai singoli test di ogni paziente. Per ovviare al fatto che alcuni pazienti non hanno svolto certi test, è stato predisposto un foglio di calcolo excel a valori booleani relativi alla coppia (paziente, test) con valore positivo in caso di test effettuato e valore negativo in caso di test assente. Il file *main_IGS.m* all'interno del quale verranno richiamate tutte le procedure descritte in seguito, analizza per prima cosa il contenuto di tale tabella per effettuare o meno l'elaborazione successiva. L'analisi è quindi condotta in maniera analoga sugli esercizi nella loro totalità e sulle singole porzioni, che nel caso dei test 'righe' sono rappresentate dalle componenti, negli altri test sono rappresentati dai tratti distintamente ascendenti e discendenti.

La funzione *elaborazione_tremore2017.m* permette di estrarre i parametri ed eventualmente di visualizzare i grafici di tutti i parametri per ciascun test eseguito dal soggetto.

La procedura *elaborazione_tremore2017.m*, serve a calcolare i parametri per stroke, componenti, parole, tratti ascendenti e discendenti in tutti i test di scrittura e visualizza i grafici a essi relativi.

Poiché ciascun test è realizzato mediante la sequenza di tratti scritti separati da staccate, la procedura identifica innanzitutto le componenti: se un intervallo temporale tra una traccia e la successiva è maggiore di 30 ms, questo rappresenta una staccata tra due componenti distinte. A questo punto si hanno gli estremi iniziale e finale di ciascuna componente che sono salvati rispettivamente nelle variabili *inicomp* e *finecomp*.

Segue un loop principale in cui sono calcolati:

- il numero totale delle componenti di un test che viene salvato nella variabile *nrcomp*;

e quindi per ciascuna componente:

- la posizione, la velocità e l'accelerazione lungo X, Y e la curva. Dapprima le posizioni X e Y sono filtrate con un filtro passa-basso di Butterworth del secondo ordine (per le buone prestazioni riscontrate in letteratura) con una frequenza di taglio pari a 20Hz. Per determinare il percorso lungo la curva si è deciso di non interpolare le posizioni lungo X e lungo Y separatamente, ma si è calcolato lo spostamento complessivo, sommando la posizione in tutti gli istanti all'interno degli estremi di ciascuna componente, che è poi stato filtrato. Si calcolano le velocità e le accelerazioni come derivate rispettivamente del segnale di posizione e di quello di velocità sempre lungo X, Y e la curva. Infine si filtrano utilizzando un filtro passa-basso di Butterworth del secondo ordine con una frequenza di taglio pari a 10 Hz, poiché, nonostante nei bambini sia più adatta una frequenza di 5 Hz, questa comporta una perdita eccessiva di informazione nel segnale di velocità, utilizzato in seguito per individuare i tratti ascendenti e discendenti.

Questi calcoli sono svolti dalla funzione *filtra_deriva.m*, che è richiamata all'interno di *elaborazione_tremore2017.m*. Gli indici di inizio e fine degli stroke, ovvero i punti in cui l'accelerazione curvilinea è nulla, sono salvati nelle variabili *ini_stroke* e *fin_stroke*.

- il numero dei passaggi per lo zero della velocità e dell'accelerazione, zero crossing.
- la curvatura e la velocità angolare in due modalità distinte (richiamando la funzione *curvatura_corretta.m*):

1. Si trova il cerchio osculatore calcolando i coefficienti a, b e c dell'equazione della circonferenza che passa per tre punti del tracciato. Viene risolto un sistema a tre equazioni e tre incognite con il Metodo di Kramer. Vengono create le matrici dei determinanti con tutti i punti del tracciato e quindi si ricavano a, b e c.

Si trova $R = \frac{\sqrt{(a^2+b^2-4c)}}{2}$, imponendo $R=1000$ nel caso in cui il radicando risulti essere un numero negativo. È infine calcolata la curvatura ($kurv0$) come l'inverso del raggio ($1/R$).

2. Alternativamente viene calcolata la curvatura ($kurv1$) attraverso la relazione:

$$k = \frac{\partial\Phi}{\partial s} = \frac{\partial\Phi/\partial t}{\partial s/\partial t} = \frac{\partial\Phi/\partial t}{\sqrt{\left(\frac{\partial x}{\partial t}\right)^2 + \left(\frac{\partial y}{\partial t}\right)^2}} = \frac{\partial\Phi/\partial t}{\sqrt{x'^2+y'^2}} = \frac{x'y''-y'x''}{\sqrt{\left((x'^2+y'^2)^{3/2}\right)}} \quad (5.2)$$

dove:

$$x' = vpxf; y' = vpyf; x'' = apxf; y'' = apyf,$$

e:

$vpxf$ = velocità di picco dello stroke nella direzione orizzontale

$vpyf$ = velocità di picco dello stroke nella direzione verticale,

$apxf$ = accelerazione di picco dello stroke nella direzione orizzontale

$apyf$ = accelerazione di picco dello stroke nella direzione verticale.

- gli indici di inizio e fine dei tratti ascendenti e discendenti, individuati tramite le variazioni di segno della velocità lungo Y: quando questa è negativa il tratto risulta discendente, mentre quando è positiva il tratto risulta ascendente. Gli indici sono inseriti nelle variabili *inizasc*, *fineasc*, *inizdisc*, *finedisc*.

Per ogni tratto ascendente o discendente identificato (sempre all'interno di una componente): valor medio, deviazione standard e valore di picco delle relative velocità lungo X, Y e la curva, i cui valori vengono salvati nei vettori *velo_ca* e *velo_cd*; valore medio e deviazione standard delle relative pressioni e percentuale dei punti in cui la pressione risulta saturata (quando supera il valore massimo pari a 1023), tali valori sono salvati nell'array *press_cad*.

Si distinguono i casi in cui i test sono costituiti da più di una componente dai casi in cui la parola è composta da un'unica componente e quindi coincide con questa.

Nel primo caso, due componenti contigue si considerano facenti parte di una stessa parola se la seguente operazione logica risulta vera:

$$((xmin-disxmax)<1 \ \&\& \ (disxmax-xmax)<12)$$

dove *xmin* è il valore minimo della posizione lungo x (l'estremo sinistro) della componente successiva all'i-esima e *disxmax* è il valore massimo della posizione lungo x (l'estremo destro) dell'i-esima componente. La funzione logica risulta vera nei casi a), b) e c) (Figura 49), cioè se la distanza tra la componente successiva e la precedente è inferiore a 1mm o se la successiva non precede la precedente per più di 12 mm.

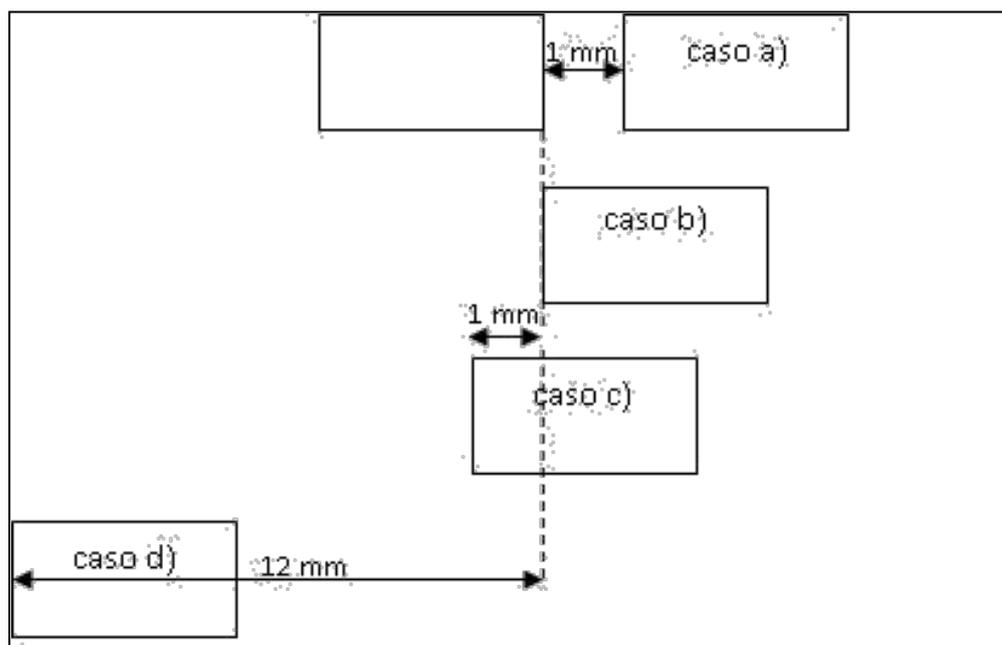


Figura 49: Casi contemplati nel programma per il riconoscimento delle parole.

La figura va interpretata immaginando la componente illustrata nei vari casi (a, b, c, d) posta sullo stesso rigo della prima (il primo rettangolo). Si ricorda che il programma fa il controllo sempre tra le ultime due componenti man mano che scorre nel tempo tutte le componenti del test. Si può evitare il controllo sulle ordinate in quanto i test analizzati non prevedono che vengano scritte in due istanti di tempo successive parole su ordinate distinte e su ascisse che soddisfano i criteri di appartenenza a una medesima parola.

Sempre all'interno del loop principale si ha il salvataggio, all'interno dell'array dati_c, dei parametri calcolati per ciascuna componente individuata nel test cioè: durata; lunghezza lungo X, Y e la curva; media, deviazione standard e valore massimo di velocità e accelerazioni lungo X, Y e la curva; media e deviazione standard delle pressioni, altitudini e azimuth; percentuali dei punti con pressione saturata.

Dopo il loop principale il programma calcola il numero degli stroke e il numero delle parole.

Per ogni stroke vengono salvati in dati_s i seguenti valori: durata; percorso lungo X, Y e la curva; media, deviazione standard e valore massimo di velocità e accelerazioni lungo X, Y e la curva; media e deviazione standard delle pressioni, altitudini e azimuth; percentuali dei punti con pressione saturata.

Per ogni parola, distinguendo sempre i casi in cui questa sia composta da una sola componente oppure da più componenti, sono calcolati e poi salvati in dati_p: durata della traccia (TTpgEP); lunghezza della traccia (SPpgEP); durata totale delle staccate (TTpsEP); percorso delle staccate, considerando quello minimo percorribile in aria (SPpsEP). Nell'array velo_p vengono salvati il valor medio, la deviazione standard e il valore di picco delle velocità di ogni parola lungo X, Y e la curva all'interno; gli stessi

valori vengono distinti all'interno di ogni singola parola per tratti ascendenti e discendenti e in seguito salvati negli array `velo_pa` (per i tratti ascendenti) e `velo_pd` (per i tratti discendenti). Sono inoltre salvati (nell'array `press_pad`) per ogni parola, media e deviazione standard della pressione e la percentuale dei punti in cui essa risulta saturata per tratti ascendenti e discendenti.

Tra parole successive sono calcolati la durata (TTpsTP) e il percorso delle staccate (SPpsTP) e salvati in `dati_p1`.

La procedura permette inoltre la visualizzazione dei grafici relativi ai parametri calcolati.

Con il file `spetmin.m` viene condotta un'analisi spettrale sull'intero esercizio. In particolare vengono calcolati gli spettri a intervalli regolari per la successiva visualizzazione e viene stimata la frequenza corrispondente al massimo, alla massima risoluzione in frequenza.

Infine, la funzione `analisi_risultati.m` mostra una serie di grafici relativi ai parametri ricavati. Di seguito si riportano le figure che tale funzione consente di visualizzare per ogni soggetto e per ogni test.

5.6 Risultati

TEST RIGHE ORIZZONTALI (HSL)

Le Figure 50 e 51 mostrano, rispettivamente, le tracce relative al test HSL effettuato da un soggetto parkinsoniano e le componenti ed i singoli tratti ascendenti (in rosso) e discendenti (in nero).

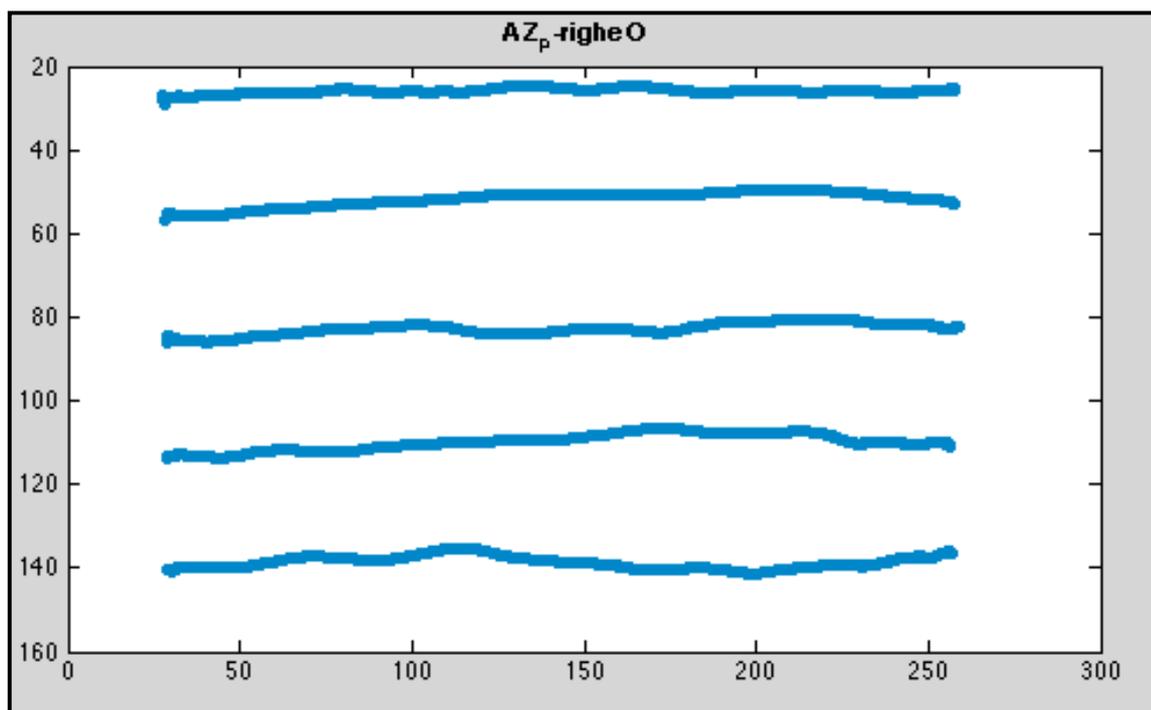


Figura 50: Esecuzione del test righe orizzontali da parte di un soggetto parkinsoniano.

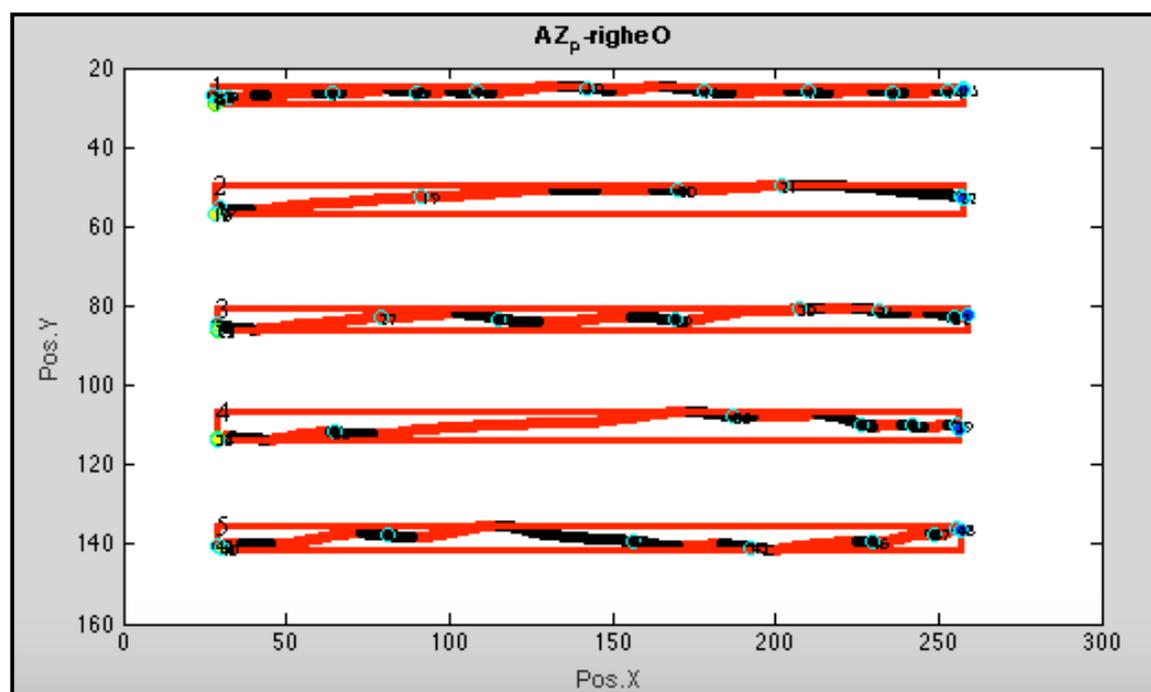


Figura 51: Visualizzazione delle componenti e dei tratti ascendenti e discendenti del test righe orizzontali effettuato da un soggetto parkinsoniano.

TEST CERCHIO (C)

La Figura 52 mostra la traccia relativa al test cerchio effettuato da un soggetto parkinsoniano; la Figura 53 evidenzia invece le componenti ed i singoli tratti ascendenti (in rosso) e discendenti (in nero).

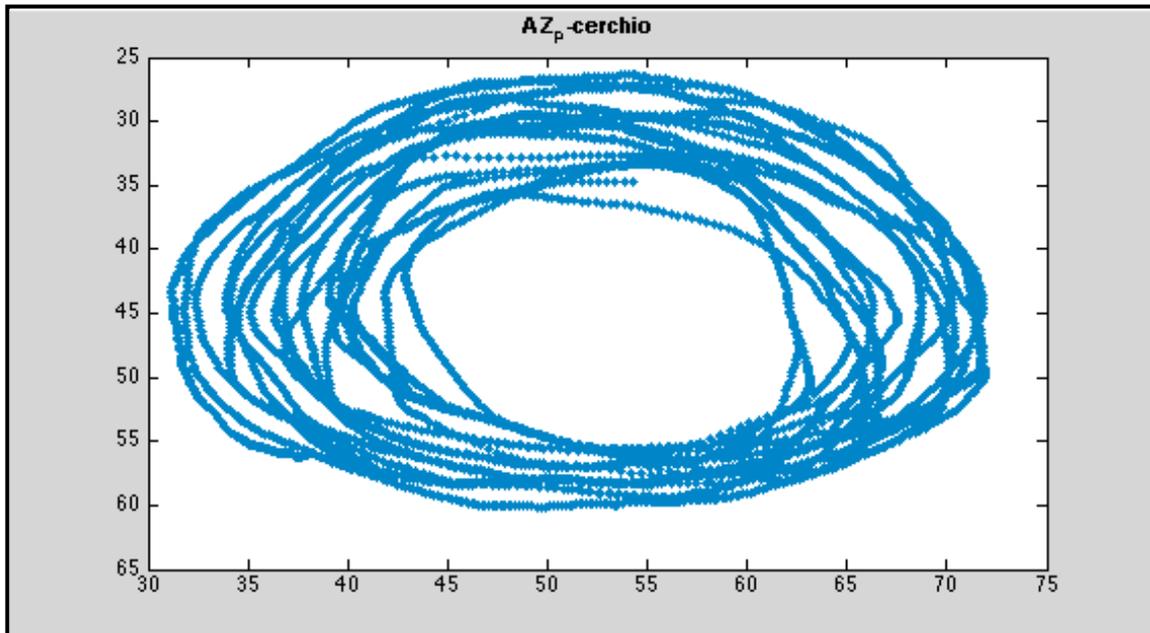


Figura 52: Esecuzione del test cerchio da parte di un soggetto parkinsoniano.

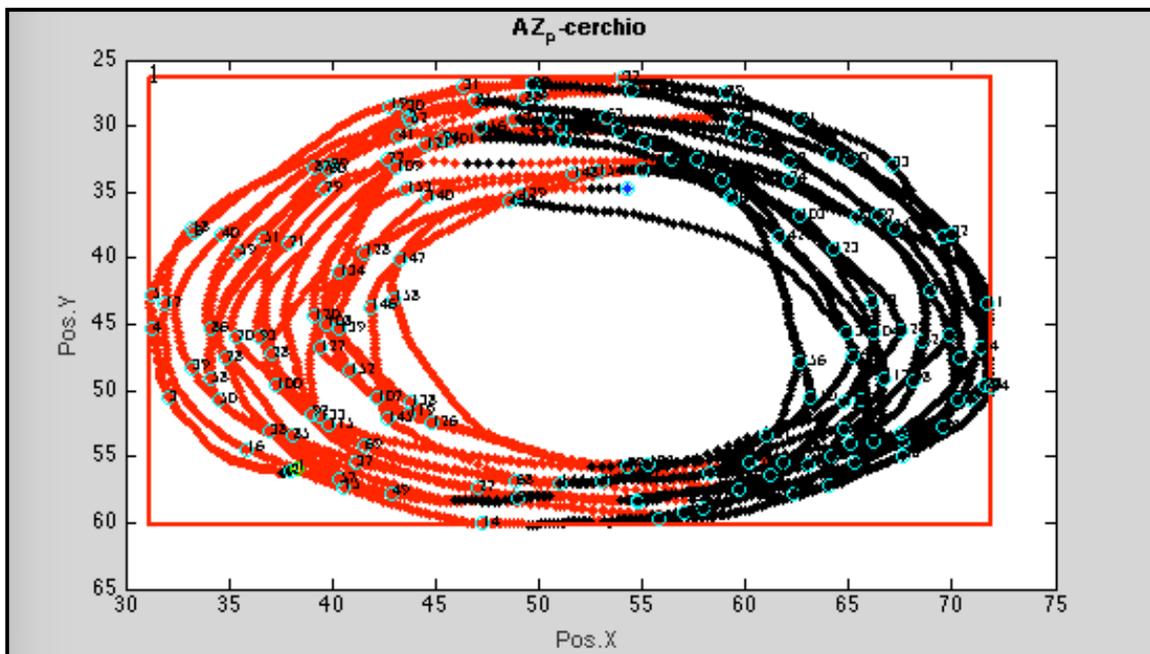


Figura 53: Visualizzazione delle componenti e dei tratti ascendenti e discendenti del test cerchio effettuato da parte di un soggetto parkinsoniano.

Nella Figura 54 sono visualizzati i moduli dei valori medi degli spettri delle velocità orizzontale, verticale e curvilinea e dell'accelerazione verticale del test cerchio effettuato da parte di un soggetto parkinsoniano. Il grafico della velocità verticale riportato in tale figura mostra il picco di frequenza tra 4 e 5 Hz, confermando i risultati riportati in [115].

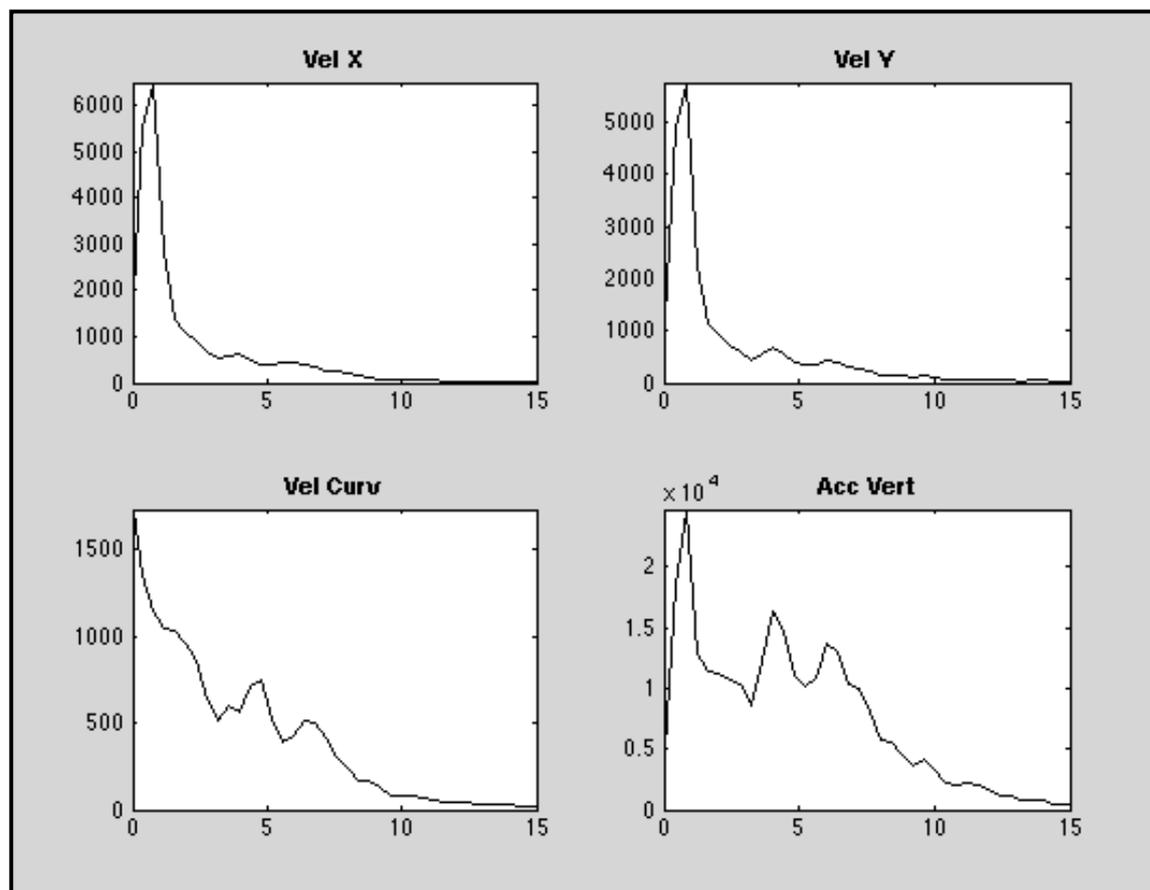


Figura 54: Visualizzazione valori medi degli spettri (modulo) delle velocità orizzontale, verticale e curvilinea e dell'accelerazione verticale del test cerchio effettuato da parte di un soggetto parkinsoniano.

La Figura 55 mostra i valori medi della densità spettrale di potenza delle velocità orizzontale, verticale e curvilinea e dell'accelerazione verticale del test cerchio effettuato da parte di un soggetto parkinsoniano.

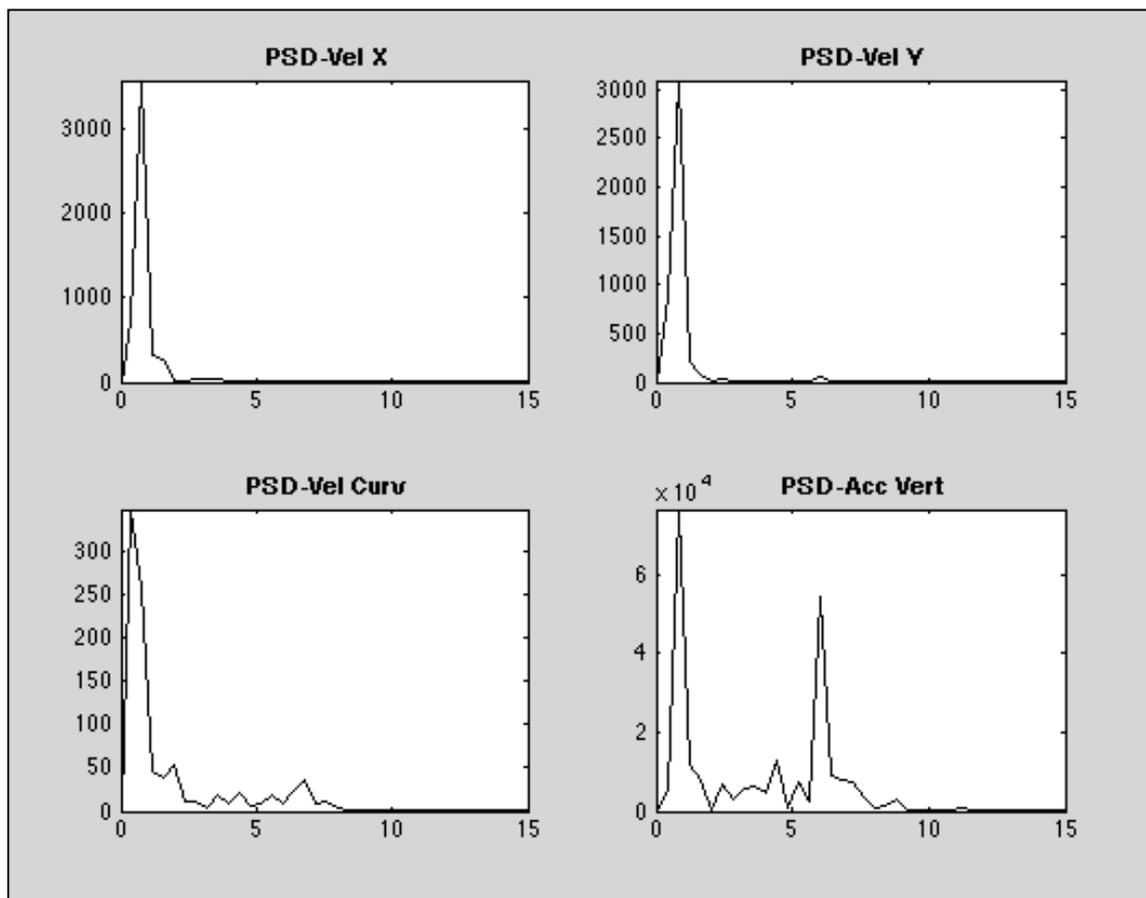


Figura 55: Visualizzazione valori medi della densità spettrale di potenza delle velocità orizzontale, verticale e curvilinea e dell'accelerazione verticale del test cerchio effettuato da parte di un soggetto parkinsoniano.

TEST SPIRALE (AS)

La Figura 56 mostra la traccia relativa al test spirale effettuato da un soggetto parkinsoniano; la Figura 57 evidenzia invece le componenti ed i singoli tratti ascendenti (in rosso) e discendenti (in nero).

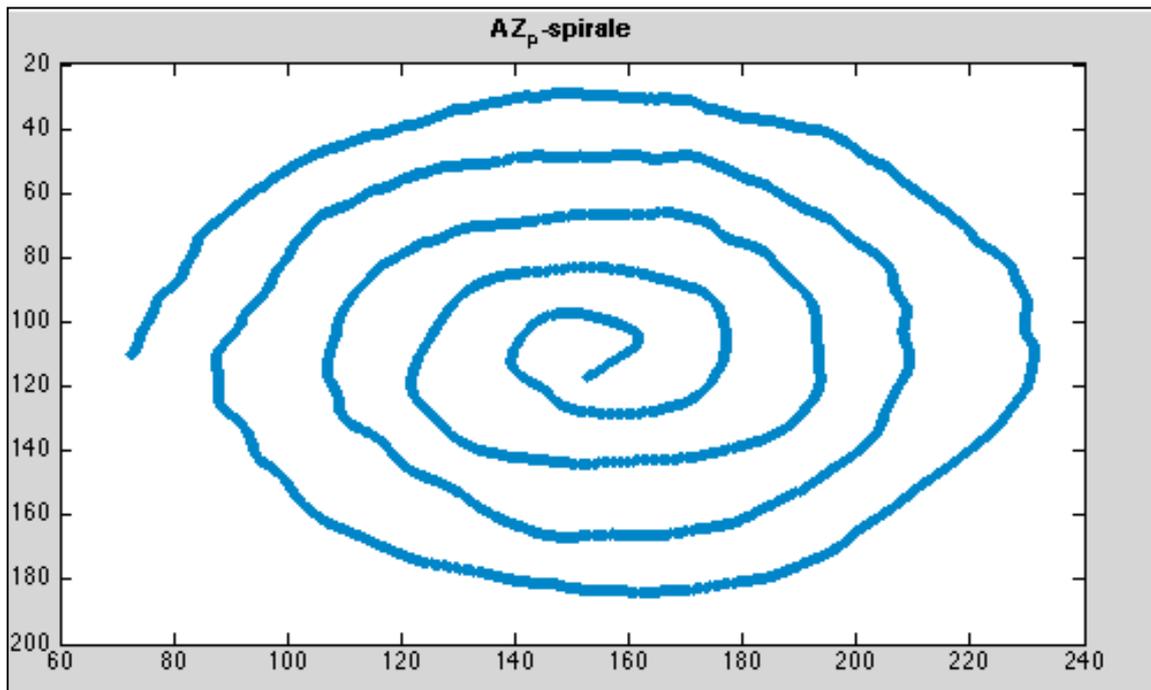


Figura 56: : Esecuzione del test spirale da parte di un soggetto parkinsoniano.

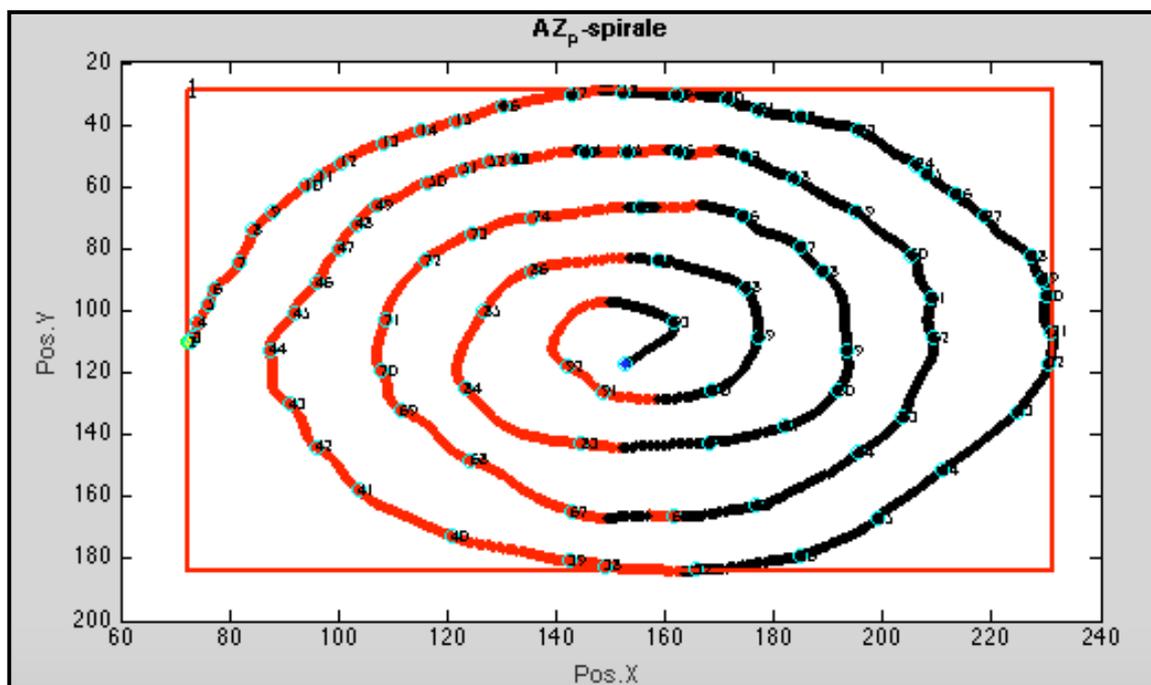


Figura 57: Visualizzazione delle componenti e dei tratti ascendenti e discendenti del test spirale effettuato da un soggetto parkinsoniano.

Nella Figura 58 sono visualizzati i moduli dei valori medi degli spettri delle velocità orizzontale, verticale e curvilinea e dell'accelerazione verticale del test spirale effettuato da parte di un soggetto parkinsoniano. Analogamente a quanto già visto per il test cerchio, i grafici riportati nella seguente figura evidenziano un picco in bassa frequenza, legato al movimento richiesto per il test spirale ed un picco di frequenza tra 4 e 5 Hz, confermando i risultati riportati in [115].

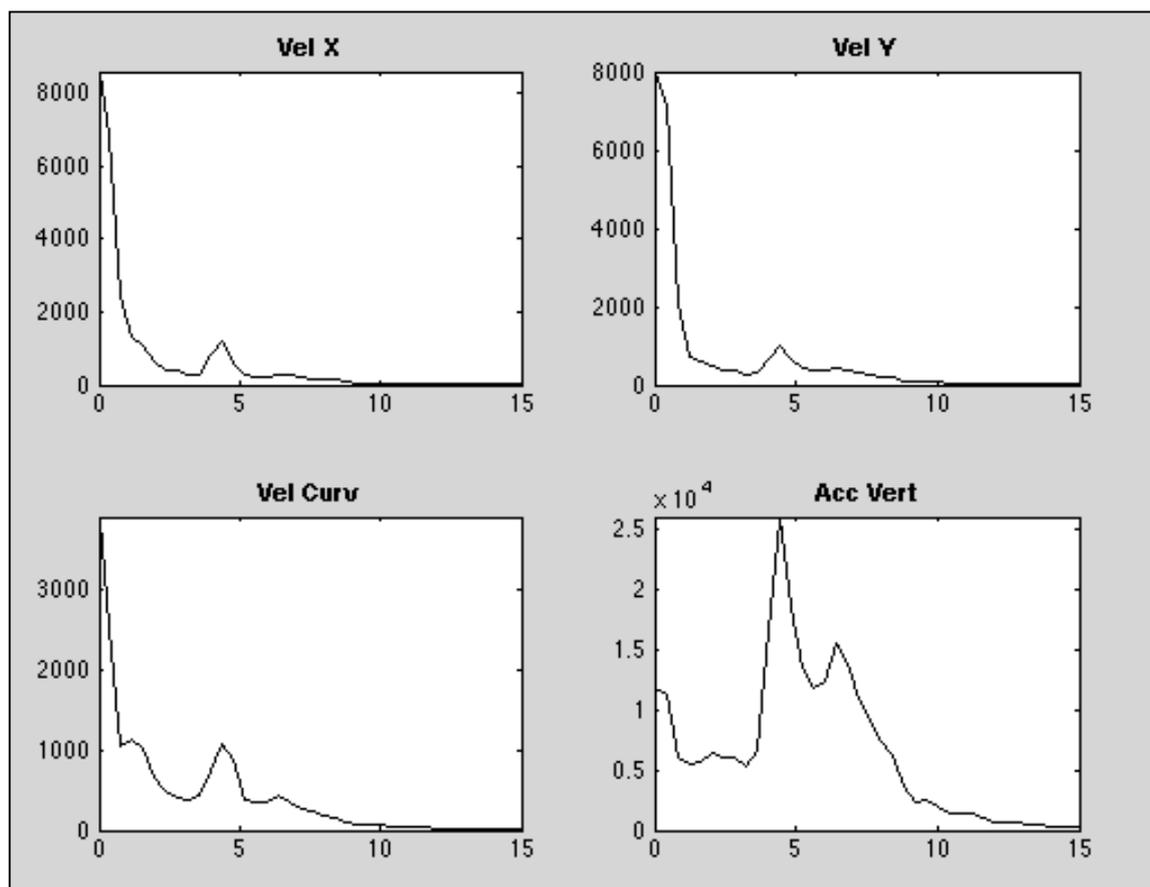


Figura 58: Visualizzazione valori medi degli spettri (modulo) delle velocità orizzontale, verticale e curvilinea e dell’accelerazione verticale del test spirale effettuato da parte di un soggetto parkinsoniano.

La Figura 59 mostra i valori medi della densità spettrale di potenza delle velocità orizzontale, verticale e curvilinea e dell’accelerazione verticale del test spirale effettuato da parte di un soggetto parkinsoniano.

La Figura 60 mostra un esempio della produzione scritta nei test HSL, AS e C in un paziente affetto da malattia di parkinson ed in un soggetto di controllo; nelle tracce dei pazienti con morbo di Parkinson, il tremore è facilmente riconoscibile.

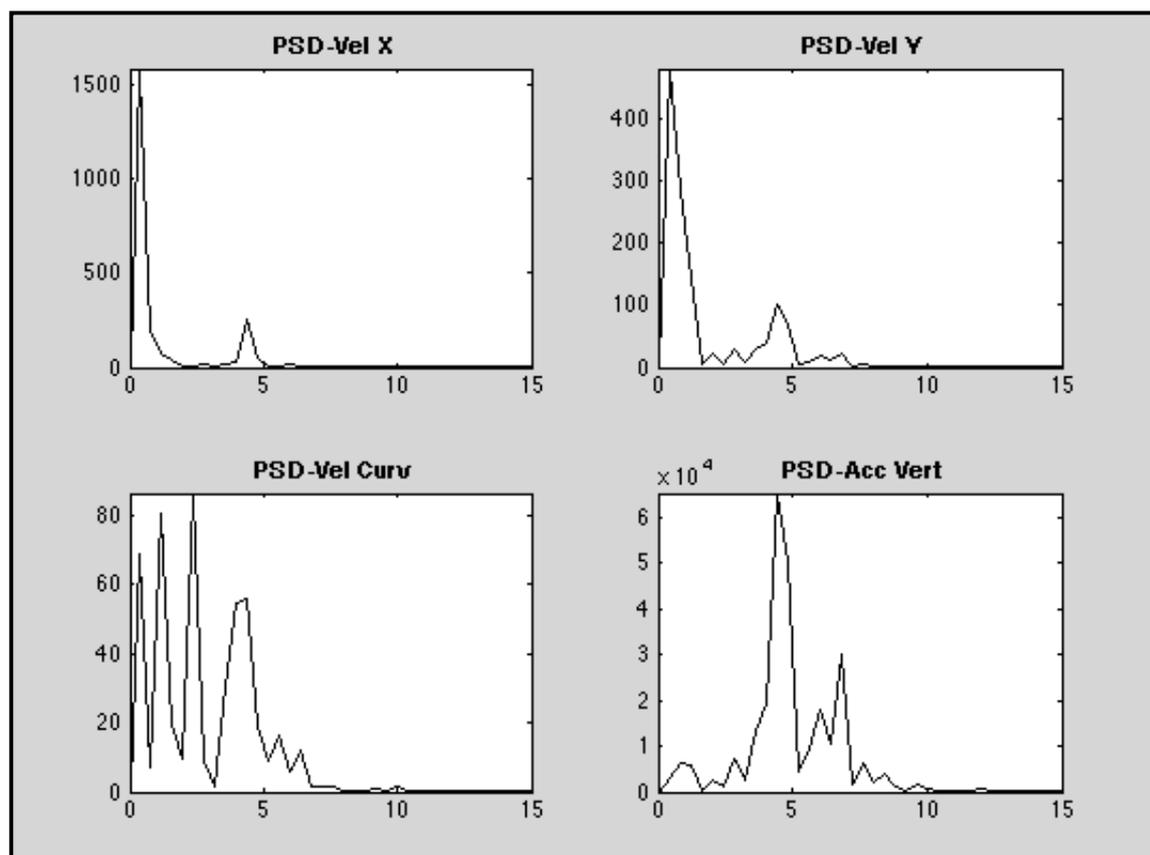


Figura 59: : Visualizzazione valori medi della densità spettrale di potenza delle velocità orizzontale, verticale e curvilinea e dell’accelerazione verticale del test spirale effettuato da parte di un soggetto parkinsoniano.

La Tabella 4 mostra, per ciascuna prova, valori medi ed SD dei parametri considerati nei pazienti PD e nei soggetti di controllo insieme con i p-value della differenza tra i due gruppi. Nel test HSL, i pazienti PD mostrano una variabilità molto alta (SD) nei parametri relativi a: velocità (V_c , V_{px} , V_{py} , V_{pc}), accelerazione (A_y) e lunghezza media dello stroke (L). In merito ai test AS e C, la Tabella 4 mostra un valore significativamente più alto per $\#str/cm$ e valori significativamente più bassi per lunghezza media dello stroke, velocità e accelerazione per i pazienti PD, evidenziando una scrittura più lenta e con marcata frammentazione rispetto ai soggetti di controllo. Tuttavia, le differenze tra i due gruppi sembrano un po’ meglio evidenziate nel compito AS rispetto a quello C.

		#str/s	#str/cm	L (mm)	D (ms)	Dpg/DT%	V_c (mm/s)	V_{px} (mm/s)	V_{py} (mm/s)	V_{pc} (mm/s)	A_y (mm/s ²)
TEST HSL	PD Patients	5.0±1.3	1.09±0.87	18.3±24.1	211±55	77.7±8.6	78.4±78.2	79.7±85.4	18.6±37.8	85.2±87.1	433±1094
	Controls	3.4±0.9	0.23±0.11	57.7±37.9	323±131	69.5±6.4	167±54.5	158.7±58.7	10.9±3.4	158.4±58.4	212±84
	p-values	<10 ⁻⁴	<10 ⁻⁴	<10 ⁻⁴	<10 ⁻⁴	0.0028	<10 ⁻⁴	<10 ⁻⁴	n.s.	<10 ⁻⁴	n.s.
TEST AS	PD Patients	5.2±1.6	1.68±0.98	6.8±3.7	182±51	79.1±20.7	37.1±22.8	26.4±14.0	32.5±28.9	43.6±28.5	378±864
	Controls	4.5±0.7	0.38±0.15	29.5±8.6	227±37	99.6±1.2	129.5±33.8	102.4±28.4	105.1±30.5	139.6±35.3	587±232
	p-values	n.s.	<10 ⁻⁴	<10 ⁻⁴	0.009	0.0001	<10 ⁻⁴				
TEST C	PD Patients	5.7±1.0	2.08±2.08	8.4±6.8	180±29	99.2±2.3	46.0±32.0	37.7±29.0	43.7±38.4	55.7±38.2	562±851
	Controls	5.4±1.6	0.38±0.22	28.1±14.1	167±50	94.1±24.3	162.2±86.9	150.9±87.3	157.8±91.8	182.7±98.0	2450±2189
	p-values	n.s.	<10 ⁻⁴	<10 ⁻⁴	n.s.	0.008	<10 ⁻⁴	<10 ⁻⁴	0.0001	<10 ⁻⁴	0.0004

Tabella 4: Media valori dei parametri cinematici calcolati in pazienti PD e controlli per HSL, AS e C test insieme ai p-value delle loro differenze (n.s. = non significativo).

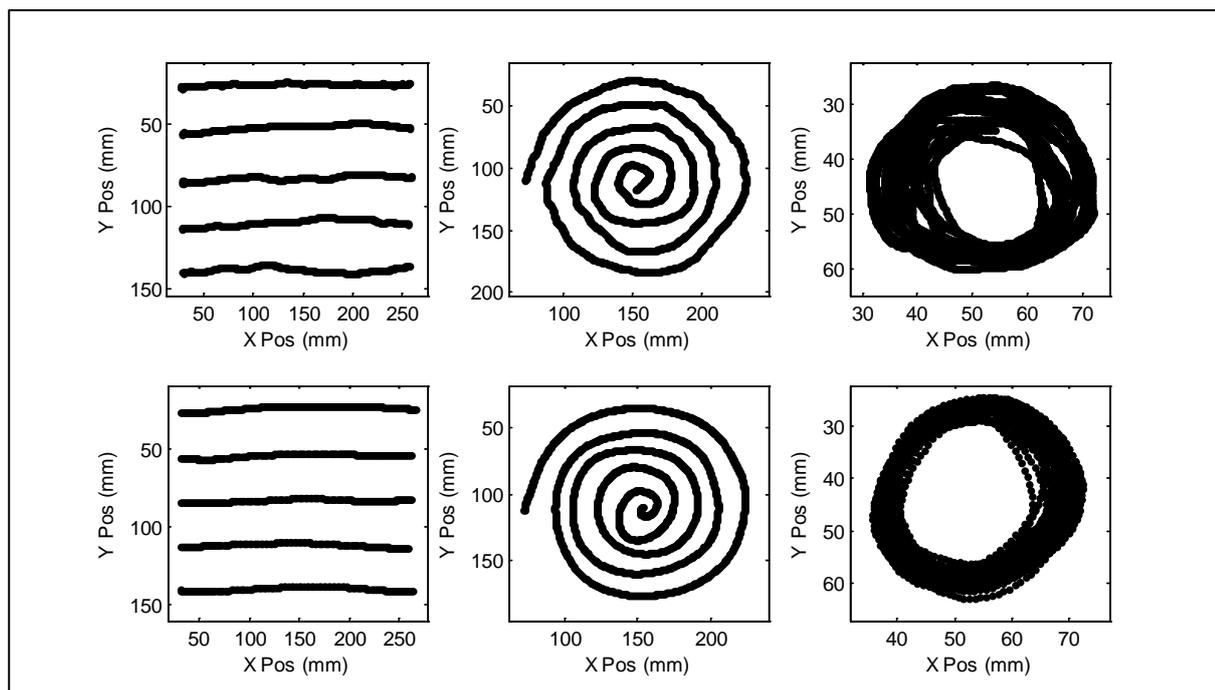


Figura 60: Esempio di HSL, AS e C Test effettuati da un paziente PD (riga superiore) ed un controllo (riga inferiore).

La Tabella 5 mostra il rapporto PSDH/PSDt stimato sulla velocità media e sull'accelerazione verticale. I valori sono molto diversi nei due gruppi con p-value significativi su Ay in tutti i test, su Vy nei test HSL ed AS e su Vx e Vc solamente per il test AS.

		Vx	Vy	Vc	Ay
TEST HSL	PD Patients	13±22	38±22	10±14	74±1
	Controls	6±3	16±6	6±3	58±12
	p-values	n.s.	<10 ⁻⁴	n.s.	0.0005
TEST AS	PD Patients	17±21	22±23	20±13	68±18
	Controls	4±4	6±6	8±4	39±9
	p-values	<10 ⁻⁴	<10 ⁻⁴	0.002	<10 ⁻⁴
TEST C	PD Patients	17±21	22±23	20±13	68±18
	Controls	4±4	6±6	6±4	30±9
	p-values	n.s.	n.s.	n.s.	0.0004

Tabella 5: Media (± SD) valori del rapporto PSDH/PSDt in pazienti PD e controlli delle velocità medie orizzontali, verticali e curvilinei e in accelerazione media verticale nei tre test e p-value delle differenze dei due gruppi.

5.7 Discussione

I risultati raggiunti dimostrano che nella discriminazione dei pazienti affetti da morbo di Parkinson dai controlli, potrebbero essere utilizzate varie combinazioni di test e parametri cinematici. In generale, i valori dei parametri cinematici rilevati in ciascun gruppo dipendono dal tipo di esercizio eseguito con tendenze simili nei due gruppi (Tabella 4).

In tutti i test, la velocità media curvilinea sull'intera traccia nonché la velocità di picco orizzontale, verticale e curvilinea media sugli strokes, nei pazienti PD, sono significativamente inferiori ai valori corrispondenti dei soggetti di controllo, evidenziando il rallentamento nell'esecuzione dei movimenti (bradicinesia), tipica dei pazienti affetti da morbo di Parkinson, confermando risultati precedentemente ottenuti per il test della spirale [109] [108]. Solo nel test HSL, V_{py} è comparabile nei due gruppi probabilmente perché in questa prova la componente verticale è trascurabile. I valori di velocità più alti sono presenti nel test HSL, seguiti dal test C e dal test AS in cui è richiesto un maggiore coordinamento visuo-motorio ed una particolare attenzione; la difficoltà di raggiungere il coordinamento necessario in un movimento veloce (soprattutto in uno spazio delimitato come quello della prova spirale) costringe il soggetto a rallentare il gesto per eseguire correttamente l'esercizio assegnato, supportando l'uso di test curvilinei per la discriminazione dei soggetti con Parkinson. Inoltre, l'accelerazione verticale ha dato risultati diversi (anche opposti) a seconda del test, probabilmente perché questo parametro non dipende solo dalla malattia, ma dipende anche dal tipo di movimento richiesto (lineare o circolare).

Rispetto ai soggetti di controllo, i pazienti PD mostrano una scrittura meno scorrevole con un numero di stroke al secondo ed un numero di stroke al centimetro significativamente maggiori, lunghezza media dello stroke e durata inferiori in quasi tutti i test (Tabella 4), corrispondenti ad una notevole frammentazione della scrittura che potrebbe essere principalmente causata dal tremore.

A causa della grande variabilità (SD) tra i soggetti, parzialmente dovuta ad alcuni pazienti PD che presentavano un lieve tremore o addirittura nullo, anche se il rapporto PSDH/PSDt è maggiore nei pazienti parkinsoniani rispetto ai controlli in tutte le prove, la differenza tra i due gruppi è significativa solo per A_y in tutte le prove, per tutte le velocità nella prova AS e per V_y nella prova HSL (Tabella 5).

L'aumento del rapporto di PSDH/PSDt nei pazienti PD è legato al fatto che, in questa malattia, dovrebbe essere presente un'ampia potenza nella banda 3.0-6.0Hz [115]. Nei nostri pazienti la frequenza di picco, stimata da V_y , viene misurata all'interno della banda 4.3-5.0Hz, confermando i risultati riportati da [115].

In sintesi, i nostri risultati sottolineano che oltre al test della Spirale, anche i test C ed HSL possono essere utilizzati con successo per l'identificazione dei pazienti PD. Inoltre, i parametri cinematici che misurano le velocità e la frammentazione, così come il rapporto fra la PSD nell'intervallo del tremore (4.0-5.0Hz) e la PSD nella banda totale, sono i più efficaci in questi compiti.

5.8 Conclusione

La valutazione della scrittura a mano per l'identificazione dei pazienti affetti da Parkinson può servire come metodo complementare alla diagnosi fatta dal clinico o da altri strumenti di supporto decisionale.

L'analisi cinematica delle tracce di scrittura di semplici test di disegno nella malattia di Parkinson ha reso possibile identificare sia i test che i parametri che consentono una migliore differenziazione tra soggetti parkinsoniani e soggetti normali.

Pertanto, i risultati confermano l'ipotesi che l'analisi cinematica può essere utile nello studio di tremori e, combinati con prove appropriate, possono distinguere tra soggetti patologici e normali.

6 – Conclusioni e sviluppi futuri

Il tema principale della ricerca ha riguardato l'analisi cinematica della scrittura nella valutazione dell'efficacia del trattamento di recupero dei bambini disgrafici. È stata analizzata la letteratura esistente sull'argomento e sono state esaminate dal punto di vista cinematico le scritture di alcuni bambini con disturbi grafo-motori e/o disgrafia in età scolare, prima e dopo un nuovo protocollo riabilitativo (Metodo Terzi), al fine di valutarne l'influenza sulla cinematica della scrittura corsiva.

L'utilizzo di tavolette digitali per l'analisi cinematica ha permesso di esaminare le dinamiche di costruzione delle lettere e le connessioni tra le stesse fornendo agli operatori informazioni utili a comprendere meglio i processi e le strategie coinvolte nel processo di scrittura.

I protocolli di valutazione utilizzati e l'analisi dinamica della scrittura hanno evidenziato i miglioramenti ottenuti con il processo di riabilitazione di Terzi, in particolare nelle caratteristiche della velocità e dello stroke.

I risultati hanno mostrato l'utilità dell'analisi cinematica per la valutazione della qualità della scrittura, identificandola quale potenziale strumento in grado di determinare l'efficacia di un programma riabilitativo quantificando le variazioni post trattamento in alcuni domini del movimento della scrittura. Pertanto, l'analisi cinematica della scrittura rappresenta uno strumento utile per il monitoraggio degli effetti del trattamento al fine di quantificare le variazioni prodotte.

Un insieme di parametri cinematici riguardanti, in particolare, le caratteristiche dello stroke (velocità, durata, numero per secondo e per lettera) e della componente (durata e lunghezza), associate a compiti specifici, può essere proposto per lo sviluppo di un sistema computerizzato per la valutazione della scrittura a mano. In futuro, si potrebbero studiare gli effetti del programma di riabilitazione su un periodo più lungo al fine di verificare se le modifiche causate dal trattamento si sono consolidate e se la velocità è aumentata come ci si aspetta.

In merito alla sonificazione della scrittura, lo studio eseguito ha consentito di raggiungere lo scopo prefissato, traducendo le caratteristiche dinamiche della scrittura a mano in suoni ed utilizzando tali suoni per l'identificazione dei differenti tipi di scrittura [C].

Come variabile da sonificare è stata scelta la velocità curvilinea in quanto è il parametro che meglio identifica i problemi relativi alla scrittura. Per la sonificazione, il suono è stato generato utilizzando una modulazione di frequenza.

Al fine di verificare la validità del metodo implementato, è stato chiesto ad alcuni soggetti di riconoscere quale suono fosse, secondo loro, più armonioso e fluente.

I risultati ottenuti hanno mostrato che i suoni sono in grado di fornire informazioni sulla scrittura e di discriminare una scrittura fluida da una non fluida. Le differenze prima e dopo la riabilitazione sono ben riconoscibili in molti test, a dimostrazione del fatto che suoni relativi a scritti meno leggibili sono discriminati da quelli leggibili. La sonificazione della scrittura, quindi, potrebbe rappresentare uno strumento molto utile sia nella diagnosi che nella riabilitazione della disgrafia.

La sonificazione in tempo reale potrebbe permettere al terapeuta di percepire quando un movimento non è fluido e collegarlo alla simultanea traccia visiva per ispezionare la qualità della traccia scritta e della postura dei bambini mentre scrivono. Inoltre, la sonificazione in tempo reale sarebbe molto utile

nel percorso di riabilitazione in quanto potrebbe fare da feedback al bambino e farlo rendere conto dei movimenti sbagliati.

Un altro tema di ricerca affrontato ha riguardato l'analisi della scrittura di soggetti affetti da morbo di Parkinson [D]. Valutata la letteratura sull'argomento al fine di individuare i test più efficaci per l'analisi della scrittura di tali soggetti, sono state esaminate le rappresentazioni grafiche di un gruppo di soggetti parkinsoniani e confrontate con quelle prodotte da un gruppo di soggetti di controllo.

L'analisi cinematica delle tracce di scrittura di semplici test ha consentito di individuare i test ed i parametri che consentono una migliore differenziazione tra soggetti parkinsoniani e soggetti normali.

I risultati ottenuti hanno confermato che l'analisi cinematica può essere utile nello studio dei tremori e che alcuni test sono più appropriati per distinguere tra soggetti patologici e normali. Infatti, oltre al test della Spirale, che è quello maggiormente utilizzato in letteratura per la valutazione della performance motoria in vari disordini del movimento, anche il test *cerchio* può essere utilizzato con successo per l'identificazione dei pazienti affetti da Parkinson. Pertanto, la valutazione della scrittura a mano per l'identificazione dei pazienti affetti da Parkinson può rappresentare un valido supporto alla diagnosi fatta dai clinici.

Per gli studi futuri, si suggerisce di estendere le analisi ad un campione più ampio al fine di ottenere risultati statistici più robusti.

BIBLIOGRAFIA

- [1] G.P. Van Galen. *Handwriting: a developmental perspective*. In *Motor development in early and later childhood: Longitudinal approaches*. Chapter 14, pp. 217–228, Cambridge University Press, 1993.
- [2] P. Giovanardi Rossi and T. Malaguti. *Valutazione delle abilità di scrittura*. Erickson, Trento, 1994.
- [3] P.E. Tressoldi and G. Sartori. *Neuropsicologia della scrittura in età evolutiva*. Manuale di neuropsicologia della età evolutiva. Zanichelli, Bologna, 1995.
- [4] C. Zucchermaglio. *Gli apprendisti della scrittura*. Il Mulino, Bologna, 1991.
- [5] E. Ferreiro and A. Teberosky. *Los sistemas de escritura en el desarrollo del niño*. Siglo XXI Editores, Mexico, 1979.
- [6] M. Borean. *Acquisizione del corsivo. Aspetti Grafo-Motori e Posturali*. Master's thesis. Università degli Studi di Trieste, Trieste, 2001.
- [7] A. Biancardi, C. Gorrini, D. Ioghà, E. Brunati and F. Cristiani. *I disordini grafici e disortografici della scrittura con la proposta di un dettato ortografico per il primo ciclo elementare*. E. Brunati and D. Ioghà (a cura di) *Le parole sono fatte di matita*, Ibis, Como, 2002.
- [8] B. Bertelli, G. Bilancia, D. Durante, E. Porello, C. Battistini and E. Profumo. *Batteria di prove per la valutazione delle componenti grafo-motorie della scrittura nei bambini*. *Psicologia clinica dello sviluppo*, 2:223–240, 2001.
- [9] C. Jarman. *Twelve Rules for Good Handwriting*. *Handwriting Review*, 2:7–9, 1988.
- [10] L. Blason, M. Borean, L. Bravar and S. Zoia. *Il corsivo dalla A alla Z – La teoria*. Edizioni Erikson, 2004
- [11] L. Blason, M. Borean, L. Bravar and S. Zoia. *Il corsivo dalla A alla Z – La pratica*. Edizioni Erikson, 2004
- [12] A.J.W.M. Thomassen and G.P. Van Galen. *Handwriting is a motor task: experimentation, modelling and simulation*. In *Approaches to the study of Motor control and learning*. Elsevier Science, North Holland, J.J. Summers edition, 1992.
- [13] A.J.W.M. Thomassen and H.L. Teulings. *The development of handwriting*. In *The psychology of written language*. John Wiley, New York, M. Martlew edition, 1983.
- [14] R. Sassoon. *Handwriting Problems: A different view of the written trace*. *Handwriting Review*, 3:64–69, 1989.
- [15] E. Barnes. *A consideration of the Matthew effect in beginning writing: A reply to Saintrop*. *Handwriting Review*, 13:59–63, 1999.
- [16] B. Noad. *Children with literacy difficulties*. Houghton Mifflin, P. Pinsent edition, 1990.
- [17] S. Graham, V.W. Berninger, R.D. Abbott, S.P. Abbott and D. Whitaker. *Role of mechanics in composing of elementary school students: A new methodological approach*. *Journal of Educational Psychology*, 89(1):170–182, 1997.
- [18] A.R. Luria. *Higher Cortical Function in Man*. Basic Books, Inc., New York, 1966.
- [19] M.D. Levine. *Developmental Variation and Learning Disorders*. Educators Publishing Service, Inc., Cambridge, Massachusetts, 1987.
- [20] J. Copley and J. Ziviani. *Kinesthetic sensitivity and handwriting ability in grade one children*. *Australian Occupational Therapy Journal*, 37:39–43, 1990.
- [21] A.J. Ayers. *Sensory Integrations and Learning Disorders*. Western Psychological Services, Los Angeles, 1972.
- [22] A.J. Ayers. *Sensorimotor foundations of academic ability*. *Research and Therapy*, 2:300–360, 1975.

-
- [23] A.J. Ayers. *A scale for measuring the quality of handwriting of school children*. Russel Sage Found, New York, 1985.
- [24] H.R. Myklebust. *Development disorder of written language*. volume 1. Grune & Stratton, New York, 1965.
- [25] P.E. Tressoldi and C. Vio. *Diagnosi dei disturbi dell'apprendimento scolastico*. Erickson, Trento, 1996.
- [26] V.W. Berninger and D. Whitaker. *Theory-based branching diagnosis of writing disabilities*. *Scool Psychology Review*, 22(4):623-642, 1993;
- [27] G. Sartori. *La lettura. Processi normali e dislessia*. Il Mulino, Bologna, 2002
- [28] G. Miceli, M.C. Silvieri and A. Caramazza. *The role of phoneme grapheme conversion system and of graphemic output buffer in writing*. In *The Cognitive neuropsychology of language*. Erlbaum, London, 1987.
- [29] G. Denes and L. Cipollotti. *Dislessie e disgrafie acquisite*. Manuale di neuropsicologia. Zanichelli, Bologna, 1990.
- [30] J. Morton and K.E. Patterson. *A new attempt at an interpretation, or, an attempt at a new interpretation*. Deep dyslexia. Routledge, London, 1980.
- [31] A.W. Ellis. *Spelling and writing (and reading and speaking)*. Normality and pathology in cognitive functions. Accademic Press, New York, 1982.
- [32] A.W. Ellis. *Slips of the pen*. *Visible Language*, chapter 13, pp. 265–282. 1979.
- [33] M. Pratelli. *Disgrafia e recupero delle difficoltà grafo-motorie*. Erickson, Trento, 1995.
- [34] P.E. Tressoldi. *I disturbi strumentali di lettura e scrittura*. I disturbi dell'apprendimento. Il Mulino, Bologna, 1991.
- [35] M. Pau et al., *Effect of Physical Rehabilitation Integrated with rhythmic auditory stimulation on Spatio-Temporal and Kinematic parameters of Gait in Parkinson's disease*. *Frontiers i Neurology*, Agosto 2016.
- [36] E. Nackaerts, E. Heremans, G. Vervoort, B.C. Smits-Engelsman, S.P. Swinnen, W. Vandenberghe, B. Bergmans and A. Nieuwboer. *Relearning of Writing Skills in Parkinson's Disease After Intensive Amplitude Training*. *Mov Disord*. 31(8), 1209-16, 2016.
- [37] R. Plamondon. *A model-based segmentation framework of computer processing of handwriting*. *Proc. 11rd Conf. on Pattern Recognition*, pp. 303–312, 1992.A.C.
- [38] Maarse and L.A: Grivell. *Nucleotide sequence of the gene encoding the 11-kDa subunit of the ubiquinol-cytochrome-c oxidoreductase in Saccharomyces cerevisiae*. *Eur J Biochem* 165(2):419-25, 1987
- [39] R. Plamondon. *What does differential geometry tell us about handwriting generation?* *Proc. 3rd ICARD Int. Conf. on Document Analisys and Recognition*, pp. 495–498, Montréal, PQ, Canada, 1995.
- [40] A. Alimi and R. Plamondon. *Analysis of the Parameter Dependence of Handwriting Generation Models on Movement Characteristics*. C. Faure, P. Keuss, G.Lorette (Eds). *Advances in Handwriting and Drawing: a multidisciplinary approach*. Europa, Parigi, pp. 363–378,1994.
- [41] F. Lacquaniti, C. Terzuolo, and P. Viviani. *The law relating the Kinematic an figural aspects of drawing movements*. *Acta Psychologica*, 54:115–130, 1983.
- [42] F. Lacquaniti, C. Terzuolo, and P. Viviani. *Global metric proprieties and preparatory processes in drawing movements*. *Preparatory states and processes*. NJ:Erlbaum, Hillsdale, S.Kornblum & J.Requin edition, 1984.
- [43] G.P. Van Galen. *Phonological and motoric demands in handwriting: evidence for discrete transmission of information*. *Acta Psychologica*, 74:259–267, 1990.
- [44] G.P. Van Galen. *Handwriting: issue for a psychomotor theory*. *Human Movement Science*, 10:156–191, 1991.
-

- [45] A.D. Baddeley, N.C. Ellis, T.R. Miles, and V.J. Lewis. *Developmental and acquired dyslexia: A comparison*. Cognition, 11:185–199, 1982.
- [46] V. Chenda. *Realizzazione di un sistema per lo studio della grafia*. Master's Thesis, Università degli studi di Trieste, Trieste, 2000.
- [47] R. Zin. *Realizzazione di uno strumento per l'analisi quantitativa delle disgrafie evolutive*, Tesi, Università degli studi di Trieste, 2003
- [48] R.W. Barron. *World recognition in early reading: a review of direct and indirect access hypothesis*. Cognition, 44:93–119, 1986.
- [49] A. Chiap. *Valutazione dell'apprendimento della scrittura mediante analisi parametrica della velocità*. Università degli studi di Trieste, Trieste, 2005.
- [50] R. Sassoon. *Handwriting: a new perspective*. Cheltenham, UK: Stanley Thornes, 1990.
- [51] S. J. Amundson. *Handwriting: evaluation and intervention in school settings*. Development of Hand Skills in the Child, J. Case-Smith and C. Pehoski (Eds.), Rockville MD: American Occupational Therapy Association, pp. 63–78, 1992.
- [52] H. Cornhill and J. Case-Smith. *Factors that relate to good and poor handwriting*. Am J Occup Ther, vol. 50, pp. 732–739, 1996.
- [53] K. P. Feder and A. Majnemer. *Handwriting development, competency, and intervention*. Dev Med Child Neurol, vol. 49, pp. 312-317, 2007.
- [54] V. W. Berninger, K. B. Vaughan, R. D. Abbott, S. P. Abbott, L. W. Rogan, A. Brooks et al.. *Treatment of handwriting problems in beginning writers: transfer from handwriting to composition*. J Educ Psych, vol. 89, pp. 652–666, 1997.
- [55] D. Jones and C. A. Christensen. *Relationship between automaticity in handwriting and students' ability to generate written text*. J Educ Psych, vol. 91, pp. 44–49, 1999.
- [56] V. Connelly and G. Hurst. *The influence of handwriting fluency on writing quality in later primary and early secondary education*. Handwriting Today, vol. 2, pp. 5-57, 2001.
- [57] S. Rosenblum, P. L. Weiss and S. Parush. *Product and process evaluation of handwriting difficulties*. Educational Psychology Review, vol. 15, pp. 41–81, 2003.
- [58] L. Hamstra-Bletz and A.W. Blöte. *A longitudinal study on dysgraphic handwriting in primary school*. J Learn Disabil, vol. 26(10), pp. 689-99, December 1993.
- [59] M. L. Lorusso, M. Vernice, M. Dieterich, D. Brizzolara, E. Mariani, S. De Masi et al.. *The process and criteria for diagnosing specific learning disorders: indications from the Consensus Conference promoted by the Italian National Institute of Health*. Annali dell'Istituto Superiore della Sanità, Vol. 50 (1), pp. 77-89, 2014.
- [60] A. P. Accardo, M. Genna and M. Borean. *Development, maturation and learning influence on handwriting kinematics*. Hum Mov Sci, vol. 32 (1), pp. 136-146, February 2013.
- [61] H. M. Gillespie. *Component handwriting skills among early elementary children with average and below average printing ability*. Northwestern University, Ph.D. Thesis, 2003.
- [62] J. G. Zwicker. *Effectiveness of occupational therapy in remediating handwriting difficulties in primary students: cognitive versus multisensory interventions*. University of Victoria. M.A. Thesis, 2005.
- [63] J. P. Wann and M. Kardiramanathan. *Variability in Children's Handwriting: Computer diagnosis of writing difficulties*. The Development of Graphic Skills, J. P. Wann, A. M. Wing & N. Sovik (Eds), Academic: London, 1991.

- [64] J. P. Wann. *Trends in the refinement and optimisation of fine motor trajectories*. Journal of Motor Behavior, vol. 19, pp. 13-37, 1987.
- [65] C. Di Brina, R. Niels, A. Overvelde, G. Levi and W. Hulstijn. *Dynamic time warping: a new method in the study of poor handwriting*. Human Movement Science, vol. 27(2), pp. 242-55, April 2008.
- [66] B. C. Smits-Engelsman and G.P. Van Galen. *Dysgraphia in children: lasting psychomotor deficiency or transient developmental delay?*. J Exp Child Psychol., vol. 67(2), pp. 164-84, November 1997.
- [67] L. Wing and J Gould. *Severe impairments of social interaction and associated abnormalities in children: epidemiology and classification*. Journal of Autism and Developmental Disorders, vol. 9(1), pp. 11-29, March 1979.
- [68] G. P. van Galen, S. J. Portier, B. C. Smits-Engelsman and L.R. Schomaker. *Neuromotor noise and poor handwriting in children*. Acta Psychols (Amst), vol. 82(1-3), pp. 161-78, 1993.
- [69] P.L. Denton, S. Cope and C. Moser. *The effects of sensorimotor-based intervention versus therapeutic practice on improving handwriting performance in 6- to 11-year-old children*. Am J Occup Ther., vol. 60(1), pp.16-27, January-February 2006.
- [70] J. Zwicker and A. Hadwin. *Cognitive versus multisensory approaches to handwriting intervention: A randomized controlled trial*. OTJR: Occupation, Participation & Health, vol. 29(1), pp. 40–48, 2009.
- [71] S. Graham, K. Harris, R. Karen and B. Fink. *Is handwriting causally related to learning to write? Treatment of handwriting problems in beginning writers*. Journal of Educational Psychology, vol 92(4), pag. 620-633. December 2000.
- [72] L. T. Miller, H. J. Polatajko, C. Missiuna, A. D. Mandich and J. J. Macnab. *A pilot trial of a cognitive treatment for children with developmental coordination disorder*. Human Movement Science, vol. 20(1-2), pp.183-210, March 2001.
- [73] M. J. Jongmans, E. Linthorst- Bakker, Y. Westenberg and B. C Smits-Engelsman. *Use of a task-oriented self-instruction method to support children in primary school with poor handwriting quality and speed*. Human Movement Science, Vol. 22(4-5), pp. 549-66, November 2003.
- [74] J. Zwicker. *Cognitive versus Multisensory Approaches for Handwriting: Current State of the Evidence*. Dyspraxia Foundation Professional Journal, 2011 (<http://www.dyspraxiafoundation.org.uk/professionals/research-professional-journal/>).
- [75] P. Mavrogiorgou, R. Mergl, P. Tigges, J. El Hussein, A. Schröter, G. Juckel et al.. *Kinematic analysis of handwriting movements in patients with obsessive-compulsive disorder*. J Neurol Neurosurg Psychiatry, vol. 70, pp. 605-612, 2001.
- [76] S. Rosenblum, S. Parush and P. L. Weiss. *Computerized temporal handwriting characteristics of proficient and non-proficient handwriters*. Am J Occup Ther, vol. 57 (2), pp.129-38, March-April, 2003.
- [77] S. Rosenblum and M. Livneh-Zirinski. *Handwriting process and product characteristics of children diagnosed with developmental coordination disorder*. Human Movement Science, vol. 27, pp.200–214, 2008.
- [78] M. Genna, A. Accardo and M. Borean. *Kinematic Analysis of Handwriting in Pupils of Primary and Secondary School*. Proceed. of the 15th International Graphonomics Society Conference (IGS 2011), Cancún, México, p.183-196, June 12-15, 2011.
- [79] M.P. Caligiuri, H. L. Teulings, C. E. Dean, A. B. Niculescu and J.B. Lohr. *Handwriting Movement Kinematics for Quantifying EPS in Patients Treated with Atypical Antipsychotics*. Psychiatry Res., vol. 177(1-2): pp. 77–83, May 2015.

- [80] M.P. Caligiuri, H. L. Teulings, C. E. Dean, A. B. Niculescu and J.B. Lohr. *Handwriting movement analyses for monitoring drug-induced motor side effects in schizophrenia patients treated with risperidone*. Human Movement Science, vol. 28(5), pp. 633-42, October 2009.
- [81] M.P. Caligiuri, H. L. Teulings, J. V. Filoteo, D. Song and J.B. Lohr. *Quantitative measurement of handwriting in the assessment of drug-induced parkinsonism*. Human Movement Science, vol.25(4-5), pp. 510-22, October 2006.
- [82] S. Chang and N. Yu. *Handwriting movement analyses comparing first and second graders with normal or dysgraphic characteristics*. Res Dev Disabil, vol. 34(9), pp. 2433-41, September 2013.
- [83] S. Chang and N. Yu. *The effect of computer-assisted therapeutic practice for children with handwriting deficit: a comparison with the effect of the traditional sensorimotor approach*. Res Dev Disabil, vol. 35(7), pp. 1648-57, July 2014.
- [84] I. Terzi. *Il Metodo Spazio-Temporale*. Milano: Ed. Ghedini, 1995.
- [85] P. E. Tressoldi and C. Cornoldi. *Manuale della batteria per la valutazione della scrittura e della competenza ortografica*. Firenze: Ed.O.S., 2000.
- [86] J. Iverson and E. Thelen. *Hand, mouth and brain: the dynamic emergence of speech and gesture*. Journal of Consciousness Studies, vol. 6, pp. 19-40, 1999.
- [87] K. E. Beery and N. A. Buktenica. *VMI - Developmental Test of Visual-Motor Integration*. Ed.O.S., 2000.
- [88] S. Henderson and D. Sugden. *The Movement Assessment Battery for Children*. Psychological Corporation, 1992.
- [89] R. Plamondon. *On the origin of asymmetric bell-shaped velocity profiles in rapid-aimed movements*. Tutorial in motor neuroscience, J.Requin and GE Stelmach (Eds), Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, pp. 283-295, 1991.
- [90] S.M. Rueckriegel, F. Blankenburg, R. Burghardt, S. Ehrlich, G. Henze, R. Meral et al.. *Influence of age and movement complexity on kinematic hand movement parameters in childhood and adolescence*. International Journal of Developmental Neuroscience vol. 26(7), pp. 655-63, August 2008.
- [91] M.M. Schoemaker, C. E. Ketelaars, M. van Zonneveld, R. B. Minderaa and T. Mulder. *Deficits in motor control processes involved in production of graphic movements of children with attention-deficit-hyperactivity disorder*. Developmental Medicine and Child Neurology, vol, 47(6), pp. 390-5, June 2005.
- [92] H. Van Mier. *Developmental differences in drawing performance of the dominant and non dominant hand in righthanded boys and girls*. Human Movement Science, vol. 25, pp. 657-677, 2006.
- [93] S. Rosenblum, A. Y. Dvorkin and P.L. Weiss. *Automatic segmentation as a tool for examining the handwriting process of children with dysgraphic and proficient handwriting*. Human Movement Science, vol. 25, pp. 608-621, 2006.
- [94] M. Borean, G. Paciulli, L. Bravar and S. Zoia. *Test DGM-P - Test per la valutazione delle difficoltà grafomotorie e posturali della scrittura*, Ed. Erickson, 2012
- [95] C. Marquardt, W. Gentz and N. Mai. *On the role of vision in skilled handwriting*, Handwriting and Drawing Research, pp. 87-97, 1996.
- [96] «www.treccani.it» [Online]. Available: [http://www.treccani.it/enciclopedia/sindrome-da-deafferentazione_\(Dizionario-di-Medicina\)](http://www.treccani.it/enciclopedia/sindrome-da-deafferentazione_(Dizionario-di-Medicina)), 2010
- [97] M.C. Hepp-Reymond, V. Chakarov, J. Schulte-Mönting, F. Huethe and R. Kristeva. *Role of proprioception and vision in handwriting*. Brain Res. Bull, n. 79, pp. 365-370, 2009.
- [98] W. Reavley. *The use of biofeedback in the treatment of writer's cramp*. J. Behav. Ther. Exp. Psychiatry 6, pp. 335-338, 1975.

- [99] J. Danna, M. Fontaine, V. Paz-Villagrán, C. Gondre, E. Thoret, M. Aramaki, R. Kronland-Martinet, S. Ystad and J.L. Velay. *The effect of real-time auditory feedback on learning new characters*. Human movement science 43, pp. 216-228, 2015.
- [100] E. Thoret, M. Aramaki, R. Kronland-Martinet, J.L. Velay and S. Ystad. *From sound to shape: auditory perception of drawing movements*. Journal of experimental psychology: human perception and performance, vol. 40, n. 3, pp. 983-994, 2014.
- [101] J. Danna, V. Paz-Villagrán, C. Gondre, M. Aramaki, R. Kronland-Martinet, S. Ystad and J.L. Velay. *Let Me Hear Your Handwriting!*. Evaluating the Movement Fluency from Its Sonification, PLoS One 10(6), 2015.
- [102] A.Z. Gazzola, L. Aziz-Zadeh and C. Keysers. *Empathy and the somatotopic auditory mirror system in humans*. Curr Biol, vol. 16, pp. 1824-1829, 2006.
- [103] Y. Capuzzo. *Il movimento attivo nella memoria di lavoro visuo-spaziale in bambini con paralisi cerebrale infantile*. Università di Pisa, Facoltà di Medicina e Chirurgia, 2006/2007.
- [104] L.M. De Lau and M.M. Breteler. *Epidemiology of Parkinson's Disease*. Lancet Neurol, 5(6), 525-35, 2006.
- [105] S. Von Campenhausen, B. Bornschein, R. Wick, K. Botzel, C. Sampaio, W. Poewe et. al.. *Prevalence and incidence of Parkinson's disease in Europe*. Eur Neuropsychopharmacol., 15(4), 473-9, 2005.
- [106] J.I. Contreras-Vidal and E. Stelmach. *Effects of parkinsonism on motor control*. Life Sci, 58(3), 165-76, 1995.
- [107] J.A. Sisti, B. Christophe, A. Rakovich Seville, A.L.A. Garton, V.P. Gupta, A.J. Bandin, Q. Yu and S.L. Pullman. *Computerized spiral analysis using iPad*. J Neurosci Methods, 275, 50-54, 2017.
- [108] P. Drotar, J. Mekyska, I. Rektorova, L. Masarova, Z. Smekal and M. Faundez-Zanuy. *Evaluation of handwriting kinematics and pressure for differential diagnosis of Parkinson's disease*. Artif Intell Med, 67, 39-46, 2016.
- [109] E.J. Smith, A.J. Tolonen, L. Cluitmans, M. van Gils, A. Conway Bernard, C. Zietsma Rutger, L. Leenders Klaus and N.M. Maurits. *Standardized handwriting to assess bradykinesia, micrographia and tremor in Parkinson's disease*. 9, 1-7, 2014.
- [110] S. Rosenblum, S. Margalit, S. Zlotnik, I. Erikh and I. Schlesinger. *Handwriting as an objective tool for parkinson's disease diagnosis*. J Neurol, 260, 2357-2361, 2013.
- [111] A. Letanneux, J. Danna, J.L. Velay, F. Viallet and S. Pinto. *From micrographia to Parkinson's disease dysgraphia*. Mov Disord, 29, 1467-75, 2014.
- [112] A. Accardo, A. Chiap, S. Marino, P. Lanzafame and D. Bramanti. *Kinematic Analysis of Tremor*, Biomed. Sci. Instrum. 46, 347-361, 2010.
- [113] J. Jankovic: *Parkinson's disease: clinical features and diagnosis*. pp. 368-374, Settembre 2007.
- [114] A.O. Andrade, A.A. Pereira, M.F. Soares de Almeida, G.L. Cavalheiro, A.P.S. Paixao, S.B. Fenelon, V.C. Dionisio. *Human Tremor: origins, detection and quantification*, Chapter 1, pp 7-18, 2013.
- [115] P.H. Mansur, L.K. Cury, A.O. Andrade, A.A. Pereira, G.A. Miotto, A.B. Soares and E.L. Naves. *A review on Techniques for Tremor Recording and Quantification*. pp 343-362, 2007.
- [116] Angelo Antonini. *La PET e la SPECT nella diagnosi differenziale della malattia di Parkinson con i Parkinsonismi*. pp 1-4, luglio 2000
- [117] N. Dounskaia, A.W.A. Van Gemmert, B.C. Leis and G.E. Stelmach. *Biased Wrist and Finger Coordination in Parkinsonian Patients during Performance of Graphical Tasks*. 2010, pp 1-13, 2010.
- [118] K.C. Veluvolu, U.X. Tan, W.T. Latt, C.Y. Shee and W.T. Ang: *Bandlimited Multiple Fourier Linear Combiner for Real-time Tremor Compensation*, pp 2847-2850, Conf Proc IEEE Eng Med Biol Soc 2007.

- [119]M. Memedi et al.. *Automatic Spiral Anaysis for Objectrive Assessment of motor symptoms in parkinson's disease*. Sensors 2015.
- [120]M. G. Longstaff and R. A. Heath *Space-time invariance in adult handwriting*. Acta Psychologica, vol. 97, no. 2, pp. 201-214, 1997.

PUBBLICAZIONI

- A. A. Accardo, F. Costa, I. Perrone, *Influence of the Spatio-Temporal Terzi's Treatment on Kinematics of Cursive Writing of Dysgraphic Subjects*, IEEE Trans Hum Mach, 47(2), pp. 249-258, 15 Feb 2017;
- B. P. D'Antrassi, F. Costa, E. Fornasa, A. Accardo *Influence of mother tongue on dynamic handwriting features in primary school*, Proceedings of the VI Latin American Conference on Biomedical Engineering - CLAIB 2014, Paraná, Entre Rios, Argentina, 29 - 31 ottobre 2014, Vol. 49, pp 552-555, IFMBE Proceedings, 2015;
- C. F. De Dea, A. Accardo, L. Cerni e F. Costa, *Sonification of pre and post rehabilitation writing*, Atti del V Congresso Nazionale di Bioingegneria, Università degli Studi Federico II di Napoli, 20-22 giugno 2016, pp.267-269, Abstract eBOOK, Edizioni Ziino, 2016;
- D. F. Costa, S. Marino, A. Accardo, *Kinematic analysis of handwriting in Parkinson disease*, accettato per la presentazione al Convegno IGS 2017 e per la successiva pubblicazione tra i relativi atti.