



1° Facoltà di Medicina e Chirurgia

**La Sapienza
Università di Roma**

**corso di laurea in fisioterapia
direttore Prof. Amabile**

TESI DI LAUREA

PER UNA VALUTAZIONE INTEGRATA:

CONSEGUENZE ADATTIVE DELL'ASTIGMATISMO FUNZIONALE

RELATORE: PAOLA COLONNELLI

CANDIDATA: GIULIA BOSCHI

CORRELATORE: ANTONIO GEMIGNANI

N.M. 839652

A.A. 2007-2008

SOMMARIO

1. Introduzione: Postura, visione, oculomotricità e optometria comportamentale.....	3
variabili soggettive	13
La visione.....	15
Rappresentazione interna e postura	21
Centratura ed identificazione secondo l'optometria comportamentale	22
2- Oculomotricità e movimenti del capo	27
I movimenti della testa	27
Movimenti monoculari o duzioni	29
Caratteristiche peculiari dei muscoli oculomotori (extraoculari)	34
Movimenti binoculari	38
Muscolatura intrinseca e ametropie	41
Innervazione	44
Pattern di motilità oculare	47
La propriocezione dei muscoli estrinseci dell'occhio	59
Relazione fra sistema oculomotore e cefalomotore	61
3-Conseguenze adattive dell'astigmatismo funzionale.....	67
Definizione di astigmatismo	71
Classificazione degli astigmatismi.....	71
L'astigmatismo funzionale	75
4 - Conclusioni: per una valutazione integrata.....	87
5- Bibliografia.....	98
Testi di riferimento:	98
Articoli/saggi citati	98
Altri articoli/saggi selezionati	107

1. INTRODUZIONE: POSTURA, VISIONE, OCULOMOTRICITÀ E OPTOMETRIA COMPORTAMENTALE.

Il sistema posturale permette al corpo di contrastare la forza di gravità preservando tonicamente l'equilibrio nella posizione statica, controilanciando le perturbazioni con contrazioni fasiche, irradiando preventivamente il tono, lungo catene cinetiche atte a sostenere il movimento programmato. I meccanismi anticipatori (feed-forward) e compensatori (feed-back) di distribuzione del tono muscolare, basandosi su coordinate estrinseche ed intrinseche, consentono l'ottimizzazione (minore dispendio energetico) nell'esecuzione del lavoro antigravitario e del movimento volontario.

La distribuzione del tono dipende da schemi automatici (riflessi posturali) e strategie apprese, basate principalmente sull'anticipazione dell'effetto prodotto dal movimento; riflette abitudini comportamentali, culturalmente e cognitivamente mediate, e offre indizi sullo stato d'animo e sulla condizione psicologica della persona.

E' quindi necessario distinguere l'*equilibrio posturale* - inteso come strategia generale antigravitaria basata essenzialmente sui meccanismi innati di controllo posturale e sulla loro articolazione – dall'*atteggiamento posturale* che colloca le strategie posturali in un contesto comportamentale. L'*atteggiamento posturale* non è mera interazione di un corpo con un compito posto in uno spazio gravitazionale; si estende alla peculiare reattività, alle singole caratteristiche morfo-funzionali, psicologiche e biografiche della persona.

Le *tappe di sviluppo* delle strategie posturali - intese come estensione progressiva del controllo centrale sui riflessi posturali, apprendimento e automatizzazione di schemi complessi non stereotipati - sono generalmente abbastanza sovrapponibili nella popolazione generale, e andrebbero distinte dalle *abitudini posturali* che dipendono da biotipo, temperamento ed attività consuete.

Le informazioni sulle coordinate intrinseche ed estrinseche arrivano al sistema posturale da afferenze somatosensoriali (principalmente tattili); propriocettive (recettori

osteotendinei e muscolari), vestibolari ed ottiche. Il cervello integra ed *interpreta* tali coordinate anticipando a feed-forward quale sarà la condizione dei segmenti corporei nello spazio gravitazionale nel momento in cui la distribuzione del tono sarà effettivamente in atto. Nelle parole di Berthoz “il cervello è prima di tutto una macchina biologica con cui giocare d’anticipo¹”. E’ stato dimostrato che il semplice *aspettarsi* una perturbazione dell’equilibrio riduce di molto lo spostamento del baricentro in occasione della perturbazione stessa, anche non conoscendone anticipatamente direzione ed intensità².

La programmazione anticipata necessita di una valutazione preliminare, basata essenzialmente sulle coordinate visive³. L’input visivo ha un ruolo gerarchicamente superiore tanto nell’orientamento (propria posizione nello spazio) quanto nella localizzazione (oggetti posti nello spazio). La visione è l’ultimo senso a svilupparsi completamente –la maturazione dell’apparato visivo nel suo insieme non si completa prima degli 8-10 anni – ma è il primo cui facciamo affidamento quando, nella vita uterina e perinatale, gli altri riflessi posturali non sono attivi⁴. Continuiamo, anche nella vita adulta, a porre il sistema visivo al vertice della gerarchia fra i sistemi posturali integrati ogni qual volta si presenti una condizione nuova o che necessiti di apprendimento; ci affidiamo invece essenzialmente a sistemi con elaborazione più rapida (vestibolari e somatici) nei riflessi, negli schemi motori, nelle attività automatizzate.

Le informazioni provenienti da ciascun sistema (somato-sensoriale, vestibolare, ottico ecc.) vengono elaborate in parallelo – e ciò anche all’interno di ogni singolo

¹ A. Berthoz: *Il senso del movimento* Mc Graw- Hill 1998

² Guerraz M, Thilo KV, Bronstein AM, Gresty MA: *Influence on action and expectation on visual control of posture* Cognitive Brain Research n. 11 2001 PMID: 11275487.

³ J Massion: *Movement, posture and equilibrium: interaction and coordination*. Progress in neurobiology 1992-38 PMID: 1736324

⁴ G. Butterworth, L. Hicks: *Visual proprioception and postural stability in infancy: a developmental study* Perception 1977/6 PMID: 866081; Woollacott M, Debu B, Mowatt M: *Neuromuscular control of posture in the infant and child: is vision dominant?* Journal of Motor Behaviour Giugno 1987 PMID: 14988057.

sistema – e integrate, secondo una modalità a gerarchie variabili, in maniera da produrre un modello *coerente*.

Nella maggior parte dei casi, le afferenze discordanti con i dati dell'insieme vengono attivamente soppresse; è stato dimostrato, ad esempio, che le vibrazioni applicate ai muscoli della caviglia influenzano in misura minore l'oscillazione se i muscoli sono affaticati; secondo gli autori ciò potrebbe essere dovuto al fatto che il SNC inibisce temporaneamente in una certa misura le afferenze da propriocettori non in stato ottimale⁵, si tratta di un'inattivazione reversibile se reversibile è l'*impairment* funzionale. La fatica dei muscoli del collo altera notevolmente l'equilibrio posturale richiedendo la vicarianza del sistema visivo⁶; d'altra parte, come vedremo, difetti visivi possono condizionare in modo determinante il tono della muscolatura cervicale.

Il recettore visivo è particolarmente soggetto alla strategia dell'inibizione attiva: il cervello può decidere di rinunciare completamente alle afferenze visive di un occhio se queste non sono omologhe a quelle dell'altro, poiché lo sviluppo del sistema visivo è stimolo-dipendente e si completa in tempi lunghi, se l'*impairment* non è rapidamente reversibile nei bambini ciò può tradursi in un danno permanente (ambliopia).

D'altra parte, gli studi in assenza di gravità ⁷(sugli astronauti), mostrano che l'input visivo e la propiocezione dei muscoli extraoculari sono completamente indipendenti dal campo gravitazionale, laddove le afferenze somato-sensoriali (incluse

⁵ Vuillerme N, Danion F, Forestier N, Nougier V *Postural sway under muscle vibration and muscle fatigue in humans* Neuroscience letters 2002 PMID 12419498

⁶ Schieppati M, Nardone A, Schmid M; *Neck muscle fatigue affects postural control in man*; Neuroscience 2003 Vol 121; PMID: 14521987

⁷ Baroni G, Ferrigno G, Rabuffetti M, Pedotti A, Massion J *long term adaptation of postural control to weightlessness* Experimental Brain Research Ottobre 1999 PMID: 10501814; Baroni G, Ferrigno G, , Pedrotti A, Massion J; *Static and dynamic postural control in long-term microgravity: evidence of a dual adaptation*; Journal of applied Physiology, Gennaio 2001; PMID: 11133912; Koga K, *Gravity cue has implicit effects on human behaviour* Aviation Space and Environmental Medicine, Settembre 2007 PMID 10993315 ; Lestienne F, Gurfinkel VS *Postural control in weightlessness: a dual process underlying adaptation to an unusual environment*. Trends in Neuroscience 1988/11 PMID 2469196.

quelle del collo) risultano gravità dipendenti. Ciò suggerisce una preferenza per i recettori oculari ogni qualvolta le afferenze somatosensoriali risultino carenti o in conflitto⁸.

Per formulare ipotesi a feed-forward, è necessario per il cervello attingere ad engrammi mnestici derivati da esperienze precedenti; inoltre si rende necessario un continuo feed-back sensoriale per rendere l'esecuzione del movimento - o dello sforzo antigravitario- fluida ed efficace. E' molto difficile, ad esempio, afferrare un oggetto con una mano anestetizzata: pur essendo le afferenze visive e le efferenze motorie perfettamente integre, manca il feedback del cosiddetto *senso aptico* (combinazione di tatto, propiocezione, cinestesia, batiestesia, equilibrio e percezione di gravità). Si deve all'approccio 'ecologico' di J.J. Gibson, all'inizio degli anni '60⁹, il superamento dell'ottica che distingue le percezioni sulla base delle differenze fra i recettori di riferimento: al senso tattile "passivo" della mera consapevolezza di contatto, egli affianca un senso "attivo" – detto appunto aptico¹⁰ - finalizzato all'esplorazione dello spazio personale e peripersonale, esplorazione che si può estendere all'ambiente esterno grazie alla vista, se consideriamo – con Merleau-Ponty – che la visione "è una palpazione attraverso lo sguardo"¹¹.

Per riprendere l'approccio 'basato sul recettore' possiamo ulteriormente distinguere l'informazione somato-sensitiva in:

- esterocettiva- proveniente dai meccanocettori superficiali (corpuscoli di Meisner, dischi di Merkel e corpuscoli del Pacini, questi ultimi

⁸ G Clement, VS Gurfinkel , F Lestienne, MI Lipshits, KE Popov *Adaptation of postural control to weightlessness* Experimental Brain research 1984/57 PMID: 6519230.

⁹ Gibson JJ *The senses considered as perceptual systems* Houghton Mifflin 1966.

¹⁰ Mazzeo M *Tatto e linguaggio: il corpo delle parole*, Editori Riuniti 2003.

¹¹ Merleau-Ponty M: *Il visibile e l'invisibile*, Bompiani 1969, citato in Berthoz *Il senso del movimento*, cit.

particolarmente sensibili alla vibrazione). Particolarmente importanti i recettori cutanei del piede¹².

- connettiva- (sottocutaneo periarticolare), in particolare dai corpuscoli del Ruffini che rispondono agli spostamenti tangenziali della cute sui piani sottostanti), senza dimenticare i barocettori vascolari¹³.
- propriocettiva in senso stretto- fusi neuro-muscolari, organi tendinei del Golgi, meccanocettori intrarticolari (e terminazioni a palizzata per i soli muscoli extraoculari).

Il complesso sistema di integrazione fra corteccia, talamo, nuclei della base, cervelletto e midollo spinale, consente di gestire attivazione ed inibizione di riflessi e schemi motori. Sebbene l'elaborazione cosciente abbia un ruolo (in particolare nella postura statica) l'equilibrio rispetto alle perturbazioni ambientali viene mantenuto soprattutto grazie a tali circuiti subcoscienti rapidi.

I riflessi posturali sono essenzialmente riflessi di raddrizzamento: visivi, vestibolari, cervico-collici, spino-cervicali (*body on head*) e spinali (*body on body*). Per il mantenimento della postura, i riflessi debbono attivarsi in conseguenza delle richieste ambientali (perturbazioni e compiti) ed essere controllati – ed inibiti quando opportuno – da centri superiori (programmazione a feed-forward). Vedremo nel prossimo capitolo sinergie inibitorie e facilitanti dei riflessi posturali del collo.

Il cervelletto (in particolare il verme) riceve informazioni dai propriocettori attraverso il tratto spinocerebellare dorsale, mentre dal tratto spinocerebellare ventrale riceve afferenze dai generatori spinali degli schemi motori; al cervelletto, dai collicoli

¹² Inglis JT, PM Kennedy, C Wells, R Chua *The role of cutaneous receptors in the foot* Advances in experimental medicine and biology 2002 PMID: 12171100; Kavounoudias A, Roll R, Roll JP *Foot sole and ankle muscle inputs contribute jointly to human erect posture regulation* The Journal of Physiology Maggio 2001 PMID 11313452.

¹³ Vaitl i D, H Mittlestaedt, R Saborrowski, R Stark, F Baisch: *Shifts in blood volume alter the perception of posture: further evidence for somatic graviception* International Journal of Psychophysiology Aprile 2002, PMID: 11852154

superiori del mesencefalo, giungono afferenze visive, mentre afferenze vestibolari ne raggiungono il lobulo flocculo-nodulare. L'effettore principale delle efferenze cerebellari al tronco è il fascio rubro spinale, mentre il fascio tetto spinale (che origina dagli strati profondi dei collicoli superiori e termina nella zona ventro-mediale della zona intermedia dei segmenti cervicali) controlla la coordinazione dei movimenti di testa e collo rispetto a stimoli visivi ed uditivi.¹⁴

Ciò permette al cervelletto di operare un costante riadattamento di questi sistemi integrati, elaborando (neocerebello) il delta fra esecuzione avvenuta ed esecuzione programmata (correzione a feedback degli schemi premotori).

Le perturbazioni del corpo nello spazio seguono essenzialmente un flusso afferente “dal basso verso l’alto” (bottom-up); il controllo delle relazioni spaziali capo-tronco segue piuttosto un flusso top-down centrato sulle afferenze visive e vestibolari¹⁵.

Bisogna anche considerare che il vestibolo innesca in maniera abbastanza indipendente i riflessi di raddrizzamento *head on body* (riflesso vestibolo-collico) da quelli *body on body* (riflesso vestibolo-spinale)¹⁶.

Già da un paio di secoli il vestibolo è riconosciuto come l’organo del “senso dell’equilibrio”; la sua attività è interconnessa ai movimenti oculari al punto tale che la video-oculografia (VOG) –la quale ha sostituito la più invasiva elettroistagmografia (ENG)- è oggi considerata il metodo elettivo per valutare la funzione vestibolare¹⁷.

¹⁴ *Neurologia* di Fazio Loeb 2003 Universo ed

¹⁵ John J. Buchanan and Fay B. Horak *Emergence of Postural Patterns as a Function of Vision and Translation Frequency* The Journal of Neurophysiology Vol. 81 No. 5 May 1999 PMID: 10322069.

¹⁶ MS Welgampola, JG Colebatch, *Vestibulospinal reflexes: quantitative effects of sensory feedback and postural task*. Experimental Brain Research 2001 /139 PMID 115473

¹⁷ Gans R.E.: *Video-oculography: a new diagnostic technology for vestibular patients* The Hearing Journal, Maggio 2001, Vol 54, N 5. Si veda anche Ian S. Curthoys; *The role of ocular torsion in visual measures of vestibular function*; Brain Research Bulletin, Maggio -Giugno 1996 ; PMID: 8886365

L'oculomotricità gioca un ruolo di primo piano negli assetti posturali anche per la relazione fra movimenti degli occhi e distribuzione del tono muscolare nel collo; relazione che è particolarmente stretta, tanto che - in tempi recenti - si sta proponendo lo *smooth pursuit neck torsion test* (SPNT) per valutare, attraverso il rallentamento del guadagno¹⁸ nell'inseguimento lento e nelle saccadi, i danni associati a colpo di frusta (WAD *whiplash associated disorders*)¹⁹. Lo SPNT secondo alcuni studi risulterebbe altamente specifico (92%) e sensibile (72%)²⁰, mentre altri non ne condividono l'affidabilità²¹.

Il cervello programma dunque la distribuzione del tono che sarà necessaria nel momento successivo a quello della percezione, confronta - grazie al lavoro cerebellare - il risultato ottenuto con il risultato atteso ed ottimizza su questa base gli schemi motori rendendoli progressivamente più efficienti ed economici.

¹⁸ Si intende per guadagno (*gain*) il rapporto fra velocità occhio /velocità della testa, idealmente prossimo ad 1.

¹⁹ Tjell C., Rosenhall U. *Smooth pursuit test for cervical dizziness* American Journal of Otology 1998 PMID 9455954. Si veda anche Prushansky T, Dvir Z, Pevzner E, Gordon CR; *Electro-oculographic measures in patients with chronic whiplash and healthy subjects: a comparative study*; Journal of Neurology, Neurosurgery and Psychiatry, Novembre 2004; PMID: 15489407 e Sterling M, Jull G, Vincenzino B, Kenardy J.; *Characterization of Acute Whiplash-Associated Disorders*; Spine, Gennaio 2004; PMID: 14722412.

²⁰ Tjell, Tenenbaum, Sandstrom *smooth pursuit neck torsion test: a specific test for whiplash disorders?* Journal of whiplash and related disorders 31/1/2002.
Randi Gimse, Carsten Tjell, Ivar a Bjørgen, Carsten Saunte *Disturbed Eye movements after whiplash Due to Injuries to the Posture Control System* Journal of clinical and experimental Neuropsychology 1996/18 PMID: 8780953.

Treleaven J, Jull G., Sterling M *Dizziness and unsteadiness following whiplash injury: characteristic features and relationship with cervical joint position error*. Journal of rehabilitation medicine gennaio 2003 PMID: 12610847

Rubin AM, Woolley SM, Dailey VM, Goebel JA: *Postural stability following mild head or whiplash injuries*. The American Journal of Otology, Marzo 1995, PMID: 8572122

²¹ Kongsted A *Are altered smooth pursuit eye movement related to chronic pain and disability following whiplash injuries? A prospective trial with one-year follow up*. Clinical Rehabilitation vol 22 Maggio 2008 PMID: 18441043.

La ripetizione prolungata nel tempo di un determinato schema motorio (allenamento) ne permette un'esecuzione sempre più automatizzata e l'abitudine a strategie viziate può strutturare compensi para-fisiologici.

In posturologia l'ottica segmentale è stata da tempo superata, grazie anche a studi stabilometrici che hanno evidenziato collegamenti continui – dalla testa ai piedi - mediati da catene cinetiche muscolari e da anastomosi nei sistemi neurali di riferimento. I muscoli estrinseci dell'occhio, attraverso queste interazioni, interagiscono non solo – come già accennato – con la muscolatura del collo, ma anche con tutto il resto del corpo; in particolare con le quattro estremità. Se la coordinazione occhio-mano è un aspetto centrale delle prassie, la relazione fra occhio, rachide e recettore plantare sta assumendo sempre maggiore importanza in posturologia; inoltre, studi recenti sembrano suggerire alterazioni della motilità oculare anche in conseguenza di modificazioni dell'apparato stomatognatico²².

A partire dalla fine degli anni '90, la scuola di posturologia francese di Bernard Bricot adotta la nuova ottica emergente dei sistemi posturali integrati, secondo la quale l'apparato vestibolare risulta preminente solo nell'equilibrio dinamico. Maggiore enfasi viene posta sul ruolo delle afferenze propriocettive di piede ed occhio, in particolare nell'atteggiamento posturale statico, che costituisce il primo elemento di valutazione per il fisioterapista.

Isolato dalle afferenze somato-sensoriali e visive, il solo sistema vestibolare non è infatti in grado di fornirci informazioni precise sulla nostra posizione nello spazio; classico l'esempio della persona intrappolata sotto la neve cui si consiglia di lasciar cadere un po' di saliva dalla bocca per capire in che direzione scavare.

L'apparato vestibolare è parte fondamentale di quel complesso sistema che regola i movimenti coniugati di testa ed occhi; registra essenzialmente accelerazioni e decelerazioni e non è attivo quindi né nella statica né nel movimento lineare e costante. In

²² D. Barraud-Crouzet *Des perturbations posturales qui étonnent l'orthoptiste* in "Posture et environnement" (Eds M Lacour, P. M. Gagey & B. Weber) Sauramps médical Montpellier, 1997.

queste condizioni sono gli esterocettori e propriocettori periferici a regolare il sistema tonico-posturale, soprattutto piede ed occhio, o meglio la combinazione delle loro afferenze.

Un soggetto sano è normalmente perfettamente in grado di seguire una traiettoria lineare camminando ad occhi bendati; se un tale soggetto viene fatto camminare per 1-2 ore su una piattaforma rotante, così da rimanere fermo nello spazio mentre la piattaforma sotto di lui si muove e poi, sceso dalla piattaforma, gli si chiede nuovamente di camminare ad occhi bendati, questi seguirà *inconsapevolmente* una traiettoria curva. Se, sceso dalla piattaforma, lo si pone invece bendato su una sedia a rotelle, egli sarà in grado di procedere nuovamente in linea retta.

Ciò dimostra che l'alterazione tonico posturale dipende dal *condizionamento* del piede²³; questo fenomeno è stato definito PKAR (podokinetic after rotation).

Una stimolazione ottocinetica (OK) può produrre lo stesso effetto²⁴: diversi soggetti, negativi al test di Fukuda della marcia sul posto, dopo essere stati posti per 30' in un cilindro con parete rotante (il verso, orario o antiorario, scelto casualmente) alla ripetizione ad occhi chiusi del Fukuda test, ruotavano invariabilmente in senso opposto a quello della rotazione del cilindro.

Da questo studio risulta che la rotazione apparente, prodotta dall'illusione ottica, crea un condizionamento simile a quello della rotazione reale registrata dai recettori somatici del piede.

²³ Geoffrey Melvil Jones *La postura* in R. Kandel, H. Schwartz, T.M. Jessel *principi di neuroscienze* CEA 2007

²⁴ C.R. Gordon, Dror Tal, Natan Gadoth, Avi Shupak *prolonged optokinetic Stimulation Generates Podokinetic after rotation* Ann. NY Academy of Science 2003, PMID: 14662469. Si veda anche Soetiching JF, Berthoz A, *Dinamic role of vision in the control of posture in man* Experimental Brain research Agosto 1979 No 36 PMID 477782 e Tanashi S, Ujike H, Kozawa R, Ukai K; *Effects of visually simulated roll motion on vection and postural stabilization*; Journal of neuroengineering and rehabilitation Ottobre 2007; PMID: 17922922

Sistemi molto diversi e lontani fra loro possono produrre uno stesso effetto, perché – nel sistema posturale integrato – non conta tanto da *dove* proviene l'informazione quanto come viene *interpretata* dai sistemi del SNC che *rispondono in modo globale*.

Bricot ritiene che asimmetrie in apertura di un singolo piede in posizione eretta siano patognomoniche di squilibri di tensione a livello della muscolatura estrinseca dell'occhio²⁵. La relazione fra eteroforie ed appoggio podalico sembrerebbe confermata da esperimenti con utilizzo di lenti prismatiche, che rendono possibile la simulazione dell'eteroforia misurandone la sua influenza sull'equilibrio posturale²⁶.

Egli individua nelle vie propriocettive trigeminali, che raggiungono direttamente il mesencefalo (connettendosi anche con il nucleo motore masticatorio), il substrato anatomico per le relazioni oculo-cervico-occlusali, passibili di influenzare la postura.

L'estensione del nucleo sensitivo del trigemino e i suoi rapporti con i nuclei oculomotori, faciale e accessorio spinale potrebbero spiegare le relazioni fra variazioni dell'oculomotricità e trattamenti ortodontici, fra spessore del bite e numero di saccadi²⁷.

Studi elettromiografici condotti da due anatomisti italiani avrebbero dimostrato una correlazione fra occlusione (sperimentalmente alterata) e tono dei muscoli peronieri e gastrocnemio²⁸.

²⁵ Bernard Bricot *La riprogrammazione posturale globale* Statipro 1998

²⁶ Matheron Eric; Lê Thanh-Thuan; Yang Qing; Kapoula Zoï *Effects of a two-diopter vertical prism on posture* Neuroscience letters Agosto 2007;423. PMID: 17709195

²⁷ Lavori citati in S. E. Salteri *mio caro dentista occhio all'occhio* Il Corriere ortodontico vol III Maggio-Giugno 2006.

²⁸ B Valentino and F Melito *Functional relationships between the muscles of mastication and the muscles of the leg* Surgical and radiological anatomy 1991 PMID: 2053042

VARIABILI SOGGETTIVE

Quanto più la strategia posturale (antigravitaria o cinestesica) può essere automatizzata, tanto più i sistemi di riferimento risultano ridondanti, poiché ciascuno di essi può potenzialmente vicariare gli altri: la vista può compensare un difetto vestibolare – come si evince facilmente dal test di Romberg – così come l'apparato vestibolare e la propriocizione plantare sono sufficienti a mantenere l'equilibrio anche ad occhi chiusi.

Questa ridondanza permette una selezione preferenziale ed individuale sul grado di prevalenza di ciascun sistema²⁹. La qualità della propriocizione è influenzata inoltre dallo spostamento dell'attenzione cosciente³⁰

Interessante notare che le variabili soggettive dell'atteggiamento posturale, ossia la sensibilità individuale nella scelta della proporzione e della gerarchia fra i diversi sistemi posturali, si manifestano in particolare rispetto al referente visuale statico.

Il *Rod and frame test* di Oltman³¹ (1968) permette di distinguere i soggetti con orientamento preferenziale sulle afferenze visive (definiti dipendenti dal campo visivo DC) da quelli che si basano di più sulle afferenze posturo-gravitarie. Il test è molto semplice: i soggetti sperimentali vengono posti in un tunnel con uno sfondo a righe che

²⁹ B. Isableu, B. Amblard, T Ohlmann, J Cremieux *Y-a-t-il un lien entre la performance posturale et le degré de dépendance perceptive à l'égard du champ visuel ?* in "Posture et environnement" (Eds M Lacour, P. M. Gagey & B. Weber) Sauramps Médical 1997.

³⁰ Hosopod V, Aimonetti JM, Roll JP, Ribot-Ciscar E. *Changes in human muscle spindle sensitivity during a proprioceptive attention task* Journal of Neuroscience Maggio 2000 PMID 17494703

³¹ In francese test "du cadre et de la baguette". Sull'utilizzo di questo test si veda anche Grod JP, Diakov PR *Effect of neck pain on verticality perception : a cohort study* Archives of physical and medical Rehabilitation Marzo 2002, No 83, PMID11887124.

non rispetta la verticale gravitaria. Nel tunnel è posto un piccolo bastone fissato su un perno, ai soggetti viene chiesto di metterlo dritto. Coloro che lo orientano secondo le righe dello sfondo sono i DC, quelli che riescono a metterlo verticale nonostante l'effetto disturbante dello sfondo "storto" preferiscono il sistema posturo- gravitativo; sono questi ultimi soggetti ad avere le migliori "performances" posturali in condizioni di disturbo (pavimento morbido e restrizioni visive).

Un recente studio sperimentale³² suggerisce la possibilità che esistano differenze di genere sulla scelta preferenziale del sistema di riferimento: la dipendenza dal campo visivo risulta significativamente superiore nelle donne, tuttavia le performances posturali delle donne 'dipendenti dal campo visivo' non si discostano molto dalle migliori performances delle 'non dipendenti'; mentre gli uomini 'dipendenti dal campo visivo' (una percentuale inferiore a quella registrata nel sesso femminile) mostrano performances posturali significativamente inferiori a quelle degli uomini non dipendenti'. Nel sesso femminile, dunque, la scelta soggettiva nella gerarchia dei sistemi di riferimento è meno influente - rispetto a quella degli individui di sesso maschile – sull'output posturale finale.

Solo nelle donne sembrerebbe inoltre esserci una correlazione fra età ed aumento della dipendenza visiva. In ogni caso le differenze inter-individuali (strategie dei processi di vicarianza) diminuiscono, come logico, sotto la pressione di ostacoli ed elementi di disturbo. Minore il grado di ridondanza dei sistemi di riferimento, maggiore la generalizzazione del comportamento. D'altro canto, almeno per la muscolatura cervicale, quando tutte le strategie di attivazione sono contemporaneamente disponibili (co-contrazioni e riflessi cervico-collici per generare resistenza in eccentrica, stabilizzazione vestibolo-collica, afferenze oculari...) la soggettività emerge nei compiti multi-tasking e diminuisce nei compiti semplici. Questo è quanto emerge da un interessante studio, condotto da Peterson e collaboratori su soggetti sani, il quale sostiene anche che alcuni muscoli (es. splenio e trapezio) presentano maggiori variabili soggettive di attivazione

³² B. Isableu, B. Amblard, T Ohlmann, J Cremieux *La dépendance perceptive à l'égard des informations visuelles d'orientation est elle prédictive du contrôle visuel de la posture ? ?* in "Posture et environnement" (Eds M Lacour, P. M. Gagey & B. Weber) Sauramps Médical 1997.

rispetto ad altri³³. Lo studio ha sviluppato un modello per i movimenti della testa che include i contributi dal sistema visivo utilizzando come indicatore lo “*head velocity error*” ossia la differenza fra la velocità del bersaglio visivo e velocità della testa.

LA VISIONE

Il recettore oculare interagisce con il sistema posturale attraverso tre diverse modalità: quella sensoriale (visiva), quella cinetica (oculomotrice)³⁴ e quella cognitiva; le nostre attività “visive” vanno ben oltre il guardare. Usiamo la visione per pensare, fantasticare, ricordare...

La visione è un atto cognitivo più che percettivo (per quanto sia possibile considerare i due termini disgiunti). Come sottolinea Ramachandran³⁵:

“L’errore più comune è pensare che l’immagine ottica all’interno del bulbo oculare ecciti i fotorecettori retinici per poi essere trasmessa fedelmente lungo un cavo chiamato nervo ottico e mostrata su uno schermo chiamato corteccia visiva. E’ un evidente errore logico, perché se un’immagine viene proiettata su uno schermo interno, nel cervello ci deve essere qualcuno che la guarda, e perché questo qualcuno possa guardarla, ci dovrà essere qualcun’altro all’interno del suo cervello e così *ad infinitum*”.

E’ quindi necessario abbandonare l’idea di “immagini” nel cervello e ragionare in termini di *trasformati*, ossia rappresentazioni simboliche di oggetti, coordinate ed eventi del mondo esterno.

³³ Peterson BW, Choi H, Hain T, Keshner E, Peng GC; *Dynamic and kinematic strategies for head movement control*; Ann NY Acad Sci Ottobre 2001; PMID: 11710479.

³⁴ P.M. Gagey *L’oculomotricité comme endo-entrée du système postural* in Aggressologie 1987

³⁵ V. S. Ramachandran *Che cosa sappiamo della mente* Mondadori 2004

La retina si sviluppa nella vita fetale direttamente dall'emisfero cerebrale per evaginazione; il nervo ottico (e l'olfattivo) a differenza degli altri nervi cranici, vanno considerati direttamente estroflessioni cerebrali³⁶.

La vista non *arriva* al cervello, è cervello.

La retina stessa può considerarsi un primo elaboratore; oltre alla distinzione fra fotorecettori a cono e a bastoncello, è organizzata con cellule gangliari magnocellulari, (specializzate per raccogliere informazioni su movimento, localizzazione e percezione di profondità) e cellule parvocellulari, che trasducono informazioni relative a colore, forma e struttura. Inoltre la retina è un sistema complesso che integra due sub-sistemi già preposti al raccogliere dati sul 'cosa' (retina centrale: macula e fovea) e sul 'dove' (retina periferica).

Quando guardiamo, le afferenze retiniche vengono proiettate ad almeno trenta zone corticali quasi contemporaneamente. Ogni volta che uno stimolo raggiunge la corteccia visiva, riverbera su due terzi del nostro cervello. Noi non vediamo la realtà come è, bensì come abbiamo imparato a conoscerla ed interpretarla. Come noto, le immagini arrivano capovolte sulla retina, il cervello *apprende* a raddrizzarle. Il neonato vede capovolto finché l'incongruenza di questa percezione con altre percezioni sensoriali (in particolare il tatto) non consente l'elaborazione di un nuovo modello cognitivo.

Dalla retina passando per il nervo ottico (le cui fibre nasali si intersecano nel chiasma), attraverso il tratto ottico, la maggior parte delle fibre raggiunge il corpo genicolato laterale del talamo (primo centro visivo) e quindi, con il fascio di radiazioni ottiche intracerebrali, arriva alla V1, nel lobo occipitale.

Lungo tutta la via che collega il recettore visivo alla corteccia striata, le fibre rispettano una rigida somatotopia, non solo per quanto riguarda la posizione delle fibre centrali (papillo-maculari) rispetto alle periferiche (superiori, inferiori, laterali e mediali) ma anche all'interno delle stesse fibre maculari. La retinotopia si mantiene anche nella

³⁶ Favale, E. Neuroftalmologia in Neurologia di Fazio Loeb 2003 Universo ed.

stratificazione dei corpi genicolati laterali e negli strati neuronali a colonna della corteccia visiva. Data la rigida somatotopia, per osservare il mondo a testa in giù ci vuole un complesso lavoro di elaborazione corticale. Questo è il motivo per cui, entro il *range* delle oscillazioni più consuete della testa, gli occhi vengono spostati e ruotati in modo riflesso, al fine di mantenere quanto più possibile la verticale retinica in linea con la verticale gravitazionale.

Di pertinenza al contesto posturale di nostro interesse è anche l'elaborazione subcognitiva delle afferenze visive. Oltre al sistema genicolo-striato, elettivamente deputato all'elaborazione cosciente della visione, esistono infatti altri tre sistemi funzionali:

1. Quello centrato sulla regione pretettale, fra mesencefalo e talamo: è responsabile del riflesso fotomotore (che agisce sullo sfintere pupillare) ed anche – attraverso proiezioni ai nuclei vestibolari – della stabilizzazione degli occhi in occasione di movimenti uniformi del capo.
2. Quello proiettante - senza passare dai corpi genicolati laterali - ai nuclei soprachiasmatici dell'ipotalamo, che regolano i ritmi endocrini circadiani sulla presenza della luce diurna, con particolare riguardo alla secrezione di melatonina da parte dell'epifisi. E' stato osservato che anche le cellule retiniche coltivate in vitro secernono autonomamente melatonina con oscillazioni circadiane³⁷.
3. Il sistema collicolo-peristriato, che essenzialmente serve a gestire la centratura dello sguardo in occasione di stimoli improvvisi, è molto importante per l'integrazione stimolo-oculomotricità ed è responsabile della cosiddetta "visione cieca": capacità inconscia, nei non vedenti, di localizzare inconsapevolmente la posizione di stimoli apparsi nel campo visivo. Le connessioni fra collicolo ed aree extrastriate si realizzano nel corso del primo mese di vita.

³⁷ Neurologia di Fazio Loeb 2003 Universo ed

La corteccia visiva primaria, ove le afferenze emiretiniche omologhe si fondono, smista l'informazione proveniente dai fotorecettori ad aree associative unimodali, ciascuna delle quali elabora separatamente i diversi attributi dell'oggetto (forma, colore, profondità, localizzazione nello spazio...); successivamente i dati vengono reintegrati in aree associative plurimodali³⁸.

Come dimenticare il musicista protagonista del famoso testo di Sachs *“l'uomo che scambiò sua moglie per un cappello”* in grado di descrivere perfettamente una “superficie rossa convoluta con un'appendice verde” senza poter riconoscere in essa una rosa se non annusandola?

Data la distribuzione corticale in aree che elaborano separatamente diversi attributi della visione, il danno alla funzione visiva può essere estremamente selettivo, determinando agnosie specifiche (prosopagnosia, acromatopsia, sindrome di Gertsmann...).

Questa architettura è più o meno analoga per tutti gli umani, ma esistono variazioni individuali. Ad esempio, alcuni percepiscono le cifre numeriche colorate (diversi colori per diverse cifre). Questo fenomeno - definito sinestesia, insieme ad altre forme analoghe di 'iperintegrazione' sensoriale - permette a tali soggetti performances visive che la maggioranza di noi non ottiene; ad esempio, estrapolare immediatamente la cifra 5 in un mucchio di cifre dove 2 e 5 sono mescolati in differenti orientamenti spaziali. Lo stesso compito per un soggetto 'normale', che non veda il 2 e il 5 in diversi colori, richiede tempi molto più lunghi.³⁹ Nel caso specifico, la sinestesia cifra-colore è resa possibile dalla contiguità delle aree cerebrali deputate alla decodificazione della cifra numerica e di quelle da cui dipende la percezione del colore. Significativo che la

³⁸ VS Ramachandran *Interaction between colour and motion in human vision* Nature Agosto 1987 Vol 328. PMID: 3614367.

³⁹ V.S. Ramachandran, E.M. Hubbard *Hearing colors, tasting shapes* Scientific American, Maggio 2003

sinestesia appaia correlata con mestieri che portano al costante uso di metafore (pittori, poeti, romanzieri...) ⁴⁰.

Al di là della specializzazione delle singole aree, rimangono comunque distinti, in linea generale, i flussi dell'informazione foveale ("cosa") da quelli della retina periferica ("dove").

L'identificazione viaggia attraverso la via ventrale dalla corteccia visiva occipitale al lobo temporale inferiore, ove sono collocate le aree deputate all'elaborazione separata delle informazioni relative a forma, colore, riconoscimento dei simboli ecc. La via del "dove" (che Berthoz suggerisce di chiamare la via del "come" perché finalizzata all'interazione con l'oggetto), segue invece la via dorsale, diretta alla corteccia parietale posteriore dove vengono elaborate le informazioni relative a posizione e movimento. Sempre sul lobo parietale, troviamo la rappresentazione dello spazio tridimensionale esterno e l'engramma relativo all'immagine corporea del sé collocata all'interno dello spazio extracorporeo. Esistono comunque vari altri sistemi, corticali e subcorticali, di coordinate eso ed egocentriche.

A livello della corteccia frontale abbiamo altre aree importanti per la visione: le informazioni sul "cosa" raggiungono l'area associativa multimodale anteriore, che presiede alla pianificazione motoria, all'emissione del linguaggio, all'attenzione; l'area frontale supero-dorsale (anteriore al solco principale) conserva informazioni sul 'dove'; l'area che circonda il solco principale presiede all'esecuzione di compiti a risposta ritardata, quindi a stimoli anche scomparsi ove poter reindirizzare sguardo o azione. Alla corteccia frontale appartengono anche aree che decidono sull'esecuzione di movimenti oculari (campi oculari frontali e campi oculari supplementari).

Il *riconoscimento* di una realtà visiva richiede un'integrazione anche con l'intelligenza emotiva del sistema limbico; ciascuno di noi, riconoscendo per brevi istanti nel volto di uno sconosciuto quello della persona temuta o desiderata, ha sperimentato quanto l'aspetto psico-emotivo possa incidere nell'elaborazione cognitiva dell'immagine.

⁴⁰ Ramachandran *Cosa sappiamo della mente* Mondadori 2004

La connessione fra aree limbiche e visive è fondamentale per la sopravvivenza e per la vita sociale. Quando questa connessione si interrompe, come avviene ad esempio nei soggetti affetti da sindrome di Capgras, può succedere che l'oggetto sia perfettamente *conosciuto* (in tutti i suoi aspetti, a differenza di quanto accadeva al musicista affetto da prosopagnosia) ma non *identificato*, proprio per l'assenza di afferenze limbiche nell'elaborazione cognitiva della visione.

Come vedremo, l'attivazione simpatica e parasimpatica influiscono sui processi di centratura e identificazione che fruiscono rispettivamente dei servomeccanismi di vergenza e accomodazione.

Una visione puramente 'razionale' con deafferentazione limbica, innesca gravi sindromi di derealizzazione e depersonalizzazione (es. Cotard). I Capgras riconoscono perfettamente un familiare al telefono, ma, guardandolo, pensano che sia un impostore che abbia assunto le fattezze del loro congiunto. Il cervello tende infatti ad aggirare le incongruità fra diversi dati sensoriali attraverso interpretazioni, anche distorte, che lo esimano dalla gestione cognitiva del conflitto. Nelle parole di Berthoz:

“La percezione è un'interpretazione, la sua coerenza è una costruzione le cui regole dipendono dai fattori endogeni e dalle azioni che noi perseguiamo.”⁴¹

Degno di nota è il rapporto fra controllo posturale e trattamento cognitivo delle informazioni visive; l'azione posturale dipende dalla nostra *scelta* rispetto alla percezione visiva. Come precedentemente sottolineato, la visione è un processo cognitivo più che percettivo; dipende da *giudizi* talvolta errati (es. illusioni ottiche) da *pregiudizi* basati sulle abitudini (ad esempio le ombreggiature vengono sempre interpretate cognitivamente come se la luce venisse dall'alto⁴²) nonché da automatismi cognitivi acquisiti (es. effetto riempimento).

⁴¹ Berthoz *Il senso del movimento* Mc Graw- Hill 1998

⁴² Dyde RT, Jenkin M R, Harris LR *Shape-from-shading depends on visual, gravitational, and body-orientation cues* Perception Dicembre 2004 PMID: 15729912

Le illusioni sono prodotte dal cervello per salvaguardare la coerenza, sono “soluzioni esercitate dal cervello di fronte all’incongruenza fra le informazioni sensoriali e la loro rappresentazione interna anticipata”⁴³.

E’ quindi necessario considerare che anche l’elaborazione dell’informazione visiva (*visual information processing*) gioca un ruolo nell’output posturale. E’ su questo elemento che maggiormente (anche se non esclusivamente) si innesta la prospettiva cognitivo-comportamentale della posturologia integrata.

L’integrazione dell’elaborazione cognitiva nell’approccio comportamentale, attualmente oggetto di numerose sperimentazioni nel contesto delle neuroscienze, si fonda essenzialmente sul concetto cardine di *rappresentazione interna*. In altri termini come noi *vediamo* noi stessi, l’ambiente e la nostra interazione con il medesimo.

RAPPRESENTAZIONE INTERNA E POSTURA

Dobbiamo considerare che la corteccia visiva primaria, insieme ad numerose altre aree cerebrali connesse, viene attivata dall’immaginare un oggetto come se l’oggetto fosse osservato nella realtà; quindi tanto lo stimolo fisico quanto lo stimolo immaginario possono provocare attivazione corticale della medesima area. Ove il ricordare richieda la formazione di immagini mentali dello spazio, viene attivata la corteccia parietale posteriore, come se dovessimo orientarci rispetto alla visione interna, ossia come se dovessimo collocare la nostra rappresentazione corporea nell’engramma mnestico dello spazio evocato. Questo aspetto, molto ben studiato attraverso l’analisi del *neglect*, ha portato alla concezione che lo spazio extrapersonale sia memorizzato a partire da un sistema centrato sulla rappresentazione corporea.

I sistemi di riferimento sono quindi distinti in

1) rappresentazione del proprio corpo come articolazione dei singoli segmenti corporei fra di loro e rispetto allo spazio gravitazionale

⁴³ Berthoz *Il senso del movimento* Mc Graw- Hill 1998

2) rappresentazione dello spazio peripersonale di interazione ove i dati visivi devono risultare congrui con quelli tattili e propriocettivi, ove si collocano le interazioni fra senso aptico e visione, in particolare nella coordinazione occhio-mano

3) rappresentazione dello spazio tridimensionale, ove sono collocati i primi due, fondata essenzialmente sulle afferenze visive.

L'interazione fra il sistema corpo e lo spazio gravitazionale dipende da tre sistemi di coordinate:

- La base d'appoggio determina la relazione fra l'insieme del corpo e lo spazio gravitazionale in relazione ai riflessi tonico-posturali di tronco ed arti
- Il sistema visivo ed il sistema vestibolare determinano la relazione della testa rispetto allo spazio gravitazionale e tridimensionale
- Il collo è il sistema di riferimento per determinare la posizione della testa (e del sistema visivo) rispetto al tronco, integrando le informazioni visuo-vestibolari, ma anche del tronco rispetto al collo attraverso le afferenze cervico-colliche. I propriocettori cervicali contribuiscono alla definizione dello spazio egocentrico⁴⁴.

CENTRATURA ED IDENTIFICAZIONE SECONDO L'OPTOMETRIA COMPORTAMENTALE

I concetti inerenti l'Optometria Comportamentale elaborati da Forrest⁴⁵, e prima ancora da Skeffington - padre della stessa - nonché da molti suoi epigoni, muovono

⁴⁴ Jahn K, Strupp M, Krafczik S, Scuhler O, Glasauer S, Brandt T; *Suppression of eye movements improves balance*; Brain Settembre 2002; PMID: 12183346

⁴⁵ Forrest EB *Visione e stress* European Academy of Sports and Vision 2003.

dall'idea che la risposta stress si traduca nella tendenza dell'organismo a restringersi fisiologicamente, funzionalmente e *perceptivamente*.

Skeffington, attorno alla metà degli anni '50, sosteneva che “chi è instabile nello spazio (mondo visivo) è insicuro nel suo ego” e ciò a sottolineare la componente soggettiva di *coping* nel *visual processing*⁴⁶.

Lo stress, inteso primariamente come lo sforzo per tenere sotto controllo ogni forma di azione effettuata o subita, ha componenti biologiche, fisiologiche e funzionali (o psicologiche). L'interrogativo riguarda l'effetto dei cambiamenti di dominanza neurale (orto-parasimpatica) sui meccanismi di accomodazione e convergenza.

L'**accomodazione**, processo mirato all'identificazione, dipende interamente dal sistema autonomico, fortemente condizionato dalla risposta-stress.

Poiché l'analisi puntuale dei dettagli su un bersaglio ravvicinato mal si accompagna ad una condizione di “combattimento o fuga”, l'aumento del potere focale corrisponde ad un'attivazione parasimpatica: con relativa contrazione del muscolo ciliare, incremento nella curvatura del cristallino, costrizione pupillare sincinetica, restringimento dell'apertura palpebrale e leggera retrazione del bulbo oculare.

Tutto ciò comporta una predominanza della funzione foveale, attiva nell'identificazione soprattutto di oggetti prossimi. Skeffington l'associa all'ego, il quale “distingue e specifica”. Alla funzione della retina periferica “che include tutto accettando ogni cosa per considerazione potenziale”, sarebbe invece attribuita la consapevolezza di fondo dell'attenzione passiva; la ‘vera consapevolezza’ secondo Forrest.

La prevalenza della funzione periferica – attenzione non centrata o ‘presenza’ – corrisponde ovviamente ad un'attivazione simpatica con rilassamento dell'accomodazione, dilatazione pupillare, allargamento delle palpebre e lieve protrusione del bulbo.

⁴⁶ Ohno H, Wada M, Saito J, Sunaga N, Nagai M *The effect of anxiety on postural control depends on visual information processing* Neuroscience Letters Giugno 2004 PMID: 15193751

La **convergenza** è deputata alla centratura di un oggetto prossimo, perché ad una distanza inferiore a tre metri è necessario che gli assi visivi si spostino, simmetricamente e in direzione opposta, per mantenere l'immagine sugli omologhi recettori retinici. La convergenza dipende dalla selettività dell'attenzione focale, è diretta dalla muscolatura striata (retto laterale e retto mediale) ed è prevalentemente sotto il controllo volontario, anche se può avvenire sulla base di automatismi e riflessi.

Poiché l'accomodazione si rende necessaria quando il compito si situa nello spazio prossimo, essa stimola *automaticamente* un riflesso di convergenza e viceversa.

Partendo dalla constatazione che gli individui emmetropi ed ortoforici rappresentano una piccola minoranza, mentre la maggior parte degli individui tende ad essere lievemente ipermetrope ed exoforica, Forrest interpreta l'ipermetropia come un 'tampone' omeostatico che tende a proteggere il meccanismo di accomodazione dagli stimoli di convergenza, e l'exoforia fisiologica come "sistema cuscinetto" per proteggere la convergenza dagli stimoli accomodativi.

Se non ci fosse un margine di adattamento fra le funzioni di accomodazione e convergenza, un lieve cambiamento nella dominanza neurale orto-parasimpatica potrebbe comportare gravi deficit nell'efficienza del processo visivo.

Determinante diventa, in quest'ottica, il grado di *arousal*, ossia l'intensità percepita nell'esecuzione di un compito visivo, l'ammontare di attenzione necessaria nel medesimo. La prevalenza, nelle società evolute, dei compiti visivi centrati al punto prossimo, connessi inoltre ad un'intensa acquisizione dei significati e ad un'attenzione forzata, porta ad una risposta stress di restringimento, con tendenza all'iperaccomodazione e all'iperconvergenza. Ciò innesca reazioni di allontanamento, cui si risponde con una spinta a centrare ancora più vicino nello spazio, con conseguente tendenza all'esoforia (verso l'interno).

Un altro fattore da considerare è la preferenza individuale nello stile dell'elaborazione retinica centro-periferia (figura-sfondo).

Uno studio osservazionale giapponese⁴⁷ sulla popolazione in età scolare, sostiene che, un eccesso di lavoro al punto prossimo, implichi un decremento della capacità di accomodazione ed inneschi una miopia “di difesa”, la quale fissa il fuoco (*focus freezing phenomenon*) per evitare ulteriori stress al sistema visivo; ciò avviene in particolare quando il medesimo sia già sottoposto ad un lavoro di accomodazione eccessivo, derivante da miopie non compensate con le lenti.

Anisometropie si possono sviluppare in conseguenza di posture alterate nello scrivere, nel lavorare al computer ecc. e possono portare a difetti secondari che, nei bambini, possono arrivare alla perdita della visione binoculare (ambliopia).

Ci occuperemo della relazione fra postura, compiti ravvicinati e sviluppo di ametropie nel capitolo dedicato all’astigmatismo funzionale. Dobbiamo qui sottolineare che i problemi postura-visione possono determinare anche cefalee, nausea, depressione, in particolare in condizioni di stress e lavoro prolungato. Il *focus freezing* (miopia funzionale) sarebbe quindi una strategia decisa dal SNC per ridurre lo sforzo accomodativo.

Esauriti quelli che Forrest considera i “meccanismi cuscinetto” (exoforia e ipermetropia), l’entità degli squilibri visivi (determinati da una mancata armonizzazione fra convergenza e accomodazione) dipende principalmente dalle strategie di *coping*, che Forrest stigmatizza principalmente in quattro tipi, corrispondenti ad altrettante personalità:

1. catatossico (combattimento)- massimo impegno, massima concentrazione associata a forte desiderio di riuscita nel periodo più breve possibile.

⁴⁷ Marumoto T, Jonai H, Villanueva MB, Sotoyama M, Saito S *A case report of Ophthalmologic Problems Associated with the Use of Information Technology among Young Students in Japan* Japan versione pdf online di un articolo in lingua giapponese; Marumoto T, Jonai H, Villanueva MB, Sotoyama M, Saito S *Significant correlation between school Myopia and postural parameters of students while studying*. International Journal of Industrial ergonomics, Volume 23, Number 1, 1 January 1998 e abstract inglese di *Correlation analysis between visual acuity and sitting postural parameters of young students* Nippon Ganka Gakkai Zasshi Maggio 1997 PMID 9170844.

2. sintossico (flusso) perseguimento del compito con tensione minima, non preoccupandosi delle difficoltà o dei tempi più lunghi del previsto e concedendosi pause senza sensi di colpa.
3. fuga: sfuggire al compito o farlo con coinvolgimento minimo
4. paura: paralisi dell'azione.

Le conseguenze adattive (ametropie) sulle funzioni oculari non dipenderebbero solo dal tipo di compito abituale - e dalla postura consueta nell'affrontarlo - ma dalla *forma mentis* di chi esegue il compito; concetto questo con forti ricadute, in termini di complessità, nel modo di impostare la rieducazione terapeutica.

L'inserimento dell'aspetto cognitivo, di elaborazione soggettiva, introduce un'ottica di ampio respiro, che richiede alte e vaste competenze ed esula pertanto dagli obiettivi di questo breve studio, che si focalizzerà sul ruolo specifico del recettore visivo sulle alterazioni posturali con particolare riguardo all'astigmatismo funzionale.

2- OCULOMOTRICITÀ E MOVIMENTI DEL CAPO

Per una percezione visiva adeguata, non basta che i fotoni raggiungano la retina, bisogna che ciò avvenga in determinate condizioni, che dipendono dalla motilità intrinseca e soprattutto estrinseca dell'occhio.

La percezione visiva è quindi movimento-dipendente.

Ai gradi di libertà dei movimenti dell'occhio vengono aggiunti i gradi di libertà dei movimenti della testa sul collo. La relazione fra movimenti della testa e movimenti dell'occhio è estremamente complessa, proveremo a delinearne un quadro di massima concentrandoci su alcuni aspetti salienti, con particolare riguardo alle nuove scoperte neuro-istologiche.

I MOVIMENTI DELLA TESTA

Lo sguardo rimane centrale, compensato da cicloduzioni innescate dal VOR, quando la testa compie movimenti di inclinazione laterale compresi entro pochi gradi, come quelli che avvengono nella normale deambulazione. I movimenti che accompagnano le posizioni secondarie dello sguardo, sono la rotazione e la flessione-estensione. La rotazione accompagna la scansione visiva sul piano orizzontale, la flessione-estensione su quello verticale. Per prolungare invece la scansione dello sguardo su posizioni terziarie (oblique), sono necessarie flessione-estensione più inclinazione, accompagnate da rotazione negli ultimi gradi di movimento.

La flessione dipende dalla catena cinetica anteriore, l'estensione da quella posteriore e laterale. Tutte le catene cinetiche contribuiscono all'inclinazione:

L'inclinazione-flessione-rotazione (sguardo in basso) dipende da:

1) Muscoli della catena anteriore come flessori (bilateralmente) e inclinatori (monolateralmente) semplici:

- Sopra e sottoioidei se mandibola fissata da temporale e massetere. Possibile componente torsionale dell'omoioideo.
- Lungo della testa
- Lungo del collo (plesso cervicale e brachiale C2-C8) che con le sue fibre inferiori contribuisce alla rotazione controlaterale
- Retto anteriore (flessione della giunzione atlo-assiale)
- Retto laterale

2) muscoli della catena anteriore come flessori (bilateralmente) e inclinatori rotatori (omolateralmente).

- Retto anteriore per la rotazione omolaterale dell'occipito atlantoidea
- Piccolo retto anteriore (rotazione omolaterale)

3) muscoli della catena anteriore come flessori- inclinatori- rotatori controlaterali

- Scaleni per l'inclinazione (tutti) e rotazione controlaterale (scaleno anteriore) delle cervicali inferiori
- Gli estensori nuchali brevi possono contribuire alla componente rotatoria anche in flesso inclinazione.

Ricordiamo che durante la flessione è necessaria una co-contrazione dei nuchali atta a prevenire una caduta del mento sul torace. La stessa cosa avviene nella co-

contrazione in frenata dei muscoli della catena anteriore durante l'estensione del capo ma in misura minore, poiché il baricentro della testa è spostato in avanti.

L'estensione-inclinazione- rotazione (sguardo in alto) dipende principalmente da:

1) Estensori-inclinatori semplici (piano profondo)

- Piccolo retto posteriore
- Grande retto posteriore
- Obliquo superiore (piccola componente rotatoria)

2) Estensori inclinatori rotatori omolaterali (piano intermedio)

- Splenio della testa
- Splenio del collo
- Lunghissimo della testa
- Elevatore della scapola
- Obliquo inferiore (sul piano profondo)

3) Estensori inclinatori rotatori controlaterali (piano superficiale)

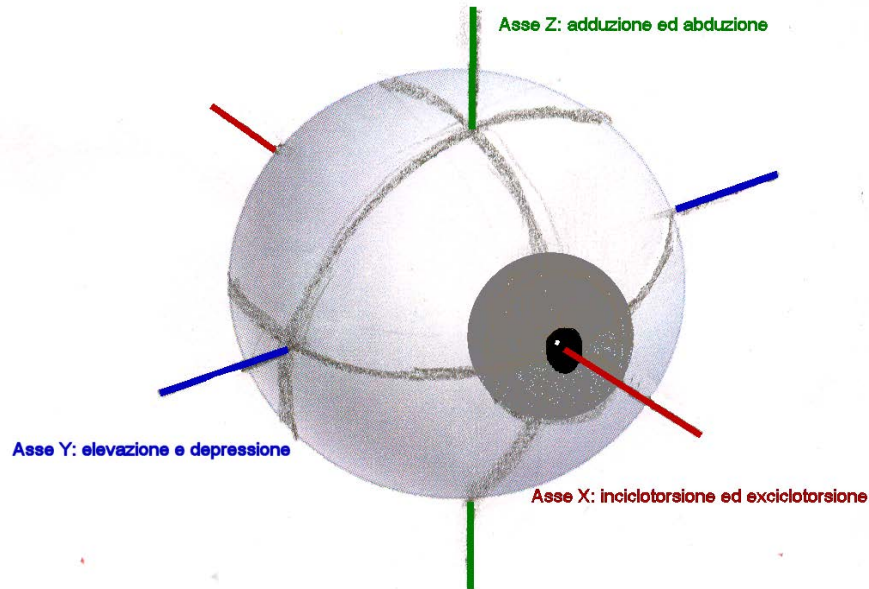
- SCOM
- Trapezio.

MOVIMENTI MONOCULARI O DUZIONI

I muscoli estrinseci dell'occhio stabilizzano l'immagine in modo riflesso (riflesso vestibolo-oculare VOR e optocinetico), rispondono in modo automatico a determinati stimoli, coordinando il loro movimento a quello della muscolatura del collo, ed infine si

muovono in modo sincrono nei due occhi, con l'obiettivo di centrare la stessa immagine sulla fovea.

Gli occhi sono mossi da sei paia di muscoli oculomotori, organizzati in tre coppie agonista-antagonista per ciascun occhio, che permettono movimenti attorno a tre assi, detti assi di Fick.



L'intersezione dell'asse parasagittale (asse X) sull'asse coronale (asse Y) determina il piano frontale, detto piano di Listing; la loro intersezione con l'asse verticale Z costituisce il centro di rotazione del globo oculare.

I movimenti di un singolo occhio sono detti collettivamente **duzioni** e si possono collegare a questi tre assi nel modo seguente:

sull'asse verticale Z adduzione ed abduzione (piano assiale)

sull'asse coronale o trasversale Y elevazione e depressione (piano sagittale)

sull'asse parasagittale X incicloduzione ed excicloduzione (piano coronale)

Poiché l'occhio non esce dall'orbita, né ruota mai oltre il suo equatore, i movimenti nelle otto direzioni dello sguardo possono considerarsi giacenti tutti su un unico piano, più o meno coincidente con l'equatore del bulbo, detto **Piano di Listing**.

La **legge di Listing** afferma che quando l'occhio lascia un oggetto per dirigersi su un altro, ruota attorno ad un asse che risulta perpendicolare al *piano dello sguardo*, ossia il piano che taglia entrambi gli assi visivi: precedente e successivo al movimento.

L'asse visivo è la linea che congiunge la fovea con l'oggetto fissato.

I gradi di libertà nella geometria dell'oculomotricità sono influenzati da diversi fattori:

- 1) Gradiente fra posizione primaria dell'occhio (parallela al piano sagittale) e orientamento dell'asse orbitario (23° circa rispetto alla sagittale mediana).
- 2) Centro di rotazione non coincidente con il centro del globo oculare ma spostato posteriormente (a circa 13,5 mm dall'apice corneale, 10,5 mm davanti al polo posteriore).
- 3) Inserzione asimmetrica dei quattro muscoli retti (superiore, inferiore, laterale e mediale) sul globo oculare: la distanza dall'asse X va progressivamente aumentando dal retto mediale al retto inferiore al laterale e risulta massima nel retto superiore, le inserzioni sono collocate quindi in una sorta di spirale detta "spirale di Tillaux".

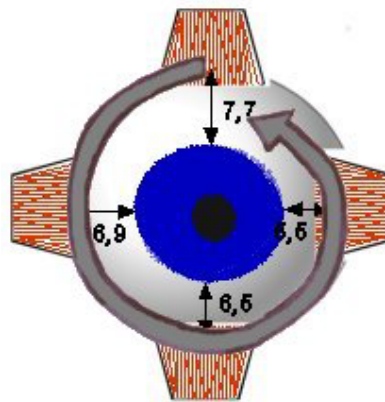


FIGURA 1 SPIRALE DI TILLAUX

- 4) Variabili biomeccaniche date dalla configurazione a doppio strato di ciascun muscolo e dalla teoria delle pulegge attive di Demer, di cui si tratterà esaminando più a fondo le caratteristiche della muscolatura estrinseca.

La legge di Donder (enunciata già in un articolo del 1846) afferma che, in tutte le posizioni terziarie dello sguardo, l'occhio subisce una torsione proporzionale al grado di

elevazione-abbassamento / abduzione-adduzione a prescindere da come l'occhio abbia assunto la posizione terziaria (prima in alto e poi lateralmente o viceversa). Fu Helmholtz a proporre di chiamare le pseudotorsioni “legge di Donder⁴⁸”.

L'asimmetria fra asse orbitario ed asse parasagittale comporta il fatto che solo i muscoli retto laterale e retto mediale possano avere azioni singole primarie (abduzione-adduzione) a partire dalla posizione primaria. La posizione primaria viene descritta come la posizione in cui la linea dello sguardo è perpendicolare al piano di Listing, ossia l'asse visivo è parallelo alla sagittale mediana.

Tutti i movimenti di adduzione-abduzione avvengono attorno all'asse verticale Z sul piano equatoriale che coincide con il piano di Listing.

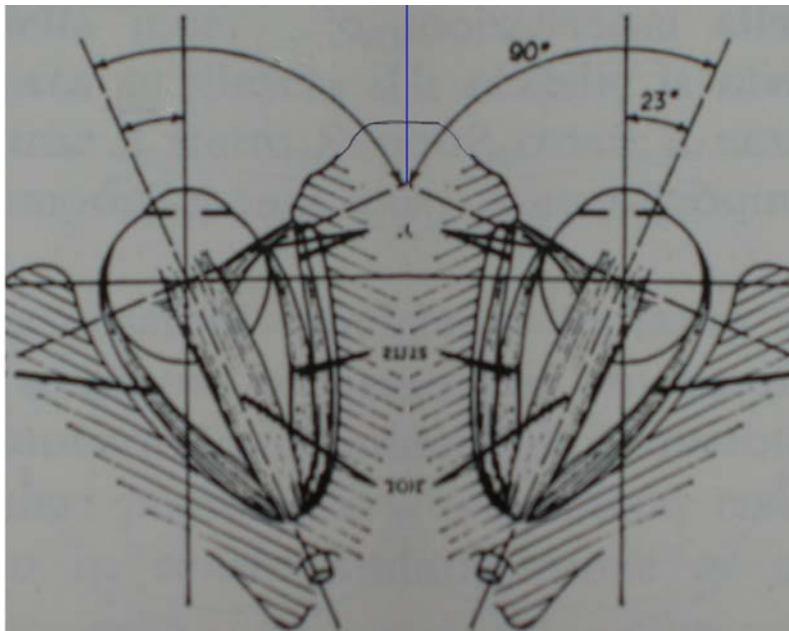


FIGURA 2 ANGOLO DI DEVIAZIONE DELL'ORBITA

Le fibre di retto superiore e retto inferiore si possono considerare sullo stesso piano, che diverge invece di 23° dalla sagittale mediana e non è quindi ortogonale al piano di Listing. Ne consegue che l'elevazione e l'abbassamento (azioni primarie dei retti sup. e inf.) sono possibili come azioni pure solo quando l'occhio è abdotto di 23°; il che

⁴⁸ HJ Simonsz I Den Tonkelaar *19th Century Mechanical Models of Eye Movements, Donder's Law, Listing's Law and Helmholtz' Direction Circles* Documenta ophtalmologica 74 1990

non può ovviamente avvenire contemporaneamente per i due occhi. Sursumduzione (elevazione) ed infraduzione (abbassamento) avvengono dunque come azioni pure solo quando l'asse visivo e l'orientamento delle fibre muscolari risultano perfettamente paralleli.

A partire dalla posizione primaria, invece, l'elevazione del retto superiore e l'abbassamento del retto inferiore (entrambi innervati dal nucleo oculomotore comune) sono necessariamente accompagnate da azioni secondarie; nello specifico incicloduzione per l'elevazione ed excicloduzione per l'abbassamento.

Se l'occhio è addotto di 67° invece, la somma con l'angolo di 23° porta ad una perfetta perpendicolarità (90°) fra l'orientamento delle fibre del muscolo e l'asse visivo; in queste condizioni il retto superiore agisce come incicloduttore puro ed il retto inferiore come excicloduttore puro.

I retti superiore ed inferiore hanno quindi come azione primaria elevazione-abbassamento, come azione secondaria incicloduzione-excicloduzione.

L'obliquo superiore, grazie alla troclea inserita sulla parete nasale dell'orbita che costituisce la sua origine funzionale, ha fibre che formano un angolo di 54° rispetto all'asse visivo primario. La sua azione primaria – incicloduzione – avviene quindi come azione pura solo nella condizione in cui l'occhio sia addotto di 36° ($54^\circ + 36^\circ = 90^\circ$ fra asse visivo e orientamento delle fibre). Con l'occhio addotto di 54° (asse e fibre paralleli) agirà come un depressore puro; in tutte le altre condizioni avrà come azione primaria l'incicloduzione e come azione secondaria concomitante l'abbassamento.

L'obliquo inferiore sottende un angolo di 51° con l'asse visivo primario. Analogamente all'obliquo superiore, potrà esercitare la sua funzione primaria pura (excicloduzione) solo con occhio addotto di 39° (90° fra asse visivo e orientamento delle fibre); eserciterà la sola funzione secondaria di elevatore con occhio addotto di 51° e in tutti gli altri casi avrà come azione primaria l'excicloduzione e come azione secondaria l'elevazione.

Retti ed obliqui hanno anche azioni terziarie: i retti contribuiscono all'adduzione e gli obliqui all'abduzione dell'occhio.

Non bisogna confondere le azioni primarie, secondarie e terziarie dei muscoli con le posizioni primaria, secondarie e terziarie dello sguardo: in questo secondo contesto, la posizione primaria è quella centrale, guardando davanti a sé (asse visivo perpendicolare al piano di Listing); le posizioni secondarie sono elevazione ed abbassamento sul piano sagittale, abduzione ed adduzione sul piano trasversale, le posizioni terziarie sono tutte le posizioni oblique (alto dx e sx, basso dx e sx).

Tutte le duzioni rispondono alla **legge di Sherrington** sull'innervazione reciproca; l'eccitazione dell'agonista coincide con l'inibizione dell'antagonista di coppia.

CARATTERISTICHE PECULIARI DEI MUSCOLI OCULOMOTORI (EXTRAOCULARI)

Tutti i muscoli extraoculari, tranne l'obliquo inferiore, originano dall'anello di Zinn, - costituito da tessuto connettivo e fibroso - posto all'apice dell'orbita, attorno al forame ottico. L'obliquo inferiore origina invece dal pavimento orbitario antero-mediale. I quattro retti si inseriscono sulla sclera *anteriormente* all'equatore del globo oculare mentre i due obliqui hanno un'origine orbitaria anteriore all'equatore del globo (anatomica per l'obliquo inferiore, funzionale per il superiore) e si inseriscono *posteriormente* all'equatore.

Il bilanciamento fra i muscoli con origine posteriore ed inserzione anteriore e quelli con origine anteriore ed inserzione posteriore, contribuisce alla sospensione del globo oculare nell'orbita. Un altro elemento di sostegno è dato dalla capsula di Tenone, che avvolge tutto l'occhio, dal nervo ottico alla giunzione corneo-sclerale (*limbus*).

I muscoli extraoculari hanno caratteristiche anatomico-istologiche, funzionali e immunologiche peculiari e diverse da quelle di tutto il resto della muscolatura striata⁴⁹:

- I muscoli extraoculari non hanno riflessi da stiramento né presentano circuiti di inibizione ricorrente – cellule di Renshaw - probabilmente perché non essendo sottoposti a variabilità di carico e non essendo inseriti su articolazioni non ne hanno bisogno.
- I fusi neuromuscolari sono presenti nello strato orbitario (si veda di seguito) e praticamente assenti nello strato bulbare, nel quale sono invece presenti, in particolare nei pressi delle giunzioni miotendinee, terminazioni a palizzata (*palisade endings*). Si ipotizza che questi propriocettori, peculiari degli estrinseci dell'occhio, possano essere organi di Golgi immaturi. Gli organi del Golgi risultano comunque praticamente assenti.
- Le unità motorie sono le più piccole dell'organismo, da 10 a 20 fibre per motoneurone. Tutti i motoneuroni partecipano in egual misura all'attivazione muscolare (non esistono neuroni specializzati per saccadi ed altri specializzati per l'inseguimento lento). Un unico tipo di motoneurone innerva sei tipi diversi di fibre muscolari.
- I muscoli extraoculari sono costituiti da due strati con fibre assai diverse; lo strato interno, che si inserisce sul bulbo, e lo strato orbitale, che in realtà si inserisce sulla componente fasciale della capsula di Tenone. E' allo studio l'esistenza di un terzo sottile strato esterno⁵⁰

⁴⁹ Leigh JR, Zee DS, *The Neurology of Eye Movements* Oxford University press 2006 (4); Agnes Mae Wong *Eye movement disorders* Oxford University Press 2008, Büttner- Ennever *anatomy of the oculomotor System* PMID 17314476, M Cigada *Appunti di anatomia dei muscoli extrabulbari* in www.mariocigada.com

⁵⁰ R Wasicky, F Zhya-Ghazvini, R Blumer et al. *Muscle fiber types of human extraocular muscles: a histochemical and immunohistological study*. Investigative Ophthalmology and Visual Science, Aprile 2000 PMID: 10752931.

- Il tendine dei retti passa quindi all'interno di una manica di pulegge fibromuscolari, costituita dallo strato orbitale ed ancorata alla fascia (capsula di Tenone). Ciascuna puleggia è legata all'orbita da bande di collagene, elastina e fibre muscolari lisce.
- Lo strato orbitale del muscolo obliquo inferiore si inserisce nelle pulegge del retto inferiore mentre quello dell'obliquo superiore si inserisce nelle pulegge del retto superiore. Si ritiene che lo scopo funzionale di queste inserzioni sia di limitare lo slittamento laterale dei muscoli retto superiore ed inferiore durante le rotazioni.
- Lo strato bulbare è quello che continua nell'inserzione tendinea sulla sclera e quindi produrrebbe la forza primaria per la rotazione del bulbo. Lo strato orbitale si inserisce nelle maniche di tessuto connettivo attorno ai retti (pulegge) e può quindi costituire un altro elemento di regolazione fine della geometria dell'albero locomotore. Secondo gli studi di Demer⁵¹, lo strato orbitale dei muscoli estrinseci termina sulle pulegge di tessuto connettivo fibroso dell'orbita, che, almeno per quanto attiene ai retti, forma una specie di 'manica' per dirigere i vettori di trazione dei muscoli. Sembra ormai certo che i due strati possano contrarsi indipendentemente l'uno dall'altro⁵².
- I muscoli extraoculari sono composti da sei tipi diversi di miofibrille, raggruppate in *singularly innervated fibers* (fibre SIF - toniche e fasiche -) e *multiply innervated fibers* (fibre MIF: fibre non-twitch a placca neurale multipla); queste ultime non risultano presenti nell'apparato locomotore dei mammiferi e sono invece proprie della muscolatura scheletrica di anfibi e

⁵¹ Demer JL et alii *Evidence for active control of rectus extraocular muscles pulleys* cit. in Buttner-ennever *Modern concepts of brainstem anatomy: from extraocular motoneurons to proprioceptive pathways* ann NY academy of Science 965 Aprile 2002, PMID: 11960795.

⁵² Buttner-Ennever J A Horn AK *The neuroanatomical basis of oculomotor disorders: the dual motor control of extraocular muscles and its possible role in proprioception* Current opinion in neurology Febbraio 2002 PMID 11796949.

pesci. Nell'uomo esistono solo nei muscoli extraoculari (e in, misura minore, nell'orecchio interno e nella laringe⁵³). Sono assenti nel muscolo elevatore della palpebra. Presentano una contrazione più lenta ma che può essere mantenuta più a lungo. La loro funzione non è ancora completamente chiarita⁵⁴. E' stato accertato però che le MIF non sono raggiunte dai motoneuroni *burst* generatori di saccadi [si veda caratteristiche delle saccadi, di seguito].

- Anche le unità motorie singolarmente innervate presentano caratteristiche peculiari: nello strato orbitale l'80% delle fibre è composto di SIF ossidative ma molto veloci, altamente resistenti alla fatica, che non si trovano né nel resto della muscolatura striata né nell'elevatore delle palpebre. Il restante 20% è costituito da MIF. Le MIF dello strato orbitale hanno inoltre la caratteristica unica di estendersi per tutta la lunghezza del muscolo. Nello strato globale ci sono SIF di tre tipi (rosse bianche ed intermedie) più un 10% di MIF, diverse da quelle dello strato orbitale.
- Le MIF dello strato orbitale hanno propagazione del potenziale d'azione centralmente e attività a plateau multipli nel resto della fibra. Le MIF bulbari hanno caratteristiche uniche: presentano placche neuromuscolari distribuite lungo tutta la loro lunghezza e anche presso le giunzioni neuromuscolari dove sono collocati i propriocettori a palizzata.
- I muscoli extraoculari conservano tutte le forme di miosina riscontrabili nel resto della muscolatura sia liscia che striata dell'organismo, incluse forme di miosina fetale. Le loro caratteristiche istologiche uniche li rendono più

⁵³ RF Spencer, JD Porter : *Structural Organization of the Extraocular Muscles* Review of Oculomotor Research 1988 PMID: 3153651

⁵⁴ Buttner-Ennever JA, Horn AK: *The neuroanatomical basis of oculomotor disorders: the dual motor control of extraocular muscles and its possible role in proprioception*. Current Opinion in Neurology Febbraio 2002 PMID 11796949

vulnerabili ad alcune patologie (es. mioastenia) ma più resistenti ad altre (es, Duchenne) rispetto agli altri muscoli del corpo.

MOVIMENTI BINOCULARI

Tutti i movimenti binoculari rispondono alla **legge di Hering** dell'eguale innervazione secondo la quale le coppie di agonisti nei due occhi ricevono uguale impulso per muovere i due occhi nella stessa misura.

La **visione binoculare** simultanea garantisce le funzioni di⁵⁵

1. percezione simultanea
2. fusione
3. stereopsi

Per **percezione simultanea** si intende la capacità di percepire le immagini dei due occhi contemporaneamente. Gli stimoli luminosi provenienti da un oggetto non possono cadere in modo perfettamente identico sulle due retine a causa della distanza anatomica fra i due occhi. L'organizzazione retinica foveocentrica (da distinguere da quella egocentrica che prende come riferimento il corpo), permette alla luce di cadere comunque su due aree omologhe, come se la visione originasse da un singolo occhio posto fra i due. Quest'occhio 'funzionale' centrale viene detto "occhio ciclopico". Permane comunque un certo grado di disparità retinica che rende possibile la stereopsi.

La **fusione** va distinta in fusione motoria (vergenze eseguite dalla muscolatura extraoculare) e fusione sensoriale (a partire dalla retina sensoriale), quest'ultima è la capacità di fondere cognitivamente (livelli corticali) le immagini dei due occhi. Si tratta

⁵⁵ Rossetti Gheller *Manuale di optometria e contattologia* Zanichelli 2007

di una capacità acquisita durante i primi mesi di vita (si completa intorno al 2-3 mese) e che può essere definitivamente persa se non sviluppata in questo periodo critico.

Lo sviluppo strutturale ed organizzativo della corteccia visiva e della retina sono fortemente stimolo-dipendenti⁵⁶; necessitano sia di stimoli visivi che di input propriocettivi dai muscoli extraoculari⁵⁷ e dai muscoli coinvolti nei movimenti coordinati occhio-testa⁵⁸. *Tutti i circuiti neuronali coinvolti nella visione continuano a rimanere stimolo-dipendenti nei processi plastici dell'età adulta.*

Nel contesto posturale, oltre a verificare l'efficienza della fusione, è importante stabilire la dominanza sensoriale di un occhio rispetto all'altro e valutare se essa corrisponda o meno con l'occhio 'posturale' dominante⁵⁹. E' possibile che la dominanza sensoriale sia inversa rispetto alla dominanza posturale. Fusione e dominanza sensoriale si misurano agevolmente con il **test delle luci di Worth**⁶⁰.

La **capacità stereoscopica** è il senso di tridimensionalità della visione elaborato a partire dalla disparità retinica. La stereocucitura si sviluppa in un periodo critico fino ai quattro mesi ma non si completa prima dei 6-8 anni⁶¹.

I movimenti binoculari vengono distinti in **versioni e vergenze**.

⁵⁶ Bertenthal BI, Rose JL, Bai DL; *Perception-action coupling in the development of visual control of posture*; Journal of Experimental Human Perceptual performance Dicembre 1997; PMID: 9425672

⁵⁷ E Gary-Bobo *Comportement visuomoteurs et proprioception extraoculaire* in Aggressologie 29, 9, 1988.

⁵⁸ P Buissieret *Développement du système visuel et proprioception d'origine extraoculaire et cervicale* in Aggressologie, 28, 1987.

⁵⁹ R. Gentaz *L'oeil postural* in Aggressologie, 29, 1988

⁶⁰ Si veda capitolo "per una valutazione integrata".

⁶¹ R. Held, I E. Birch, J Gwiazda *Stereoacuity in human infants* proceedings of the National Academy of Science 1980, PMC 350104; Banks M S, Aslin R N Letson R D *Sensitive period for the development of human binocular vision* Science 1975 PMID 1188363.

Le **versioni** sono i movimenti in cui i due occhi si muovono nella stessa direzione; si distinguono:

- Destroversione (si dirige lo sguardo a destra).
- Levoverzione (si dirige lo sguardo a sinistra).
- Destrocicloversione (entrambi gli occhi ruotano verso destra attorno all'asse parasagittale).
- Levocicloversione (entrambi gli occhi ruotano verso sinistra attorno all'asse parasagittale).
- Supraverzione (o elevazione).
- Infraverzione (o depressione).

Le versioni possono essere rapide (saccadi) o di inseguimento lento (smooth pursuit).

Le **vergenze** sono movimenti in cui i due occhi si muovono in direzioni opposte. Nella convergenza (vergenza positiva), che serve a focalizzare un oggetto prossimo, si ha la contemporanea rotazione temporo-nasale di entrambi gli occhi, nella divergenza (detta anche convergenza negativa) la rotazione sarà in senso opposto (naso-temporale).

La divergenza è stata in passato interpretata come movimento passivo di ritorno alla condizione primaria, ipotizzando che lo sguardo rivolto ad infinito non necessiti né di accomodazione né di vergenza. Attualmente tale ipotesi risulta ampiamente superata, numerose evidenze scientifiche provano che questa condizione riguarda in realtà il cosiddetto “*dark focus*” intermedio di accomodazione, fra punto remoto e punto prossimo⁶².

⁶² Tan RKT, O'Leary D *Stability of the accommodative Dark Focus After Periods of Maintained Accommodation* Investigative Ophthalmology and Visual Science Settembre 1986 PMID: 3744732; Leibowitz HW, Owens DA, *Anomalous Myopias and the intermediate dark focus of accommodation* Science vol 189 1975 PMID: 1162349.

Misurando l'accomodazione in diottrie, solo alla morte l'accomodazione è nulla.

L'equilibrio tonico fra simpatico e parasimpatico (che corrisponde ad un'assenza di sforzo accomodativo) è di circa 1,7 diottrie⁶³, quindi corrisponde ad una posizione intermedia nello spazio, fra infinito e punto prossimo. In quest'ottica anche la divergenza è considerata un movimento attivo, necessario per focalizzare oggetti posti oltre il *dark focus*. Versioni e vergenze costituiscono la base del processo di localizzazione, generalmente attivato da una stimolazione della retina periferica o dalla volontà cosciente.

MUSCOLATURA INTRINSECA E AMETROPIE

La muscolatura intrinseca dell'occhio è costituita essenzialmente dall'apparato ciliare e dallo sfintere pupillare. L'apparato ciliare modifica il raggio di curvatura del cristallino in base alla distanza dell'oggetto da mettere a fuoco; lo sfintere pupillare, attivato dal riflesso fotomotore, modifica il diametro della pupilla sulla base della quantità di luce.

Il fatto che i raggi luminosi possano convergere su un unico punto della retina, detto punto focale, dipende dal potere diottrico dell'occhio, ossia dalla sua capacità di rifrangere i raggi luminosi, misurata appunto in diottrie.

La rifrazione dipende, come noto, dalla diversa densità dei corpi attraversati dalla radiazione e dall'angolo di incidenza del raggio luminoso sulla superficie del mezzo. All'apparato di rifrazione dell'occhio contribuiscono tutte le componenti trasparenti dell'occhio, dalla cornea – normalmente a contatto con l'aria ambiente - fino alla retina. La cornea interfaccia due mezzi a densità molto differente: aria ed umor acqueo; contribuisce inoltre alla concentrazione dei raggi luminosi grazie alla sua forma sferica. Umor acqueo e umor vitreo danno il loro contributo, ma è soprattutto il cristallino, posto

⁶³ E.B. Forrest *Visione e stress* European Academy of Sports and Vision 2003

fra i due, a determinare per oltre un terzo il potere diottrico dell'occhio. Il cristallino, grazie alla sua deformabilità, garantisce anche la focalizzazione rispetto all'asse X antero-posteriore; in posizione di riposo è una lente biconvessa che, come tale, concentra la luce. La curvatura del cristallino, in condizioni di riposo, è tale da far coincidere il punto focale con la retina solo se i raggi luminosi provenienti dall'oggetto sono paralleli fra di loro, il che avviene quando l'oggetto è posto ad almeno 5-6 metri di distanza. Per oggetti più vicini, il cristallino deve aumentare il proprio spessore (incrementare il potere diottrico), modificando la sua curvatura - e quindi l'angolo di incidenza dei raggi luminosi - per mantenere la distanza focale idonea. Ciò avviene grazie all'azione del **muscolo ciliare**, un muscolo anulare collegato al cristallino da fibre anelastiche dette collettivamente zonula.

Quando la porzione anulare del muscolo ciliare è rilassata (e/o la radiale è contratta), la zonula è sotto tensione e “stira” il cristallino mantenendolo in una forma relativamente appiattita.

La contrazione della porzione anulare del muscolo ciliare e/o il rilassamento di quella radiale comporta un rilassamento della zonula; in questa condizione il ritorno elastico della capsula del cristallino lo riporta alla sua forma naturale, più arrotondata.

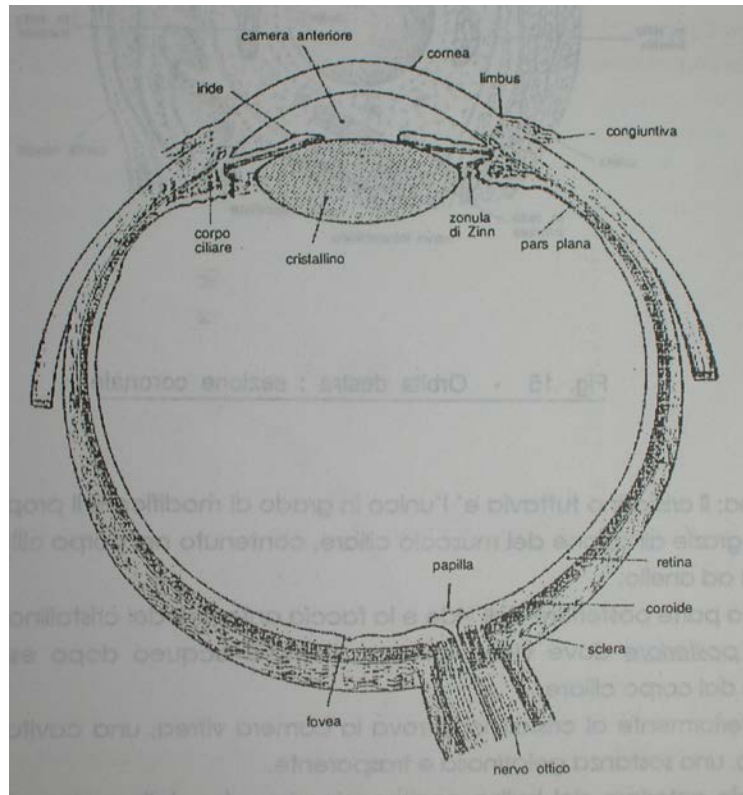


FIGURA 3 CRISTALLINO E MUSCOLO CILIARE

Il lavoro del muscolo ciliare è alla base del processo di **accomodazione**: modificazione della forma e della capacità rifrattiva del cristallino che consente di mettere a fuoco diverse distanze sullo stesso asse visivo. L'aumento del potere diottrico del cristallino si associa, come abbiamo accennato, ad una sincinesia parasimpatica. L'accomodazione è alla base del processo di identificazione; una funzione essenzialmente foveale.

Naturalmente, tanto l'elasticità della capsula quanto la capacità contrattile del muscolo ciliare si perdono progressivamente con l'età e, con esse, si perde la capacità di mettere a fuoco oggetti vicini.

La visione da vicino può risultare pregiudicata sia nella condizione in cui il cristallino non si arrotonda a sufficienza per mancanza di ritorno elastico e/o la contrazione della porzione anulare del muscolo ciliare sia insufficiente (**presbiopia**), oppure quando la distanza focale sia alterata da un'insufficienza relativa della lunghezza assiale del bulbo (**ipermetropia**).

La **miopia** è caratterizzata invece o da un bulbo troppo allungato o dall'incapacità del muscolo ciliare (porzione anulare) di rilassarsi completamente (miopia funzionale). Miopia, presbiopia ed ipermetropia costituiscono le cosiddette "ametreopie sferiche"; in esse il fuoco non coincide con il piano della retina ma è comunque puntiforme. Le ametropie possono essere però anche **astigmatiche**, ossia non consentire la formazione di un'immagine puntiforme di un oggetto puntiforme. Approfondiremo l'aspetto relativo all'astigmatismo nel prossimo capitolo.

INNERVAZIONE

Il III n.c. (oculomotore comune) innerva i retti mediale, superiore ed inferiore ed anche il muscolo elevatore della palpebra; inoltre trasporta fibre autonome dirette al muscolo sfintere dell'iride e al muscolo ciliare. Queste ultime partono dal nucleo di Edinger-Westphal, detto anche oculomotore accessorio, adiacente dorsalmente al nucleo del III n.c.. Le fibre parasimpatiche pre-gangliari dell'oculomotore accessorio si dirigono al ganglio ciliare.

Il nucleo dell'oculomotore comune è situato nel tegmento mesencefalico, a livello del collicolo superiore e in prossimità del nucleo di Cajal che, come vedremo, riveste un ruolo di grande importanza nella coordinazione oculocefalomotoria. Le fibre ortosimpatiche (che determinano la midriasi, la contrazione della porzione radiale del muscolo ciliare e contribuiscono all'elevazione della palpebra) originano nell'ipotalamo, scendono nel midollo, sinaptano nel Ganglio di Budge, fuoriescono a livello di C8 e risalgono contraendo sinapsi con il ganglio cervicale superiore, da dove partono anche le fibre autonome del VII (dirette alle sottomandibolari) e del IX (dirette alle parotidi). Dal ganglio cervicale le fibre si uniscono al ramo oftalmico del trigemino, attraverso il quale raggiungono l'occhio; dallo stesso nervo sono trasmesse le afferenze propriocettive dei muscoli estrinseci dell'occhio.

Oltre che dal riflesso fotomotore, dilatazione e contrazione pupillare dipendono dall'assetto psicoemotivo trasmesso per mediazione ipotalamica. Le fibre autonome dello sfintere pupillare possono essere danneggiate da danni alle strutture nervose adiacenti (alto valore diagnostico dell'anisocoria) e anche danni all'apice del polmone possono determinare miosi e ptosi palpebrale ipsilaterale⁶⁴.

Nel nostro contesto va ricordato che midriasi e miosi fanno parte delle **sincinesie accomodative** :

1. attivazione parasimpatica= contrazione dello sfintere pupillare (miosi), del muscolo ciliare (aumento di curvatura del cristallino), contrazione palpebrale.
2. attivazione simpatica = midriasi, contrazione della porzione radiale del muscolo ciliare (con conseguente tensione dei legamenti della zonula ed 'appiattimento' del cristallino) allargamento della rima palpebrale.

Attraverso le sincinesie, il sistema autonomo della muscolatura liscia dell'occhio è soggetto agli sforzi accomodativi prodotti volontariamente.

Sempre nel mesencefalo, caudalmente al III n. c., si trova il IV n.c. (trocleare) che innerva l'obliquo superiore.

Il VI n.c. (abducente), che innerva il retto laterale, si trova invece nel ponte.

Il muscolo orbicolare delle palpebre è innervato dal VII n.c. (faciale) che trasporta anche fibre autonome dirette alla ghiandola lacrimale principale.

⁶⁴ M.E. Goldberg *Il controllo dello sguardo* in Kandel ER, Schwartz JH, Jessel TM, Principi di Neuroscienze CEA ed. 2007

I motoneuroni dei nuclei oculomotore, trocleare ed abducente vengono attivati da diversi network pre-motori, relativamente indipendenti, i quali generano diversi pattern di attivazione (saccadi, VOR, OKN, inseguimento lento, convergenza e fissazione).

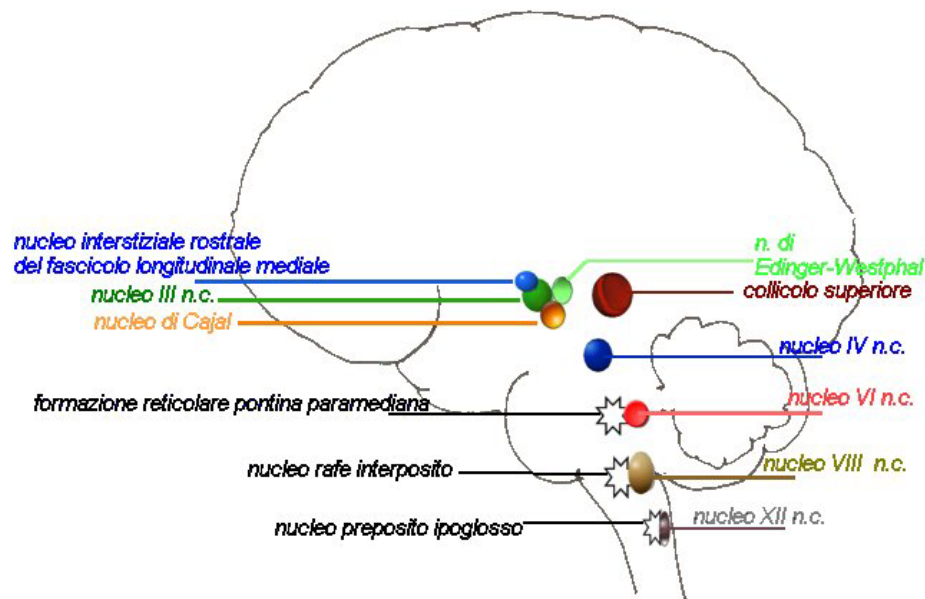


FIGURA 4 SCHEMA SEMPLIFICATO DI ALCUNE STRUTTURE IMPORTANTI DEL TRONCO ENCEFALO

Il **fascicolo longitudinale mediale** connette i tre nuclei motori dell'occhio con il nucleo di Edinger-westphal, con il nucleo vestibolare, con la formazione reticolare e con l'accessorio spinale, consentendo la coordinazione dei movimenti coniugati di occhi, testa e collo. Nella sua parte rostrale si trova il *nucleo interstiziale rostrale del fascicolo longitudinale mediale* (riMLF) che riceve proiezioni dalla corteccia oculomotoria frontale ipsilaterale e proietta ai motoneuroni di retti ed obliqui (movimento verticale). Alcune fibre del fascicolo longitudinale mediale raggiungono il *nucleo interstiziale di Cajal* e la commissura posteriore. Gli assoni discendenti fanno parte del fascicolo vestibolo-spinale mediale. Il riMLF ospita neuroni ad alta frequenza di scarica (neuroni *burst*) per le saccadi verticali e torsionali; il nucleo di dx contiene neuroni che regolano i movimenti in senso orario e quello di sinistra neuroni per il movimento in senso antiorario.

I motoneuroni dei nuclei III, IV e VI possono essere suddivisi in diretti alle SIFe diretti alle MIF. I network dei movimenti saccadici e vestibolo-oculari non coinvolgono i neuroni diretti alle MIF, che sono invece attivate per la fissazione, anche di bersagli mobili (inseguimento lento).

Dal collicolo superiore hanno origine i tratti tettospinale e tectobulbare; nel gatto, il primo discende ai segmenti cervicali del midollo, il secondo discende a toccare nuclei pontini e nuclei motori dei muscoli del collo che muovono la testa in modo coordinato alla direzione dello sguardo (oculocefalogiria)⁶⁵. Si immagina che nell'uomo il percorso sia analogo.

Gli stimoli afferenti trasmessi dagli oculomotori, dal trigemino e dalle numerose anastomosi fra i due, attivano i nuclei del trigemino e vestibolare, il collicolo superiore, il cervelletto, il nucleo preposito dell'ipoglosso, il genicolato laterale e la corteccia visiva.

Di volta in volta il segnale fasico SIF trasmette informazioni relative alla velocità ed il segnale tonico MIF informazioni relative alla posizione che vanno successivamente integrate (si veda movimenti binoculari di seguito).

PATTERN DI MOTILITÀ OCULARE

La ragione principale per cui i nostri occhi si muovono è il bisogno di coniugare l'ampiezza del campo visivo con il dettaglio dell'immagine; in altri termini si tratta di una strategia fisiologica per evitare che il cervello sia raggiunto da un eccessivo numero di input visivi pur mantenendo un'alta performance⁶⁶. Come noto, diverse razze di animali percepiscono il mondo in modo estremamente diverso, fra loro e rispetto agli

⁶⁵ Hadjidimitrakis K, Moschovakis AK, Dalezios Y, Grantyn A; *Eye position modulates the electromyographic responses of neck muscles to electrical stimulation of the superior colliculus in the cat*; Experimental brain research Maggio 2007; PMID: 17091287

⁶⁶ Agnes Mae Wong *Eye movement disorders* Oxford University Press 2008

umani. C'è chi privilegia l'ampiezza del campo visivo rispetto al dettaglio (es. i conigli) chi restringe il campo visivo per permettersi una definizione altissima (es. le aquile) e chi, come gli esseri umani e i primati, adotta una strategia mista, suddividendo la retina in una zona particolarmente densa di recettori per definire il dettaglio (fovea e macula), circondata da un'altra zona che garantisca una percezione periferica ampia, seppure meno dettagliata.

Potremmo semplificare dicendo che tutti i movimenti oculari hanno lo scopo di centrare la fovea sull'oggetto da definire e/o di mantenere l'immagine centrata sulla fovea anche quando l'oggetto o chi osserva sono in movimento.

Schematicamente, i movimenti dell'occhio possono essere distinti in due gruppi funzionali:

1. quelli che mantengono l'immagine stabile sulla retina: sistema di fissazione, sistema vestibolo-oculare e sistema optocinetico.
2. quelli che dirigono la fovea su un oggetto di interesse: sistema saccadico, sistema di inseguimento lento e sistema di vergenza.

SISTEMI DEL PRIMO GRUPPO:

- il **sistema di fissazione** funziona quando sia la testa sia l'oggetto sono immobili. In realtà la fissità è solo apparente, il bersaglio è continuamente ricentrato da piccoli movimenti detti **microdrifts** senza i quali l'immagine scomparirebbe per adattamento dei recettori. Questi microdrifts sono accompagnati da microsaccadi e microtremori la cui funzione non è ancora completamente conosciuta. Bisogna considerare, inoltre, che il contenuto orbitale imprime forze di ritorno elastico che tendono a riportare l'occhio nella sua posizione centrale. Il mantenere

fisso lo sguardo in una direzione richiede quindi una contrazione tonica dei muscoli extraoculari⁶⁷.

- il riflesso vestibolo oculare (**VOR**) permette di mantenere l'oggetto stabile sulla retina quando il capo compie piccoli movimenti; esso innesca movimenti degli occhi uguali e contrari a quelli della testa. E' il sistema vestibolare a comandare i movimenti oculari, quindi il VOR funziona anche al buio. Tuttavia, in assenza di stimoli visivi, il VOR tende ad estinguersi, inoltre non funziona al meglio se le rotazioni sono molto lente. Per questo motivo il sistema optocinetico, che invece è sensibile agli slittamenti, anche lenti, dell'immagine sul piano retinico e non si estingue facilmente, integra e coadiuva il VOR.
- il sistema **optocinetico** mantiene l'immagine stabile sulla retina anche quando il capo compie movimenti marcati, con una combinazione di inseguimento lento nella direzione di rotazione e rifissazione rapida nella direzione opposta (**nistagmo optocinetico OKN**). Ciò permette di osservare una grande superficie in movimento; sia reale – come nell'esempio del cilindro rotante- sia apparente, come quando si guarda un panorama da un treno in movimento.

Il nistagmo in generale può essere definito come un movimento ripetitivo di fasi di inseguimento lente seguite da movimenti rapidi di correzione in ritorno. L'OKN funziona per via riflessa (riflesso optocinetico **OKR**).

In realtà, in natura, l'unica condizione per cui tutto il campo visivo risulta in movimento è quando è il soggetto stesso a muoversi. L'illusione di movimento, che abbiamo ad esempio osservando il treno che parte vicino al nostro, deriva dall'abitudine del cervello ad interpretare in questi termini tale situazione.

⁶⁷ Leigh JR, Zee DS, *The Neurology of Eye Movements* Oxford University press 2006 (4).

Il sistema optocinetico va quindi distinto dal sistema di inseguimento lento, in quanto il primo riguarda la fissazione di grandi superfici in movimento mentre il secondo la fissazione di oggetti che si muovono su uno sfondo.

Difetti che comportino asimmetria nelle afferenze vestibolari possono generare un senso di rotazione illusorio (vertigine) dato da un'attivazione del nistagmo optocinetico per compensare la rotazione, in realtà inesistente, erroneamente segnalata dal vestibolo. Il lavoro cerebellare di confronto fra esito programmato ed esito atteso dello schema motorio attivato, porta normalmente in pochi giorni ad una correzione del problema, assumendo il difetto vestibolare e ricalibrando il sistema afferente.

I problemi dell'oculomotricità derivati da lesioni cerebellari sono particolarmente gravi perché pregiudicano il sistema di correzione-compenso degli errori.

Il cervelletto mette a punto costantemente tanto gli schemi motori quanto il grado di prevalenza ed interazione fra i vari riflessi, garantendo un notevole grado di plasticità al sistema, in funzione della migliore performance visiva possibile⁶⁸; questa funzione cerebellare necessita di informazioni provenienti dalle aree corticali che processano i movimenti oculari, come l'area temporale mediana⁶⁹. Nel cervelletto, il vestibolocerebello governa principalmente i movimenti VOR, l'inseguimento lento e la stabilizzazione dello sguardo; il verme e il nucleo fastigiale presiedono all'accuratezza di saccadi ed inseguimento.

SISTEMI DEL SECONDO GRUPPO:

- Il sistema **saccadico** che dirige rapidamente la fovea su un oggetto di interesse

⁶⁸ Leigh JR, Zee DS *ibid.* Carey MR, Medina JF, Lisberger SG

⁶⁹ Carey MR, Medina JF, Lisberger SG; *Instructive signals for motor learning from visual cortical area MT*; Nature neuroscience Luglio 2005; PMID: 15908949

- il sistema di **inseguimento lento** (*smooth pursuit*) che mantiene sulla fovea l'immagine di un piccolo oggetto in movimento (gli assi oculari si muovono nella stessa direzione)
- il sistema di **vergenza** che, attraverso il movimento dei due assi oculari in direzioni opposte (convergenza o divergenza) permette che l'immagine dello stesso oggetto sia mantenuta contemporaneamente sulla fovea dei due occhi anche quando l'avvicinamento del bersaglio non consenta di mantenere gli assi visivi paralleli.

CARATTERISTICHE DELLE SACCADI:

Le saccadi sono movimenti rapidi che permettono la convergenza di entrambi gli occhi su un bersaglio. Possono essere innescate da stimoli visivi, tattili, auditivi o mnemonici. Possono essere volontarie, automatiche (es. dirigere lo sguardo su un oggetto entrato nel campo visivo) o riflesse (fase rapida di compenso al nistagmo optocinetico). La velocità della saccade (da 30° a 700°/sec) non è volontaria ed è correlata con il range di movimento previsto (maggiore lo spostamento, maggiore la velocità). Effettuiamo circa 100.000 saccadi al giorno.

Nelle saccadi e nelle fasi rapide del nistagmo tutte le fibre sono reclutate sincronicamente. Nei movimenti lenti e nella fissazione, l'ordine di reclutamento è strettamente dipendente dalla posizione dell'occhio nell'orbita e dall'estensione e dalla velocità del movimento previsto: prima, quando l'occhio è ancora in direzione opposta a quella ove si concluderà il movimento, vengono reclutate le fibre rosse SIF (*singularly innervated fibers*); poi – probabilmente in corrispondenza della posizione primaria - vengono reclutate le fibre MIF (*multiply innervated fibers*); le fibre più veloci ma meno

resistenti alla fatica vengono reclutate per ultime, quando l'occhio ha quasi completato il movimento⁷⁰.

Durante una saccade, i muscoli oculomotori agonisti ricevono una scarica ad alta frequenza detta impulso (*pulse*) di contrazione fasica, cui segue una fase di attività tonica (*step*) che mantiene l'occhio nella posizione raggiunta e che riguarda anche gli antagonisti (i quali nella fase *pulse* vengono inibiti).

Il modello *pulse step* si applica a tutti i movimenti oculari (saccadi inseguimento lento, nistagmo fase lenta, vergenze).

La velocità di una saccade è anche proporzionata al grado di attenzione: nel passaggio da un bersaglio visivo all'altro, la saccade è più veloce (latenza 100 ms) se il primo bersaglio sparisce, rispetto alla velocità che assume (200-250 ms) se il bersaglio originario ed il successivo rimangono entrambi presenti nel campo visivo⁷¹.

Clinicamente, è importante considerare separatamente l'aspetto della velocità da quello della precisione delle saccadi (la presenza di eventuali dismetrie), considerando che un piccolo *overlap* (fissazione poco oltre il bersaglio e successiva correzione) nelle saccadi di piccola ampiezza ed un piccolo *lag* (fissazione poco prima del bersaglio e successiva correzione) in quelle di grande ampiezza sono da considerarsi fisiologici.

La metrica della saccade dipende essenzialmente dal contributo cerebellare.

Ancestralmente, le saccadi sono finalizzate soprattutto alla scansione dell'orizzonte per vagliare l'eventuale approssimarsi di un pericolo. E' forse per questo motivo che *le saccadi laterali hanno caratteristiche neuromuscolari diverse rispetto a quelle verticali od oblique*.

I muscoli responsabili delle saccadi orizzontali (retto mediale e retto laterale) sono innervati da due diversi nuclei cranici (III e VI) che si attivano con schemi motori

⁷⁰ Agnes Mae Wong *Eye movement disorders* Oxford University Press 2008

⁷¹ Wong *ibid*.

generati principalmente dai neuroni *burst* (“cellule che scaricano a raffica”) della formazione pontina paramediana.

I neuroni *burst* eccitatori (EBN) agiscono sul nucleo dell’abducente ipsilaterale, dal quale partono anche interneuroni diretti al nucleo del III n.c. per l’attivazione del retto mediale controlaterale. I movimenti di lateralità sono quindi essenzialmente gestiti dal IV n.c.

Neuroni *burst* inibitori (IBN) bloccano l’attività dell’abducente controlaterale.

In assenza della generazione di saccade, i neuroni dei muscoli estrinseci sono tonicamente inibiti da ‘neuroni pausa’ (*omnipause*).

Le saccadi verso l’alto e il basso hanno invece neuroni di scarica (*burst*) nella formazione reticolare del mesencefalo, ma condividono con le saccadi orizzontali l’inibizione tonica dei neuroni *omnipause*, che si attivano per mantenere la stabilità della posizione raggiunta, collocati bilateralmente nei nuclei vestibolare mediale e preposito dell’ipoglosso⁷².

Le saccadi oblique coinvolgono entrambi i circuiti.

Anche la stimolazione tonica *step* (mantenimento dell’occhio nella posizione raggiunta) presenta strutture distinte per i movimenti verticali ed orizzontali.

Il comando ‘*step*’ implica un’integrazione neurale fra comandi di velocità e posizione, non ancora completamente compresa, che fa ipotizzare l’esistenza di un integratore neurale (*neural integrator*). Per i movimenti orizzontali l’integrazione neurale coinvolge il nucleo vestibolare e l’adiacente preposito dell’ipoglosso. Per i movimenti verticali e torsionali, l’integratore neurale è centrato sul nucleo mesencefalico di Cajal.

I generatori di movimento saccadico del tronco encefalo sono attivati dal collicolo superiore sulla base di impulsi provenienti dalla corteccia parietale posteriore (stimolo

⁷² *Il controllo dello sguardo* in Kandel ER, Schwartz JH, Jessel TM, Principi di Neuroscienze CEA ed. 2007

attentivo) e dalle aree oculomotrici della corteccia frontale (comando operativo); queste ultime, attraverso il nucleo caudato, sospendono l'inibizione tonica esercitata sul collicolo superiore dalla substantia nigra, quindi presiedono all'attivazione del movimento e alla disinibizione del collicolo.

Da studi recenti sui primati, si ritiene inoltre che esso abbia un ruolo nei movimenti della testa indipendenti dai movimenti dello sguardo⁷³.

Studi recenti ritengono che in realtà il collicolo superiore codifichi solo i movimenti sugli assi principali lasciando l'attivazione per le posizioni oblique – che comportano un certo grado di torsione - ad un più complesso controllo *downstream*⁷⁴

MOVIMENTI DI INSEGUIMENTO LENTO

I movimenti di inseguimento lento (*smooth pursuit*), rappresentano un'attività cerebrale complessa, che coinvolge numerose strutture corticali e subcorticali.

I movimenti di scansione effettuati solo con gli occhi comportano un'inattivazione dell'OKR che tenderebbe a riposizionarli al centro. La scansione visiva con movimenti di occhio e testa combinati, comporta altresì una cancellazione del VOR che tenderebbe a compensare con lo spostamento degli occhi il movimento della testa che invece, in questo caso, va nella stessa direzione dello sguardo.

⁷³ Walton MG, Bechara B, Gandhi NJ *Role of the primate superior colliculus in the control of head movements*, Journal of neurophysiology, No. 98, Giugno 2007 PMID: 17581848

⁷⁴ Klier EM, Wang H, Crawford JD *Three-dimensional eye-head coordination is implemented downstream from the superior colliculus*. Journal of Neurophysiology maggio 2003 PMID 12740415.

si veda anche Constantin AG, Wang H, Crawford JD *role of superior colliculus in adaptive eye-head coordination during gaze shifts*, Journal of Neurophysiology ottobre 2004 PMID 15190087.

In sintesi i movimenti di inseguimento lento richiedono l'inattivazione dei riflessi (VOR e OKR) ed una gestione corticale più complessa rispetto alle saccadi.

La velocità dei movimenti di inseguimento lento è estremamente variabile (da 0,1 a 70°/sec, fino a 130°/sec in persone particolarmente allenate.

Esistono in letteratura diversi studi che hanno misurato, nei soggetti affetti da WAD (*whiplash associated disease*), un'influenza in termini di guadagno (in questo caso velocità occhio/velocità di spostamento del bersaglio) di questo disturbo sulla velocità di inseguimento lento accompagnata da movimenti di rotazione della testa⁷⁵.

La smooth pursuit può essere innescata da vari tipi di stimoli, in primis quello visivo (slittamento delle immagini sul piano retinico) o da stimoli propriocettivi (es. tracciare la traiettoria di un proprio dito in movimento al buio o seguire con gli occhi sempre al buio il percorso di uno stimolo tattile⁷⁶) o persino cognitivi (es. seguire una sequenza di luci stroboscopiche anche se non c'è movimento reale o anche ripercorrere con la memoria a breve termine una traiettoria compiuta da un oggetto⁷⁷).

Non è possibile però, se non per rari individui, effettuare movimenti di inseguimento lento in assenza di stimolo, in questo caso si opera solo una serie di saccadi consecutive.

L'inseguimento di stimoli visivi imprevisti genera normalmente un *lag* fasico prima che l'oggetto sia perfettamente centrato nella fovea; tracciare movimenti prevedibili permette invece una centratura immediata.

⁷⁵Kongsted A, Jørgensen LV, Bendix T, Korsholm L, Leboeuf-Yde C. *Are smooth pursuit movements altered in chronic whiplash-associated disorders? A cross-sectional study* Clinical Rehabilitation Novembre 2007 Vol 21 PMID: 18390982; Montfoort I, Kelders WP, Van der Geest JN, Schipper IB, Feenstra L, de Zeeuw CI, Frens MA *Interaction between ocular stabilization reflexes in patients with whiplash injury* PMID: 16799028; quest'ultimo interessante anche per l'aspetto della ripercussione su COR e VOR.

⁷⁶ Agnes Mae Wong *Eye movement disorders* Oxford University Press 2008.

⁷⁷ Leigh JR, Zee DS, *The Neurology of Eye Movements* Oxford University press 2006 (4)

L'architettura neurale dei movimenti di inseguimento lento non è stata ancora completamente tracciata.

Senz'altro, in analogia con i movimenti saccadici, anche qui l'inseguimento lungo l'orizzonte e quello in direzione assiale sono azionati da circuiti diversi: le proiezioni corticali e talamiche raggiungono il nucleo dorsolaterale pontino per i movimenti orizzontali ed il nucleo rostrale della formazione reticolare del ponte nonché il nucleo interstiziale di Cajal per quelle verticali.

Il nucleo di Cajal contiene diverse popolazioni neuronali: alcune impiegate nel meccanismo di integrazione neurale per il mantenimento della posizione dello sguardo (dopo saccadi verticali e torsionali); un'altra popolazione coordina i movimenti coniugati di occhi e testa (soprattutto in rotazione).

Dal nucleo di Cajal partono tre vie neuronali: commissurale (attraverso la commissura posteriore) discendente ed ascendente⁷⁸.

⁷⁸ Kokkoroyannis T, Scudder CA, Balaban D, Highstein SM, Moschovakis K, *Anatomy and physiology of the primate interstitial nucleus of Cajal efferent projections*, Journal of Neurophysiology 75, Febbraio 1996 PMID: 8714648.

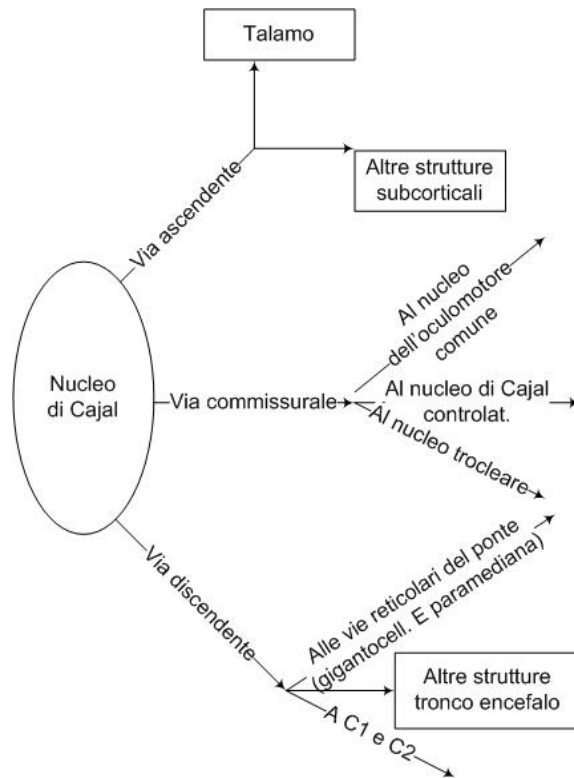


FIGURA 5 SCHEMA SEMPLIFICATO DELLE EFFERENZE DAL N. DI CAJAL

La via commissurale proietta al nucleo omologo controlaterale, al nucleo dell'oculomotore comune e al trocleare.

La via ascendente proietta al talamo e ad altre strutture subcorticali.

La via discendente proietta alla formazione reticolare del ponte (gigantocellulare e paramediana), ad altre strutture del tronco encefalo e ai primi due segmenti cervicali. Un altro studio sembrerebbe indicare che, oltre alla codifica dei movimenti orari ed antiorari degli occhi – associati anche con le stimolazioni dei canali semicircolari – il nucleo di Cajal avrebbe iscritte coordinate per l'orientamento della testa sugli assi di Fick⁷⁹.

⁷⁹ Klier EM, Wang H, Crawford JD: *Interstitial Nucleus of Cajal Encodes Three Dimensional Head Orientations in Fick like Coordinates* Journal of Neurophysiology 97 Gennaio 2006 PMID: 17079347

Particolarmente interessante è uno studio pubblicato quest'anno, che evidenzia le diverse sinergie muscolari del collo su stimolazione di precise aree del nucleo interstiziale di Cajal (INC) ⁸⁰.

Stimolazioni unilaterali dell'INC evocano torsioni e rotazioni della testa, che vengono mantenute finché la stimolazione non cessa.

L'inattivazione unilaterale porta ad un deficit nel mantenimento della posizione eretta, con inclinazione in direzione opposta.

Lo studio ha registrato in EGM movimenti oculari e attività muscolare in scimmie che potevano liberamente muovere la testa. I muscoli esaminati sono stati::

- sternocleidomastoideo (SCM)
- splenio della testa (SP)
- grande retto (rectus capitis major RCP maj)
- obliquo inferiore (occipital capitis inferior OCI)
- trapezio (complexus COM)
- semispinale (biventer cervics).

La stimolazione del nucleo interstiziale evocava una fase a corta latenza (5-10 ms) di facilitazione fasica e, successivamente una facilitazione tonica dell'attività della maggior parte dei muscoli ipsilateralmente e dell'obliquo inferiore e grande retto controlateralmente. Il parametro non è però simmetrico nell'inattivazione monolaterale del nucleo, che determina aumento dell'attività dello SCM controlaterale, dello splenio, del grande retto e dell'obliquo ipsilaterali ed un decremento nell'attività del grande retto

⁸⁰ Farshadmanesh F, Chang P, Wang H, Yan X, Corneil BD, Crawford JD *Neck muscle synergies during stimulation and inactivation of the interstitial nucleus of Cajal (INC)*. Journal of Neurophysiology, Settembre 2008 PMID 18579660; si veda anche degli stessi AA *Three-dimensional eye-head coordination after injection of muscimol into the interstitial nucleus of Cajal (INC)*. Journal of Neurophysiology Marzo 2007 PMID: 17229829

e dell'obliquo ipsilaterale. Quindi in particolare a livello dei nucali brevi i pattern di attivazione disattivazione non sono simmetrici.

Inoltre sono stati individuati parametri di relazione complessa che fanno presumere che, a livello del nucleo interstiziale esistano schemi motori più sofisticati rispetto a quelli evidenziabili dal comportamento aperto.

LA PROPRIOCEZIONE DEI MUSCOLI ESTRINSECI DELL'OCCHIO

La propriocezione dei movimenti oculari, nonché la sensibilità della cute palpebrale superiore ed inferiore, della cornea, della congiuntiva e del muscolo ciliare dell'iride dipendono dalla branca oftalmica del V n.c. (trigemino). Esiste anche l'ipotesi che le afferenze propriocettive siano trasmesse corticalmente attraverso il nervo ottico⁸¹. Dal nucleo del trigemino l'informazione propriocettiva viene trasmessa sia a strutture coinvolte nell'oculomotricità (collicolo superiore, corteccia frontale, cervelletto, nucleo preposito dell'ipoglosso) sia a strutture coinvolte nella trasmissione della percezione visiva (corpi genicolati laterali, pulvinar corteccia visiva)⁸².

Le peculiari caratteristiche istologiche dei propriocettori dei muscoli estrinseci dell'occhio - simili agli altri muscoli nello strato orbitale, unici e peculiari dell'occhio nello strato globale (propriocettori "a palizzata") - lasciano aperto un dibattito sul ruolo che la propriocezione stessa avrebbe nel contribuire all'orientamento dello sguardo⁸³.

⁸¹ Gentle A, G Ruskell *Pathway of the primary afferent nerve fibers serving proprioception in monkey extraocular muscles*. Ophthalmic and Physiological Optics maggio 1997 PMID 9196664.

⁸² Leigh JR, Zee DS, *The Neurology of Eye Movements* Oxford University press 2006 (4), Agnes Mae Wong *Eye movement disorders* Oxford University Press 2008.

⁸³ Per una review sull'argomento si veda Weir C.: *Proprioception in extraocular muscles*, Journal of Neuroophthalmology Giugno 2006, PMID: 16845314 e Weir C., Knox P., Dutton G *Does extraocular muscle proprioception influence oculomotor control?* British Journal of Ophthalmology, Settembre 2000 No 84, PMID: 10966971.

L'assenza di riflessi di stiramento nella muscolatura extraoculare; il fatto che – almeno nelle scimmie – la deafferentazione del trigemino non impedisca corretti movimenti oculari⁸⁴ ed infine la considerazione che l'occhio può ovviamente regolarsi su coordinate visive, portano a credere che l'informazione pregnante utile per inferire la posizione degli occhi derivi dall'attività neuronale investita per mantenere gli stessi in quella determinata posizione, in rapporto con l'orientamento della testa nello spazio (propriocezione cervicale). L'entità derivata da questa attività e usata a tal scopo viene chiamata *effERENCE copy*, ragionevolmente traducibile in copia dell'innervazione efferente. Secondo il modello a feed-forward il messaggio efferente viene così copiato e utilizzato immediatamente per creare e inviare al cervello un'informazione predittiva sulla risultante. La *effERENCE copy* o *corollary discharge* è dunque una riproduzione o copia endogena di un impulso nervoso efferente - nello specifico della muscolatura extraoculare – che può sostituire la propriocezione nel controllo momento per momento dei movimenti degli occhi. La sua genesi è determinata dalla funzione innervativa di movimento o mantenimento di posizione, non dalla sua applicazione dinamica. Abbondante è la letteratura sull'argomento⁸⁵; alcuni sostengono che gli organi a palizzata, caratteristici dello strato globale, avrebbero funzione di effettori, almeno nei gatti⁸⁶, altri rivendicano un ruolo della propriocezione globale (organi-palizzata) almeno per quanto attiene al network della fissazione ed inseguimento lento, per i meccanismi che permettono di mantenere un corretto allineamento dei due occhi ed anche per quanto

⁸⁴ Lewis RF, DS Zee, MR Hayman, Rj Tamargo *Oculomotor function in the rhesus monkey after deafferentation of the extraocular muscles* Experimental Brain Research Dicembre 2001 PMID: 11715079

⁸⁵ Buttner-Ennever JA, Horn AK: *The neuroanatomical basis of oculomotor disorders: the dual motor control of extraocular muscles and its possible role in proprioception*. Current Opinion in Neurology Febbraio 2002 PMID 11796949; Blumer R, Konacki KZ, Streicher J, Hoetzenecker W, Blumer MJ, Lukas JR *Proprioception in the extraocular muscles of mammals and man*. Strabismus Giugno 2006 PMID 16760116

⁸⁶ Konacki KZ, Streicher J, Hoetzenecker W, Blumer MJ, Lukas JR, Blumer R. *Molecular Characteristics suggest an effector function of palisade endings in extraocular muscles* Investigative Ophthalmology and Visual Science Gennaio 2005 Gennaio 2005, PMID: 15623769.

concerne la programmazione premotoria delle saccadi, quando i riferimenti visivi siano compromessi⁸⁷. Probabilmente il cervello gode di un'ampia riserva funzionale, multireferenziale (input visivi, efference copy, propiocezione) per determinare la posizione dello sguardo nello spazio. In ogni caso i segnali propriocettivi provenienti dai due occhi sono coinvolti nella localizzazione visiva egocentrica, con un maggior coinvolgimento dell'occhio dominante 'posturale'⁸⁸ ed avrebbero quindi un loro ruolo nell'interrelare le coordinate corporee con quelle spaziali e nell'integrare le afferenze visive con la posizione dell'occhio nell'orbita⁸⁹.

RELAZIONE FRA SISTEMA OCULOMOTORE E CEFALOMOTORE

Il riflesso optocinetico (OKR) e il riflesso vestibolo-oculare (VOR) sono fra i primi movimenti dell'occhio ad apparire filogeneticamente. La compensazione fra movimenti del capo e movimenti degli occhi parte dal sistema vestibolare, che ha tempi di latenza circa dieci volte inferiori (7-15 ms fra afferenza vestibolare ed efferenza oculomotrice) rispetto a quello visivo (100 ms fra input visivo ed output oculomotore). Questo è il motivo per cui riusciamo a leggere oscillando la testa ma non riusciamo a leggere se teniamo la testa ferma e oscilliamo lo scritto alla stessa velocità.

Il VOR si articola in due sotoriflessi: il VOR angolare o rotazionale (r-VOR) si basa sulle afferenze dei canali semicirculari e segnala gli spostamenti della testa rispetto al corpo (flessoestensione, rotazione, inclinazione); il VOR traslazionale o lineare (t-

⁸⁷ Leigh JR, Zee DS, *The Neurology of Eye Movements* Oxford University press 2006 (4)

⁸⁸ Velay JL, Roll R, Lennestrand G, Roll JP *Eye proprioception and visual localization in humans: influence of ocular dominance and visual context* Vision research Agosto 1994 PMID 7941413.

⁸⁹ JP Roll, R Roll, *La proprioception extra-oculaire comme élément de référence posturale et de lecture spatiale des données rétinienne*. in *Aggressologie*, 28,1987

VOR) si basa sulle afferenze di utricolo e sacculo e segnala gli spostamenti della testa *insieme* al corpo (orizzontali –*heave* -, verticali –*bob*- o avanti-indietro –*surge*-).

Un danno al canale semicircolare orizzontale di sinistra porterà ad un'eccitazione del suo omologo di destra creando l'illusione che la testa stia ruotando verso destra ed attivando un nistagmo optocinetico di compenso a sinistra (ossia fasi lente a sinistra – ipsilesionali – e battito rapido a destra controlesionale). Una lesione bilaterale dei vestiboli non causerà nistagmo perché le afferenze dx-sx risulteranno comunque bilanciate.

I canali semicircolari sono disposti in tre coppie funzionali di attivazione-inibizione reciproca: la depolarizzazione destra corrisponde ad iperpolarizzazione sinistra e viceversa.

Il semicircolare anteriore può considerarsi giacente sullo stesso piano del semicircolare posteriore controlaterale e viceversa. Le coppie funzionali dei canali semicircolari sono associate alle coppie sinergiche dei muscoli extraoculari:

La stimolazione del canale semicircolare di destra porta lo sguardo a sinistra e viceversa (semicircolari orizzontali associati ai retti mediale e laterale)

La stimolazione dei canali anteriori darà attivazione del retto superiore ipsilaterale e dell'obliquo inferiore controlaterale, producendo elevazione dello sguardo con incicloduzione dell'occhio ipsilaterale (retto) ed excicloduzione dell'occhio controlaterale (obliquo).

La stimolazione dei canali semicircolari posteriori darà attivazione dell'obliquo superiore ipsilaterale e del retto inferiore controlaterale, producendo abbassamento con incicloduzione dell'occhio ipsilaterale (obliquo) ed excicloduzione del controlaterale.

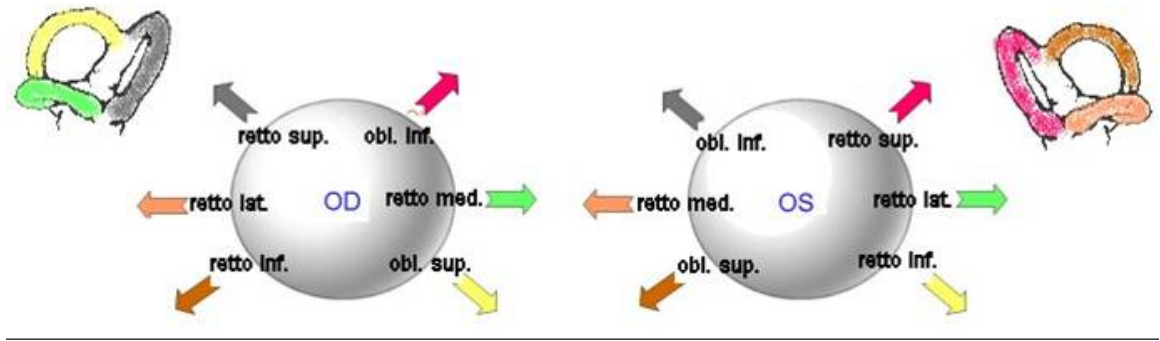


FIGURA 6 I DIVERSI COLORI MOSTRANO L'ATTIVAZIONE DEI MUSCOLI SINERGISTI NEI DUE OCCHI COME COMPENSAZIONE AI MOVIMENTI DELLA TESTA SEGNALATI DAI CANALI SEMICIRCOLARI DEL VESTIBOLO

Questi movimenti si coordinano al movimento della testa grazie all'integrazione con il collicolo superiore e con il nucleo interstiziale di Cajal. Il nucleo destro controlla i movimenti in senso orario di occhi e testa, mentre il nucleo sinistro controlla i movimenti in senso antiorario⁹⁰.

La stabilità dello sguardo durante il movimento dipende anche dalla stabilità della testa rispetto ai movimenti del corpo. Oltre alla forza di inerzia, che agisce principalmente su rotazioni ed inclinazioni e poco sulla flessione-estensione, il riflesso collico-vestibolare⁹¹ attiva la muscolatura del collo compensando il movimento della testa nello spazio; il riflesso cervico collico (CCR) agisce sulla stessa muscolatura attraverso riflessi di stiramento, stabilizzando la testa rispetto al tronco⁹².

⁹⁰ Z. M. Klier, J.D. Crawford *Neural control of three dimensional Eye and Head posture* annals of the NY Academy of Science Ottobre 2003 PMID: 14662453.

⁹¹ Welgampola MS, Colebatch JG; *Vestibulocollic reflex: normal values and the effect of age*; Clinical Neurophysiol 2001; PMID: 11682335

⁹² Peterson BW, Goldberg J, Bilotto G, Fuller JH: *Cervicocollic reflex: its dynamic properties and interaction with vestibular reflexes*. Journal of Neurophysiology Luglio 1985 PMID 3162006.

In particolare, sembra sia la muscolatura cervicale superiore⁹³ a giocare, attraverso l'orientamento visivo, un ruolo particolarmente importante per la regolazione posturale del capo sul tronco.⁹⁴

Il riflesso cervico-oculare (COR) dipende dalle afferenze propriocettive che dai muscoli del collo giungono al vestibolo; in condizioni normali i suoi contributi alla stabilizzazione dello sguardo sono minimi⁹⁵; in presenza di alterazioni vestibolari il COR assume maggiore importanza nella generazione dei movimenti oculari di compenso ai movimenti della testa⁹⁶. Questa funzione di compenso è comunque mediata dal cervelletto, tanto che, in presenza di danno cerebellare in aggiunta al danno vestibolare, la strategia di incremento del COR non si attua⁹⁷. Da uno studio di quest'anno, su pazienti affetti da WAD, emerge - d'altra parte - che una ridotta mobilità cervicale influenza molto la plasticità di vicarianza fra COR e VOR⁹⁸.

In altri termini, al di là dei riflessi di stiramento, la distribuzione del tono nella muscolatura cervicale è collegata per via riflessa all'integrazione fra il sistema visivo ed il sistema vestibolare.

⁹³ Peterson BW, Choi H, Hain T, Keshner E, Peng GC: *Dynamic and kinematic strategies for head movement control*. Ann NY Acad Sci Ottobre 2001 PMID: 11710479

⁹⁴ M.W. Morningstar, Burl R Pettibon, H Schiappi, Ma schiappi, T V Ireland *Reflex control of the spine and posture: a review of the literature from a chiropratic perspective*. Chiropratic and Osteopathy Agosto 2005 PMID 16091134.

⁹⁵ Jurgens R, Mergner T, *Interactions between cervico-ocular and vestibulo ocular reflexes in normal adults* Ann. of the NY Acad of Science 2001 PMID 2792284.

⁹⁶ Carmona S, Nieto D. *The specificity and sensitivity of uninhibited COR in labyrinthine-defective patients* Ann N Y Acad Sci. 2005 Apr;1039:508-12 PMID: 15827010 ; Heimbrand S, Bronstein AM, Gresty MA, Faldon ME; *Optically induced plasticity of the cervico-ocular reflex in patients with bilateral absence of vestibular function*; Experimental Brain research Dicembre 1996; PMID: 9007539.

⁹⁷ Leigh JR, Zee DS, *The Neurology of Eye Movements* Oxford University press 2006⁴

⁹⁸ Montfoort I, JN Van der Geest, HP Sliper, CI De Zeeuw, MA Frens *Adaptation of the cervico and vestibulo-ocular reflex in whiplash injury patients* Journal of Neurotrauma Giugno 2008, PMID: 18476768.

Sembra che un incremento del guadagno del CCR compensi il deterioramento senile della funzione vestibolare⁹⁹. In uno studio sperimentale per indagare le relazioni fra riflesso vestibolo-spinale e VOR, Jahn e collaboratori hanno messo a confronto volontari sani e pazienti affetti da neurite vestibolare, facendo loro indossare maschere che consentivano la fissazione di un punto prossimo. La soppressione dei movimenti oculari (nistagmo), ottenuta fissando la mira sulla maschera, consentiva ai pazienti labirintopatici una considerevole limitazione delle oscillazioni posturali. Per i volontari sani il risultato è stato il medesimo nella fissazione del bersaglio o ad occhi aperti nel buio. Poiché la fissazione prossima esclude l'effetto dello scivolamento sul piano retinico, lo studio conclude che l'incremento di equilibrio sia dovuto alle afferenze propriocettive dei muscoli extraoculari (probabilmente via efference copy) più che agli input visivi¹⁰⁰.

Le flessione-estensioni che compensano i movimenti di traslazione alto-basso durante la locomozione risultano assenti in pazienti con funzione vestibolare compromessa¹⁰¹ il che dimostra il ruolo del VCR in questa funzione. VCR e CCR lavorano insieme per prevenire le perturbazioni della testa rispetto al corpo ma il CCR – che agisce su riflessi da stiramento -può invece lavorare in senso opposto, diminuendo la funzionalità del VCR, quando ad essere perturbata è la posizione del corpo¹⁰².

Naturalmente è anche possibile un controllo volontario della muscolatura del collo, importante quando VCR è compromesso.

Poiché la testa si muove rispetto al corpo, il corpo si orienta nello spazio e gli occhi si muovono nella testa, le afferenze retiniche non permettono una localizzazione

⁹⁹ G. Schweigart, RD Chien, T Mergner *Neck proprioception compensates for age related deterioration of vestibular self-motion perception* Experimental Brain Research 2002 PMID 2373373.

¹⁰⁰ Jahn K, Strupp M, Krafczik S, Scuhler O, Glasauer S, Brandt T; *Suppression of eye movements improves balance*; Brain Settembre 2002; PMID: 12183346.

¹⁰¹ Pozzo T, Berthoz A, Lefort L, Vita E *Head stabilization during various locomotor tasks in humans* seconda parte: *Patients with bilateral vestibular deficit*- Experimental brain research 85, 1991

¹⁰² Leigh JR, Zee DS, *The Neurology of Eye Movements* Oxford University press 2006 (4)

adeguata nello spazio del bersaglio visivo; a meno che non siano coniugate con informazioni riguardanti la posizione reciproca del capo sulla testa e degli occhi nell'orbita, nonché del corpo nello spazio. L'ipotesi di uno studio, condotto associando diverse posizioni della testa sul collo con diversi orientamenti dello sguardo,¹⁰³ è che è probabile, poiché la vibrazione dei muscoli extraoculari produce risposte posturali direzionali, che una qualche componente di propriocezione extraoculare influenzi il controllo del sistema tonico-posturale. I propriocettori cervicali giocano un ruolo importante per direzionare lo sguardo quando la testa è ruotata (posizione testa-collo come base per la posizione dell'occhio nell'orbita). Tuttavia non è ancora chiarito come il cervello determini la posizione degli occhi nella testa. L'ipotesi più probabile è che sia predeterminata via efference copy con un contributo a feedback della propriocezione oculare.

¹⁰³ A Thurrell, P. Bertholon, A.M. Bronstein *Reorientation of a visually evoked postural response during passive whole body rotation* Experimental Brain Research Luglio 2000 PMID: 10968223.