

Vincui posturâi al imbinament dai moviments dai articui

FAUSTO BALDISSERA *

1. Introduzion. Biel che o fasìn une vore dai moviments di ogni dì – par esempi, fâ lavôrs manuâi, sunâ, fâ ativitâts sportivis – i moviments volontaris dai diviers segments dai nestris articui si cumbinin intune grande varietât di schemis.

Lis cumbinazions dai moviments, però, no son ilimitadis e cierts moviments che o rivin a fâ cun facilitât un a la volte a diventin dificiis cuant che o cirin di fâju insiemi. Un esempi ben cognossût di chest al è chel di cuant che si disegnin moviments speculars da lis mans tal plan parasagjitâl (Müller 1840, Meige 1901): al è facil disegnâ cerclis tal aiar cuant che si môf une man par volte o cuant che si movin dutis e dôs lis mans te stesse direzion, ma movi lis mans in dôs direzions contrariis al è cetant plui difcil, al domande une vore di atenzion e si pues fâlu dome lentementri.

Une vore di altris cubiis di moviments associâts a presentin dificolts similis. Par esempi, i moviments di flesso-estension cicliche da la man e dal pît ipsilaterai tal plan parasagjitâl. Cheste sorte di moviments monoarticolars (Figure 1) a puedin jessi cumbinâts cuntune cierte facilitât cuant che ducj e doi i articui si movin te stesse direzion, ven a stâi cuant che i moviments a son isodirezionai – in chest câs o vin la coativazion, in fase, dal muscul soleus (SOL), flessôr dal pît in direzion plantâr, e dal flexor carpi radialis (FCR), flessôr da la man in direzion palmâr. Al contrari, cuant che i articui si movin un in direzion contrarie di chel altri, ven

* Universitât di Milan, Italie. E-mail: fausto.baldissera@unimi.it.

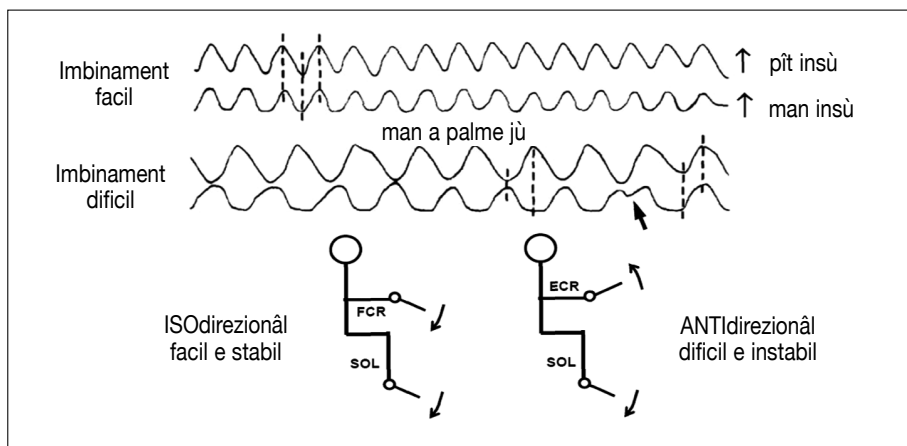


Figure 1. “Principi di direzione” tal imbinament man-pît. Di notâ la frecuece plui basse dal imbinament ANTIdirezionâl (dificil) e la inversion spontanee (freçute) al imbinament ISO-direzionâl (facil).

a stâi cuant che i moviments a son antidirezionâi, in oposizion di fase, cu la coativazion dal soleus e dal extensor carpi radialis (ECR), l’aumentâ de frecuece di ossilazion, o il diminuî dal nivel di atenzion, al puarte in curt a une inversion di 180°, che e torne a puartâ il moviment in te modalitât isodirezionâl.

Pe lôr semplicitât strutturâl, chescj moviments, a son stâts sielzûts par studiâ la origine de dicotomie facil/dificil tai imbinaments di moviments.

2. Il principi di direzione. I moviments isodirezionâi (che, in curt, o clamarin ISO) man-pît a puedin jessi fats cence erôrs anje a 3-4 ciclis al secont par plui di un minût. Al contrari, i moviments antidirezionâi (che, in curt, o clamarin ANTI) a diventin vie vie plui dificii a man a man che la frecuece e cres, di mût che dome pôcs sogjets, cuant che si rive par sore dai 2,5 Hz, a rivin a evitâ par plui di 10 seconts la inversion di fase ai moviments ISO. Par finî, i moviments ISO a restin facii di fâ (e i ANTI dificii) anje cuant che la man e je palme sù, si ben che, in chest câs, il scheme di coativazion dai muscui al sedi invertît. Chest nus mostre che la facilitât o la dificolât dal imbinament a dipendin de direzion dai moviments rispjet a coordinadis esternis e no dai muscui ativâts (Baldissera et al. 1982).

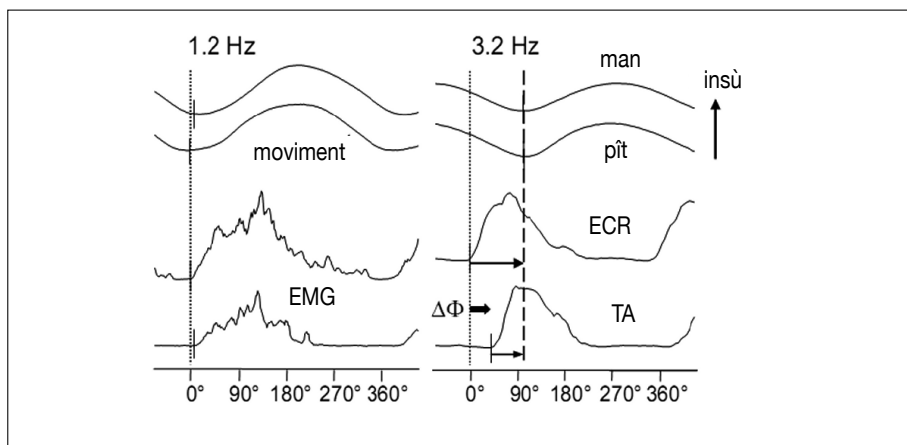


Figure 2. Cuan che la frecuece e aumante di 1.2 a 3.2 Hz, il ritart di fase dai moviments rispjet a la contrazion muscolâr al è plui grant te man che tal pît (freçutis finis). Cul anticipi di ativazion dal ECR rispjet al TA ($\Delta\Phi$, freçute gruesse), il control neurâl al compense la disparitât mecaniche dai articui e al manten la sincronie dai moviments.

3. Studi da lis regulis mecanichis e neurâls. Il pas seguitîf al è stât chel di distingui jenfri il rûl che a àn i vincui mechanics e il rûl che al à il control esercitât dal çurviel tal guviernâ l'imbinament man-pît.

Lis ossilazions dai segments di un articul a son une vore similis a chês di un pendul ideâl movût di une fuarce sinusoidâl (cfr. Baldissera et al. 2000): a man a man che la frecuece e cres, lis ossilazions a van simpri plui in ritart di fase rispjet a la fuarce, secont une funzion sigmoidâl che e à un andament determinât de rigiditât, de inerzie e de viscositât dal pendul.

La relacion di fase tra fuarce e moviment dai articui e je stade misurade, a diviersis frecuencis di ossilazion (1.0-3.2 Hz), come la variazion dal ritart di fase jenfri l'inizi de contrazion dal muscul (mostrât dal eletromiogram, EMG) e l'inizi dal moviment relatîf. Se la frecuece e je basse (Figure 2, 1,2 Hz) l'inizi de fuarce al è sincron tai musculi de man (estensôr radiâl dal carp, ECR) e dal pît (tibiâl anteriôr, TA) e, tal stes timp, simultani ancje cul inizi dai moviments corrispondents. Come che si spietavisi, cul inçressi da la frecuece (Figure 2, 3.2 Hz), l'atac dal moviment al à tacât a ritardâ rispjet a la respetive fuarce in ducj e doi i moviments, ma in maniere plui marcade tai moviments da la man che tai moviments

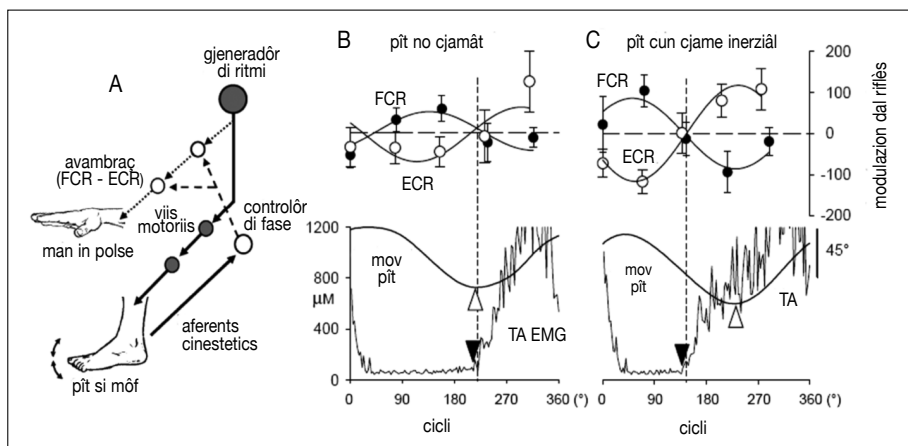


Figure 3. A) Scheme dal feedback cinestetic ipotizât, che al va dai recetôrs di posizion dal pît ai trois neurâi direts al brâç. B) La modulazion de ecitabilitât dai motoneurons (MN) dai muscui flessôrs (FCR) e estensôrs (ECR) dal avambrâç e je in oposizion di fase. L'inizi (triangul plen) dal EMG dal muscul TA e l'inizi (triangul vueit) dal moviment gîenerât dal TA (estension dorsâl dal pît) a son cuasi sincrons tra di lôr e ançe cul pont li che lis dôs modulacions si incrosin (linie tratinate). C) Cuan che e ven aplicade une cjame inerziâl al pît, il moviment (triangul vueit) al ritarde in maniere considerevule, sedi rispîet al TA EMG sedi rispîet a la modulazion de ecitabilitât dal FCR e dal ECR. La modulazion de ecitabilitât e reste invezit leade a la ativazion dal TA, sì che no pues jessi causade di segnâi aferents che a segnalin la posizion ritardade dal pît.

dal pît (come che a mostrin lis freçutis plui finis de Figure 2). Cun dut chest, i doi moviments a restin sincronis, parcè che intant la fase di ativazion dal ECR e à anticipât chê dal TA da la quantitat juste par rivâ a compensâ l'aument di ritart mecanic dal pît. In sumis, la disparitât mecaniche jenfri man e pît e je compensade di un control neurâl che al previôt un anticipi di fase dal comant di moviment mandât al ECR rispîet a chel mandât al TA. In chest mût la sincronie dai articui e pues jessi mantignude par dut il spetri des frecuencis.

Tai agns seguitîfs, i studis su l'imbinament dai moviments dai articui (massime da lis dôs mans, viôt Swinnen 2000) a son aumentâts di numar, modelâts soledut daûr dal model di Kelso (Haken et al. 1985), che al considere la fase relative jenfri lis ossilazions dai articui, $\Delta\Phi$, tant che il "parametri controlât" dal sisteme. Di fat, la variabilitât di $\Delta\Phi$ (ven a stâi, la sô deviazion standard, $SD\Delta\Phi$) e je plui largje e plui sensibil a la frequence dal moviment tal imbinament di moviments difcil pluitost che tal

imbinament facil; par cheste reson e je considerade il marcadôr cuantitatîf de instabilitât e da la tindince a la inversion di fase dai moviments imbinâts.

In cheste prospettive, mantignî il plui pussibil basse la $DS\Delta\Phi$ al podarès jessi il mût par stabilizâ i moviments imbinâts. O vin, alore, ipotizât che chest control al puedi jessi esercitât par mieç di un “controlôr di fase” neurâl, che al ricêf informazions su la posizion da la man e dal pît di segnâi cinestetics aferents, al misure $\Delta\Phi$ e al trasforme lis sôs deviazions dal valôr programât (0° par ISO o 180° par ANTI) in comants motoris che a corezin l'erôr cuntun cambiament di fase da la ativazion dai muscui di un o di ducj e doi i articui. Cheste ipotesi e previôt (scheme de Figure 3A) che i moviments di un articul, par esempi il pît, a puedin influençâ la ecitabilitât des viis motoris che a rivin ai muscui motoris da la man, salacor ancje cuant che la man e je ferme. Cheste prevision e à podût jessi verificade in maniere sperimentâl e al somee che i risultâts otignûts le vedin confermade.

La ecitabilitât dai neurons motoris dal FCR e dal ECR tal braç in polse e je modulade, intant dai moviments ritmics di flession estension dal pît, in maniere sinusoidâl, come che si pues verificâ a mieç dal riflès di Hoffmann (Baldissera et al. 1998, 2002). Cu la man a palme jù, intant de flession plantâr dal pît, la ecitabilitât e incrès tai neurons motoris dal FCR e e decrès tai neurons motoris dal ECR. Cu la man a palme sù, al sucêt il contrari. Se chestis azions a fossin supraliminâls a fasaressin zirâ la man, sedi palme sù sedi palme jù, in imbinament isodirezionâl cul pît, indipendentementri dai muscui ativâts. Cun di plui, al è stât ancje dimostrât che cheste modulazion dal riflès di Hoffmann e je mediade de aree motorie primarie de scuarce cerebrâl che e controle la man.

I esperiments di control nus àn però mostrât che la modulazion che o vin descrite achì parsore no pues vê une origine aferente. Di fat (Cerri et al 2003), cuant che o aplichin une cjame inerziâl al pît in mût di provocâ un ritart di fase da la sô ossilazion rispjet a la contrazion muscolâr (Figure 3, confronto B cun C), la modulazion de ecitabilitât si manten in fase cu la ativazion volontarie dal muscul che al môf il pît, e no cul moviment dal pît. In reson di chest, la modulazion no pues jessi gjenerade par riflès dai segnâi aferents che a informin il çurviel da la posizion dal pît. Al è stât osservât ancje che la difference di fase jenfri il segnâl di un me-

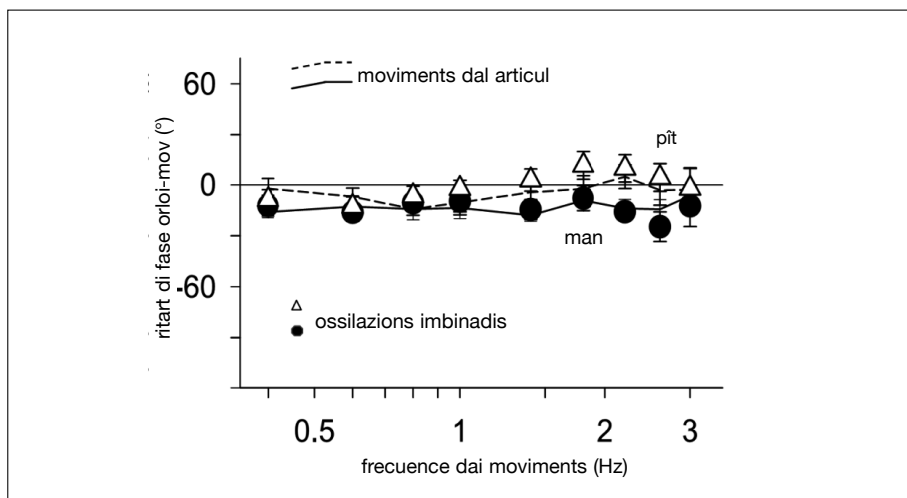


Figure 4. Il ritard di fase rispjet al segnâl di un metronom nol cambie se si môf la man di bes-sole (linie continue) o se si môf la man in imbinament cul pît (cercluts colorâts a plen). Chest fat al vâl ancje pal pît, bessôl (linie tratinade) e imbinât cu la man (trianguluts vueits).

tronom e il moviment (*orloi-mov* $\Delta\Phi$, Figure 4) sedi da la man sedi dal pît, nol cambie cuant che si movin ducj e doi i articui in imbinament – sedi ISO sedi ANTI – rispjet a cuant che si môf dome un dai doi (Baldissera et al. 2006). Si che duncje, imbinâ i doi moviments ni al zonte ni al gjave nuie a ce che la man e il pît a puedin fâ, ognidun par so cont, par restâ in fase cul gjeneradôr di ritmi centrâl; e si dimostre cussì che la sincronizazion tra i articui si la oten cence necessitât di nissun scambi di informazions sensoriâl jenfri i articui. Di chest al seguìs che il parametri controlât tal imbinament nol è la fase relative tra i doi articui ma la fase di ognidun dai articul rispjet al ritmi dal metronom.

4. Nature dai vincui che a imbarbain l'imbinament antidirezional di man e pît. Come che o vin viodût, al è stât pussibil escludi che i valôrs programâts da la fase relative tra i doi articui (0° o 180°) a sedin mantignûts par mieç di un circuit “feedback” cinestetico jenfri man e pît. Di cheste conclusion e nas, però, une altre cuistion: quale ise la nature e la funzion fisiologjiche da la modulazion de ecitabilitât che si è manifesta-de tai motoneurons dal braç e che, come o vin viodût, e je leade a strent

a la ativazion volontarie dai muscui che a movin il pît? In altris contescj sperimentâi e concetuâi, al è stât plui voltis ripuartât che une ecitabilitât dai motoneurons di un articul e pues jessi modulade dai moviments di un altri articul. In particolâr, al è aromai ricognossût di ducj che il moviment volontari di cualsisedi segment dal cuarp al è compagnât di Justaments Posturâi Anticipatoris (JPA) – ven a stâi da la ativazion simultanie dai muscui di altris zonis dal cuarp che a servissin a creâ cjadenis di fissazion fra l’articul che si môf e un supuart stabil e/o a produci moviments che a cuintribelancin lis perturbazions posturâls causionadis da la azion primarie (Bouisset, Zattara 1987; Cordo, Nashner 1982; Marsden et al. 1978; Massion 1992).

I JPA a son regolâts daûr de impuartance de perturbazion posturâl (Aruin, Latash 1996) e lis lôr scansion tal timp e distribuzion tal spazi a puedin cambiâ in funzion da la direzion dal moviment (Aruin, Latash 1995; Nashner, Forssberg 1986), in funzion da la posizion e dal numar dai ponts di fissazion o cuant che e cambiin lis informazion tatilis e propriocetivis.

Ce che o vin descrivût fin cumò nus puarte a un pont di svolte: isal pusibil che la modulazion da la ecitabilitât dai motoneurons dal braç e sedi causade dal intervent dal control posturâl? La modulazion de ecitabilitât tal braç e je subliminâl ma, cuant che il sogjet al è sentât, la grande superficie di supuart sigurade da la sente e fâs diventâ il rûl posturâl dal braç trascurabil. Si che duncje, si pues ipotizâ che l’efiet dal control posturâl al deventi plui evident cuant che il rûl dal braç te stabilizazion dal cuarp al devente plui impuartant.

Cuant che un sogjet al è impins (viôt scheme de Figure 5), cul pît çamp poiât suntune superficie stabile e la man drete poiade suntun supuart salt, intant che il pît dret al è libar di ossilâ, la flession plantâr rapide dal pît (par ativazion dal muscul SOL) e je compagnade di JPA tai muscui dal braç dret (Figure 5A), ecitatoris tal FCR (flessôr radiâl dal carp) e inhibitoris tal ECR (estensôr radiâl dal carp); efietis vicendevui si disvilupin intant de flession dorsâl dal pît cun supuart dorsâl da la man).

Intant da lis ossilazions ritmichis dal pît (Figure 5B), tal muscul FCR i JPA a son sostituîts di une ativitât sinusoidâl in fase cu lis contrazions dal flessôr plantâr: in chest mût, la distribuzion dai JPA e ripet il scheme “isodirezionâl” (rispjet ai moviments dal pît), da la modulazion subli-

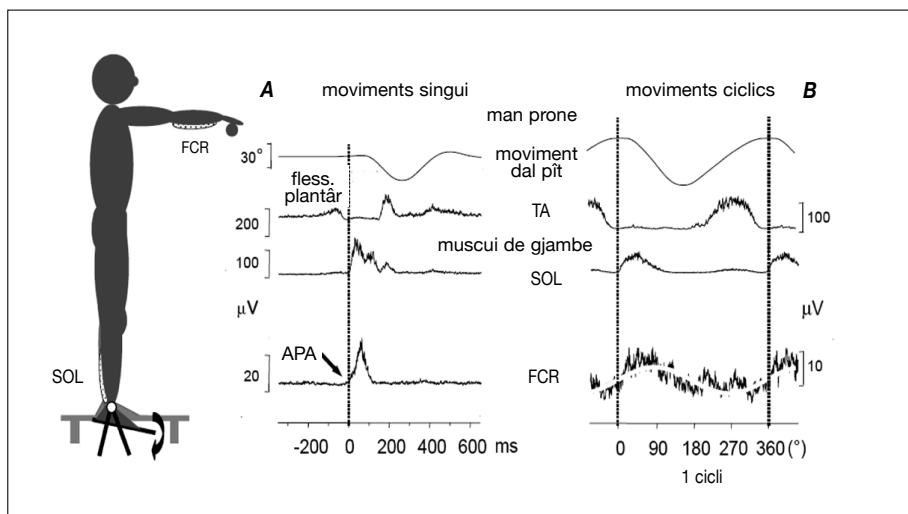


Figure 5. A) Imbinament “isodirezional” de contracziun volontarie dal SOL, che e provoche une flession plantâr rapide dal pît, e i JPA concomitants tal flessôr de conole (FCR). B) Cunt che i moviments dal pît a son ciclics, i JPA a son sostituîts di une ativitât sinusoidâl in fase cu la ativazion dal SOLEUS (la linie blancje e mostre la sinusoidâl tal grafic dal EMG dal FCR).

minâl registrade in posizion sentade. Il scheme si repet cunt che la man e je a palme jù e l’imbinament tra i musculi de gjambe e dal braç al è invertît (Baldissera, Esposti 2005).

Cheste complete soreposizion topografiche e sugjeris che la modulazion da la ecitabilitât e i JPA a sedin la version subliminâl e supraliminâl dal stes event posturâl, ven a stâi, la preparazion di une cjadene posturâl che e coleghe il pît in moviment al braç di supuart, e che la lôr intensitât e sedi regolate daûr da la relevance dal rûl posturâl che il braç al à tes variis situaziuns.

Par spiegâ cheste flessibilitât dai JPA, si pues ipotizâ che ogni moviment volontari al sedi leât a la co-ativazion di un scheme a arbul di comants posturâi, indreçâts viers un ciert numar di ponts di fissazion pussibii, e che la ativazion dai ramaçs di chest scheme e sedi supraliminâl par chei indreçâts viers i segments che a àn di garantî un supuart reâl e subliminâl par chei no necessaris in chel moment, ma potenzialmentri utii tal câs che la situazion e cambiî. Cheste ipotesi e je supuartade di une osservazion sperimentâl: tai felins, il moviment volontari di un articol al è com-

pagnât di un scheme une vore complès di comants posturâi che de scuarce dal çurviel a rivin a la formazion reticulâr pontomedulâr e jù fin a la medole spinâl, dulà che la trasmission dai segnâi e ven indreçade dome ai muscui necessaris pal supuart posturâl, là che la trasmission ai muscui che no àn di ativâsi ta chel precîs moment e ven blockade (Shepens, Drew 2006).

5. Il “Principi di direzion” al à la sô origjin tai vincui posturâi. Par vie da la lôr funzion necessarie e fondamentâl in ogni at motori, si pues spietâsi che i justaments posturâi anticipatoris, a sedin la cause da la dicotomie facil/dificil ançe in altris cumbinazions di moviments dai articui. Un supuart a cheste idee al ven de analisi dai moviments imbinâts dai doi braçs, fats tal plan orizontâl (trasversâl) e tal plan verticâl parasagjitâl. Cuant che il plan da lis ossilazions dal braç e, duncje la direzion da lis fuarcis muscolârs aplicadis jenfri i braçs e il tronç, a cambiin, la distribuzion dai JPA si modifichie di consequence; si rive cussì a verificâ che in ognidune des cuatri cumbinazions (orizontâl ISO e ANTI e parasagjitâl ISO e ANTI) tra la stabilitât dal imbinament e i justaments posturâi si mantegnin relations compagnis a chês che si palesin pal imbinament man-pît (Baldissera et al. 2008a, 2008b; Baldissera, Esposti 2013; Esposti, Baldissera 2013; Esposti et al. 2013).

5.1. Stabilitât dal imbinament dai moviments dai braçs. Come o vin metût in lûs te sezion 3, plui grande e je la variabilitât da la fase relative jenfri i articui, $SD\Delta\Phi$, plui grande e je ançe la dificolât di rivâ a mantignî l’imbinament dai moviments. Par chel che al rivuarde lis cuatri cumbinazions di moviments che o vin elencât culî sore, i imbinaments plui faciî subietivementri e plui stabii (ven a stâi, cul plui bas $SD\Delta\Phi$) a son risultâts – cence nissune difference cuantitative tra lôr (Figure 6) – i ANTI orizontâi (*ANTIo*) e i ISO parasagjitâi (*ISOp*). Dulà che la $SD\Delta\Phi$ e amente e la stabilitât e diminuîs in ducj e doi i imbinaments dificii – ma in maniere plui grande tal *ISOo* che tal *ANTIp*.

Si à di notâ ançe che la polarizazion direzionâl facil-dificil e je contrarie tai doi gjenars di moviments e che la pierdite di stabilitât facil-dificil e je plui grande tai moviments orizontâi che tai moviments parasagjitâi. In sumis, il marcadôr da la instabilitât (dificolât) dai imbinaments, al in-

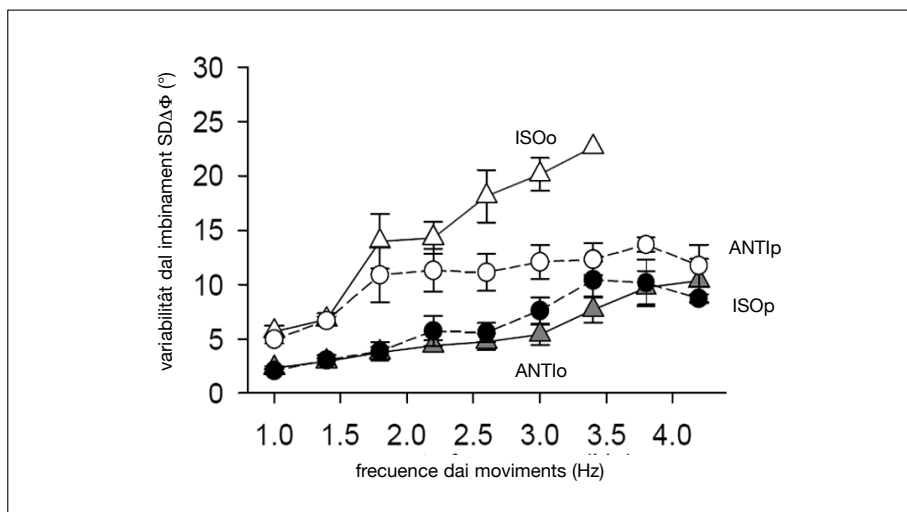


Figure 6. La polarizzazione facil-difficile è in due direzioni contrarie ai movimenti dei bracci orizzontali e parasagittali. I due imbinamenti facili sono quelli ANTIO e ISOp (simboli colorati a pieno). La instabilità è cresciuta per i due imbinamenti difficili e è cresciuta di più per l'imbinamento ISOo che per l'imbinamento ANTIp.

cresce, per i quattro imbinamenti, da due di queste sequenze: $ANTIO \neq ISOp < ANTIp < ISOo$.

5.2. I JPA dei movimenti dei bracci. La generazione e la funzione dei JPA in termini dei movimenti dei bracci e per cui essi capiscono esaminando questi esempi. L'adduzione di un braccio (per esempio, il braccio destro) in quel piano orizzontale e viene ostacolata con l'attivazione del muscolo grande pettorale destro (Figure 7, RPM), che allontana il torace con l'omero. La contrazione del RPM e per cui origina la rotazione (adduzione) del braccio se il tronco non è immobilizzato, o in alternativa, la cuintrorotazione del tronco se il braccio non è fissato a un supporto stabile. Si può dire che, per un soggetto che ha una adduzione pura del braccio destro, il braccio non può muoversi liberamente e la rotazione del tronco è di per sé bloccata. A bloccare il tronco a provvidenza i JPA che a vicenda generano i muscoli che formano i due cingoli di fissazione: una indagine al braccio cuintrilaterale (il braccio campo) e ostacolata da l'attivazione dei muscoli omologhi di quelli che producono il movimento (vale a dire PM e FCR di mano campo, LPM e LFCR, Figure 7.B), la seconda indagine verso il terreno e

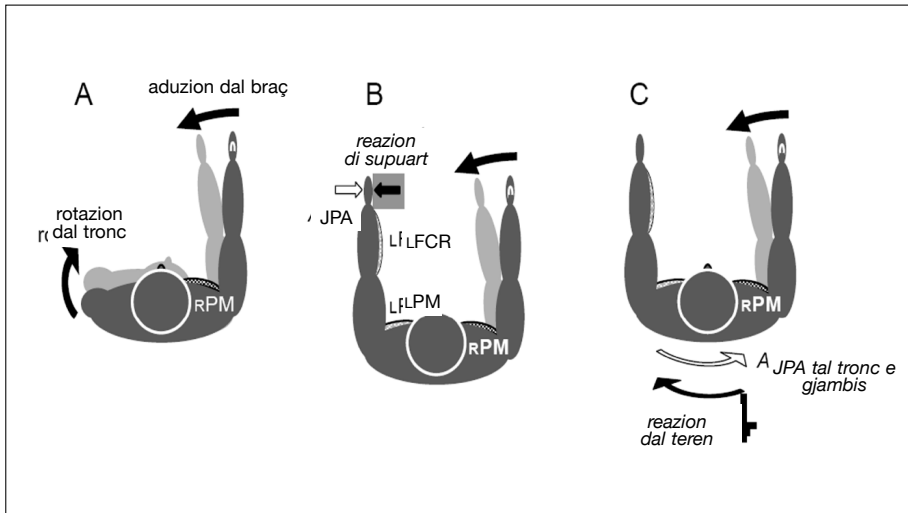


Figure 7. La contrazion dal muscul Grant Potorâl dret (RPM, right Pectoralis Maior) e indûs la aduzion dal braç dret e la cuintrirrotazion dal tronc (A). Si pues movi dome il braç juste cuant che il tronc al è imobilizât sedi (B) dai JPA dai muscui omolics dal braç cuintrilaterâl (par es. PMç e FCRç), che a trasmetin la fuarce dal PMd al supuart stabil de man çampe, dulà che si gjenera la reazion corispuindinte, sedi (C) dai JPA asimetricks dai muscui da lis gjambis che a trasmetin a tiere la fuarce torsionâl dal RPM.

formade dai muscui dal tronc e des gjambis (Figure 7C). Dutis e dôs chestis cjadenis a contribuissin a stabilizâ il tronc.

Intant de aduzion dal braç dret, la distribuzion dai JPA tal braç çamp e riprodûs il scheme di ativazion dai muscui che a determinin il moviment primari dal braç dret. In cheste maniere i JPA a esercitin sul tronc fuarcis che a spieglin chês dai muscui che a determinin il moviment dal braç dret. Lis dôs fuarcis a tindin a neutralizâsi une cun chê altre e cussì a ridusin o a impedissin dal dut la rotazion dal tronc. Il stes rûl di stabilizazion al ven esercitât dai JPA asimetricks tai muscui des gjambis che a aplichin al tronc une fuarce rotazionâl contrarie a chê dal RPM e tal stes timp a gjenerin a tiere une reazion torsionâl (moment) T_z .

5.3. Imbinament dai moviments orizontâi dai braçs. Cuant che si movin ducj e doi i braçs insiem, i neurons centrâi specializâts tal movi i muscui di ognidun dai doi braçs a ricevin tal stes moment i comants gnervôs che a determinin il moviment volontari e i comants posturâi che a gjenerin i

JPA leâts al moviment dal braç cuintrilaterâl. Cuan che i moviments a son *ANTI*o, i doi gjenars di comants a concuardin (par esempli, a son ducj e doi di caratar ecitatori o inibitori); cuan che l'imbinament al è *ISO*o, invezit, a son contraris (un ecitatori e un inibitori).

Cheste distribuzion dai JPA e favorîs duncje l'imbinament *ANTI*o e e contraste l'imbinament *ISO*o. Di chest al seguîs che, par conservâ la misure e la regolaritât dal moviment te modalitât ISO, i JPA a àn di jessi blocâts ativamente dal mecanisim di sbarament (viôt sez. 4). Cun di plui, considerât che i JPA a aumentin cuan che e aumente la frecuece dai moviments, si pues adiriture ipotizâ che ancje il sfuarç par soprimiju al à di aumentâ in proporzion. Al somee, duncje, plausibil che la “fadie neurâl” provocade dal aument de frecuece dai moviments, e produci une progressive insuficiencia dal mecanisim di sbarament, che e puarte a une incressite de instabilitât da l'imbinament ISO e, ae fin, a la inversion di fase tai moviments *ANTI*.

Ancje il mût di agîf da la cjadene di fissazion al teren al è diviers tai moviments *ANTI*o e *ISO*o, e, di ce che al pâr, al è plui favorevul ai prins.

Intant dai moviments *ANTI*, lis fuarcis torsionâls (moments) contraris esercitadis di ognidun dai doi braçs a nivel da la spale si neutralizin une cun chê altre, di mût che l'intervent da la cjadene di fissazion al teren nol è necessari: i JPA tai muscui da la gjambe e la fuarce reative a sparissin. Tai moviments ISO, invezit, lis perturbazions des dôs fuarcis torsionâls a àn la stesse direzion e si sumin une cun chê altre, provocant, tal tronç e ta lis gjambis, il rinfuarç dai JPA asimetrics che a gjenerin une grande fuarce torsionâl TZ reative viers il teren.

In sumis, il contrast neurâl diret tra i JPA e i comants volontaris intant dai moviments ISO, oponût a la convergjence facilitatorie che si verifiche in *ANTI*, si compagne ben cu la plui grande instabilitât da la prime schirie di moviments rispjet a la seconde. Il fat che il rûl da la cjadene di fissazion al teren al sedi fuart in ISO e inesistent in *ANTI*, al fâ pensâ ancje che il sfuarç posturâl di cheste cjadene si podarès sumâ al contrast neurâl tal ostacolâ i moviments ISO.

5.4. Imbinament dai moviments parasagitâi dai braçs. Tai moviments parasagitâi, la distribuzion dai JPA tal braç cuintrilaterâl e je plui complesse, tant al è che si gjenera un conflit tra i JPA e i comants volontaris

sedi in ISO, par cierts muscui, sedi in ANTI, par altris muscui. Ta la cjadene di fissazion a tiere, cuant che i braçs a son ducj e doi fletûts o estindûts (ISO), lis azion simetrichis dai muscui da lis spalis che par prins a determinin il moviment a tindin a provocâ une inclinazion viers il tronc in direzion anteroposteriôr e i JPA relatîfs, che a gjenerin une reazion anteroposteriôr (F_y) viers il teren. Al contrari, cuant che un braç al è fletût chel altri estindût (ANTI) i muscui che par prins a determinin il moviment a agjissin in direzions contrariis su lis dôs spalis, di mût che la F_y anteroposteriôr e ven neutralizade intant che i JPA asimetrics des gjambis a gjenerin sul teren une reazion torsionâl T_z .

In sumis – al contrari di ce che al sucêt tai moviments orizontâi, dulà che lis influencis potenzialmentri contrariis a agjissin dome tai moviments ISO – tai moviments parasagjitâi, il conflit neurâl tai braçs e la ativazion da la cjadene a tiere si cjatin sedi tai moviments ISO sedi ta chei ANTI. In aparence, chest al somee lâ dacuardi cul fat che tai moviments parasagjitai dai braçs la difference di stabilitât ($SD\Delta\Phi$) tra l'imbinament facil e chel dificil e je plui piçule che tai moviments orizontâi.

Ta la cjadene di fissazion a tiere, i JPA no jentrin diretamentri in contrast cui comants voluntaris ai braçs: cemût rivino alore a ostacolâ l'imbinament dai moviments dai braçs? In tims avonde resints al è stât scuviert che la fadie dai muscui posturâi e cause une modifiches sedi de intensitât dai JPA sedi dal timp di latence dai JPA rispjet ai muscui che a determinin il moviment primari (Strang, Berg 2007). Al somee duncje realistic ipotizâ che cuant che la frecuence e aumente al aumenti ancje il lavôr posturâl da la cjadene di fissazion a tiere, e chest al puarti al disvilup dai procès di stracament. Chest al podarès provocâ une desincronizazion tra la ativitât volontarie dai braçs e i JPA dal tronc e da lis gjambis e une destabilizazion dai moviments.

Cheste ipotesi e je supuartade da la correlazion cjatade, ta lis 4 cumbinazions di moviments, tra il sfuarç posturâl de cjadene di fissazion a tiere – cussì come che al è stât valutât misurant la intensitât da lis fuarcis scjamadis a tiere e il cost metabolic () da la component posturâl dal esercizi – e la instabilitât, $SD\Delta\Phi$ dal imbinament (Esposti et al. 2013). Il sfuarç al è minim e virtualmentri compagn ta lis dôs modalitâts di moviments “facii” (*ANTIo* e *ISOp*), plui grant tal moviment *ANTIp* e massim tal moviment *ISOo*, ven a stâi che al incrès lant daûr a la stesse secuencia di in-

cressite ($ANTI_o \neq ISO_p < ANTI_p < ISO_o$) di $SD\Delta\Phi$, il marcadôr di instabilitât e di dificoltât subietive (viôt Figure 6).

6. Conclusions. Cuâl isal il messaç clâf di cheste ricercje? La facilitât o dificoltât dal imbinament di moviments no dipendin ni dai muscui associâts ni dal fat che i moviments a sedin fats in modalitât *ISO* o *ANTI*, ma, par ogni imbinament, da la distribuzion e da la grandece dai justaments posturâi che a compagnin il moviment. Tal davuelzi la lôr funzion fondamentâl di fissazion e stabilizazion dal cuarp intant dai moviments volontaris, i JPA a gjenerin ancje cualchi efiet colateral. Chest al sucêt cuant un ciert moviment principâl al è associât cul moviment di un altri segment che al fâs part di une cjadene di fissazion, e che si môf in direzion contrarie ai JPA che a agjissin su chel segment. Se la cjadene di fissazion e je une da lis cjadenis principâls, l'efiet al è evident e l'ecuilibri static al va pierdût, se invece la cjadene e je une di chês secondariis, ven a stâi, se i JPA a son minôrs o subliminâi, cumbinâ i doi moviments al è pussibil a une frecuece (velocitât) basse. Cul inressi da la frecuece (velocitât), però, a inressin sedi il conflit neurâl tra i JPA e i comants volontaris (sez. 5.3) sedi il sfuarç da la cjadene posturâl di fissazion a tiere (sez. 5.4), e il risultât al è che l'imbinament dai moviments e devente instabil, dificil o parfin impossibil. Il fat che i JPA a son ecitatoris o inibitoris secont la direzion dal moviment principâl (definide di coordenadis estrinsechis) al spiegarès cemût mai che la dicotomie facil/dificil dal imbinament e je regolade di un principi di direzion.

Bibliografie

- Aruin A.S., Latash M.L. (1995). Directional specificity of postural muscles in feed-forward postural reactions during fast voluntary arm movements. *Exp. Brain Res.*, 103:323-332.
- Aruin A.S., Latash M.L. (1996). Anticipatory postural adjustments during self-initiated perturbations of different magnitude triggered by a standard motor action. *Electroencephalogr Clin. Neurophysiol.*, 101: 497-503.
- Baldissera F., Borroni P., Cavallari P. (2000). Neural compensation for mechanical differences between hand and foot during coupled oscillations of the two segments. *Exp. Brain Res.*, 133: 165-177.
- Baldissera F., Borroni P., Cavallari P., Cerri G. (2002). Excitability changes in human corticospinal projections to forearm muscles during voluntary movement of ipsilateral foot. *J. Physiol.*, 539: 903-911.
- Baldissera F., Cavallari P., Leocani L. (1998). Cyclic modulation of the H-reflex in a wrist flexor during rhythmic flexion-extension movements of the ipsilateral foot. *Exp. Brain Res.*, 118:427-30.
- Baldissera F., Cavallari P., Civaschi P. (1982) Preferential coupling between voluntary movements of ipsilateral limbs. *Neurosci. Lett.*, 34: 95-100.
- Baldissera F., Esposti R. (2005). Postural constraints to coupling of ipsilateral hand-foot movements. *Neuroreport.*, 16: 1615-1619.
- Baldissera F., Rota V., Esposti R. (2008a). Anticipatory postural adjustments in arm muscles associated with movements of the contralateral limb and their possible role in interlimb coordination. *Exp. Brain Res.*, 185: 63-74.
- Baldissera F., Rota V., Esposti R. (2008b). Postural adjustments in arm and leg muscles associated with isodirectional and antidirectional coupling of upper limb movements in the horizontal plane. *Exp. Brain Res.*, 190: 289-305.
- Baldissera F.G., Cavallari P., Esposti R. (2006). Synchrony of hand-foot coupled movements: is it attained by mutual feedback entrainment or by independent linkage of each limb to a common rhythm generator? *BMC Neurosci.*, 7: 70.
- Baldissera F.G., Esposti R. (2013). The role of anticipatory postural adjustments in interlimb coordination of coupled arm movements in the parasagittal plane: II. Postural activities and coupling coordination during cyclic flexion-extension arm movements, ISO- and ANTI-directionally coupled. *Exp. Brain Res.*, 229: 203-19.
- Bouisset S., Zattara M. (1987). Biomechanical study of the programming of anticipatory postural adjustments associated with voluntary movement. *J. Biomech.*, 20: 73.
- Cerri G., Borroni P., Baldissera F. (2003). Cyclic H-reflex modulation in resting forearm related to contractions of foot movers, not to foot movement. *J. Neurophysiol.*, 90: 81-88.
- Cordo P.J., Nashner L.M. (1982). Properties of postural adjustments associated with rapid arm movements. *J. Neurophysiol.*, 47: 287-302.
- Esposti R., Baldissera F.G. (2013). The role of anticipatory postural adjustments (apas) in interlimb coordination of coupled arm movements in the parasagittal plane: I. APAs associated with fast discrete flexion and extension movements of one arm or of both arms ISO- and ANTI-directionally coupled. *Exp. Brain Res.*, 228: 527-539.
- Esposti R., Limonta E., Esposito F., Baldissera F.G. (2013). The role of anticipatory postural adjustments in interlimb coordination of coupled arm movements in the parasagittal plane: III. Difference in the energy cost of postural actions during cyclic flexion-extension arm movements, ISO- and ANTI-directionally coupled. *Exp. Brain Res.*, 231: 293-303.

- Haken H., Kelso J.A., Bunz H. (1985). A theoretical model of phase transitions in human hand movements. *Biol. Cybern.*, 51: 347-356.
- Marsden C.D., Merton P.A., Morton H.B. (1978). Anticipatory postural responses in the human subject [proceedings]. *J. Physiol.*, 275: 47P-48P.
- Massion J. (1992). Movement, posture and equilibrium: interaction and coordination. *Prog. Neurobiol.*, 38: 35-56.
- Meige H. (1901). Les mouvements en miroir: leurs applications pratiques et thérapeutiques. *Rev. Neurol.*, 19: 780.
- Müller J. (1840). *Handbuch der Physiologie des Menschen*. Koblenz: Hölscher.
- Nashner L.M., Forssberg H. (1986). Phase-dependent organization of postural adjustments associated with arm movements while walking. *J. Neurophysiol.*, 55: 1382-1394.
- Schepens B., Drew T. (2006). Descending signals from the pontomedullary reticular formation are bilateral, asymmetric, and gated during reaching movements in the cat. *J. Neurophysiol.*, 96: 2229-2252.
- Strang A.J., Berg W.P. (2007). Fatigue-induced adaptive changes of anticipatory postural adjustments. *Exp. Brain Res.*, 178: 49-61.
- Swinnen S.P. (2002). Intermanual coordination: from behavioural principles to neural-network interactions. *Nat. Rev. Neurosci.*, 3: 348-359.