

L'angle de fase i la fase relativa contínua per a la investigació de la coordinació motora

Phase Angles and Continuous Relative Phase for Research into Motor Coordination

ROSA ANGULO-BARROSO

Center of Human Growth and Development and School of Kinesiology
University of Michigan (Ann Arbor, USA)
Institut Nacional d'Educació Física de Catalunya - Centre de Barcelona

ALBERT BUSQUETS FACIABÉN

Institut Nacional d'Educació Física de Catalunya - Centre de Barcelona

ELIANE MAUERBERG-DECASTRO

Department of Physical Education
State University of São Paulo - UNESP (Rio Claro, Brasil)

Autora per a la correspondència

Rosa Angulo-Barroso
rangulo@gencat.cat
rangulo@umich.edu

Resum

Tot procés per aconseguir una habilitat motora comporta un aprenentatge, un control i una coordinació motora. La coordinació motora es defineix generalment com les relacions espaciotemporals que existeixen entre diferents segments corporals. L'objectiu d'aquest article va ser donar a conèixer una metodologia per a l'estudi de la coordinació motora. Els angles de fase i la fase relativa contínua són dues tècniques que possibiliten conèixer la relació desplaçament/velocitat angular d'un o diversos segments durant tot el moviment. Aquestes tècniques generen uns gràfics les trajectòries dels quals ens van indicar com els diferents segments es coordinaven (en fase o fora de fase). Amb això, vam poder conèixer les estratègies coordinatives a les quals els individus recorrien en realitzar una tasca nova. Malgrat els resultats obtinguts, els angles de fase i la fase relativa contínua no van presentar el moviment en la seva totalitat i es fonamenten en una anàlisi qualitativa. Per tant, recomanem a l'investigador tenir en compte: 1) complementar l'anàlisi amb variables quantitatives que reflecteixin la dinàmica dels diferents segments, i 2) seleccionar la normalització en funció de les variables que s'han d'analitzar.

Paraules clau: aprenentatge motor, biomecànica, graus de llibertat, coordinació intersegmentària, coordinació intrasegmentària

Abstract

Phase Angles and Continuous Relative Phase for Research into Motor Coordination

Any process geared towards the attainment of a motor skill involves learning, control and motor coordination. Motor coordination is generally defined as the space-time relationships between different body segments. The aim of this paper is to present a methodology for the study of motor coordination. Phase angles and continuous relative phase are two techniques that make it possible to find out the displacement/angular velocity relationship of one or several segments throughout the movement. These techniques generate graphs whose paths tell us how different segments are coordinated (in phase or out of phase). This in turn enables us to discover the coordination strategy which individuals use to perform a new task. In spite of the findings obtained, phase angles and continuous relative phase do not represent the movement in its entirety and are based on qualitative analysis. We therefore recommend that researchers (1) complement the analysis with quantitative variables that reflect the dynamics of the different segments, and (2) select normalization on the basis of the variables analyzed.

Keywords: motor learning, biomechanics, degrees of freedom, inter-segmental coordination, intra-segmental coordination

* Finançament amb el suport de la Secretaria General de l'Esport i el Departament d'Universitats, Recerca i Societat de la Informació de la Generalitat de Catalunya.

Introducció

Una de les preocupacions més grans dels investigadors de l'aprenentatge d'habilitats motores és conèixer el procés o mecanisme pel qual els individus adquireixen i modifiquen els seus moviments a fi d'aconseguir l'objectiu de la tasca amb un alt grau d'eficàcia i eficiència (Sparrow & Irizarry-Lopez, 1987). Quan la producció d'una tasca permet resoldre un problema motriu aconseguint les màximes expectatives d'èxit i com a mínim de temps i energia, estem parlant d'habilitat (Riera, 2005). Tot procés per aconseguir una habilitat motora comporta un aprenentatge, un control i una coordinació motora.

Segons l'aproximació de la teoria dels sistemes dinàmics (TSD), el comportament és una conseqüència de les relacions entre els múltiples subsistemes de l'organisme, com l'estatus neural, les característiques biomecàniques, l'experiència, el nivell d'alerta o la precisió visual, entre d'altres (Kugler, Kelso, & Turvey, 1982; Thelen & Ulrich, 1991; Ulrich, Ulrich, & Collier, 1992). De fet, l'adquisició d'una habilitat motora s'entén com un comportament que sorgeix de la interrelació entre la pràctica i un conjunt de condicionants (*constraints* en la literatura anglesa), categoritzats en condicionants de l'organisme, de l'entorn i de la tasca (Clark, 1995, 2002; Handford, Davids, Bennett, & Button, 1997; Holt, 2005; Kugler, Kelso, & Turvey, 1980; Marin, Bardy, & Bootsma, 1999; Newell, 1986; Nourrit, Deschamps, Lauriot, Caillo, & Delignieres, 2000; Thelen & Smith, 1994). L'impacte relatiu d'aquestes tres categories de limitants en el perfil de coordinació varia d'acord amb les circumstàncies específiques. No obstant això, la pràctica és considerada generalment el factor més important per a una millora permanent de la capacitat d'execució d'una habilitat motora (Guadagnoli & Lee, 2004; Nourrit et al., 2000). Tant és així que l'assoliment del nivell més alt d'habilitat en l'execució d'una tasca (execució de l'expert) requereix anys de pràctica (Clark, 1995; Guadagnoli & Lee, 2004).

A més a més, la TSD defineix els sistemes que conformen els individus com a sistemes oberts, és a dir, que es veuen afectats per la seva interrelació o per les característiques específiques de la situació. Aquestes característiques dinàmiques permeten al sistema modificar el seu comportament en el temps, la qual cosa dóna al sistema la capacitat de contínua autoorganització. De fet, és la inestabilitat del sistema allò que permet explorar noves organitzacions i coordinacions motores (Kelso, Scholz, & Schöner, 1986).

L'aprenentatge motor pot ser considerat com una modificació de la dinàmica dels sistemes per aconseguir l'objectiu de la tasca. És àmpliament acceptada la distinció de dos estadis en l'aprenentatge de tasques motores: 1) quan l'objectiu de l'individu ha d'elaborar un nou model de coordinació, i 2) quan l'objectiu de l'individu és **ajustar els paràmetres d'una coordinació prèviament apresada** (Clark, 1995; Delignieres et al., 1998; Newell, 1991; Temprado, Della-Grasta, Farrell, & Laurent, 1997). En qualsevol dels dos estadis la transició d'un tipus de coordinació a un altre, és a dir, d'un estadi del sistema a un altre, no és necessàriament progressiva, sinó que els canvis poden ser abruptes i no lineals. Aquests canvis en les formes coordinatives succeeixen quan subsistemes crítics (els paràmetres de control) progressen de manera suficient per generar un estat crític o punt de transició, provocant un canvi qualitatiu (bifurcació) i permetent l'emergència d'un nou patró de coordinació (nova organització).

D'altra banda, s'ha definit la coordinació motora com les relacions espaciotemporals que existeixen entre els diferents segments corporals durant la realització d'una tasca (Delignieres, Teulier, & Nourrit, 2009). Per resoldre una nova coordinació l'individu ha de reorganitzar el control d'un gran nombre de variables. Totes les variables d'un sistema que necessiten ser controlades independentment per al desenvolupament d'una tasca són denominades graus de llibertat. Una habilitat motora d'un sistema obert i no rígid, com per exemple seure's, pot tenir diversos graus de llibertat segons els condicionants. Així, un nen petit als sis mesos d'edat pot caure si seu i amb això no necessita un control diferencial de la postura o control tonic muscular, els quals són dependents de l'activitat neural. No obstant això, una persona gran amb problemes d'equilibri pot necessitar ampliar els seus graus de llibertat reclutant activitats addicionals dels músculs, atenció i monitorització del sistema visual, a més a més dels sistemes sensorials involucrats normalment en la postura (Tang & Woolacott, 1996). En el cas d'un sistema constituït per una cadena de pèndols (considerant únicament els segments corporals, per exemple) els graus de llibertat poden ser quantificats comptant quants segments i eixos participen en les dimensions possibles (Meriam, 1966).

Si considerem el cos com un conjunt de sistemes de pèndols, els individus que s'enfronten a una *nova* tasca

presenten dues solucions generals per controlar la gran quantitat de graus de llibertat: 1) congelar o fixar alguns graus de llibertat (*freezing degrees of freedom* en la literatura anglesa), disminuint la mobilitat de les articulacions, i 2) realitzar les accions articulars simultàniament (*coupling degrees of freedom* en la literatura anglesa), disminuint les diferències temporals entre les accions dels segments (Vereijken, Van Emmerik, Whiting, & Newell, 1992). La millora en l'habilitat motora és caracteritzada, per tant, en una disminució del control “congelat” o “acoplat” dels graus de llibertat. Això comporta un “alliberament” d'aquests graus de llibertat (*freeing degrees of freedom* en la literatura anglesa), i per la incorporació en un sistema dinàmic controlat.

La complexitat de les operacions entre els graus de llibertat que actuen en la coordinació motora d'una tasca, juntament amb la no-linealitat dels canvis al llarg del procés d'aprenentatge, necessita una aproximació científica capaç de desfer aquest fenomen multidimensional (Jensen, 2005). Els principis i les eines de la TSD poden ajudar a entendre els orígens, les formes dels comportaments i les raons perquè aquests patrons canvien (Clark & Phillips, 1991; Mauerberg, Schuller, & Fantucci, 1994; Mauerberg-deCastro & Angulo-Kinzler, 2000; Winstein & Garfinkel, 1989). El principal objectiu d'aquest article va ser mostrar als lectors unes tècniques per a l'estudi de la coordinació del moviment. Per exemplificar-ne aplicabilitat i identificar-ne els avantatges i limitacions es van aplicar dites tècniques a diverses habilitats motrius analitzades en els nostres laboratoris (la locomoció i el balanceig en la barra fixa).

L'angle de fase (*phase angle*) aplicat a l'anàlisi de la coordinació motora

Per a l'estudi de la coordinació és necessària una captació precisa de les dades que provenen de l'activitat. Una de les millors eines per a l'estudi de la coordinació del moviment és la biomecànica, no tan sols per descriure els canvis que succeeixen, sinó també per entendre perquè els canvis passen (Holt, 2005; Jensen, 2005; Jensen & Korff, 2005; “Knoek” van Soest & Ledebt, 2005; Ulrich & Kubo, 2005; Winter & Eng, 1995). L'anàlisi de la coordinació durant el procés d'aprenentatge necessita que les dades biomecàniques siguin combinades amb tècniques de reducció de dades (com per exemple l'angle de fase o l'angle relatiu de fase) de manera que la representen i l'expliquen.

Elaboració dels angles de fase

L'anàlisi del moviment pot ser simplificat utilitzant mesures d'un sistema de coordenades en moviment. Aquesta aproximació és coneguda com a anàlisi del moviment relatiu. Pel contrari, quan el moviment és especificat partint de la base d'un sistema de coordenades fixes parlem de moviment absolut. En l'anàlisi del moviment relatiu, el moviment del sistema de coordenades pot ser de translació, de rotació o una combinació dels dos. En conseqüència, es pot dir que en general existeixen sistemes de referència de translació i sistemes de referència de rotació. Per a l'anàlisi de la coordinació dels diferents segments corporals es consideren els sistemes de referència de rotació, ja que els segments es mouen a partir de l'eix articular. En la representació dels sistemes de rotació s'utilitzen les coordenades polars. En les coordenades polars els angles de fase poden ser derivats i graficats en sèries de temps, la qual cosa ens ajudarà a representar el moviment dels diferents segments i a observar-ne la coordinació.

L'angle de fase és representat en l'eix y mentre que l'eix x mostra la durada del moviment, habitualment la durada està expressada en valors normalitzats o en percentatges. Els valors dels angles de fase són derivats d'un retard de fase (desplaçament angular i velocitat angular d'un segment o articulació) graficats en un sistema de coordenades polars. Cada una de les coordenades “desplaçament angular-velocitat angular” ens dóna un valor angular en relació amb un zero establert per convenció (costat esquerre de l'eix x en el nostre cas). Convencionalment, la direcció de les agulles del rellotge ha estat elegida per computar les dades de la gràfica desplaçament angular-velocitat angular.

A continuació es presenten les equacions utilitzades per al còmput d'un gràfic d'angle de fase (Clark & Phillips, 1993; Kelso, Saltzman, & Tuller, 1986; Kurz & Stergiou, 2002, 2004; Mauerberg-deCastro & Angulo-Kinzler, 2001; Wheat & Glazier, 2006).

1. Primer, el desplaçament angular és normalitzat.

$$i = \frac{2 [i - \min(i)]}{\max(i) - \min(i)} - 1$$

en què (graus) són els angles del recorregut articular.

2. A continuació, la velocitat angular és **normalitzada** en funció del seu màxim. La velocitat angular igual a zero ha de correspondre a una velocitat angular normalitzada igual a zero.

$$i = \frac{i}{\max(i)}$$

en què (graus/segons) són la velocitat angular del recorregut articular.

3. L'angle articular recorregut i la velocitat angular normalitzats permeten el càlcul de l'angle de fase (AF).

$$AF = \arctan \frac{i}{i}$$

en què (graus) són els angles del recorregut articular i (graus/segons) són la velocitat angular del recorregut articular.

4. L'angle de fase ha de ser corregit en funció del quadrant en el retard de fase (taula 1). Sense la correcció el traçat de la gràfica de l'angle de fase perdria la seva continuïtat i mostraria valors iguals per a punts amb el mateix valor absolut, però de diferent signe (positiu o negatiu). En la figura 1 es presenta un exemple realitzat a partir de dades no reals amb la finalitat de facilitar la comprensió de la realització i interpretació dels angles de fase. En aquest cas, sense la correcció tots els punts assenyalats en la figura 1a (P1, P2, P3, P4, P5 y P6) obtindrien el mateix valor d'angle de fase.

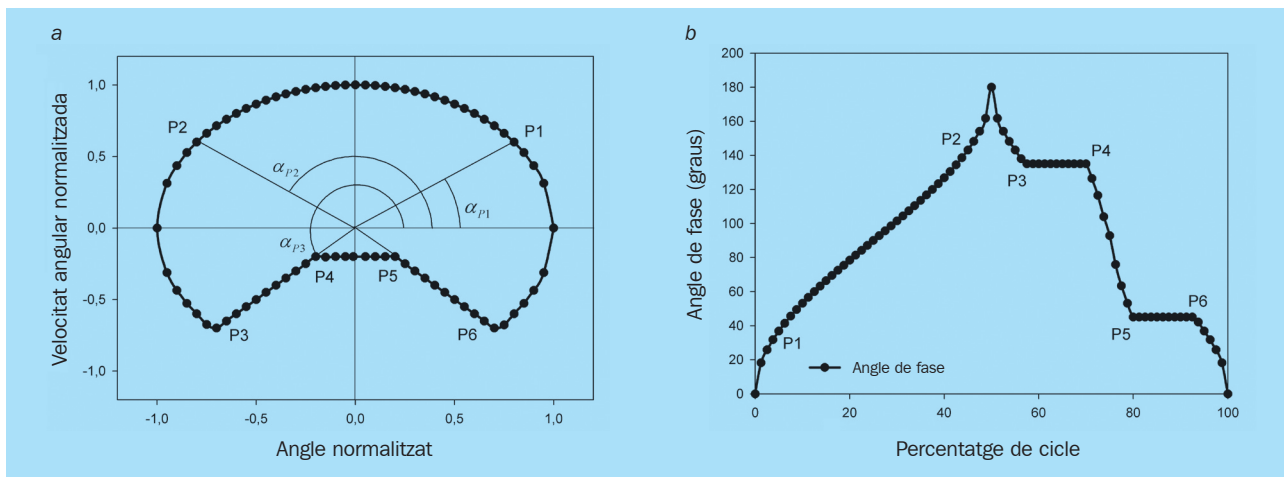
Interpretació dels angles de fase

Els angles de fase se solen interpretar de manera qualitativa. Per a una sola variable el gràfic de l'angle ens informa de la relació desplaçament/velocitat angular d'un segment durant tot el moviment.

i	i	Fórmula aplicada	
+	+	convertir a graus	$= 57,3 \quad a \tan \frac{i}{i}$
-	+	$180 +$ (graus obtinguts)	$= 180 + 57,3 \quad a \tan \frac{i}{i}$
-	-	$180 -$ (graus obtinguts)	$= 180 - 57,3 \quad a \tan \frac{i}{i}$
+	-	valor absolut dels graus obtinguts	$= 57,3 \quad a \tan \frac{i}{i}$

Taula 1
Correcció del senyal en funció del quadrant a què pertanyen en el retard de fase (Hamill, Van Emmerik, Heiderscheit, & Li, 1999)

Figura 1
Retrat de fase realitzat a partir de dades no reals en el qual es mostra l'obtenció dels angles de fase corregits (α_{P1} , α_{P2} , α_{P3}) en diferents punts (fig. 1a, a l'esquerra). Angle de fase obtingut a partir de les mateixes dades no reals (fig. 1b, a la dreta)



Generalment els angles de fase se solen graficar amb relació al temps o el recorregut del moviment expressats en percentatge per facilitar possibles comparacions. Si el traçat és lineal i evoluciona en un pic positiu, sabem que el segment està en moviment amb una relació de canvi constant entre desplaçament i velocitat angular (com per exemple, l'angle de fase entre P1-P2 en la *figura 1b*). En canvi, si el traçat de l'angle de fase es torna pla com en el descrit entre els punts P3-P4 o P5-P6 de la *figura 1b*, vol dir que el segment no està **canviant la seva relació desplaçament/velocitat angular** (*fig. 1a*). Quan la trajectòria del gràfic de l'angle de fase es torna no-lineal, és a dir, canvia d'una direcció positiva envers una de negativa o viceversa, significa que el segment està canviant la seva direcció de rotació (reversió), per exemple passa d'una extensió a una flexió (en el 50 % del cicle de la *figura 1b*).

La representació simultània dels angles de fase de dos segments permet veure la coordinació del sistema. Aquesta coordinació es denomina intrasegmentària si els dos segments pertanyen a la mateixa extremitat (genoll i turmell, per exemple), o intersegmentària si els dos segments pertanyen a extremitats diferents (genoll dret i genoll esquerre). Si les trajectòries dels gràfics corren paral·lels, els dos segments estan acoblats "en fase". Al contrari, si un traçat **va en la direcció oposada** a l'altre o no hi ha canvi en un dels dos traçats mentre que l'altre canvia, els segments estan desacobllats o "fora de fase".

Per il·lustrar el concepte de coordinació es representen dos exemples d'acobllament en fase i dos fora de fase en la *figura 2*. Els gràfics de locomoció són representats amb el temps de cada cicle en l'eix d'abscisses x (des de la retirada del peu del terra fins a la següent retirada del peu) expressat en percentatge de 0 % a 100 % (*fig. 2a i 2c*). En la *figura 2*, un bebè portador de la síndrome de Down exhibeix dues porcions de la trajectòria en què hi ha una relació fora de fase entre la cama i la cuixa (coordinació intrasegmentària). La primera succeeix a l'inici del cicle i la segona pren la major part de la fase de recolzament, fase iniciada amb el contacte del peu en el terra (cpt). En el moment del contacte del peu amb el terra la cama es manté sense alteració (meseta en la trajectòria del gràfic) i la cuixa, després d'una petita inflexió, continua en moviment. S'observa una segona inflexió per part de la cuixa al voltant del 65 % de duració del cicle, la qual cosa indica cert grau de

reversió. D'altra banda, la cama es manté estable fins a la segona inflexió de la cuixa i a partir del 65 % del cicle reinicia el moviment. En canvi la *figura 2c* mostra dues línies paral·leles i ben acoblades (en fase). Això significa que la cuixa i la cama realitzen simultàniament el mateix moviment al llarg del cicle. En aquest cas no existeix acció del genoll que hauria d'actuar com a esmorteïdor, tal com succeeix en la *figura 2a*. Així, la rigidesa de l'articulació del genoll fa perdre un grau de llibertat al moviment.

El segon exemple pertany a dos joves adults en procés **d'adquisició d'una nova habilitat: balancejar-se en la barra fixa** (*fig. 2b i 2d*). Els gràfics de l'habilitat esportiva són presentats amb el recorregut de cada cicle (des de la màxima altura del maluc per darrere de la barra fins a la màxima altura del maluc per davant) expressat en percentatge de -100 % a 0 % en el recorregut de baixada i del 0 % al +100 % en el recorregut de pujada (*fig. 2b i 2d*). D'aquesta manera, la màxima altura possible per darrere de la barra (projecció vertical dels malucs a sobre de la barra) equivaldria al -100 %; la mínima altura possible (projecció vertical dels malucs a sota de la barra) equivaldria al 0 %, i la màxima altura possible per davant de la barra (projecció vertical dels malucs a sobre de la barra) equivaldria al 100 %. En aquest exemple es representen el moviment dels malucs i l'espatlla, per això parlem de coordinació intersegmentària. El primer subjecte (*fig. 2b*) mostra una coordinació seqüencial o fora de fase entre les accions de l'espatlla i del maluc del -20 % al 0 % i del 20 % al 60 % del cicle. Mentre que la resta del moviment es produeix en paral·lel (*off-set*), és a dir, fan el mateix moviment però amb un valor diferent d'angle de fase. Durant el recorregut de la gràfica en percentatges negatius del cicle (fase de descens del balanceig), l'espatlla realitza primer l'acció i posteriorment el maluc. En canvi, en els percentatges positius del cicle (fase d'ascens del balanceig), el maluc avança a l'acció de l'espatlla. D'altra banda, el participant representat en la *figura 2d* mostra una coordinació simultània o en fase des del percentatge de cicle -20 fins al 60.

Limitacions dels angles de fase

La representació de l'angle de fase té l'avantatge de mostrar el grau d'acobllament entre dos segments. No obstant això, dos comportaments motors diferents poden produir el mateix angle de fase. Per

exemple, un desplaçament de 20 graus a una velocitat de 20 graus/segon serà representat per un angle de fase igual a un desplaçament d'1 grau a una velocitat d'1 grau/segon, ja que aquesta representació es calcula a partir de la tangent d'aquests valors com a coordenades. Per evitar aquest problema podríem afegir el valor del radi de cada punt en la trajectòria al llarg de les coordenades polars.

Per raons similars, alguns autors (Kurz & Stergiou, 2002, 2004) apunten que el càlcul de l'angle de fase a partir de valors normalitzats en el retrat de fase (desplaçament angular vers velocitat angular)

pot exagerar les modificacions produïdes per aquesta normalització. Segons els mateixos autors, el càlcul dels angles de fase i de la fase relativa (a continuació en aquest mateix article) no necessitaria una normalització prèvia ja que l'amplitud dels moviments dels segments no altera el resultat a causa de les propietats de la funció arc tangent. No obstant això, com veurem més endavant, la tècnica de normalització exacta dependrà de l'interès de la pregunta d'investigació i de les característiques de les dades (Peters, Haddad, Heiderscheit, Van Emmerik, & Hamill, 2003).

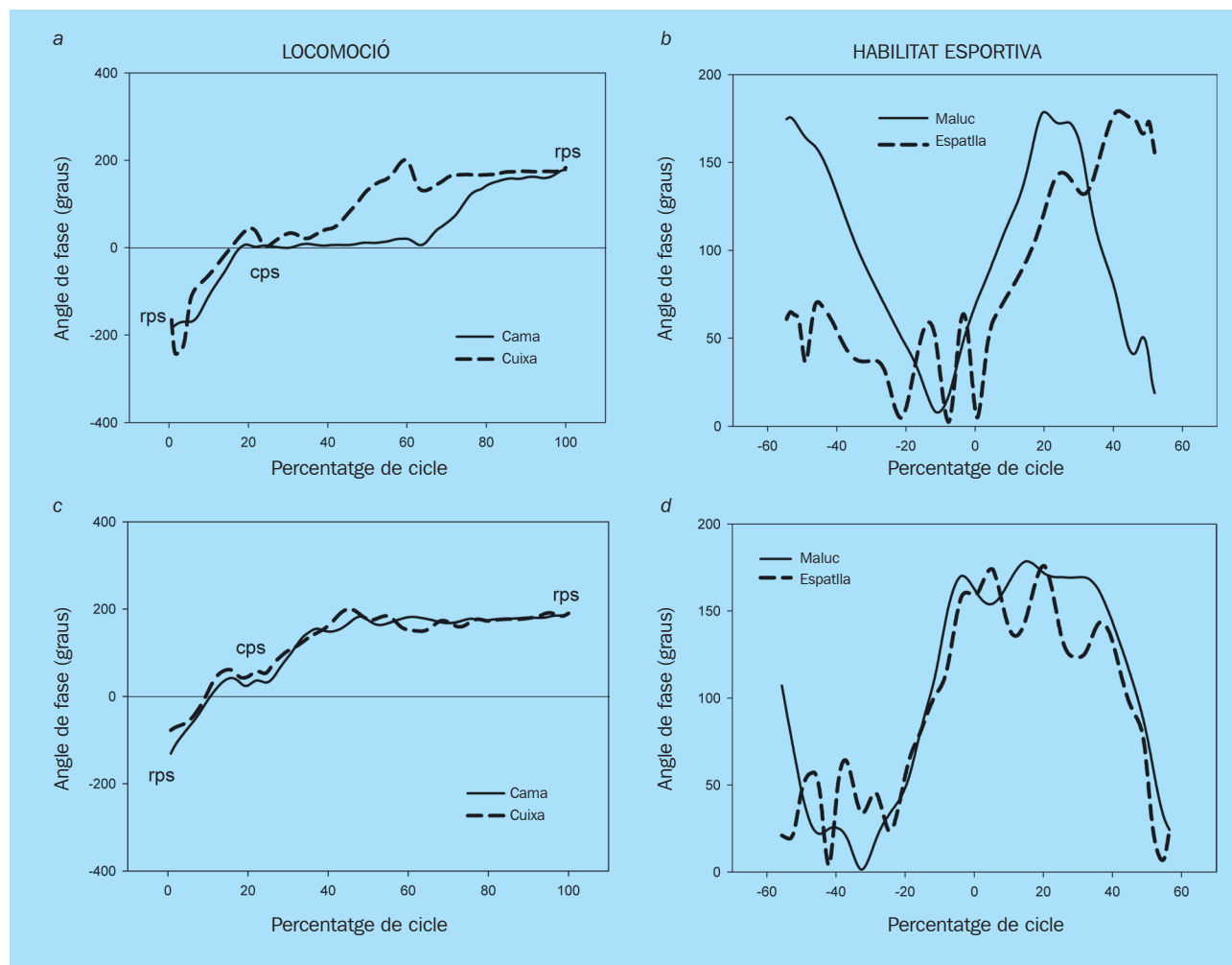


Figura 2

A l'esquerra, angles de fase de la marxa sobre cinta rodant de dos cicles mostrats per un bebè portador de la síndrome de Down (rpt = retirada del peu del terra; cpt = contacte del peu al terra). El temps transcorregut per cada cicle (acció entre la primera retirada del peu i la segona) està expressat en percentatge de 0 % a 100 % en l'eix d'abscisses x. I a la dreta, angles de fase del balanceig en barra mostrats per dos joves adults en procés d'aprenentatge. L'espai recorregut en cada cicle (acció entre la màxima altura del maluc per darrere de la barra i la màxima altura del maluc per davant) està expressat en percentatge de -100 % a 0 % en el moviment de baixada del balanceig i de 0 % a +100 % en el moviment de pujada

A més, l'ús de l'angle de fase no permet establir la contribució de la cinemàtica angular dels segments al moviment, a causa de l'ús simultani de desplaçament i velocitat angular per al seu càlcul. Per a això és necessari l'ús d'altres tècniques que complementen l'angle de fase, com per exemple la tècnica dels retrats de fase que descriuen el desplaçament/velocitat angular de cada segment.

Finalment, també hem de tenir en compte que la interpretació dels gràfics de l'angle de fase acaba per patir ambigüitats causades pel subjectivisme de l'investigador en fer l'anàlisi qualitativa. Per donar més consistència a la interpretació se solen complementar els estudis amb l'anàlisi de variables quantitatives extretes del mateix angle de fase. És a dir, s'elegeixen moments importants en l'exercici i es comparen valors de l'angle de fase en aquests moments en diversos subjectes i després d'un procés d'aprenentatge.

La fase relativa contínua (*continuous relative phase*) aplicada a l'anàlisi de la coordinació motora

Elaboració de la fase relativa contínua

Una altra tècnica de reducció de dades utilitzada per a l'anàlisi de la coordinació és la fase relativa contínua. La fase relativa es basa en la relació temporal de dos sistemes, és a dir, la relació de fase entre dos segments corporals, o entre dos segments corporals i un esdeveniment específic. La fase relativa contínua pot ser derivada de diferents eines de reducció de dades. Alguns investigadors utilitzen el desplaçament vertical, horitzontal o resultant (vertical/horitzontal) i altres el deriven dels angles de fase. Si es deriva de la fase relativa dels angles de fase, el càlcul és el següent (Clark & Phillips, 1993; Kurz & Stergiou, 2002, 2004; Wheat & Glazier, 2006):

1. Els angles de fase dels segments (calculats seguint la metodologia anteriorment explicada) permeten el càlcul de la fase relativa.
2. La fase relativa (ϕ) es defineix com la diferència entre l'angle de fase del segment distal amb l'angle de fase del segment proximal en cada instant.

$$\phi = AF_d - AF_p$$

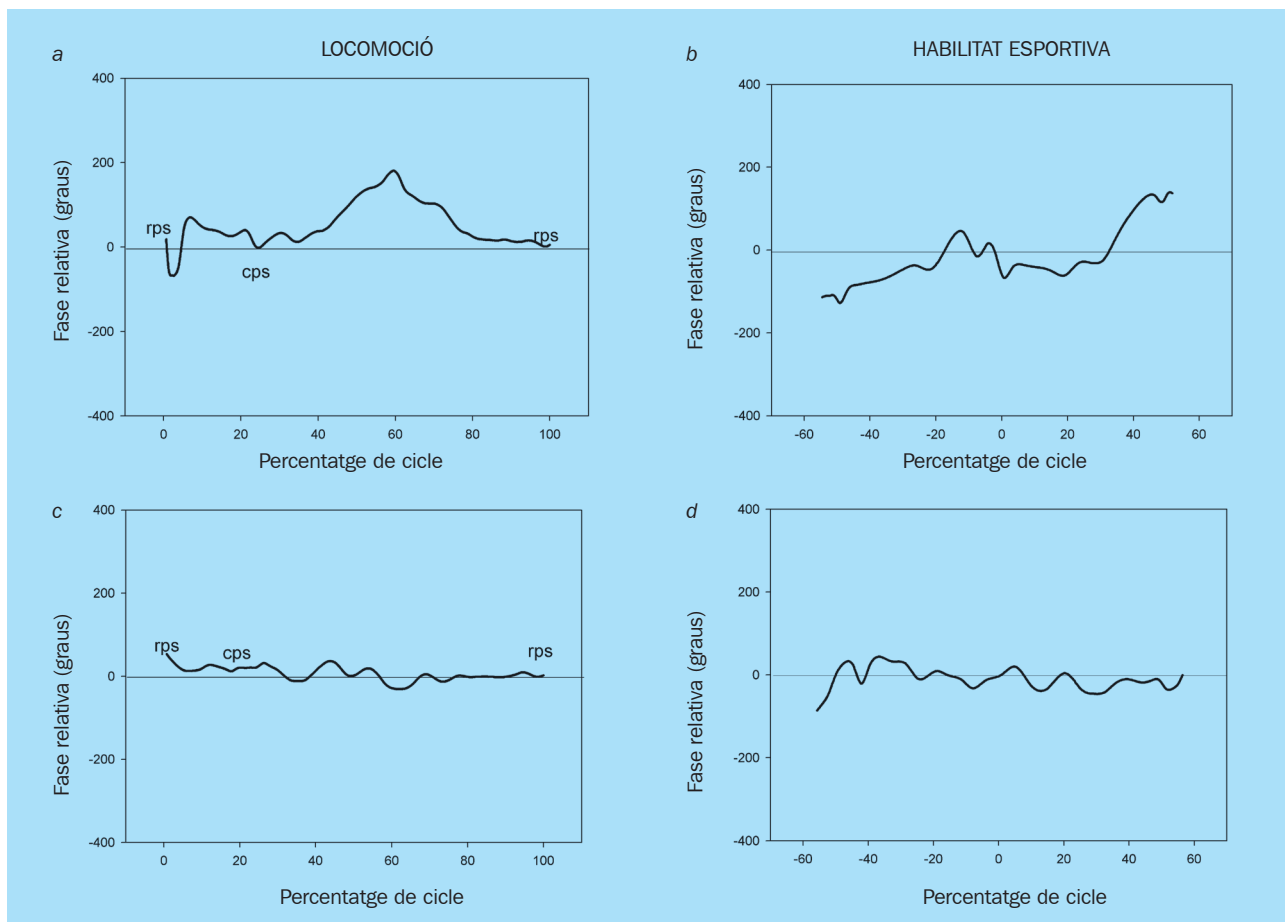
en què AF_d és l'angle de fase del segment distal i AF_p és l'angle de fase del segment proximal.

Interpretació de la fase relativa contínua

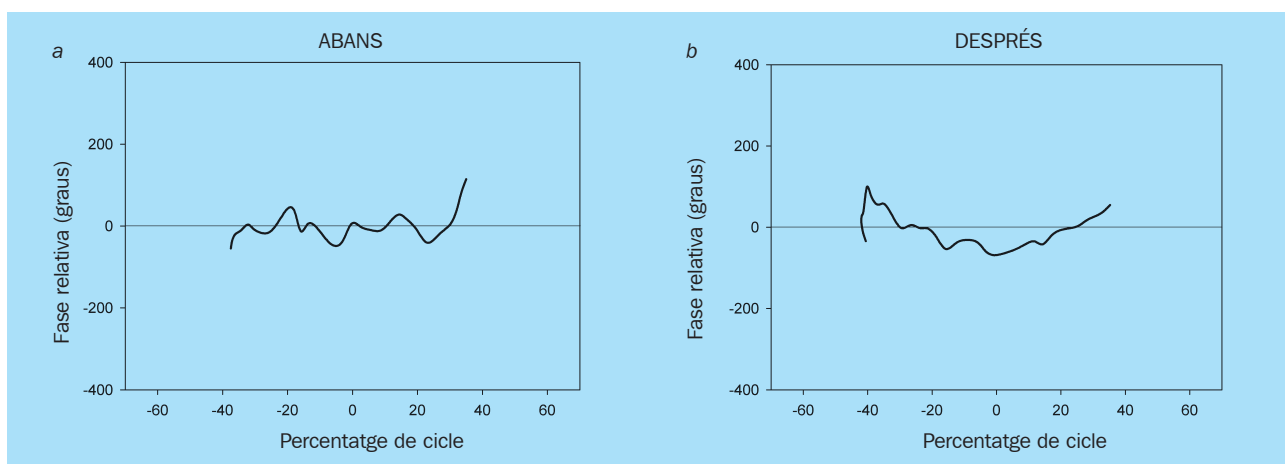
Els valors de la fase relativa contínua permeten determinar el tipus de coordinació. Definim una coordinació en fase (0°) si els dos segments o articulacions es mouen sincrònicament. Del contrari, la coordinació és antifase (180°) si els segments o articulacions es mouen en direccions oposades. A més, podem trobar múltiples maneres de coordinació intermèdies, anomenades fora de fase, entre les coordinacions en fase o antifase. D'altra banda, el signe (positiu o negatiu) dels valors de la fase relativa contínua expressen quin segment antecedeix l'altre en la coordinació del moviment. Si els valors són positius, el segment distal realitza el moviment abans que el proximal i si els valors són negatius, el segment proximal precedeix el distal.

Les gràfiques incloses en la *figura 3* són exemples de fase relativa contínua derivats dels angles de fase de les gràfiques presentades en la *figura 2*. La diferència entre els angles de fase, de la cuixa i de la cama en el cas de la locomoció i dels malucs i de l'espatlla per al balanceig en la barra, indiquen que els dos segments s'estan movent en fase quan la línia es desplaça al llarg de l'eix zero (*fig. 3c* i *3d*). Tanmateix, pendents en la direcció negativa o positiva indiquen que el sistema es troba fora-de-fase (*fig. 3a* i *3b*) i fins i tot arriba a valors d'antifase en aconseguir el 60 % del cicle de marxa (*fig. 3a*). En la *figura 3b* podem observar que entre el -60% i el -20% del cicle del balanceig el maluc antecedeix l'espatlla i entre el 40 % i el 60 % l'espatlla precedeix el moviment.

La fase relativa contínua, com a tècnica que permet resumir la coordinació, té un fort potencial per ser un bon descriptor de l'essència del moviment que realitza el sistema (individu). La seva variabilitat reflecteix l'estabilitat del sistema com un tot. L'aprenentatge motor implica que l'individu modifica la coordinació dels segments implicats per adequar-se a l'objectiu de la tasca i realitzar-la de manera més eficaç i eficient. Per tant, els canvis entre intents en els valors de la fase relativa contínua ens mostren diferents coordinacions i són un indicador de la reorganització del sistema que normalment ocorre en el procés d'aprenentatge. En la *figura 4* s'observa la fase relativa contínua obtinguda per part d'un mateix individu en l'execució d'un balanceig en la barra fixa el primer dia de pràctica (*fig. 4a*) i després de realitzar divuit sessions de pràctica (*fig. 4b*). El primer dia de pràctica la fase relativa contínua mostra una coordinació en fase, pròxima a 0° , la major part del cicle (*fig. 4a*). En canvi, després del període de pràctica el moviment s'inicia amb una coordinació fora de fase amb

**Figura 3**

Fase relativa contínua de l'angle de fase de la marxa sobre cinta rodant dels dos cicles mostrats en les figures 2a i 2c d'un bebè portador de la síndrome de Down (a i c) i del balanceig en barra mostrats en les figures 2b i 2d de dos joves adults en el període d'aprenentatge (b i d)

**Figura 4**

Fase relativa contínua entre l'espatlla i el maluc d'un individu realitzant un balanceig en barra fixa abans d'un període de pràctica (fig. 4a) i del mateix individu després de divuit sessions de pràctica (fig. 4b)

un moviment d'espatlla que precedeix el de maluc, progressivament el maluc va avançant l'espatlla fins a arribar a precedir-lo en el 0 % del cicle i a partir d'aquest punt l'espatlla progressivament torna a precedir el maluc (fig. 4b).

Així, aquesta tècnica pot apuntar bifurcacions o canvis en la coordinació del moviment. Si un sistema mostra un canvi en la fase relativa contínua, per exemple com succeeix en la figura 4 passant d'una manera predominantment en fase a una de fonamentalment fora de fase, diem que el sistema passa per una bifurcació. Aquesta identificació és important per plantejar intervencions en l'aprenentatge, ja que les intervencions tenen més garantia d'induir canvi si 1) es focalitzen en buscar la bifurcació en la fase relativa contínua dels segments adequats i 2) s'implanten en una etapa en la qual el sistema ja tendeix cap al canvi.

Limitacions de la fase relativa contínua

La fase relativa contínua, com qualsevol altra eina d'anàlisi, presenta algunes mancances. Una de les limitacions més importants és que com a mínim un dels components del sistema analitzat ha de demostrar un comportament cíclic o repetitiu. És molt difícil computar i interpretar la fase relativa entre dos segments corporals que són moguts una sola vegada (comportament acíclic).

A més, les tècniques de normalització usades en el càlcul de la fase relativa contínua assumeixen que estem analitzant un senyal oscil·latori (similars a un pèndol) i, per tant, pot no ser apropiat per a oscil·ladors parcials o de trajectòries no sinusoidals (Peters et al., 2003). A més, com hem comentat anteriorment, la tècnica de normalització exacta dependrà de l'interès de la pregunta d'investigació. Si les dades són sinusoidals, la tècnica específica de normalització és irrellevant perquè qualsevol tècnica utilitzada escalaria la velocitat de manera que el resultat final seria un gràfic desplaçament angular-velocitat angular de manera circular. Quan les dades són no sinusoidals, diverses tècniques de normalització poden ser utilitzades, sempre amb l'objectiu de fer el retrat de fase més circular. Les dades no sinusoidals utilitzen entre altres tècniques de normalització la reescala de l'eix vertical de coordenades, altres tècniques més sofisticades de transformació o metodologies no-lineals (Peters et al.).

D'altra banda, l'investigador ha de tenir en compte que en calcular les relacions de fase, les formes del retrat de fase són ignorades i tan sols ens centrem en

el sincronisme del moviment dels segments corporals. Quan les formes del retrat de fase són ignorades, no és possible deduir quines estratègies de control hi estan involucrades. Tal com succeïa amb la tècnica d'angles de fase, la tècnica de fase relativa contínua ha de ser complementada amb l'ús d'altres tècniques que descriu el comportament qualitatiu dels segments, com per exemple els mateixos retrats de fase.

Conclusions

El principal objectiu d'aquest article va ser mostrar als lectors una metodologia per a l'estudi de la coordinació del moviment. Tant els angles de fase com la fase relativa contínua van permetre analitzar la coordinació del moviment a partir d'una variable (el traçat de la seva representació gràfica). A través de l'anàlisi qualitatiu d'ambdues tècniques vam ser capaços de diferenciar quines parts del moviment es realitzen dins la fase o fora de la fase. També vam poder explicar quina estratègia de coordinació (*congelar* o *acoblar* els angles de llibertat) utilitzaven els individus analitzats en fer una nova tasca. No obstant això, ni els angles de fase ni la fase relativa contínua són representacions completes de la coordinació. L'anàlisi hauria de ser complimentat amb eines que reflecteixin la dinàmica dels diferents segments, com els retrats de fase. Una altra limitació que cal tenir en compte és la normalització que cal realitzar i les interpretacions que es deriven de cada tipus de normalització.

Referències

- Clark, J. E. (1995). On becoming skillful: patterns and constraints. *Research Quarterly for Exercise and Sport*, 66(3), 173-83.
- Clark, J. E. (2002). Stepping into a new paradigm with an old reflex: A commentary on "The relationship between physical growth and a newborn reflex" by Esther Thelen, Donna A. Fisher, and Robyn Ridley-Johnson. *Infant Behavior and Development*, 25(1), 91-93.
- Clark, J. E. & Phillips, S. J. (1991). The development of intralimb coordination in the first six months of walking. A. J. Fagard & P. H. Wolff (Eds.), *Temporal organization in coordination action* (pàg. 245-260). The Netherlands: Kluwer Academic Publs.
- Clark, J. E. & Phillips, S. J. (1993). A longitudinal study of intralimb coordination in the first year of independent walking: a dynamical systems analysis. *Child Development*, 64(4), 1143-57.
- Delignieres, D., Nourrit, D., Sioud, R., Leroyer, P., Zattara, M., & Micallef, J. P. (1998). Preferred coordination modes in the first steps of the learning of a complex gymnastics skill. *Human Movement Science*, 17(2), 221-241.
- Delignieres, D., Teulier, C., & Nourriy, D. (2009). L'apprentissage des habiletés motrices complexes: des coordinations spontanées a la coordination experte. *Bulletin de Psychologie, Tome 62(4)*, N°502, 327-334.

- Guadagnoli, M. A. & Lee, T. D. (2004). Challenge point: a framework for conceptualizing the effects of various practice conditions in motor learning. *Journal of Motor Behavior*, 36(2), 212-24.
- Hamill, J., Van Emmerik, R. E., Heiderscheit, B. C., & Li, L. (1999). A dynamical systems approach to lower extremity running injuries. *Clinical Biomechanics (Bristol, Avon)*, 14(5), 297-308.
- Handford, C., Davids, K., Bennett, S., & Button, C. (1997). Skill acquisition in sport: some applications of an evolving practice ecology. *Journal of Sports Sciences*, 15(6), 621-40.
- Holt, K. G. (2005). Biomechanical models, motor control theory, and development. *Infant and Child Development*, 14(5), 523-527.
- Jensen, J. L. (2005). The puzzles of motor development: how the study of developmental biomechanics contributes to the puzzle solutions. *Infant and Child Development*, 14(5), 501-511.
- Jensen, J. L. & Korff, T. (2005). Continuing the discourse on the contribution of biomechanics to understanding motor development: response to the commentaries. *Infant and Child Development*, 14(5), 529-533.
- Kelso, J. A. S., Saltzman, E. L., & Tuller, B. (1986). The dynamical perspective on speech production: Data and theory. *Journal of Phonetics*, 14, 29-59.
- Kelso, J. A. S., Scholz, J. P., & Schöner, G. (1986). Non-equilibrium phase transitions in coordinated biological motion: Critical fluctuations. *Physics Letters A*, 118(6), 279-284.
- "Knoek" van Soest, A. J. & Ledebt, A. (2005). Towards a broader scope of biomechanics in developmental studies: a commentary on Jensen (2005). *Infant and Child Development*, 14(5), 513-518.
- Kugler, P. N., Kelso, J. A. S., & Turvey, M. T. (1980). On the concept of coordinative structures as dissipative structures: I. Theoretical lines of convergence. A. G. E. Stelmach & J. Requin (Eds.), *Tutorial in Motor Behavior* (pàg. 3-47). Amsterdam, The Netherlands: North-Holland Publishing Company.
- Kugler, P. N., Kelso, J. A. S., & Turvey, M. T. (1982). On the control and coordination of naturally developing systems. A. J. A. S. Kelso & J. E. Clark (Eds.), *The development of movement control and coordination* (pàg. 5-78). New York: Wiley.
- Kurz, M. J. & Stergiou, N. (2002). Effect of normalization and phase angle calculations on continuous relative phase. *Journal of Biomechanics*, 35(3), 369-74.
- Kurz, M. J. & Stergiou, N. (2004). Applied dynamics systems theory for the analysis of movement. A. N. Stergiou (Ed.), *Innovative analyses of human movement* (pàg. 93-119). Champaign, ILL: Human Kinetics Publishers.
- Marin, L., Bardy, B. G., & Bootsma, R. J. (1999). Level of gymnastic skill as an intrinsic constraint on postural coordination. *Journal of Sports Sciences*, 17(8), 615-26.
- Mauerberg, E., Schuller, J., & Fantucci, I. (1994). Phase portrait descriptions of walking patterns of severely mentally retarded subjects. *Brazilian International Journal of Adapted Physical Education Research*, 1, 19-50.
- Mauerberg-deCastro, E. & Angulo-Kinzler, R. (2000). Locomotor patterns of individuals with Down syndrome: Effects of environmental and task constraints. A. D. Elliot, R. Chua, & D. Weeks (Eds.), *Perceptual-motor behavior in Down syndrome* (pàg. 71-98). Champaign, ILL: Human Kinetics Publishers.
- Mauerberg-deCastro, E. & Angulo-Kinzler, R. (2001). Vantagens e limitações das ferramentas usadas para investigar padrões de comportamento motor segundo a abordagem dos sistemas dinâmicos. A. L. A. Teixeira (Ed.), *Avanços em Comportamento Moto* (pàg. 62-87). São Paulo, Brasil: Movimento.
- Meriam, J. L. (1966). *Dynamics*. London, UK: Wiley.
- Newell, K. M. (1986). Constraints on the development of coordination. A. M. G. Wad & H. T. A. Whiting (Eds.), *Motor development in children: Aspects of coordination and control* (pàg. 341-360). Doedrecht, The Netherlands: Martinus Nijhoff Publishers.
- Newell, K. M. (1991). Motor skill acquisition. *Annual Reviews of Psychology*, 42(1), 213-37.
- Nourrit, D., Deschamps, T., Lauriot, B., Caillou, N., & Delignieres, D. (2000). The effects of required amplitude and practice on frequency stability and efficiency in a cyclical task. *Journal of Sports Sciences*, 18(3), 201-12.
- Peters, B. T., Haddad, J. M., Heiderscheit, B. C., Van Emmerik, R. E., & Hamill, J. (2003). Limitations in the use and interpretation of continuous relative phase. *Journal of Biomechanics*, 36(2), 271-4.
- Riera, J. (2005). *Habilidades en el deporte*. Barcelona, Spain: Editorial INDE.
- Sparrow, W. A. & Irizarry-López, V. M. (1987). Mechanical efficiency and metabolic cost as measures of learning a novel gross motor task. *Journal of Motor Behavior*, 19(2), 240-64.
- Tang, P. & Woollacott, M. H. (1996). Balance control in older adults: Training effects on balance control and the integration of balance control into walking. A. A. M. Ferrández & N. Teasdale (Eds.), *Changes in sensory-motor behavior in aging*. Amsterdam, The Netherlands: North Holland.
- Temprado, J., Della-Graza, M., Farrell, M., & Laurent, M. (1997). A novice-expert comparison of (intra-limb) coordination subserving the volleyball serve. *Human Movement Science*, 16(5), 653-676.
- Thelen, E. & Smith, L. (1994). *A dynamic system approach to the development of cognition and action*. Cambridge, Massachusetts: MIT Press.
- Thelen, E. & Ulrich, B. D. (1991). Hidden skills: a dynamic systems analysis of treadmill stepping during the first year. *Monographs of the Society for Research in Child Development*, 56(1), 1-98; discussion 99-104.
- Ulrich, B. D. & Kubo, M. (2005). Adding pieces to the puzzle: a commentary. *Infant and Child Development*, 14(5), 519-522.
- Ulrich, B. D., Ulrich, D. A., & Collier, D. H. (1992). Alternating stepping patterns: hidden abilities of 11-month-old infants with Down syndrome. *Developmental Medicine & Child Neurology*, 34(3), 233-9.
- Vereijken, B., Van Emmerik, R. E. A., Whiting, H. T. A., & Newell, K. M. (1992). Free(z)ing degrees of freedom in skill acquisition. *Journal of Motor Behavior*, 24(10), 133-142.
- Wheat, J. S. & Glazier, P. S. (2006). Measuring Coordination and Variability in Coordination. A. K. Davids, S. Bennett, & K. Newell (Eds.), *Movement system variability* (pàg. 167-181). Champaign, ILL: Human Kinetics Publishers.
- Winstein, C. J. & Garfinkel, A. (1989). Qualitative dynamics of disordered human locomotion: a preliminary investigation. *Journal of Motor Behavior*, 21(4), 373-91.
- Winter, D. A. & Eng, P. (1995). Kinetics: our window into the goals and strategies of the central nervous system. *Behavioural Brain Research*, 67(2), 111-20.