

El retrat de fase com una eina d'anàlisi del comportament motor*

Phase Portraits as a Tool for Analysis of Motor Behaviour

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 Sao Paulo (Rio Claro, Brasil)

Autora per a la correspondència

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

Resum

Hi ha un gran nombre d'investigacions centrades en l'adquisició i el perfeccionament d'habilitats motrius. Aquestes investigacions intenten explicar quina és la font i els processos de canvi dels comportaments motors que permeten a l'individu adquirir o perfeccionar una habilitat. L'avantatge de la teoria dels sistemes dinàmics (TSD) com a marc de referència és la inclusió d'una anàlisi contextual en el procés d'aprenentatge. L'objectiu d'aquest article és donar a conèixer una metodologia anomenada retrat de fase que facilita l'estudi del comportament motor basant-se en els principis de la TSD. Dades biomecàniques tractades amb una tècnica de reducció adequada són una bona eina per descriure i entendre els canvis que es produeixen en el comportament motor. Els retrats de fase, mitjançant un gràfic (posició angular, velocitat angular), són capaços de capturar el complex joc de forces que influeixen en el comportament motor. En aquest article, les formes de trajectòria dels gràfics ens van indicar: 1) com l'organisme es comporta durant la realització de les habilitats motrius analitzades mostrant els seus patrons generals; 2) les singularitats poblacionals (amb deficiències i sense deficiències) o individuals; 3) els comportaments adquirits en el procés d'aprenentatge (principiant i expert); i 4) els canvis produïts per manipulació de l'entorn. No obstant això, els retrats de fase encara que són molt útils per resumir el comportament motor, no en són representacions completes i els hauríem de completar amb altres tècniques d'anàlisi.

Paraules clau: aprenentatge motor, biomecànica, teoria dels sistemes dinàmics, locomoció, habilitats esportives

Abstract

Phase Portraits as a Tool for Analysis of Motor Behaviour

A significant amount of research has been done that focuses on the acquisition and improvement of motor skills. This research attempts to explain the source and the processes of change in motor behaviour that enable the individual to acquire or improve a skill. The advantage of the Theory of Dynamic Systems (TDS) as a frame of reference is the inclusion of contextual analysis in the learning process. The purpose of this paper is to present a methodology called phase portraits which facilitates the study of motor behaviour based on the principles of TSD. Biomechanical data treated with an appropriate reduction technique are a good tool for describing and understanding the changes that occur in motor behaviour. Phase portraits using a chart (angular position, angular velocity) are able to capture the complex interplay of forces that influence motor behaviour. In this paper, the shapes of the trajectories in the charts will show: (1) how the body behaves during the performance of analyzed motor skills by showing its general patterns; (2) population (with gaps and without gaps) or individual singularities; (3) behaviours acquired during the learning process (novice and expert); and (4) the changes caused by manipulation of the environment. Nonetheless, although phase portraits are very useful for summarizing motor behaviour, they are not complete representations of it and need to be supplemented by other analytical techniques.

Keywords: motor learning, biomechanics, dynamic systems theory, locomotion, sports skills

* 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

Al llarg de la vida sorgeixen, es desenvolupen i fins i tot desapareixen comportaments motrius. Aquests comportaments estan vinculats a moviments amb objectius concrets, és a dir, es relacionen amb tasques. Quan la producció d'una tasca permet resoldre un problema motriu aconseguint les màximes expectatives d'èxit i amb un mínim de temps i energia, estem parlant d'habilitat (Riera, 2005). Precisament, una de les preguntes que centren actualment les investigacions i els debats teòrics recau en quina és la font dels nous comportaments motors i com passen a ser moviments hàbils (Jensen, 2005).

Durant les últimes dècades del segle xx han predominat dues teories sobre l'aprenentatge motor: les teories de maduració neural i les teories cognitives. Segons les teories de maduració neural l'habilitat arriba des de les estructures jeràrquiques del Sistema Nerviós Central (SNC), anomenades generadors centrals de patrons, que produeixen la seqüència i el ritme de l'activació muscular (Clark & Phillips, 1993). Així, el comportament és prescrit o predeterminat per la maduració del SNC, la qual cosa implicaria que els altres subsistemes de l'individu (dimensions antropomètriques, per exemple) i les seves relacions no tenen influència en el desenvolupament dels comportaments motors. La perspectiva cognitiva entén que l'aprenentatge principalment ve determinat per representacions internes prèvies al moviment i pels programes motors generalitzats a disposició de l'individu (Schmidt, 1982). D'aquesta manera, el comportament es produeix per la formació d'un esquema motor emfatitzat per mitjà de l'experimentació.

Ambdues teories, la madurativa i la cognitiva, ignoren la riquesa en el desenvolupament dels comportaments que sorgeixen des dels diversos subsistemes i els seus processos (Thelen & Ulrich, 1991). Aquests punts de vista poden ser concebibles quan la tasca que s'ha de realitzar constitueix una variant d'una altra prèviament apresada, però són menys fàcils d'aplicar quan el comportament d'un subjecte es troba davant d'una tasca completament nova (Delignieres *et al.*, 1998). A més a més, moltes tècniques per a l'anàlisi del comportament motor van ser aplicades solament per descriure el comportament en lloc d'explicar el procés d'elaboració, organització i adaptació del comportament motor. Així, l'efectivitat del control i el progrés d'aprenentatge tan sols s'avaluaven respecte del total de l'actuació (Temprado, Della-Grasta, Farrell, & Laurent, 1997).

D'altra banda, s'accepta que l'individu està format de múltiples sistemes que interactuen i que aquests sistemes són oberts, és a dir, modifiquen els seus comportaments sota la influència d'altres sistemes o de la situació. Una explicació teòrica alternativa a la madurativa i la cognitiva que s'ha estat desenvolupant sobre les últimes dècades és la Teoria dels Sistemes Dinàmics (TSD). La TSD veu el moviment com un comportament emergent que sorgeix des de la dinàmica col·lectiva de tots els sistemes de l'organisme que estan implicats en la tasca. Entre d'altres podem citar: l'estatus neural, les característiques biomecàniques, l'experiència, el nivell d'alerta i la precisió visual (Kugler, Kelso, & Turvey, 1982; Thelen & Ulrich, 1991). Els principals factors que condicionen la forma específica del comportament motor, els anomenats *constraints* en la literatura anglesa, es categoritzen en pertanyents a l'entorn, a la tasca o a l'organisme (Clark & Phillips, 1993; Newell, 1986). Els condicionants de l'entorn provenen de l'entorn físic (gravetat, temperatura ambiental, etc.), així com de l'entorn cultural, els quals tenen tendència a promoure cert tipus de moviment i desterrar-ne d'altres. Els condicionants de la tasca inclouen les característiques físiques de la tasca en si mateixa (aparells, màquines, etc.) i les instruccions que es dona als executants sobre l'objectiu o de la coordinació particular que han de realitzar. Per últim, els condicionants de l'organisme inclouen les característiques físiques de l'executant (el pes, l'alçada i la forma del cos, per exemple) i els seus atributs fisiològics i psicològics. L'impacte relatiu d'aquestes tres categories de condicionants en el comportament motor es modifica d'acord amb les circumstàncies específiques. A més a més, la TSD estableix que els sistemes i les seves relacions es modifiquen en el temps, són "sistemes dinàmics". Aquestes propietats dinàmiques donen al sistema la capacitat de contínua autoorganització gràcies a la constant fluctuació que existeix entre les interaccions dels subsistemes. La fluctuació de les interaccions, provocada pels canvis dels mateixos subsistemes i/o dels seus condicionants, fa que els canvis puguin emergir convertint-se en un nou moviment o modificant un moviment ja après.

L'aprenentatge, per tant, pot ser considerat com una modificació de la dinàmica dels subsistemes del comportament motor. L'avantatge d'utilitzar la TSD per emmarcar l'aprenentatge motor resideix en el fet que podem proposar una explicació orientada al procés, que busca explicar els canvis, i inclou una

anàlisi de les circumstàncies en què es desenvolupa (Clark & Phillips, 1993; Thelen & Smith, 1994). Tradicionalment, el canvi d'un comportament a un altre s'ha presentat com un fenomen progressiu, però els estudis ja han demostrat que aquestes transicions poden ser abruptes i clarament no-lineals. En la base d'aquests processos de canvi resideix la *competició* entre allò que l'executant vol o és instruït a fer (tasca) i la tendència natural del sistema a preferir certs comportaments motors ja establerts. D'altra banda, les i els autors seguidors de la TSD (Delignieres, Teulier, & Nourrit, *in press*; Thelen & Smith, 1994) proposen que el sorgiment d'un comportament motor expert s'adquireixi amb la cooperació entre els comportaments nous i els ja adquirits, sense la necessitat de desaprendre un comportament o competir amb ells. Així, l'individu fa una primera adaptació del comportament motor per satisfer els requisits de la tasca i posteriorment apareix una segona fase en què el comportament motor anterior es va alternant amb la coordinació adquirida prèviament.

Els canvis en els comportaments motors succeeixen quan subsistemes crítics (anomenats paràmetres de control) progressen suficientment per generar un punt de transició que provoca un canvi qualitatiu (bifurcació) i permet el sorgiment d'un nou patró (nova organització). Els comportaments motors en un determinat instant de la vida del sistema es defineixen com estats atractors, els quals exhibeixen una major o menor estabilitat. La inestabilitat del sistema permet a aquest explorar noves organitzacions i conseqüentment noves solucions motores (Kelso, Scholz, & Schöner, 1986). Tots els sistemes dinàmics, encara que siguin estables, sempre pateixen algun tipus de fluctuació.

Com hem dit, l'aprenentatge d'una tasca és un procés no-lineal que implica diversos subsistemes i el context en què es realitzen. A causa de la complexitat en les relacions que existeixen entre els subsistemes humans per realitzar els moviments, ens trobem amb diverses limitacions quan volem analitzar el comportament motor. Per tant, és necessària una aproximació científica que defaci la complexitat o multidimensionalitat dels comportaments motors per entendre els canvis que es presenten amb l'aprenentatge (Jensen, 2005). Els principis i les eines de la TSD poden ajudar a entendre els orígens i les formes dels comportaments motors, i les raons del canvi dels seus patrons (Clark & Phillips, 1991; Mauerberg, Schuller, & Fantucci, 1994; Mauerberg-deCastro & Angulo-Kinzler, 2000; Winstein &

Garfinkel, 1989). Així, el principal objectiu d'aquest article és proporcionar als lectors una metodologia per a l'estudi del comportament motor basada en els principis de la TSD anomenada retrat de fase. Aquesta metodologia permetrà a qui investiga analitzar els canvis del comportament motor d'un segment i/o articulació durant el procés d'adquisició o perfeccionament d'una habilitat. Per exemplificar l'aplicabilitat de la metodologia presentada i identificar els seus avantatges i limitacions, també es presenten diverses habilitats motrius analitzades en els nostres laboratoris amb aquesta metodologia.

Eines utilitzades per la TSD per a l'anàlisi del comportament motor

Un dels canvis més importants en les ciències del desenvolupament i aprenentatge és la minuciosa captació, vàlidesa i precisió de les dades que reflecteixen l'activitat. L'elecció de la tècnica o eina per analitzar un fenomen depèn de la potència de les variables que s'obtindran per donar respostes a les qüestions plantejades. La biomecànica ens presenta un dels millors camps científics per a l'estudi dels comportaments motors, no tan sols per descriure els canvis que succeeixen, sinó també per entendre per què els canvis passen (Winter & Eng, 1995; Jensen, 2005). Tradicionalment la biomecànica ha estat aplicada per descriure el comportament motor sense explicar el procés d'emergència i adquisició de les habilitats motrius. Així, paràmetres de cinemàtica i cinètica de la locomoció (Eng & Winter, 1995; Foti, Davids, & Bagley, 2000; Prince, Corriveau, Hébert, & Winter, 1997) o de diferents habilitats esportives (Arampatzis & Bruggemann, 1999; Hiley & Yadon, 2003; en el balanceig en barra fixa, per exemple) són freqüentment investigades amb el propòsit de quantificar-ne el comportament. Realment, per analitzar el procés de canvi dels comportaments motors és necessari que aquests conceptes biomecànics siguin combinats amb tècniques de reducció de dades, amb les quals aconseguirem representar, resumir i explicar el comportament motor sense perdre'n la contextualització.

Diverses tècniques de reducció de dades del camp de l'enginyeria física aplicada, o la mateixa biomecànica, s'apliquen en l'estudi dels sistemes biològics complexos, en particular al comportament motor humà. En

assumir la TSD com a marc referencial de les nostres investigacions experimentals, l'elecció de les tècniques de reducció de dades a utilitzar ha de ser compatible amb els principis proposats per aquesta aproximació. D'altra banda, les eines utilitzades han de ser capaces de mostrar les generalitats que exhibeix un comportament motor a causa de les propietats comunes dins cada població, a més de mostrar la seva singularitat a causa de les seves característiques individuals. Per exemple, les característiques diferenciades dins el Sistema Nerviós Central (SNC) d'individus portadors de paràlisi cerebral "forcen" una organització o cooperació diferent entre els subsistemes, del qual resulta un comportament motor singular. Així, els processos d'adaptació d'algunes poblacions portadores de deficiències estan associats amb regles de cooperació diferenciades de les observades en poblacions no portadores de deficiències. En l'anàlisi dels comportaments motors dels individus portadors de paràlisi cerebral, les eines de reducció correctament seleccionades mostraran patrons similars a la població no portadora de deficiències a causa de les característiques que compartim totes les persones i les característiques de la tasca. A la vegada, aquestes tècniques de reducció de dades posaran en relleu les adaptacions que la població portadora de deficiències realitza en el patró del comportament motor d'aquesta tasca.

A més a més de les diferències causades pels condicionants de l'organisme, els comportaments motors poden sorgir o modificar-se per servir un propòsit (condicionants de la tasca) i la seva constància pot ser o no preservada en un ampli rang de demandes canviants de l'entorn (condicionants de l'entorn). Per exemple, podem caminar a diferents velocitats i sobre terrenys diversos mentre mantenim encara el "caminar". El manteniment del comportament motor sobre aquests canvis permet adaptacions dels mateixos comportaments més que reorganitzacions i creació de nous comportaments (Clark & Phillips, 1993). Les eines d'anàlisi escollides també han de facilitar l'observació de les adaptacions del comportament a l'entorn.

Tot un sistema mostra un cert grau de fluctuació que li permet adaptar el moviment o crear-ne un de nou. Malgrat aquesta fluctuació inherent, els comportaments establerts presenten un estat estable. Els estats de transició d'un sistema inestable a un sistema estable, o viceversa, són característics dels processos d'aprenentatge. Les eines seleccionades han de mostrar les fluctuacions que permeten al sistema ser flexible i es-

table al mateix temps. En els punts de transició, aquestes fluctuacions intrínseques augmenten i amb aquestes augmenta la variabilitat del comportament col·lectiu. Per ser capaços d'analitzar el comportament motor és necessari poder reduir la complexitat del sistema, alta dimensionalitat, a una baixa dimensionalitat. Thelen i Smith (1994) proposen que uns pocs paràmetres (variables essencials) poden caracteritzar el funcionament del comportament motor per una simplificació de les seves dimensions i , a més a més, aquests poden ser abstractes en representacions gràfiques. La identificació de la variable essencial i del seu valor permet la identificació dels diferents estats del sistema, estables o inestables, que constitueixen la dinàmica del comportament motor (Temprado et al., 1997).

El retrat de fase (phase portrait) com a tècnica d'anàlisi del comportament motor

Elaboració dels retrats de fase

Per entendre millor la baixa dimensionalitat, o organització fonamental d'un sistema, podem utilitzar representacions geomètriques com els gràfics de retrats de fase. Els retrats de fase capturen el joc complex de forces actives i passives que es produeixen en un moviment per mitjà d'un gràfic. Així, els retrats de fase són una descripció resumida de les interrelacions del sistema i del sorgiment de l'autoorganització del comportament motor. El gràfic del retrat de fase representa els canvis en la cinemàtica (posició angular contra velocitat angular) dins una regió específica del sistema de coordenades, regió referida aquí com a espai de l'estat (*state space*) (Abraham & Shaw, 1984). A continuació es presenten les equacions utilitzades per a la realització d'un gràfic de retrat de fase (Kurz & Stergiou, 2002, 2004; Mauerberg-deCastro & Angulo-Kinzler, 2001):

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. La velocitat angular igual a zero ha de

correspondre a una velocitat angular normalitzada igual a zero.

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

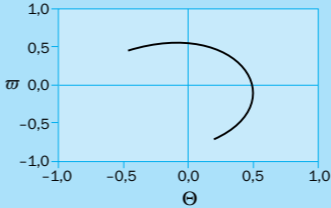
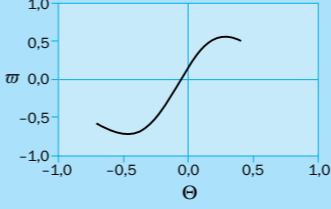
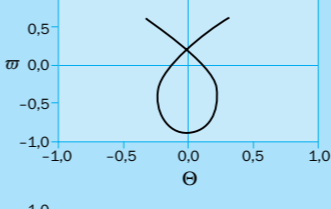
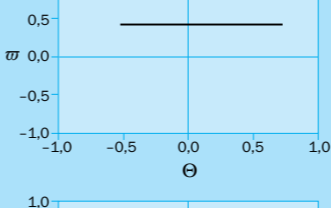
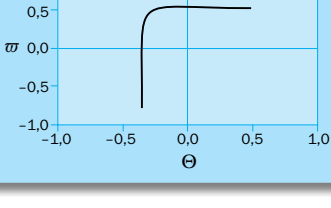
en què (graus/segons) són la velocitat angular del recorregut articular

3. Fer gràfica en l'eix d'ordenades y la velocitat angular () i en l'eix d'abscisses x l'angle ().

Interpretació dels retrats de fase

Per a Thelen i Smith (1994) la convergència de les òrbites d'un sistema en una regió dins l'espai de l'estat caracteritza un atractor. Un atractor, representat pel retrat de fase, és una característica de preferèn-

cia d'organització per al sistema. Els retrats de fase freqüentment són interpretats de forma qualitativa (Mauerberg-deCastro & Angulo-Kinzler, 2000; Winstein & Garfinkel, 1989). La forma assumida per la trajectòria de l'atractor ens dona una idea de com l'organisme es comporta en veure's afectat per les diferents restriccions. Els investigadors poden visualitzar patrons comuns en els retrats de fase, com també les diferents estratègies adoptades pels sistemes i identificar-ne i definir-ne els mecanismes de control. A continuació presentem unes pautes per interpretar les formes que adquireix el retrat de fase durant el comportament motor d'una articulació o d'un segment (Kurz & Stergiou, 2004; Mauerberg-deCastro & Angulo-Kinzler, 2001; Winstein & Garfinkel) (taula 1).

Representació gràfica	Interpretació
	La presència de trajectòries suaus i arrodonides indica un patró ben controlat i estable. Existeixen propietats elàstiques del sistema múscul-tendó involucrades en la producció de trajectòries suaus i arrodonides.
	Les inflexions i protuberàncies són mecanismes de control utilitzats per parar i reiniciar el sistema.
	Els bucles (loops) que creuen a velocitat 0 són considerats indicadors de la presència de reversions. Un gran nombre d'encreuaments en el valor 0 podria suggerir un gran nombre de canvis en la dinàmica del segment.
	Una velocitat constant implica que l'acceleració és 0 i, per tant, la força neta aplicada és 0. La presència de velocitats constants, observables en la presència de replans, suposa l'aportació d'un flux continu d'energia per mantenir el segment en aquesta trajectòria restrictiva. En canvi, el moviment lliure sota l'influx de les forces passives, com la gravetat, es manifesta a la inversa.
	La presència de caïres quadrats és una evidència d'accions explosives o balístiques. Els mecanismes de control actuen per parar o desaccelerar l'acció com també per accelerar el moviment després d'una trajectòria constant.

Taula 1
Possibles formes que poden assumir els retrats de fase i la seva interpretació

Estabilitat i variabilitat del comportament motor

L'atractor mostra una preferència (predisposició a una configuració) que no sempre es pot canviar amb facilitat. Per exemple, les configuracions del moviment com les de la locomoció són atractors de tanta força i estabilitat que perturbacions fins i tot dràstiques no els afecta. Al contrari, moltes habilitats esportives són fàcilment desestabilitzades per manipulacions contextuais, falta de pràctica o falta d'atenció. Els comportaments cíclics, com la marxa o els molins en la barra, són marcats per la repetició dins una òrbita tancada de l'espai de l'estat. La repetició de les trajectòries dels retrats de fase que caracteritzen l'estabilitat del patró pot patir petites perturbacions a causa de la dinàmica típica dels sistemes oberts. Aquestes variacions, observables en el gràfic com petits canvis de mida o de forma que no afecten el patró general confirmen la flexibilitat del sistema (fig. 1a durant la carrera i fig. 1b durant el molí a la barra fixa de gimnàstica). D'altra banda, l'extrema rigidesa en el comportament, marcada per una repetició amb poca variabilitat, és una evidència de falta de flexibilitat o extrem control en l'execució del moviment que s'observa durant el procés d'aprenentatge (fig. 1c en la marxa i fig. 1d en el molí de barra fixa). De manera semblant, l'extrema irregularitat en les trajectòries són un senyal d'instabilitat (fig. 1e en la marxa i fig. 1f en el molí de barra fixa).

Com hem explicat abans, la tasca (caminar, molí a la barra), la situació de l'entorn (terra o barra d'equilibri) i les condicions de l'organisme (presència d'una síndrome o patologia cerebral) són factors importants per justificar l'estabilitat/instabilitat del comportament. Tant els nens portadors com els no-portadors de deficiències poden adquirir patrons de comportament estables. En el procés d'anàlisi en els canvis d'aquests comportaments la variabilitat i l'especificitat són aspectes importants que cal tenir en compte. La figura 2 presenta el procés d'aprenentatge de la marxa d'un nen amb síndrome de Down durant vuit mesos de pràctica (a, c i e) i d'un balanceig en barra fixa per gimnastes amb una altra experiència (b, d i f). Inicialment les trajectòries per a cada cicle són diferents i el patró no es percep, però amb la pràctica la forma traçada pel retrat de fase en cada cicle s'assembla i emergeix un patró que serà semblant al de l'adult o expert (vegeu fig. 2).

Eficiència mecànica del comportament motor

Un altre aspecte important durant el sorgiment i perfeccionament d'un comportament motor es relaciona amb l'eficiència del moviment. La dissipació d'energia durant el moviment com un procés de despesa d'energia, i amb això l'eficiència mecànica, pot ser visualitzada en els retrats de fase basant-nos en les inflexions (canvis ràpids de velocitat) i expansions de les trajectòries (la mida de l'atractor com a producte de la relació entre el desplaçament i la velocitat). Molta de l'energia gastada és generalment resultat dels canvis de velocitat, com podem veure en la figura 3a i 3b la despesa d'energia es vincularia a un moviment ampli i més lent amb més desplaçament.

Les expansions de les trajectòries es visualitzen com una àrea més gran de l'espai d'estat indicant una despesa energètica més gran. Encara que si els retrats de fase són normalitzats podem trobar-nos que l'àrea augmenta o disminueix perdent la seva mida original. Malgrat aquesta limitació, la normalització ens permet comparar retrats de fase de diferents subjectes o en diferents contextos. Un exemple en què es produeixen aquestes diferències entre la mida del retrat de fase normalitzat i no normalitzat és la figura 3c. En aquesta figura un bebè exhibeix petits passos en la cinta rodant probablement a causa de les sensacions (pessigolles o irritació en la planta del peu) causades per les protuberàncies de goma afegides sobre la cinta. Aquesta manipulació de l'entorn probablement fa que el bebè opti per no ampliar el pas, d'aquesta manera no augmenta la pressió de la planta del peu sobre una superfície desagradable per a ell. Si observéssim el retrat de fase sense normalitzar, l'àrea ocupada, i amb això la despesa energètica implicada, seria molt petita. Al contrari, l'àrea ocupada s'expandeix una vegada hem normalitzat el desplaçament i la velocitat angular i no per això implica una despesa energètica més elevada (fig. 3c). El mateix ocorre en la figura 3d, en què s'observa el comportament motor dels malucs durant els balanceigs de poca amplitud d'un nen gimnasta amb poca experiència.

En les figures 3e i 3g es pot observar com dos nens portadors de la síndrome de Down tenen similars dissipacions d'energia en dues tasques, córrer a terra i caminar per un trampolí respectivament. En el primer cas la impulsio generada en la carrera fa que l'atractor expandeixi gradualment la seva trajectòria, mentre que en caminar pel trampolí l'elasticitat de la lona elàstica genera l'impuls (inclinació mostrada en la part inferior de la gràfica).

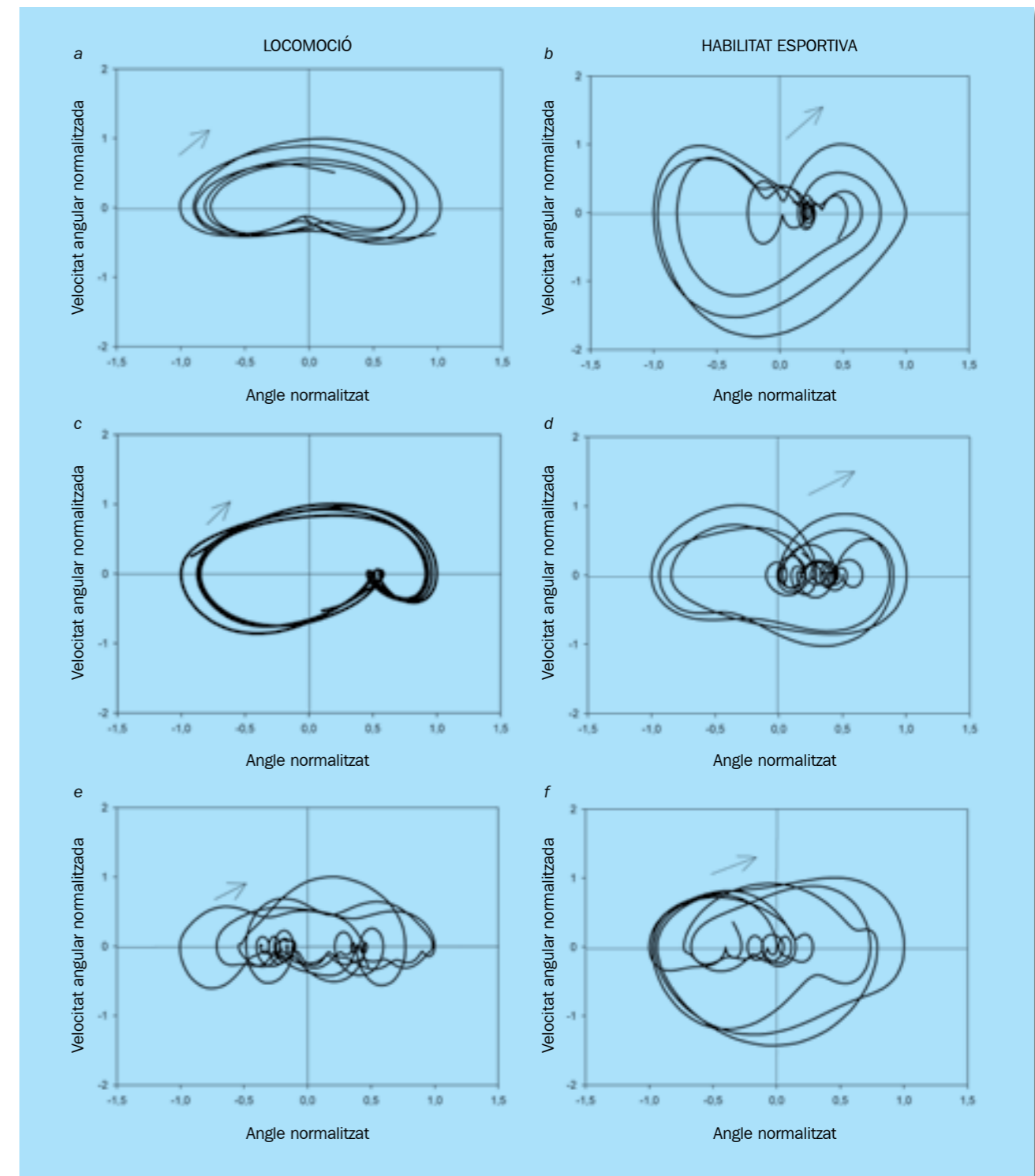


Figura 1
 A l'esquerra, retrats de fase de la cuixa en la locomoció: a) nen portador de la síndrome de Down corrent en un terra; c) adolescent portador de paràlisi cerebral caminant a terra; e) nen portador de la síndrome de Down caminant sobre una barra. I a la dreta, retrats de fase de l'angle format pel tronc i la cuixa durant el balanceig en la barra fixa: b) gimnasta expert (categoria sènior) fent balanceigs complets; d) nen gimnasta (categoria aleví) fent balanceigs complets; f) nen gimnasta de categoria aleví fent balanceigs no complets

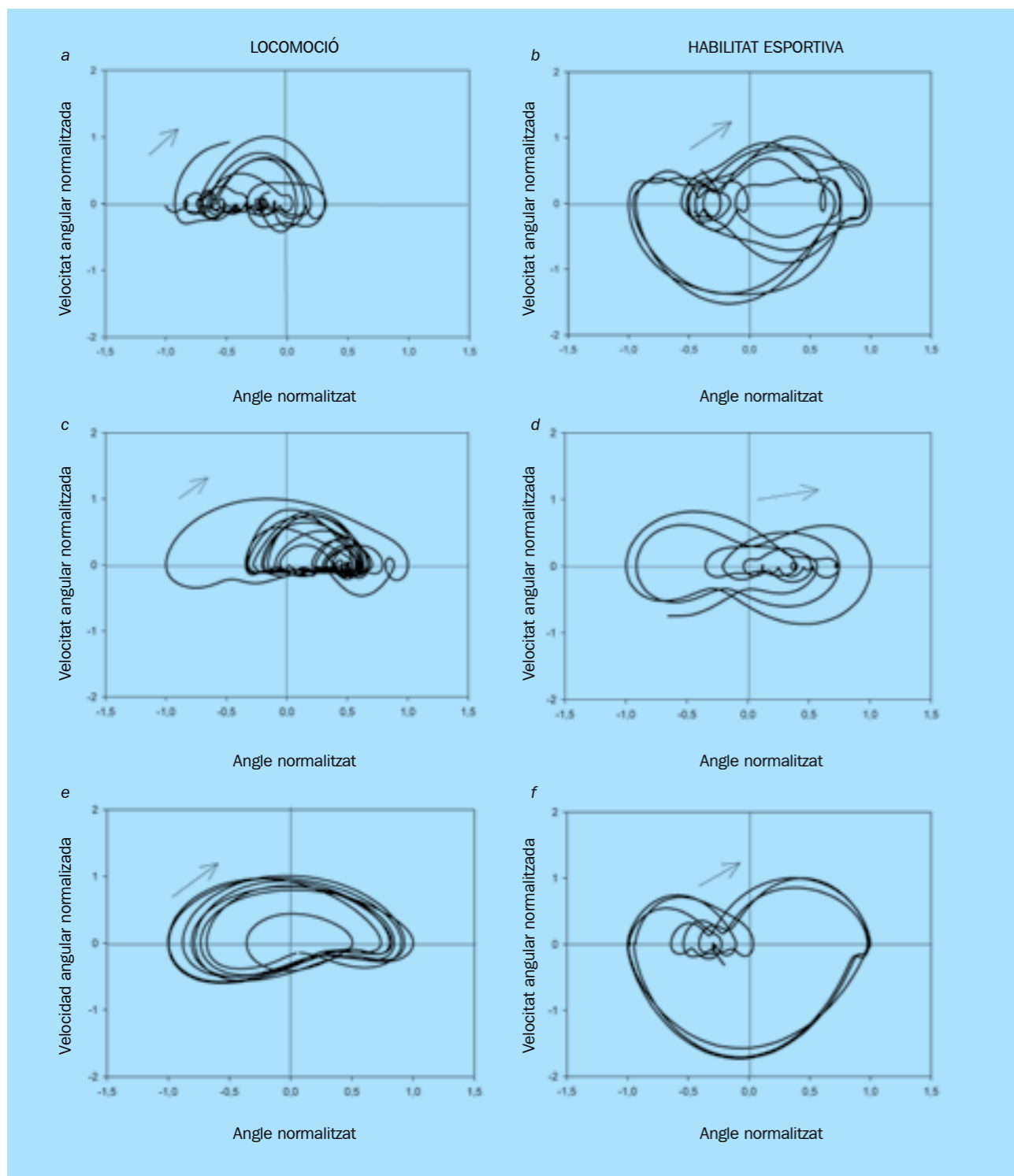


Figura 2

A l'esquerra, retrats de fase de la cama d'un bebè portador de la síndrome de Down en un estadi prelocomotor caminant sobre una cinta rodant: a) avaluació inicial; c) després de tres mesos de pràctica a la cinta rodant; e) després de cinc mesos de pràctica a la cinta rodant. I a la dreta, retrats de fase del segment tronc en relació amb les cuixes en diverses etapes de formació dels gimnastes en la barra fixa: b) balanceig d'un nen gimnasta (categoria aleví) amb dos anys de pràctica; d) balanceig complet d'un nen gimnasta (categoria aleví) amb quatre anys de pràctica; e) balanceig complet d'un adolescent gimnasta (categoria infantil) amb sis anys de pràctica

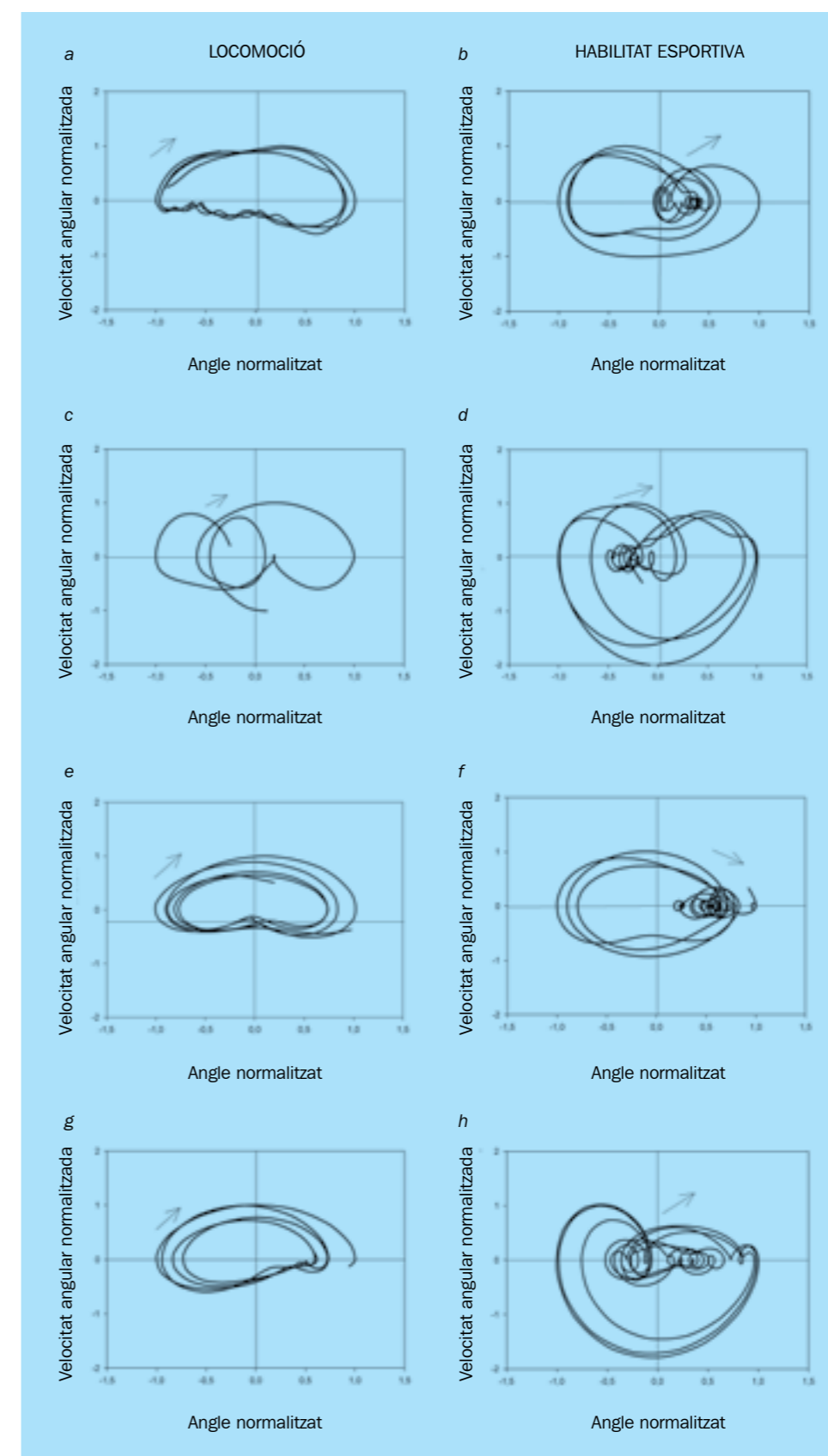


Figura 3

Retrat de fase: a) de la cama d'un individu d'edat avançada caminant amb cadència imposada de seixanta passos/minut per terra; b) del maluc d'un gimnasta expert fent molins a baixa velocitat; c) de la cama d'un bebè portador de la síndrome de Down caminant sobre una cinta rodant amb protuberàncies de goma (efecte distorsionat a causa de la normalització); d) del maluc d'un nen gimnasta balancejant-se en barra amb poca amplitud de moviment (efecte distorsionat a causa de la normalització); e) de la cama d'un nen portador de síndrome de Down corrent a terra; f) del maluc d'un nen gimnasta fent un molí sense aprofitar les forces externes; g) de la cama d'un nen portador de la síndrome de Down caminant sobre un lliç elàstic; h) del maluc d'un nen gimnasta fent un molí aprofitant les forces externes

A més, en aquest últim cas en què el nen se sotmet a l'acció de les forces passives i elàstiques de la superfície, podem veure com aquestes forces dificulten el control del moviment, la qual cosa queda reflectida en la variabilitat de les inflexions que es presenten en la part dreta i inferior de la gràfica. Ambdues situacions exhibeixen grans quantitats d'energia. Les figures 3*f* i 3*h* corresponen a la realització per part de dos nens gimnastes de diversos balanceigs complets en la barra fixa. En el primer cas s'aprecia una part inferior de la corba més plana, la qual cosa indica que s'aprofita menys la força de la gravetat i els moments d'inèrcia.

Adaptacions del comportament motor

Els diferents processos o adaptacions dels comportaments motors poden ser analitzats simplement visualitzant-se les formes del retrat de fase sota restriccions ambientals i biològiques. En la figura 4, columna de l'esquerra, cada bebè exhibeix un patró únic de moviment de la marxa sobre una cinta rodant. Així, en la figura 4*a*, en què el bebè camina en condicions naturals, s'observa una trajectòria que s'inicia amb una velocitat constant (replà en la part superior del gràfic) i que posteriorment desaccelera causant la formació d'una cantonada (forma quadrada en l'atractor). En la figura 4*c* es presenta el comportament motor d'un bebè que està caminant sobre una superfície de velcro col·locat sobre la cinta i a la planta del bebè amb un mitjó. Les forces elàstiques del segment i les característiques de la superfície són probablement responsables del moviment balístic que marca l'inici de la trajectòria (forma quadrada en l'atractor). A continuació, gradualment succeeix una desacceleració de la cama en la meitat de la fase de balanceig de la marxa (part superior de la gràfica) i reassumint una mica de velocitat angular al final de la mateixa fase de balanceig. Les figures 4*e* i 4*g* pertanyen a dos bebès caminant sobre una cinta rodant amb protuberàncies de goma. En el primer cas la fase de balanceig de la marxa és clarament pendular, no obstant això, en la fase de suport (part inferior de la figura) la trajectòria és plana i sense guany de velocitat angular, la qual cosa implica una participació muscular de control del moviment per estabilitzar la cuixa. En el segon cas, el moviment erràtic de la cama en la fase de balanceig marca els dos bucles en la trajectòria del retrat de fase que suggereixen reversions del moviment i, per tant, falta de control.

D'altra banda, a la columna de la dreta podem observar com succeeix el mateix amb joves adults que ad-

quireixen una nova habilitat esportiva concreta; el molí a la barra fixa. En la figura 4*b*, el participant iniciava el moviment amb un replà a causa de la velocitat constant de l'obertura del maluc. En la figura 4*d* queden reflectides les accions balístiques (inflexions en la trajectòria del retrat de fase) que un altre jove adult en fase d'aprenentatge realitza per intentar guanyar amplitud de balanceig. La figura 4*f* mostra una fase clarament pendular en la fase intermèdia del moviment, en canvi en les fases inicials i finals la trajectòria és plana, la qual cosa suposa més implicació del control muscular. I l'últim cas, la figura 4*h*, pertany a un moviment erràtic que realitza diversos bucles en la trajectòria del retrat de fase que suggereixen reversions del moviment.

Limitacions dels retrats de fase

Els investigadors han de tenir en compte que els retrats de fase, com totes les eines d'anàlisi, tenen les seves limitacions. En primer lloc, l'aspecte temporal es perd perquè els paràmetres de les coordenades (posició angular i velocitat angular) són tots dos representats independentment del temps. Tot i que, indirectament es podria observar el distanciament entre els punts en la corba de la gràfica i estimar el temps en funció de la freqüència de mostreig de les dades recollides. Aquesta absència de temps no permet verificar la seva coordinació amb els altres segments o articulacions. Per a l'anàlisi de les coordinacions que es produeixen en l'adquisició o perfeccionament de les habilitats motrius, hauríem de recórrer a altres eines de la TSD com l'angle de fase i la fase relativa contínua (Clark & Phillips, 1993; Kurz & Stergiou, 2002, 2004).

L'anàlisi també pot estar limitada perquè els retrats de fase siguin representacions bidimensionals d'un sistema que en realitat es comporta tridimensionalment. A més a més, segons el tipus de tasca que s'analitza, se sol donar preferència a avaluar els plans de moviment en què se succeeixen els moviments més importants, com el sagital en el cas de la locomoció o el balanceig en la barra fixa. Però no podem oblidar que les activitats en els diferents plans de moviment són importants quan es tracta de nens portadors d'alguna deficiència o quan es tracta de patrons que encara estan emergint (com és el cas de l'aprenentatge del balanceig). Encara que el pla frontal en la locomoció i el balanceig sigui de menor importància, en sistemes immadurs i atípics poden mostrar detalls de com els subjectes controlen i redueixen els moviments.

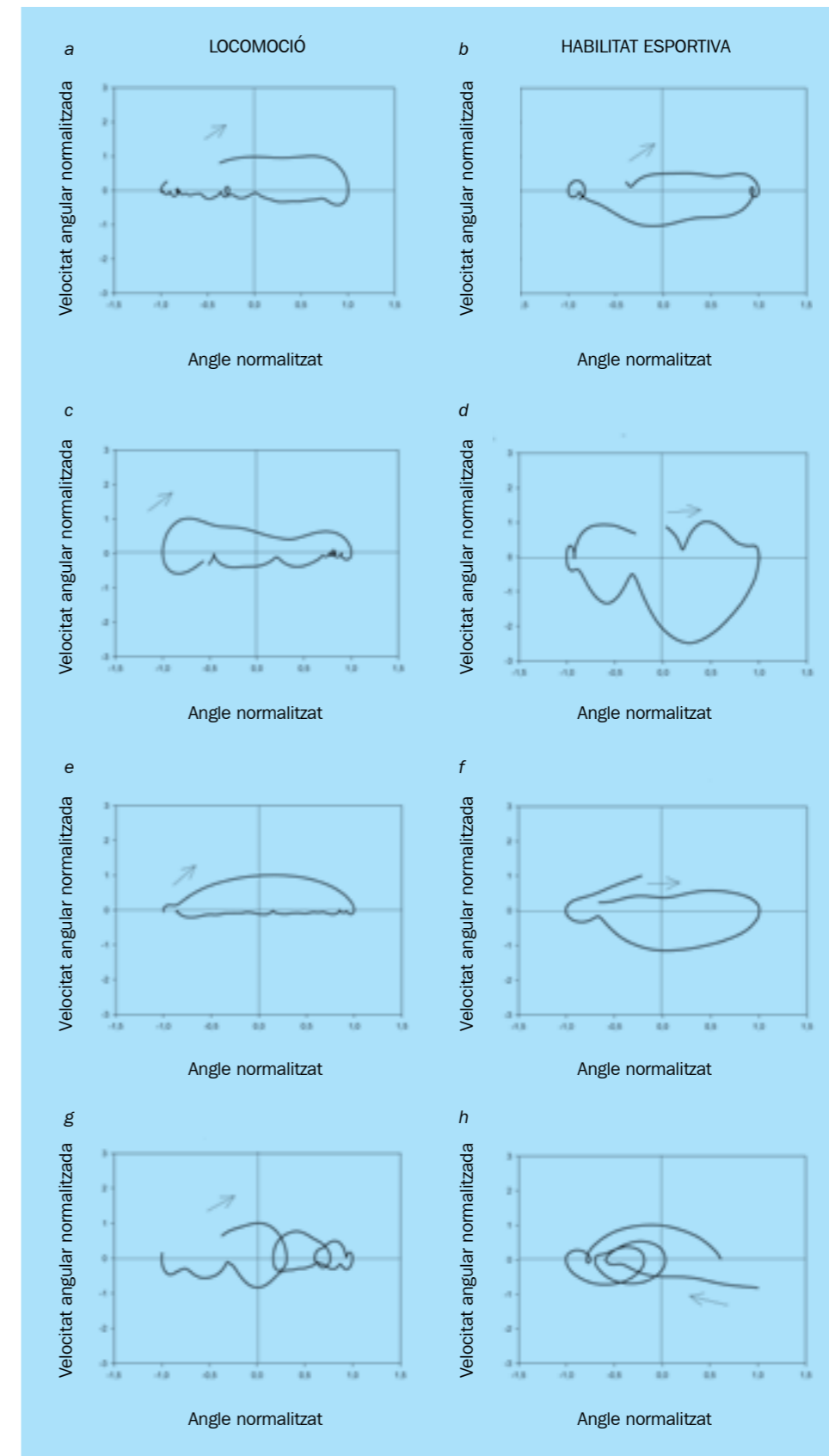


Figura 4
A l'esquerra, retrat de fase de la cuixa dels bebès portadors de la síndrome de Down, en un estadi prelocomotor, caminant sobre una cinta rodant: a) sense restriccions; c) superfície de velcro; e) i g) superfície amb protuberàncies de goma. A la dreta retrats de fase de l'angle cuixa-tronc de joves adults en procés d'aprenentatge del balanceig en barra

Una altra limitació de l'ús d'aquesta tècnica és la seva interpretació. Una interpretació del retrat de fase, a causa de la seva naturalesa qualitativa, acaba per patir ambigüitats causades pel subjectivisme de l'investigador en fer l'anàlisi. Per exemple, ¿quan es decideix si el control del moviment és pendular o balístic? No existeixen límits clars i objectius en aquesta decisió. A més a més, com qualsevol sistema obert, el sorgiment d'un comportament motor sol ser erràtic i aquests comportaments erràtics són més difícils de descriure. Per facilitar la interpretació dels retrats de fase i eliminar un cert grau de subjectivitat se solen complementar els estudis amb l'anàlisi de variables quantitatives, com per exemple la ràtio (Clark & Phillips, 1993; Kurz & Stergiou, 2002, 2004). Per últim, també ha de considerar-se que segons Kurz i Stergiou (2002, 2004) la normalització de les dades tendeix a distorsionar la dinàmica del comportament ja que la utilització de dos factors escalars diferents canvia l'aspecte dels retrats de fase (el desplaçament angular s'escala mitjançant el seu màxim). Una pèrdua de l'aspecte de la ràtio dels retrats de fase podria canviar el comportament no-lineal del segment. Així, per tant, és aconsellable realitzar representacions no normalitzades per evitar aquest problema i incloure les normalitzades per poder realitzar comparacions.

Conclusions

El principal objectiu d'aquest article va ser proporcionar als lectors una metodologia per a l'estudi del comportament motor basada en els principis de la TSD. L'eina presentada, els retrats de fase, va permetre reduir la multidimensionalitat que forma el comportament motor a un paràmetre de control (el traçat de la gràfica) i així facilitar l'anàlisi. Amb l'anàlisi qualitatiu dels retrats de fase vam ser capaços de mostrar quins eren els patrons generals de les habilitats analitzades (la marxa i el molí a la barra), així com poder discernir les singularitats de les característiques poblacionals (nens amb deficiències i sense deficiències) o individuals al llarg del procés d'aprenentatge (no iniciats i experts en l'habilitat). També, va facilitar l'observació de les adaptacions del comportament en diferents entorns (cinta rodant, terra, llit elàstic, velcro i goma) i sempre analitzant el procés en cada intent i no únicament el resultat. No obstant això, els retrats de fase no són representacions completes del comportament motor i hauríem de complementar-los amb: (1) l'anàlisi en altres plans del moviment; (2) l'anàlisi de la coordinació d'aquest segment o articu-

lació amb d'altres d'implicats en el moviment; (3) utilitzar variables quantitatives que faciliten la interpretació dels gràfics.

Referències

- Abraham, R. H. & Shaw, C. D. (1984). *Dynamics: The geometry of behavior*. Santa Cruz, California: Aerial Press.
- Arampatzis, A. & Bruggemann, G. P. (1999). Mechanical energetic processes during the giant swing exercise before dismounts and flight elements on the high bar and the uneven parallel bars. *Journal of Biomechanics*, 32(8), 811-20.
- 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 actions* (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. *Children 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 à la coordination experte. *Bulletin de Psychologie*, 62(4), núm. 502, 327-334
- Eng, J. J. & Winter, D. A. (1995). Kinetic analysis of the lower limbs during walking: what information can be gained from a three-dimensional model? *Journal of Biomechanics*, 28(6), 753-758.
- Foti, T.; Davids, J. R., & Bagley, A. (2000). A biomechanical analysis of gait during pregnancy. *The Journal of Bone and Joint Surgery*, 82-A(5), 625-632.
- Hiley, M. J. & Yeadon, M. R. (2003). Optimum technique for generating angular momentum in accelerated backward giant circles prior to a dismount. *Journal of Applied Biomechanics*, 19(2), 119-130.
- 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. doi: 10.1002/icd.425
- Kelso, J. A. S., Scholz, J. P., & Schöner, G. (1986). Non-equilibrium phase transitions in coordinated biological motion: Critical fluctuations. *Physics Letters A* (118), 279-284.
- 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, Illinois: Human Kinetics Publishers.
- 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, IL: Human Kinetics Publishers.
- Mauerberg-deCastro, E. & Angulo-Kinzler, R. (2001). Ventajas e limitações das ferramentas usadas para investigar padrões de compor-

- tamento motor segundo a abordagem dos sistemas dinamicos. A L. A. Teixeira (Ed.), *Avanços em Comportamento Motor* (pàg. 62-87). Sao Paulo, Brasil: Movimiento.
- 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.
- Newell, K. M. (1986). Constraints on the development of coordination. A M. G. Wade & H. T. A. Whiting (Eds.), *Motor development in children: Aspects of coordination and control* (pàg. 341-360). Doedrecht, The Netherlands: Martinus Nijhoff Publishers.
- Polk, J. D., Spencer-Smith, J., DiBerardino, L., Ellis, D., Downen, M., & Rosengren, K. S. (2008) Quantifying variability in phase portraits: application to gait ontogeny. *Infant Behavior & Development*, 31(2), 302-306.
- Prince, F., Corriveau, H., Hébert, R., & Winter, D. A. (1997). Gait in the elderly. *Gait and Posture*, 5, 128-135.
- Riera, J. (2005). *Habilidades en el deporte*. Barcelona, Spain: Editorial INDE .

- Schmidt, R. A. (1982). *Motor control and learning: a behavioral emphasis*. Champaign, IL: Human Kinetics Publishers.
- 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, MA: 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.
- 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.