

Repercussions de la teoria dels sistemes dinàmics en l'estudi de la motricitat humana

CARLOTA TORRENTS*

Professora d'Expressió Dinàmica.
INEFC- Lleida

NATÀLIA BALAGUÉ**

Professora de Fisiologia.
INEFC Barcelona

Correspondència amb autores

* carlotat@inefc.es

** nbalague@gencat.net

Resum

A partir de 1980, la teoria dels sistemes dinàmics va començar a aplicar-se a l'estudi de la motricitat humana, concretament a la comprensió de la coordinació de moviments cíclics, que difícilment podien ser explicats en el marc de l'existència de programes motors. Els resultats dels primers estudis van mostrar que l'organisme humà és un sistema dinàmic complex que presenta principis d'organització similars a qualsevol altre sistema dinàmic. Posseeix estats que l'atreuen, i es produeixen transicions d'un estat a un altre en funció de la forma en què aquest sistema interactua i s'autoorganitza amb l'entorn. En les transicions es produirà una pèrdua d'estabilitat i apareixeran les denominades fluctuacions crítiques. Aquests fenòmens es van estudiar durant l'execució de tota mena de tasques cícliques i posteriorment de tasques acícliques i de cooperació-oposició entre persones. Aquestes investigacions van influir en les teories d'aprenentatge i control motor i en les ciències de l'activitat física i l'esport.

Paraules clau

Sistema dinàmic, Autoorganització, Coordinació.

Abstract

Effects of the Dynamic Systems Theory on the study of human motricity

Since 1980, Dynamic Systems Theory has been applied to the study of human motricity, specially to the understanding of cyclic movements coordination. These kind of movements couldn't be just explained with the theories based on motor programs. Results showed how the human organism is a dynamic complex system that presents typical organizing principles of complex systems. They have attractor states, and transitions between states are produced when interact and self-organize with the environment. During transitions, stability will decrease and critical fluctuations will appear. These phenomena have been studied during the execution of cyclic tasks and also to non-cyclic and cooperation-opposition between persons tasks. These investigations will affect motor control and learning and Sport Sciences.

Key words

Dynamical systems, Self-organisation, Coordination.

Introducció

Durant el segle xx van sorgir diverses teories que van provocar un canvi substancial en multitud de branques de la ciència. La concepció dels organismes vius com un tot que interactua amb l'entorn i el desenvolupament d'equacions que poden descriure el comportament dels éssers vius han afectat el coneixement d'àrees tan distintes com les matemàtiques, la física, la psicologia, o l'economia. Aquestes teories ja no se centraran en la reducció dels sistemes en components més petits, sinó que els interpretaran de forma integral centrant-se en els principis bàsics de la seva organització. Aquests principis són sovint comuns per a qualsevol tipus de sistemes, i concretament en els sistemes

dinàmics complexos, entre els quals es troben tots els sistemes vius, es donarà el fenomen de l'autoorganització, que els caracteritzarà amb formes de comportament semblants.

Una de les teories sorgides és l'anomenada teoria dels sistemes dinàmics (TSD) i, malgrat que es considera matemàtica, els seus conceptes i tècniques s'apliquen a un ampli espectre de fenòmens (Abraham i Shaw, 1992; Capra, 1996). La TSD aplicada als sistemes vius es pot definir com una teoria del canvi, que pretén capturar, estudiar i entendre les transicions estructurals i de comportament que ocorren en aquests sistemes amb el seu entorn i ha estat ràpidament adoptada per a descriure els mecanismes de progressió i desenvolupament humans,



Figura 1

La figura de l'esquerra mostra la posició inicial de la tasca sobre la qual es va confeccionar el model HKB. La central mostra el moviment antifase, i la de la dreta el moviment en fase.

igual com per a estudiar el fenomen de la coordinació motriu (Corbetta i Vereijken, 1999; Newell i Molenaar, 1998).

Una de les figures més representatives d'aquesta línia d'investigació ha estat J.A. Scott Kelso, i la seva obra apareix esmentada pràcticament a tots els estudis posteriors de control motor que apliquen la TSD. En 1980, Kugler, Kelso i Turvey van iniciar aquesta nova línia (Kugler, Kelso i Turvey, 1980) tot explicant la fenomenologia dels sistemes biològics en termes de regularitats dels sistemes dinàmics no lineals, i no només per l'acció del control intencional. Fins aleshores, predominava la hipòtesi de l'existència de programes motors o de generadors centrals de patrons emmagatzemats en el sistema nerviós per explicar la coordinació del moviment en els éssers humans i en animals. Però les teories sobre control motor que es basaven en el concepte del programa motor van començar a ser criticades per diferents causes. En primer lloc, no s'expliquen amb un llenguatge comú a altres ciències, com ara la biologia o la física, cosa que dificulta la recerca de relació entre tots els elements que componen el sistema. En segon lloc, la naturalesa complexa de l'ésser humà requereix més flexibilitat i adaptabilitat que el que permet un programa motor i aquest, a més a més requereix el coneixement previ del resultat pretès (Beek, Peper i Stegeman, 1995; Schmidt i Fitzpatrick, 1996; Schöner i Kelso, 1988). Per això Kugler i els seus col·laboradors es van plantejar l'estudi dels patrons de coordinació que emeriran en els sistemes biològics. En aquest marc teòric es van realitzar experiments sobre la coordinació entre diferents membres de l'ésser humà (Kelso, 1984), i en 1985 es va publicar el treball experimental de Haken,

Kelso i Bunz (1985) amb la confecció d'un model teòric no lineal (model HKB) que explicava el comportament coordinatiu. La tasca utilitzada per a aquesta finalitat, ideada per Kelso, consistia a moure rítmicament els dits índexs de cada mà al ritme d'un metrònom. S'iniciava el moviment de forma paral·lela, activant els músculs homòlegs alternativament, és a dir, amb una relació entre els dos membres denominada antifase. Es va demanar als subjectes que no modifiquessin el moviment de forma conscient si notaven que el patró estava a punt de canviar, sinó que deixessin que els dits es moguessin de la forma més confortable. A cada pulsació del metrònom, els subjectes havien de finalitzar un cicle complet, i la freqüència es va anar incrementant progressivament. Es va observar que a partir d'un valor crític de freqüència, el moviment canviava espontàniament i els dits començaven a moure's en fase, i que s'activaven els músculs homòlegs de forma simultània (vegeu *fig. 1*). Aquest canvi de patró no es produïa quan es realitzava l'experiment en sentit invers, és a dir, començant amb una relació entre els dits en fase. Així, es va mostrar una transició involuntària en la coordinació rítmica de dos membres, demostrant que existeixen dos patrons estables (o atractors) a freqüències baixes i només un a partir d'un valor crític de la freqüència. El canvi de patró no serà instantani, sinó que en la zona prèvia es produiran fluctuacions en el moviment, les anomenades fluctuacions crítiques. Prèviament a la transició, es pot tornar a l'atractor després d'una pertorbació externa malgrat la pèrdua d'estabilitat, i les fluctuacions es convertiran en una variable predictora de la proximitat del punt de transició i de l'estabilitat de l'atractor (Court i cols., 2002).

A partir d'aquest experiment, els resultats de la investigació es van estendre a tota l'àrea de l'aprenentatge i control motor. Inicialment, es va continuar estudiant l'organització dels patrons coordinatius cíclics, bé de forma individual o en tasques de col·laboració o oposició, però ràpidament es van aplicar els mateixos principis d'organització a l'estudi de moviments acíclics i també a l'aprenentatge de multitud de tasques.

Aplicació de la TSD a l'estudi de la coordinació de moviments cíclics

Kelso va continuar experimentant sobre aquest concepte, i ho va voler ampliar amb l'estudi de la coordinació entre més de dos membres, com és el cas d'una cama i un braç (Kelso i Jeka, 1992). Es va observar la mateixa dinàmica, basada en estats estables de coordinació amb transicions espontànies. Altres autors també ho van aplicar a la coordinació entre diferents membres (Baldissera, Cavallari i Civashi, 1982; Fitzpatrick, Schmidt i Lockman, 1996) o entre diferents parts del mateix membre (Carson i cols., 1995). També es va aplicar a la coordinació entre un braç i un estímul visual (Byblow i cols., 1995; Wimmers Beek i Wieringen, 1992) o sonor (Calvin i Temprado, 2003).

La tasca proposada per Kelso, de la qual es va reallitzar el model HKB, malgrat la seva relativa simplicitat, presenta moltes similituds amb els patrons rítmics de locomoció, que també són estudiats sota aquesta perspectiva. El patró de caminar i de córrer és distint en tots els animals, i l'un o l'altre sorgirà en funció de múltiples condicionaments i les seves relacions. Són coneguts els experiments amb gats i cavalls que modifiquen el patró de locomoció a partir d'un valor crític de velocitat adoptant el més "econòmic" energèticament no sense abans haver passat per una transició caracteritzada per la presència de fluctuacions crítiques del patró (Kelso, 1999). S'han realitzat també estudis amb éssers humans, que analitzen la influència de la dinàmica del sistema i de la dinàmica del mitjà, i Diedrich i Warren (1995) han observat un increment de variabilitat en la transició.

Anys enrere, l'estudi de la locomoció estava dominat pel concepte del programa motor, creat pel sistema nerviós i executat pel sistema musculoesquelètic. La neurociència es va centrar a explicar de quina forma l'activitat

del sistema nerviós causa el moviment en el cos, i la biomecànica en la forma en què la dinàmica del sistema musculoesquelètic respon als estímuls neuronals. Però quin era la causa i quin era l'efecte? El moviment és fruit de la interacció entre el sistema musculoesquelètic, el sistema nerviós i l'entorn, i els estats d'atracció sorgiran de la interacció de tot el sistema.

La principal repercussió de l'estudi d'aquest tipus de fenòmens des d'aquesta perspectiva és segurament que els investigadors comencen a interessar-se per la forma en què s'organitza l'organisme en moviment i per la recerca de principis comuns d'organització per a tot tipus de sistemes. Es descarta el concepte de programa motor per a explicar l'execució de moviments cíclics i es planteja l'aparició de fluctuacions en les zones de transició com un possible senyal de la no linealitat del sistema, així com una mostra que els anomenats comunament errors d'execució poden ser necessaris i imprescindibles per a produir un canvi en el comportament del sistema.

De forma paral·lela als estudis sobre coordinació entre membres d'una mateixa persona, apareixen moltes investigacions en les quals s'analitza la coordinació entre membres de persones distintes. Considerem aquest tipus de tasques de molta importància a l'hora d'explicar les aplicacions de la TSD, atès que representen un exemple de tasques en les quals no hi ha una estructura cognitiva comuna que pugui produir la coordinació motriu. El fet que apareguin fenòmens similars als vistos durant el moviment d'una persona, com les transicions entre fases o les fluctuacions crítiques, fa més palès encara que aquests fenòmens no són fruit de l'existència d'un programa motor. Igual que en els sistemes físics, no hi pot haver un programa comú entre dues persones. Un exemple d'acoblament entre dos sistemes físics és el de dos rellotges de paret col·locats pròxims l'un de l'altre i amb els pèndols oscil·lant en fases distintes. La vibració de la paret provocarà una interacció entre tots dos rellotges fins que oscil·lin en mode en fase o antifase, tot arribant així a un estat d'equilibri o atractor. Estudis amb persones mostren un comportament similar quan es demana als subjectes que facin oscil·lar un membre o un pèndol alhora que una altra persona mentre es puguin veure mútuament. Schmidt, Carello i Turvey (1990) van demostrar una transició d'un estat de coordinació antifase a un en fase en una tasca en la qual els subjectes havien de moure la cama o fer oscil·lar un pèndol amb el canell coordinadament i en manera

antifase amb la del company i a una freqüència determinada per un metrònom. L'augment de la freqüència de forma progressiva va provocar el mateix efecte que el famós estudi de Kelso, la impossibilitat de mantenir la coordinació antifase i la transició a una coordinació en fase, però no viceversa, i també l'aparició de fluctuacions crítiques.

L'estudi de la interacció entre persones té clares aplicacions en la investigació esportiva. Tots els esports en què es realitzen moviments amb música i en grup poden ser objecte d'aquesta mena d'estudis, com és el cas de la gimnàstica rítmica o aeròbica o la natació sincronitzada. Aquests esports estaran constituïts per tasques en les quals l'objectiu és la coordinació interpersonal en ella mateixa, a més a més d'acoblarse a una freqüència externa marcada pel ritme de la música. No obstant això, la majoria d'esports d'equip estaran constituïts per tasques en les quals la coordinació entre els jugadors no serà l'objectiu, com passava en la tasca de l'oscil·lació del pèndol a la freqüència més confortable. L'estudi de la interacció entre els subjectes pot explicar comportaments que es donen en el joc, tant en tasques de cooperació com d'oposició. En aquesta línia, McGarry i cols. (2002) van estudiar diversos esports de cooperació-oposició, com ara l'esquai o el futbol, per tal de demostrar que aquests es poden analitzar com a sistemes dinàmics complexos, atès que presenten el comportament dinàmic característic d'aquests.

Aplicacions de la TSD a l'estudi de moviments acíclics

Els estudis que hem esmentat anteriorment se centren eminentment en tasques cícliques. Probablement això sigui conseqüència de la major dificultat que presenten les tasques no cícliques per a identificar els estats d'atracció a causa de la seva curta durada i a les variables que caracteritzen l'estat del sistema. No obstant això, Schöner va estudiar una tasca acíclica des d'aquesta perspectiva ja en 1990 (Schöner, 1990), i s'han continuat estudiant i s'han observat senyals de no linealitat en aquest tipus de tasques, com ara durant l'execució de salts verticals (Torrents, 2005).

En tots els moviments acíclics la intenció serà un factor influent, per tal com el moviment ha d'iniciar-se en un moment concret. La intenció es tractarà com una informació del comportament, i la dinàmica intrínseca

es trobarà determinada per la postura inicial i per l'objectiu del moviment. Des d'aquesta perspectiva s'han estudiat diferents tasques, especialment d'intercepció d'objectes o d'acoblament de la percepció amb l'acció (McLeod i Dienes, 1993; Peper i cols., 1994; McBeath Shaffer i Kaiser, 1995; Montagne i cols., 2000). També s'han estudiat algunes tasques esportives, com ara la correguda prèvia al salt de longitud (Buekers, Montagne i Laurent, 1999), caracteritzada per una reducció de la variabilitat de la distància mitjana de cada pas, o el servei de voleibol. Davids i cols. (1999) ho van utilitzar com a tasca que requereix un alt grau de coordinació entre moltes parts rellevants del sistema de moviment i necessita que l'acció es coordini espaciotemporalment amb la informació dels condicionaments imposats per la pilota. Van analitzar el desplaçament i les sèries temporals de la coordinació entre els membres durant el servei en jugadors experts. Van observar una forta relació en fase entre els parells d'articulacions adjacents (maluc-muscle, muscle-colze i colze-canell); mostraven estructures organitzades sinèrgicament que es movien en la mateixa direcció en el mateix moment de la transició i amb perfils de velocitat similars. Temprado (2000) va comparar aquest patró amb el que tenen aprenents novells i va observar que, en relació amb la posició de la pilota, els que servien millor mantenien una consistència espacial i temporal en la col·locació vertical de la pilota. L'anàlisi de la relació entre la informació de la pilota en el punt més alt i l'inici del moviment del maluc endavant van revelar que estaven molt acoblats i eren molt poc variables. L'acció de l'inici del cop i la bola en el punt més alt constituirà un estat atractor, un "sistema de servei", i la pràctica de les diferents fases sense dividir-les permetria a l'aprenent explorar les relacions emergents entre els condicionaments físics i informacionals de la tasca i trobar-hi relacions individuals. Si es practica de forma descomposta, com sol fer-se en molts exercicis enfocats a l'optimització de la tècnica esportiva, l'aprenent explorarà la regió incorrecta de l'espai.

En resum, l'estudi de les tasques acícliques va mostrar que els principis sorgits de la TSD es poden aplicar a un gran ventall de tasques. Entre aquests principis hi destaca l'autoorganització del sistema amb el seu entorn, és a dir, l'organització sinèrgica de tot l'organisme condicionat per tots els elements de l'entorn amb què interactua. A partir d'aquestes conclusions, s'ha proposat variar les condicions de l'entorn durant l'aprenentatge

per tal d'afavorir l'autoorganització del sistema en la direcció de l'aprenentatge. Un exemple d'aquesta variació podria ser la utilització de marques a terra que ressaltin punts importants de la tasca. Els inexperts seran incapaces de detectar la informació rellevant i útil del medi, i tindran problemes per produir el patró de moviment. Amb les marques, en canvi, els aprenents seran més susceptibles a la informació que els proporciona l'entorn (Buekers i cols., 1999).

L'aprenentatge d'accions motrius des de la perspectiva de la TSD

En el model HKB es demanava als subjectes participants que no intervinguessin voluntàriament en el canvi de patró motor, evitant per tant la participació de la intenció, condicionament imprescindible en els processos d'aprenentatge. De fet, aquesta serà la principal característica que distingirà la coordinació biològica de la dels sistemes inanimats, la presència de la intenció, de la consecució d'un objectiu. Scholz i Kelso (1990) van demostrar que la manipulació de la intenció podia modificar la dinàmica de la coordinació, i fins i tot evitar una transició sota determinades condicions. Zanone i Kelso (1992) van estudiar diferents subjectes que havien de practicar el moviment oscil·latori dels dits amb una relació fase de 90°, i, després de cinc dies de pràctica, aquest patró coordinatiu va presentar les característiques d'un atractor. S'havia modificat així la distribució dels atractors. Es veu, d'aquesta forma, un canvi en el concepte tradicional de l'aprenentatge, que passarà a ser una modificació específica d'alguna cosa que ja existeix en els models de comportament en la direcció de la tasca a aprendre. Tota la distribució dels atractors es modifica i es reconstrueix (es passa d'un estat organitzat d'un sistema a un altre) i la dificultat del procés variarà en funció de si la tasca a aprendre coopera o competeix amb els estats que atreuen el sistema prèviament.

També es van analitzar les fluctuacions que es produeixen durant l'aprenentatge. Schmidt i cols. (1992) van estudiar l'aprenentatge de l'oscil·lació de dos pèndols (un a cada mà) amb una freqüència de 2:1 durant 12 sessions, i van trobar una reducció de les fluctuacions i de la desviació de la freqüència escollida al llarg del període de pràctica. Tenint en compte

aquests resultats, podem suposar que la mesura de les fluctuacions pot ser una mesura de l'estabilitat d'un aprenentatge o de la dificultat que presenta la tasca per al subjecte.

En aquest tipus d'experiments també ha estat valorada la contribució que tenen en l'aprenentatge els condicionaments propis del sistema (corresponents al sistema neuromuscular-esquelètic) i els propis de la tasca o de l'entorn, i s'ha observat que tots dos condicionaments influeixen en l'aprenentatge (Carson i cols., 1996).

Walter i Swinnen (1992) van estudiar l'aprenentatge d'una tasca coordinativa asimètrica i van realitzar l'estratègia inversa a la proposada per la tasca del model HKB. En aquesta tasca, l'augment de la freqüència produïa una transició del moviment en mode antifase al mode en fase, de la qual cosa es dedueix que baixar la freqüència facilitarà l'aprenentatge de la transició inversa. Walter i Swinnen van observar que a mesura que es va progressant, es pot augmentar la freqüència dels moviments i aprendre així tasques que al principi no atreuen el sistema. No cal que el paràmetre sigui la freqüència, però aquesta és una estratègia molt utilitzada per aprendre moviments esportius. Es realitza primer a menys velocitat i es va incrementant a mesura que progressa l'aprenentatge.

Aquesta concepció de l'aprenentatge i del control motor representa una clara evolució en relació amb la perspectiva del programa motor, i va portar a diferenciar clarament els conceptes d'estabilitat i variabilitat. L'experimentació sorgida arran de la perspectiva dinàmica mostra l'estabilitat dels patrons coordinatius, alhora que la seva flexibilitat en funció dels components que hi actuen i les seves propietats biomecàniques. Els patrons coordinatius seran estables, però també variables (Kelso, 1997). La perspectiva dinàmica enriqueix l'anterior en incloure propietats que no poden explicar-se amb la teoria de la programació motriu, com ara la presència de fluctuacions, que prediuen el canvi entre estats de coordinació, o les bifurcacions o l'aprenentatge "a salts". També aquesta perspectiva ens ajuda a comprendre l'aprenentatge de qualsevol habilitat, en qualsevol etapa de l'aprenentatge o de l'evolució de l'ésser humà, tot integrant l'entorn en el procés, la individualitat de les relacions que es donen entre l'aprenent i l'entorn, i la influència de les condicions inicials, és a dir, les habilitats i competències de què ja disposa el subjecte en el moment de sotmetre's a l'aprenentatge (Riera, 2005).

Conclusions

Els conceptes que sorgeixen de la TSD poden aplicar-se a l'estudi de l'ésser humà en moviment. L'organisme és un sistema dinàmic complex que s'auto-organitza per moure's, i presenta les propietats de tot sistema d'aquestes característiques. Té estats que l'atreuen i es produeixen transicions d'un estat a un altre en funció de la forma en què s'interactua amb el medi. En les transicions es produeix una pèrdua d'estabilitat i apareixen fluctuacions crítiques que anticipen el canvi. Aquests principis s'han mostrat durant l'execució de tasques de tota mena, i el seu aprenentatge estarà condicionat per la presència d'aquests atractors i per la necessària desestabilització d'aquests per poder aprendre i crear-ne de nous. La nova teoria suposa un canvi en la comprensió dels mecanismes relacionats amb el moviment humà, i qüestiona definitivament la validesa del conegut concepte del programa motor. També suposa un repte a l'hora d'optimitzar els processos d'adaptació i aprenentatge.

Agraïments

Les autores agraeixen la col·laboració en la revisió d'aquest article del Dr. Joan Riera.

Bibliografia

- Abraham, R. H. i Shaw, C. S. (1992). *Dynamics- The geometry of behaviour*. California: Addison-wesley publishing company.
- Baldissera, F.; Cavallari, P. i Civashi, P. (1982). Preferential coupling between voluntary movements of ipsilateral limbs. *Neuroscience Letters*, 34, 95-100.
- Beek, P. J.; Peper, C. E. i Stegeman, D. F. (1995). Dynamical models of movement coordination. *Human Movement Science*, 14, 573-608.
- Byblow, W. D.; Chua, R.; Bysouth-Young, D. F. i Summers, J. J. (1999). Stabilisation of bimanual coordination through visual coupling. *Human Movement Science*, 18, 281-305.
- Buekers, M. J.; Montagne, G. i Laurent, M. (1999). Is the player in control, or is the control somewhere out of the player? *International Journal of Sport Psychology*, 30, 490-506.
- Calvin, S. i Temprado, J. J. (2003). Coalition of informational and neuromuscular constraints in a synchronization task. W. I. Schöllhorn, C. Bohn, J. M. Jäger, H. Schaper i M. Alichmann. *European Workshop on Movement Science. Mechanics, Physiology, Psychology*. Köln: Sport Buch Strauss.
- Capra, F. (1996). *La trama de la vida*. Barcelona: Anagrama.
- Carson, R. G.; Goodman, D.; Kelso, J. A. S. i Elliot, D. (1995). Phase transitions and critical fluctuations in rhythmic coordination of ipsilateral hand and foot. *Journal of Motor Behavior*, 27, 211-224.
- Carson, R. G.; Byblow, W. D.; Abernethy, B. i Summers, J. J. (1996). The contribution of inherent and incidental constraints to intentional switching between patterns of bimanual coordination. *Human Movement Science*, 15, 565-589.
- Corbetta, D. i Verijken, B. (1999). Understanding development and learning of motor coordination in sport: the contribution of dynamic systems theory. *International Journal of Sport Psychology*, 30, 507-530.
- Court, M. L. J.; Bennett, S. J.; Williams, A. M. i Davids, K. (2002). Local stability in coordinated rhythmic movements: fluctuations and relaxation times. *Human Movement Science*, 21, 39-60.
- Davids, K.; Bennett, S.; Handford, C. i Jones, B. (1999). Acquiring coordination in self-paced, extrinsic timing tasks: a constraints-led perspective. *International Journal of Sport Psychology*, 30, 437-461.
- Diedrich, F. J. i Warren, W. H. (1995). Why change gaits? Dynamics of the walk-run transition. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 21(1), 183-202.
- Fitzpatrick, P.; Schmidt, R. C. i Lockman, J. J. (1996). Dynamical patterns in the development of clapping. *Child Development*, 67(6), 2691-2708.
- Haken, H.; Kelso, J. A. S. i Bunz, H. (1985). A theoretical model of phase transitions in human hand movements. *Biological Cybernetics*, 51, 347-356.
- Kelso, J. A. S. (1984). Phase transitions and critical behavior in human bimanual coordination. *American Journal of Physiology: Reg. Integ. Comp.* 15, R1000-R1004.
- (1997). Relative timing in brain and behavior: some observations about the generalized motor program and self-organized coordination dynamics. *Human Movement Science*, 16, 453-460.
- (1999). *Dynamic Patterns*. USA: Massachusetts Institute of Technology.
- Kelso, J. A. S. y Jeka, J. J. (1992). Symmetry breaking dynamics of human interlimb coordination. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 18(3), 645-668.
- Kugler, P. N.; Kelso, J. A. S. i Turvey, M. T. (1980). On the concept of coordinative structures as dissipative structures: I. Theoretical lines of convergence. G. E. Stelmach & J. Requin, *Tutorials in Motor Behavior*. Amsterdam.
- McBeath, M. K.; Shaffer, D. M. i Kaiser, M. K. (1995). How baseball outfielders determine where to run to catch fly balls. *Science*, 268, 569-573.
- McGarry, T.; Anderson, D. I.; Wallace, A.; Hughes, M. D. i Franks, I. M. (2002). Sport competition as a dynamical self-organizing system. *Journal of Sports Sciences*, 20, 771-781.
- McLeod, P. i Dienes, Z. (1993). Running to catch the ball. *Nature*, 362, 23.
- Montagne, G.; Fraise, F.; Ripoll, H. i Laurent, M. (2000). Perception-action coupling in an interceptive task: First-order time-to-contact as an input variable. *Human Movement Science*, 19, 59-72.
- Newell, K. M. i Molenaar, P. C. (1998). *Applications of nonlinear dynamics to developmental process modeling*. New Jersey: Lawrence Erlbaum Associates.

- Peper, L.; Bootsma, R. J.; Mestre, D. R. i Bakker, F. C. (1994). Catching balls: how to get the hand to the right place at the right time. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 20(3), 591-612.
- Riera, J. (2005). *Habilidades en el deporte*. Barcelona: Inde publicaciones.
- Schmidt, R. C.; Carello, C. i Turvey, M. T. (1990). Phase transitions and critical fluctuations in the visual coordination of rhythmic movements between people. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 16(2), 227-247.
- Schmidt, R. C. i Fitzpatrick, P. (1996). Dynamical perspective on motor learning. H. N. Zelaznik *Advances in motor learning and control*. Champaign, Il: Human Kinetics.
- Schmidt, R. C.; Treffner, P. J.; Shaw, B. K. i Turvey, M. T. (1992). Dynamical aspects of learning an interlimb rhythmic movement pattern. *Journal of Motor Behavior*, 24(1), 67-83.
- Scholz, J. P. i Kelso, J. A. S. (1990). Intentional switching between patterns of bimanual coordination depends on the intrinsic dynamics of the patterns. *Journal of Motor Behavior*, 22, 98-124.
- Schöner, G. (1990). A dynamic theory of coordination of discrete movement. *Biological Cybernetics*, 63, 257-270.
- Schöner, G. i Kelso, J. A. S. (1988). Dynamic patterns generation in behavioral and neural systems. *Science*, 239, 1513-1519.
- Temprado, J. J. (2000). Inter-joint coordination subserving the volley-ball serve: a dynamical approach to expertise. *Congres International de la SFPS- París INSEP 2000- Symposia*.
- Torrents, C. (2005). *La teoría de los sistemas dinámicos y el entrenamiento deportivo*. Tesis doctoral. Universitat de Barcelona.
- Wimmers, R. H.; Beek, P. J. i van Wieringen, P. C. W. (1992). Phase transitions in rhythmic tracking movements: A case of unilateral coupling. *Human Movement Science*, 11, 217-226.
- Walter, C. B. i Swinnen, S. P. (1992). Adaptive tuning of interlimb attraction to facilitate bimanual decoupling. *Journal of Motor Behavior*, 24(1), 95-104.
- Zanone, P. G. i Kelso, J. A. S. s. (1992). Evolution of behavioural attractors with learning: nonequilibrium phase transitions. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 18(2), 403-421.