



Dr. Mauro Lastrico – Dra. Laura Manni

De las cadenas musculares a los sistemas complejos

1. Una evolución histórica y científica

El concepto de "cadenas musculares" tiene raíces históricas que preceden en muchas décadas su sistematización clínica moderna. En 1875, Reuleaux introdujo el concepto de "cadena cinética" como sistema mecánico donde el movimiento de un segmento tiene determinadas relaciones con cada otro segmento del sistema.

Sucesivamente, en 1924, Baeyer definió el "sistema articular cinemático", transformando la idea de segmentos anatómicos simples en componentes de un sistema más complejo: "la cadena muscular".

Fue sin embargo en 1947 que una fisioterapeuta francesa, Françoise Mézières, transformó estas intuiciones teóricas en una revolución clínica.

A través de su "observación capital", Mézières descubrió que los numerosos músculos dorsales se comportaban como un solo músculo, demasiado fuerte y demasiado corto.

Esta observación la llevó a formular el concepto moderno de cadena muscular, entendida como grupo de músculos poliarticulares cuyas inserciones se "superponen como las tejas de un techo", formando sistemas funcionales integrados.

La metodología de Mézières se difundió rápidamente e inspiró numerosos desarrollos sucesivos.

En los años siguientes, otros investigadores como Souchard, Busquet y Myers elaboraron ulteriores clasificaciones y aplicaciones de las cadenas musculares, cada uno aportando contribuciones específicas a la comprensión de estos sistemas interconectados.

1.2 Del empirismo a la ciencia

La evolución del concepto de cadenas musculares muestra el pasaje gradual de intuiciones empíricas a explicaciones científicas.

Las observaciones de Mézières estaban basadas en evidencias clínicas más que en modelos matemáticos. Sus "leyes" encontraron explicación científica solo tiempo después, a través de la aplicación de la física y de las matemáticas a los sistemas biológicos.

Este proceso evolutivo refleja cómo la ciencia progresa: de la observación empírica a la comprensión teórica, de la teoría a la validación experimental.

Los principios que Mézières había intuido clínicamente encuentran confirmación en las leyes físicas que gobiernan los sistemas complejos.

1.3 El salto conceptual: de los sistemas lineales a los sistemas complejos

El presente capítulo afronta el pasaje del concepto de cadenas musculares hacia una comprensión más amplia de los sistemas complejos.

Mientras las primeras teorizaciones de las cadenas musculares se basaban en modelos interpretativos lineales, la moderna ciencia de los sistemas complejos ofrece herramientas matemáticas y físicas para comprender el comportamiento del sistema músculo-esquelético.

La matemática no lineal y la teoría de los sistemas complejos explican fenómenos que la visión tradicional no lograba interpretar: cómo pequeñas disfunciones puedan generar patologías difusas, por qué las compensaciones sean a menudo imprevisibles, cómo el cuerpo logre desarrollar estrategias adaptativas.

Estos conceptos representan la aplicación de principios físicos avanzados al sistema músculo-esquelético.

1.4 Los sistemas complejos: definición y escala de observación

Un sistema complejo puede ser definido como cualquier "cosa" compuesta por más de un elemento. Esta definición encierra una característica esencial: la naturaleza escalar e infinitamente divisible de la complejidad.

El concepto de sistema complejo funciona como un reloj de arena abierto, expandiéndose tanto hacia lo micro como hacia lo macro.

Cada individuo representa un sistema complejo respecto a sus propios aparatos - visceral, neurológico, músculo-esquelético, etc.

Cada uno de estos aparatos es a su vez descomponible en subsistemas: el sistema músculo-esquelético se divide en distritos, cada distrito en articulaciones, cada articulación en componentes específicos, y así hacia lo infinitamente pequeño.

La misma lógica se aplica en dirección opuesta: el individuo deviene subsistema cuando se quiere estudiar el comportamiento de una población, que a su vez deviene subsistema en el análisis de fenómenos continentales o planetarios, procediendo hacia lo infinitamente grande hasta comprender el universo entero.

Solo en la física cuántica existen elementos que no son ulteriormente divisibles.

Para la física general cualquier sistema puede ser descompuesto en elementos más pequeños: es solo cuestión de disponer de las herramientas adecuadas para hacerlo.

Esta característica de infinita divisibilidad y recomposición representa una de las propiedades de los sistemas complejos.

2. Las cuatro características de los sistemas complejos

Lo que comúnmente viene llamado "cadena muscular" representa en realidad un ejemplo de sistema complejo, gobernado por leyes físicas precisas y previsibles.

No se trata de sustituir los conceptos clásicos, sino de proporcionarles una base científica que explique su funcionamiento y amplíe las posibilidades aplicativas.

3. Primera característica: interdependencia e interacción de los elementos

En un sistema complejo todos los elementos que lo componen son interdependientes e interactuantes.

Es el clásico ejemplo de la telaraña: actuando sobre una porción es toda la telaraña la que debe adaptarse a la modificación.

Aplicando este principio al sistema músculo-esquelético, cualquier acción segmentaria localizada en un distrito corpóreo determinará adaptaciones en los distritos adyacentes.

Adaptaciones que podrían ser correctivas o de entidad desdeñable, pero podrían también ser agravantes.

Profundizando ulteriormente el análisis, sabemos que si la acción distrital ocurre en sentido correctivo de los ejes esqueléticos pero determina el aumento de la energía del sistema - en el sentido del aumento del tono muscular - se verificarán agravamientos sistémicos superiores a la corrección obtenida.

3.1 Ejemplos clínicos de interdependencia

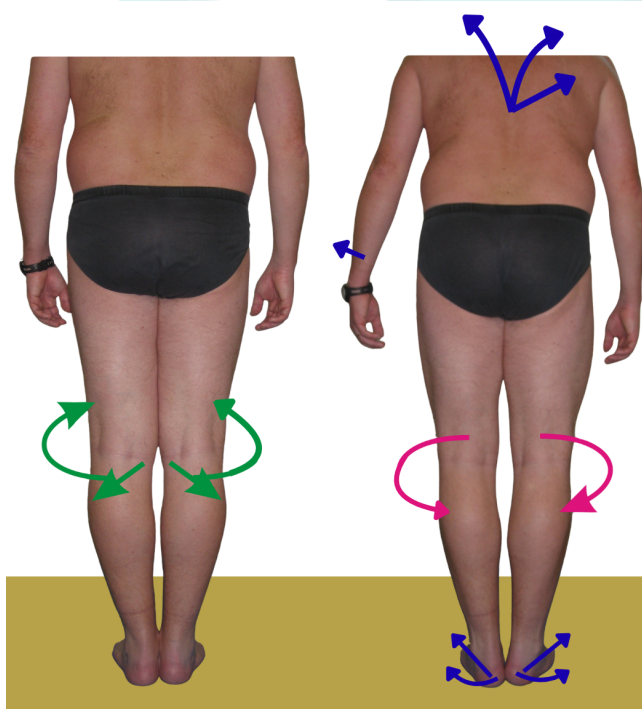


Fig. 01 - En habitual, foto a la izquierda, el paciente presenta una rotación interna de los miembros inferiores evidenciada por la proyección posterior de los cóndilos femorales mediales (flechas verdes). A la petición de corrección activa, foto a la derecha (flechas magenta), y a la corrección pasiva (no representada), se evidencian modificaciones de la configuración corpórea (flechas azules):

- flexión anterior del tronco y su lateralización
- abducción miembro superior;
- apertura de la base de apoyo con desplazamiento de la carga sobre el borde externo del pie;

con consiguiente mayor dificultad en el mantenimiento de la estación erecta y un aumento sistémico del tono muscular. En este caso los componentes agravantes sistémicos

derivados de la acción correctiva local son de mayor entidad respecto al efecto positivo de la corrección misma.

En el ejemplo precedente, la corrección local ha requerido la activación a alta intensidad de algunos grupos musculares. En el ejemplo siguiente, al contrario, la petición correctiva es de bajo gasto teórico de energía: la desrotación de los miembros superiores que debería ocurrir por la sola activación de los rotadores externos humerales.

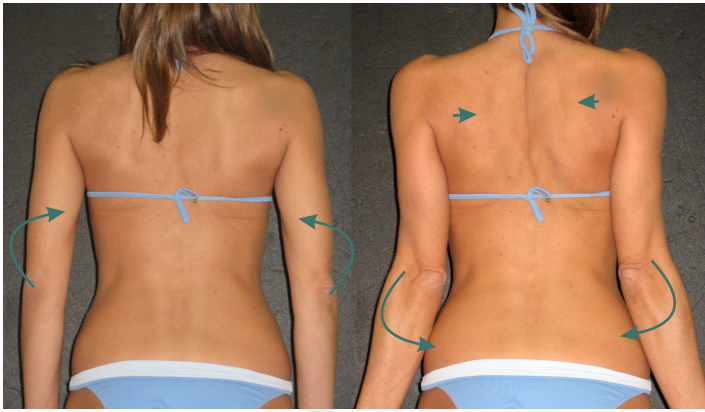


Fig. 02 - Foto a la izquierda: paciente en habitual en el que se evidencia la rotación interna de los húmeros. Foto a la derecha: viene requerida la rotación externa de los húmeros. Aunque no presentando problemáticas de hombro, la paciente activa en co-contracción con los rotadores externos otros grupos musculares que determinan esqueléticamente la aducción de las escapulas, con proyección anterior y en

compresión de las vértebras dorsales y la elevación del tono. También en este caso el agravamiento sistémico es superior a la corrección obtenida.

Es entonces posible que los intentos de auto-corrección - el padre que dice al hijo "ponte derecho", las auto-correcciones frente al espejo, las indicaciones segmentarias sobre la dinámica - escondan las insidias de agravamientos estructurales.

En consecuencia, también las intervenciones terapéuticas deberán ser moduladas para evitar la aparición de problemáticas "matemáticamente ciertas".

4. Segunda característica: comprensión sistémica necesaria

La comprensión del funcionamiento de un sistema complejo puede ocurrir exclusivamente considerando el sistema en su conjunto.

Esto significa que para interpretar el significado de las estrategias segmentarias tanto estáticas como dinámicas que el sistema pone en acto, es necesario observar las conexiones entre el patrón alterado distrital y los patrones globales.

Significa, entre otras cosas, que el síntoma puede ser expresión de un sufrimiento local, referido, o de una molestia sistémica.

Para individualizar el origen central de síntomas periféricos se basará en un análisis músculo-esquelético global, en la utilización de las tablas dermatoméricas y de las de inervación periférica; la ejecución de tests analíticos y sistémicos permitirá detectar las dominancias que interfieren en el balance muscular y distinguir entre acortamientos primarios y secundarios.

5. Tercera característica: habilidades emergentes y momentos sustitutivos

Un sistema complejo, en la persecución de sus propios objetivos, es capaz de generar soluciones no previsibles del examen de los elementos individuales.

Es capaz de generar "habilidades emergentes".

Esta tercera característica tiene consecuencias terapéuticas muy importantes.

Sustancialmente significa que al realizar una acción no vendrán necesariamente empleados solo los músculos anatómicamente prepuestos a la acción.

Tales músculos pueden ser sustituidos o acompañados por músculos que según un análisis vectorial de matemática lineal no deberían o no podrían entrar en juego.

Se determinan, es decir, momentos sustitutivos.

5.1 Los dos contextos de los momentos sustitutivos

Tales momentos se manifiestan en dos ocasiones principales:

5.2 Sustitución por optimización energética

De la física sabemos que los pares de fuerza respecto a las fuerzas individuales presentan la ventaja de ejecutar un mejor trabajo utilizando globalmente menor energía.

Casi todos los músculos tienen la posibilidad de valerse de sinergistas (pares de fuerza) mientras otros se encuentran "aislados" y vectorialmente subdominantes en su acción de agonistas o antagonistas.

Algunos ejemplos: el recto abdominal, en el descenso del tórax en el acto espiratorio activo; el serrato mayor, en la abducción de la escápula para la proyección anterior del miembro superior; el recto femoral en la anteropulsión del hemipelvis homolateral durante la deambulación y en el balance de la retroversión de la pelvis al subir las escaleras; los hioideos en la apertura de la mandíbula.

Los centros corticales (sistema piramidal) individualizan el objetivo de movimiento, es decir el "qué", mientras el "cómo" está bajo el control de los centros subcorticales (sistema extrapiramidal) a través de un mapeo definido "esquema corpóreo".

El "qué" es prioritario sobre el "cómo".

Si los antagonistas al movimiento "objetivo" resultan en exceso de fuerza resistente, es decir en acortamiento, los músculos aislados se encuentran en sub-dominancia vectorial y en la imposibilidad de ejecutar la acción.

Puesto que la acción tiene la prevalencia sobre la modalidad ejecutiva, estos músculos vendrán integrados por otros músculos, a través de patrones coordinativos emergentes que permitirán una acción finalizada en alteración del movimiento esquelético fisiológico.

El sistema neuromuscular desarrolla estrategias coordinativas que trascienden la función anatómica aislada del músculo individual, creando resultantes vectoriales inesperadas a través de la activación en sinergia de grupos musculares no previstos por el análisis segmentario.

Ejemplos de estrategias sustitutivas

Caso de la rotación externa humeral: En la figura 2 han sido evidenciadas las reacciones esqueléticas "excesivas" a la simple petición de desrotación humeral.

Yendo más en lo específico, a la palpación y a la vista es observable la implicación, además de los aductores escapulares y de los fascículos superiores del trapecio, también la activación de los dorsales anchos y de los subescapulares.

La paciente ha utilizado los rotadores internos humerales en apoyo de los rotadores externos.

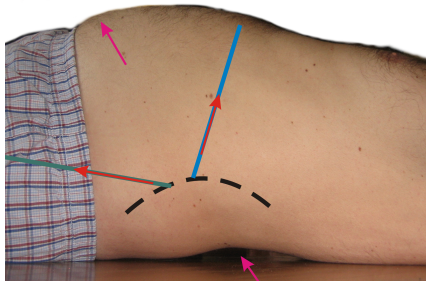
Cómo los rotadores internos humerales puedan contribuir a la rotación externa a través de patrones de reclutamiento no convencionales no es explicable con diagramas vectoriales aislados: es una habilidad emergente que el sistema utiliza a través de coordinaciones sinérgicas complejas para llegar al "qué" en el "aquí y ahora".

Estrategia respiratoria sustitutiva: en la inspiración fisiológica en reposo, el diafragma, después de haberse bajado, debería permitir a sus inserciones costales aumentar el volumen lateral de la caja torácica.

En el caso en que, por ejemplo el dorsal ancho, oponga resistencia a la expansión lateral del tórax, siendo la función respiratoria prioritaria, el diafragma con sus inserciones vertebrales y junto con el psoas con el que está en par de fuerza, proveerá a levantar el tórax aumentando la lordosis.

El aumento de la lordosis será confirmado visualmente por el abdomen que se "hincha".

Fig. 03 - Pilares del diafragma: azul; psoas: verde. Durante la inspiración el paciente utiliza el par diafragma-psoas en sustitución de la dinámica costal del diafragma. El tórax se eleva y la zona hipogástrica se expande como resultante mecánica de la proyección anterior de la columna dorso-lumbar (flechas magenta).



Músculos frecuentemente sustituidos

Los músculos que tienden a ser sustituidos no son casuales sino que son previsibles, según la lógica matemática de los pares de fuerza:

- Infrahioideos
- Serrato anterior
- Recto abdominal
- Tríceps braquial
- Cuádriceps femoral
- En general los monoarticulares

Los mismos que, por ejemplo, Françoise Mézières había definido "fuera de cadena" en sus observaciones empíricas.

5.3 Estrategias protectivas y bloqueos musculares

El segundo filón de indagación sobre los momentos sustitutivos está dirigido a individualizar bloqueos articulares no mecánicos sino musculares, finalizados a la protección de posibles conflictos mecánicos directos o indirectos.

La ausencia de dolor no es necesariamente sinónimo de ausencia de patologías latentes o posibles.

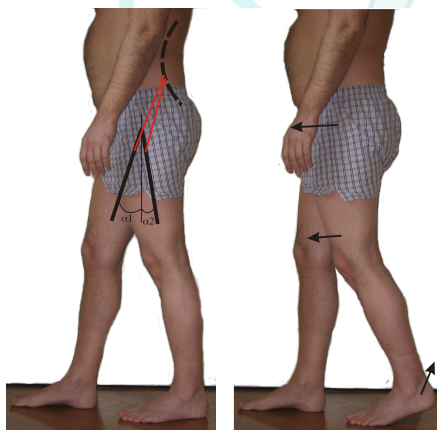


Fig. 04 - Durante la deambulación, el paciente, en la fase en la que ambos pies están en apoyo, muestra una limitada extensión de la cadera. Respecto al eje vertical, el ángulo alfa 2 resulta menor que el ángulo alfa 1 (fig 1)

Alcanzado el ángulo alfa2, comienza la flexión del miembro inferior y la proyección anterior de la pelvis (fig 2)

En este caso, la limitación de la extensión podría ser debida a un mecanismo protector que limite la puesta en tensión del iliopsoas (trazos rojos) que a su vez determinaría el aumento de la lordosis lumbar.

fig 1

fig 2

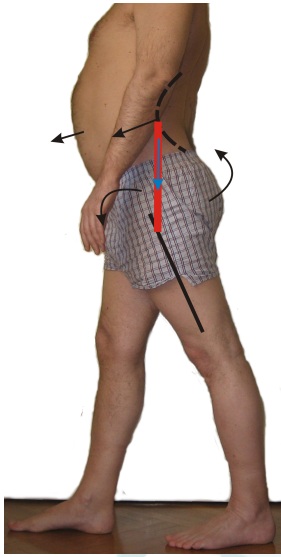


Fig. 05 - Al paciente ha sido requerida una mayor extensión de la cadera manteniendo el pie en apoyo (el test articular no ha evidenciado problemáticas a la coxo-femoral).

Como consecuencia de la acción el paciente lamenta la aparición de dolor en zona lumbar (no percibido durante la deambulaci3n espontánea).

Visualmente se evidencia (flechas negras):

- *anteversi3n de la pelvis*
- *proyecci3n anterior columna lumbar*
- *proyecci3n anterior regi3n hipogástrica*

La hip3tesis es que la extensi3n de la cadera ponga en tensi3n el psoas (rojo).

La limitaci3n a la amplitud articular de la coxo-femoral parece entonces funcional a la salvaguarda de potenciales conflictos latentes en regi3n lumbar.

5.4 Implicaciones terapéuticas

Terapéuticamente es importante detectar las estrategias sustitutivas en acto y crear las condiciones para que los músculos aislados retomen su funci3n anatómica.

Esto es obtenible a trav3s de la recuperaci3n de longitud de los músculos "freno", aquellos en exceso de fuerza resistente, de modo que los músculos subdominantes vuelvan a estar liberados y automáticamente reinsertados en el funcionamiento sistémico.

No se trata de reforzar los subdominantes sino de "liberarlos" de la interferencia de los dominantes.

6. Cuarta característica: equilibrio en los márgenes del caos

El concepto de Equilibrio en los Márgenes del Caos es tomado de la Teoría de la Dinámica No Lineal y de la Teoría del Caos Determinístico, donde representa la condici3n en la que un sistema complejo opera con máxima eficiencia y adaptabilidad.

Biomecánicamente, este estado es identificado por la dominancia de la Fuerza de Trabajo sobre la Fuerza Resistente.

En esta regi3n, el sistema responde de modo óptimo a las pequeñas seÑales (perturbaciones), modificando su propio estado con el mínimo gasto energético.

Un sistema complejo, entonces, utiliza al mejor su propia energÍa cuando se pone en los "límites del caos", cuando es decir los elementos de estabilidad y dinamicidad están en equilibrio tal de permitir a pequeñas seÑales modificar el estado del sistema.

Referido al sistema muscular, este se pone en los límites del caos cuando la Fuerza de Trabajo es dominante sobre la Fuerza Resistente, cuando es decir los elementos dinámicos prevalecen sobre aquellos estáticos que serán calibrados al mínimo necesario para garantizar la estabilidad articular:
FL >> FR

Una de las prerrogativas de los sistemas complejos es la capacidad de adaptaci3n: el "margen del caos" es el lugar en el que hay suficiente innovaci3n para dar vida a un sistema dinámico, y suficiente estabilidad para impedirle precipitar en la anarquía.

Si un sistema viviente se acerca demasiado al margen dinámico arriesga precipitar en la incoherencia; pero si se retira demasiado deviene rígido.

6.1 Las condiciones óptimas

La sinusoide vertebral fisiológica y la fisiológica sucesión articular sistémica son posibles solo si no hay alteraciones estructurales específicas y si todos los músculos trabajan en condiciones de longitud ideal.

En estas condiciones el sistema músculo-esquelético se encuentra en estar "en los márgenes del caos" en cuanto a través de pequeñas señales podrá guiar comportamientos diversos ahorrando energía.

Podrá, por ejemplo, pasar de la fase estática a la dinámica con un pequeño desplazamiento de un segmento corpóreo.

6.2 El circuito de autoalimentación de la rigidez

Si el sistema muscular está en aumento de fuerza resistente por exceso de tono basal del componente contráctil y si este último perdura en el tiempo, se determina la implicación de la porción conectival de la fibra, con acortamientos de la longitud de los músculos mismos (acortamientos musculares primarios).

Análogo mecanismo puede ocurrir como consecuencia de una disfunción de otro aparato (acortamientos musculares secundarios).

En ambos casos la consecuencia será el desalineamiento de los baricentros esqueléticos individuales y la pérdida de la capacidad dinámica de los músculos.

El sistema entrará en un circuito de autoalimentación: el desalineamiento de los baricentros esqueléticos individuales requiere una mayor contracción basal para el mantenimiento de la estación erecta y para la dinámica; el aumento del tono basal determina el acortamiento del músculo con consiguiente ulterior desalineamiento de los baricentros y modificaciones del recorrido sinusoidal de la columna y de la axialidad de todas las otras articulaciones.

El sistema se aleja del "margen del caos" y deviene rígido.

7. Conclusiones: la transformación conceptual

Esta transformación conceptual - de las cadenas musculares empíricas a los sistemas complejos físicamente demostrables - representa el desarrollo natural de intuiciones geniales hacia una comprensión científica completa del sistema músculo-esquelético humano.

Las cuatro características de los sistemas complejos ofrecen una clave interpretativa para fenómenos que antes eran observados en la realidad pero inexplicables, abriendo nuevas posibilidades diagnósticas y terapéuticas basadas en los principios de la física.

La aplicación de la teoría de los sistemas complejos al sistema músculo-esquelético transforma observaciones empíricas en análisis cuantificables.

Las cuatro características proporcionan herramientas interpretativas basadas en principios físicos verificables, permitiendo prever y comprender comportamientos que el abordaje lineal no podía explicar.

8. Síntesis del capítulo

Evolución histórica: de cadenas musculares a sistemas complejos De Reuleaux (1875) a Mézières (1947) hasta la moderna teoría de los sistemas complejos. El pasaje de intuiciones empíricas a explicaciones científicas basadas en principios físicos demostrables.

Primera característica: interdependencia e interacción En un sistema complejo todos los elementos son interdependientes. Cada acción local determina adaptaciones sistémicas que pueden ser correctivas o agravantes (ejemplo de la telaraña).

Segunda característica: comprensión solo sistémica El funcionamiento puede ser comprendido exclusivamente considerando el sistema en su conjunto. El síntoma puede ser expresión local, referida o de molestia sistémica.

Tercera característica: habilidades emergentes y momentos sustitutivos El sistema genera soluciones no previsibles del examen de los elementos individuales. Músculos anatómicamente no prepuestos pueden sustituirse para alcanzar el objetivo ("qué" prioritario sobre el "cómo").

Cuarta característica: equilibrio en los márgenes del caos Sistema óptimo cuando la Fuerza de Trabajo domina sobre la Fuerza Resistente. Pequeñas señales modifican el estado ahorrando energía. Rigidez = alejamiento del margen del caos.

Músculos frecuentemente sustituidos Infraioideos, serrato anterior, recto abdominal, tríceps braquial, cuádriceps femoral, monoarticulares en general. Aquellos que Mézières llamaba empíricamente "fuera de cadena".

Correcciones locales con agravamientos sistémicos Si la corrección distrital aumenta la energía del sistema (tono muscular), los agravamientos sistémicos superan los beneficios locales obtenidos.

Estrategias protectivas a través de limitaciones funcionales Bloqueos articulares musculares (no mecánicos) para evitar la manifestación de conflictos latentes. La ausencia de dolor no significa ausencia de patologías potenciales.

Naturaleza escalar de la complejidad Sistema complejo expandible tanto hacia lo micro (articulaciones→componentes→moléculas) como hacia lo macro (individuo→población→universo). Infinita divisibilidad y recomposición.

Bibliografía

- [1] Bar-Yam Y. *Dynamics of Complex Systems*. Reading: Addison-Wesley; 1997.
- [2] Kelso JAS. *Dynamic Patterns: The Self-Organization of Brain and Behavior*. Cambridge: MIT Press; 1995.
- [3] Strogatz SH. *Nonlinear Dynamics and Chaos*. Boulder: Westview Press; 1994.
- [4] Bernstein NA. *The Co-ordination and Regulation of Movements*. Oxford: Pergamon Press; 1967.
- [5] Latash ML. *Synergy*. New York: Oxford University Press; 2008.
- [6] Latash ML, Scholz JP, Schöner G. Toward a new theory of motor synergies. *Motor Control*. 2007;11(3):276-308.
- [7] Scholz JP, Schöner G. The uncontrolled manifold concept: identifying control variables for a functional task. *Exp Brain Res*. 1999;126(3):289-306.
- [8] Hodges PW, Tucker K. Moving differently in pain: a new theory to explain the adaptation to pain. *Pain*. 2011;152(3 Suppl):S90-S98.

- [9] Shumway-Cook A, Woollacott MH. *Motor Control: Translating Research into Clinical Practice*. 5th ed. Philadelphia: Wolters Kluwer; 2017.
- [10] Schmidt RA, Lee TD. *Motor Control and Learning*. 5th ed. Champaign: Human Kinetics; 2011.
- [11] Sahrmann SA. *Diagnosis and Treatment of Movement Impairment Syndromes*. St. Louis: Mosby; 2002.
- [12] Page P, Frank CC, Lardner R. *Assessment and Treatment of Muscle Imbalance: The Janda Approach*. Champaign: Human Kinetics; 2010.
- [13] Reuleaux F. *The Kinematics of Machinery*. London: Macmillan; 1876. [14] Nicolis G, Prigogine I. *Exploring Complexity: An Introduction*. New York: Freeman; 1989.

