

Revisão

Qual o papel das informações proprioceptivas no ato motor ?

Which is the role of proprioception in motor control ?

Mario Adrian Lerena Misailidis

.....

Professor do Curso de Fisioterapia da Faculdade de Ciências da Saúde da Universidade do Vale do Paraíba (UNIVAP), Mestre em Biologia Funcional e Molecular na área de Fisiologia pelo instituto de Biologia da Universidade de Campinas (UNICAMP)

Palavras-chave:

Movimentos multiarticulares, estratégias motores, controle motor, propriocepção, neuropatia.

Key-words:

Multijoint movements, motor strategies, motor control, proprioception, neuropathy.

Resumo

Na prática clínica são bem conhecidos os efeitos da redução das informações proprioceptivas na alteração das características cinemáticas do movimento. Entretanto, efetivamente pouco se sabe como estas informações são processadas para estabelecer o planejamento e a elaboração dos movimentos multiarticulares. Alguns estudos têm sido realizados com a finalidade de esclarecer as estratégias adotadas pelo Sistema Nervoso Central e identificar a importância das informações proprioceptivas nos movimentos. Este trabalho discute algumas das hipóteses e estratégias identificadas nos estudos de controle motor.

Abstract

The effects of the proprioception deficit in the disturbance of the cinematic movement characteristics are well known. Therefore, there are few informations about the function of the proprioception during the planning and elaboration of the multijoints movements. Some researches have been conducted to study the role of the proprioceptive informations in these movements. This paper discuss some hypothesis and strategies identified in the motor control studies.

Artigo recebido em 6 de agosto; aprovado em 4 de novembro de 2002.

Endereço para correspondência: Av. Perimetral dos Ipês, 1150, Vale do Sol, 12120-000 Tremembé SP,
Tel: (12) 272 2361, E-mail: mamisail@bol.com.br

Introdução

Há mais de um século é conhecida a importância das informações proprioceptivas para a elaboração do ato motor coordenado. Alterações nos movimentos em animais desorientados foram observadas desde o final do século XIX nos trabalhos de Mott e Sherrington [1]. Em suas análises, os autores atribuíram às informações proprioceptivas um importante papel na iniciação dos movimentos, e concluíram que o movimento coordenado é resultado de uma concatenação de mecanismos reflexos. Apesar do avanço científico e tecnológico que atualmente dispomos para analisar o comportamento motor, muitas dúvidas ainda permanecem sem respostas, frente à complexidade que constitui a ação motora.

Afinal, o que deve ser controlado para a realização de um movimento coordenado? Sabemos que durante a execução do movimento de um membro, por mais simples que seja, uma grande quantidade de variáveis são geradas. Elas correspondem à velocidade linear da extremidade que move, trajetória linear, velocidade angular de cada articulação envolvida na tarefa, torque muscular gerado em cada articulação, torques de interação, entre outras. Estas variáveis podem ser agrupadas em variáveis intrínsecas e extrínsecas. As variáveis intrínsecas correspondem àquelas provenientes das articulações envolvidas, como o deslocamento angular, a velocidade angular, torque muscular e torque de interação. As variáveis extrínsecas são determinadas pela projeção espacial da extremidade do membro que move, como trajetória linear e velocidade linear. Com tantas variáveis geradas durante a execução de um movimento, seria muito difícil para o Sistema Nervoso Central processar e controlar todas estas informações ao realizarmos um movimento. Portanto, acredita-se que o sistema nervoso se utilize de mecanismos para reduzir os graus de liberdade ao elaborar um ato motor. Esta hipótese foi primeiramente levantada por Bernstein [2] e, posteriormente, reafirmada em uma série de estudos [3-7]. Sendo esta premissa verdadeira, quais destas variáveis teriam que ser controladas para executarmos um ato motor coordenado? Quais regras poderiam ser utilizadas pelo Sistema Nervoso Central para reduzir o grau de

liberdade durante a execução de movimentos multiarticulares?

Na intenção de responder estes questionamentos, pesquisadores em controle motor propuseram algumas teorias a respeito do planejamento das tarefas motoras. Alguns destes estudos consideram que os movimentos multiarticulares são planejados em termos das características extrínsecas [3,8,9]. Outros são favoráveis ao planejamento pelas variáveis intrínsecas [4,6,7]. A falta de consenso no entendimento do planejamento motor demonstra a complexidade envolvida na geração do ato motor.

Controle pelas variáveis extrínsecas

Os autores que defendem esta hipótese observaram que durante a execução de movimentos multiarticulares restritos ao plano, ocorre um comportamento padrão nas variáveis extrínsecas, ou seja, na velocidade linear e na trajetória do dedo indicador [3,8,9]. Nestes estudos, voluntários eram instruídos a executar movimentos de alcance, partindo de uma posição inicial para atingir alvos fixos dispostos em diversas posições espaciais. Foi verificado que independente da direção do alvo, os movimentos ocorriam com trajetória retilínea do dedo indicador e a curva estabelecida pela velocidade linear era em forma de sino [3]. O autor considerou que estas variáveis determinaram padrões invariantes que deveriam ser reproduzidos durante a elaboração de um ato motor coordenado. Por outro lado, as variáveis intrínsecas não puderam estabelecer nenhum comportamento invariante, alterando seu padrão conforme a direção de movimento executado [3]. Comportamento similar foi observado nos trabalhos de Hollerbach e Abend [8,9].

Controle pelas variáveis intrínsecas (Princípio da covariação linear)

Em contrapartida à hipótese que defende o controle através das variáveis extrínsecas, Gottlieb e colaboradores [6] estabeleceram uma nova hipótese para explicar o planejamento dos movimentos multiarticulares. Ao analisar movimentos multiarticulares do membro superior em diversas direções, Gottlieb verificou um acoplamento entre os torques

musculares gerados nas articulações envolvidas na tarefa motora (ombro e cotovelo). Este acoplamento é resultante de uma alta correlação linear entre estes torques. A correlação linear é o resultado do comportamento interrelacionado entre os torques musculares, no que se refere à sincronia na geração de magnitudes proporcionais destes torques e sincronia nos momentos de reversão destes torques. Este comportamento entre os torques musculares foi também observado em movimentos uni-articulares [10] e em movimentos de reversão [7]. O princípio da covariação linear foi identificado em crianças no início do desenvolvimento neuropsicomotor (até 30 meses de idade) [11]. Portanto, para estes pesquisadores, que trabalharam com a análise da covariação linear, este princípio poderia ser um mecanismo para reduzir o processamento de informações ao gerar os comandos necessários durante a execução de movimentos multiarticulares [6,7,10,11]. Desta maneira, um comando único seria enviado para as articulações envolvidas na tarefa, coordenando a execução da ação a partir do acoplamento destes torques.

Participação das forças de interação

Durante a execução dos movimentos multiarticulares, devemos considerar a participação das forças de interação geradas pela movimentação de uma articulação (articulação focal) sobre outra (articulação não-focal), quando elas estão interligadas no mesmo segmento corporal [8]. Estas forças acabam gerando os torques de interação, que tendem a perturbar o movimento articular das articulações não-focais. Portanto, de algum modo estes torques devem ser compensados ou integrados durante um ato motor [8].

O ato motor sem as informações proprioceptivas

Na clínica neurológica é bem reconhecido que os portadores de neuropatia periférica apresentam alterações durante a execução motora [12,13,14]. Estas alterações ocorrem principalmente em movimentos multiarticulares e de reversão, onde há uma maior complexidade nos comandos motores [13].

Nestes indivíduos o comprometimento motor é caracterizado pela alteração da trajetória linear, com perda a retilinearidade, pelo aumento da dispersão final do movimento e incapacidade de manter o movimento restrito ao plano [14,15,16]. Estes erros tendem a normalizar quando os sujeitos dispõem da informação visual durante a execução do movimento (*feedback* visual) [13]. Sainburg observou que estas distorções ocorrem principalmente durante a fase de reversão (momento que muda o sentido do movimento de ida para volta) [16]. Os erros no comportamento motor ocorriam pela incapacidade de coordenar sincronicamente a reversão das duas articulações envolvidas na tarefa (ombro e cotovelo). Entretanto, como poderia ser explicado este comportamento? Seria decorrente da perda do princípio da covariação linear? Incapacidade em converter as informações proprioceptivas em comandos adequados para manter a retilinearidade da trajetória? Ou pela incapacidade em detectar a influência dos torques de interação e, conseqüentemente, estabelecer comandos adequados para anular seus efeitos?

Em estudo mais recente [17], realizado com movimento multiarticular de reversão do membro superior em plano vertical, pode-se avançar sobre alguns destes questionamentos. Este estudo demonstrou que o princípio da covariação linear não é uma regra para a execução dos movimentos multiarticulares. Nesta condição experimental, os sujeitos normais tiveram que romper o princípio da covariação linear para manter a trajetória linear retilínea, enquanto que os sujeitos portadores de neuropatia perderam a retilinearidade da trajetória, por manter os torques musculares acoplados entre si (manutenção do princípio da covariação linear) [17]. Neste trabalho foi verificado que o padrão do torque de interação é mantido nos sujeitos com neuropatia periférica, ocorrendo alterações no padrão torque muscular gerado na articulação do cotovelo. Enquanto os torques musculares dos sujeitos normais apresentavam 5 impulsos, os sujeitos portadores de neuropatia tendiam a gerar torques musculares com a presença de 3 impulsos, aproximando-se do padrão de torque muscular gerado na articulação do ombro, 3 impulsos. O erro na geração do torque muscular do cotovelo determinou a incapacidade desta articulação em reverter de modo adequado.

Considerando que os quadros de neuropatia periférica tendem a comprometer preferencialmente as porções distais dos membros [12,13], pode-se deduzir que as alterações no comportamento cinético e cinemático do cotovelo estão relacionadas a redução das informações proprioceptivas. É importante considerar que durante todo o momento de execução da tarefa motora, os sujeitos tinham disponíveis as informações visuais. Portanto, informações exteroceptivas não puderam compensar a redução das informações proprioceptivas para manter as características normais de movimento.

Conclusão

Dispondo destes dados, podemos reafirmar que nos movimentos multiarticulares de alcance ou reversão entre dois pontos espaciais, a trajetória linear tende a ser retilínea e a velocidade linear gera uma curva em forma de sino. Este padrão de comportamento pode ser utilizado pelo SNC para reduzir o grau de liberdade, permitido pelo sistema músculoesquelético durante a execução de tarefas multiarticulares. Estas características de movimento não podem ser preservadas em sujeitos portadores de neuropatia periférica, principalmente no que se refere à trajetória retilínea.

Uma vez que o princípio da covariação linear pode ser abandonado para garantir a retilinearidade da trajetória linear, esta estratégia não representa um padrão obrigatório durante a execução de movimentos multiarticulares. Portanto, não há sustentação para afirmarmos que este princípio tenha algum papel no planejamento das ações motoras em movimentos multiarticulares.

Entretanto, sabemos que durante a execução de um movimento, os comandos motores são convertidos em contrações musculares, que irão resultar nos torques musculares para cada articulação envolvida. Conseqüentemente, é necessário uma conversão de variáveis extrínsecas para variáveis intrínsecas durante o comando do movimento. Para tanto, algumas estruturas centrais devem promover a conversão do que seria a projeção do comportamento extrínseco para comandos intrínsecos, como ocorre nos cálculos por dinâmica inversa [8,18]. De fato,

o Sistema Nervoso Central apresenta estruturas que poderiam participar destes processamentos. Estudos com macacos demonstraram que grupos de neurônios do córtex motor primário, são ativados em relação à direção de movimento executado e não para ativar especificamente um grupo muscular [19]. Estudos similares demonstraram que neurônios da área 5 do córtex parietal também são ativados, especificamente em relação a direção de movimento [20]. Estes neurônios não apresentavam alteração de atividade quando uma carga resistia ao movimento. Porém, neurônios do córtex motor primário (área 4) eram influenciados com adição de carga [20]. Outros neurônios da área 5 também podem responder à movimentação passiva de uma ou várias articulações [21]. Enfim, esta área cortical pode processar ao mesmo tempo informações extrínsecas (direção do movimento) e intrínsecas (deslocamento angular). Associando o córtex motor primário, temos também o processamento de informações cinéticas (força muscular). Portanto, podemos pensar que estas áreas possam participar do planejamento (área 5) e comando (área 4) motor, convertendo informações relacionadas à direção de movimento e posição articular para estabelecer comandos musculares adequado na execução das tarefas motoras. A redução dos dados intrínsecos provenientes das informações proprioceptivas, gerou uma deterioração no comportamento motor em sujeitos portadores de neuropatia periférica. Este fato pode demonstrar que as informações intrínsecas se comportam como veículo para controlar o que ocorre com a extremidade do membro que se move.

Outras áreas do Sistema Nervoso Central obviamente devem participar ou contribuir no planejamento e no comando motor. Portadores de cerebelopatia apresentam comportamento motor similar àqueles observados na neuropatia periférica [22]. Sejam quais forem as estruturas envolvidas nesta função, a realimentação proprioceptiva é fundamental para manter o padrão normal de movimento, caracterizado por apresentar trajetória linear retilínea e a curva de velocidade linear em forma de sino.

Referências

1. Mott FW, Sherrington CS. Experiments upon the influence of sensory nerves upon movement and the nutrition of the limbs. *Proceedings of the Royal Society* 1895;57: 481-488.
2. Bernstein NA. *The Co-ordination and the regulation of movements*. Oxford: Pergamon Press 1967:15-59.
3. Morasso P. Spatial control of arm movements. *Experimental Brain Research* 1981;42:223-227.
4. Buneo CA, Boline J, Soechting JF. On the form of the internal model for reaching. *Experimental Brain Research* 1995;104:467-479.
5. Gottlieb G., Corcos DM, Agarwal GC. Strategies for the control of voluntary movements with one mechanical degree of freedom. *Behavioral and Brain Sciences* 1989;12:189-250.
6. Gottlieb GL, Song Q, Hong D *et al.* Coordinating movement at two joints: A principle of linear covariance. *Journal of Neurophysiology* 1996;75(4):1760-1764.
7. Almeida GL, Hasan Z, Corcos DM. Planar reversal movement in individuals with down syndrome and control. *Journal of Neurophysiology* 2000;84:1949-1960.
8. Hollerbach JM, Flash T. Dynamic interactions between limb segments during planar arm movement. *Biological Cybernetics* 1982;44:67-77.
9. Abend WE, Bizzi E, Morasso P. Human arm trajectory formation. *Brain* 1982;105:331-348.
10. Gottlieb GL, Song Q, Almeida GL *et al.* Directional control of planar human arm movement. *Journal of Neurophysiology* 1997;78:2985-2998.
11. Zaal FTJ, Daigle K, Gottlieb G *et al.* An unlearned principle for controlling natural movements. *Journal of Neurophysiology* 1999;82(1):255-259.
12. Bruyn GW, Galard H. Neuropathies of endocrine origin. In.: Vinken, PJ and Bruyn, GW. *Diseases of Nerves: Handbook of clinical neurology*, Amsterdam, North-Holland Publishing Company Part II 1970;8:29-71.
13. Rothwell JC, Traub MM, Day BL *et al.* Manual motor performance in a deafferented man. *Brain* 1982;105:515-542.
14. Ghez C, Gordon J, Guillard MF *et al.* Roles of proprioceptive input in the programming of arm trajectories. *Cold Spring Harbor Symposia On Quantitative Biology* 1990;60: 837-847.
15. Sainburg RL, Poizner H and Guez C. Loss of proprioception produces deficits in interjoint coordination. *Journal of Neurophysiology* 1993;70(5):2136-2147.
16. Sainburg RL, Guillard MF, Poizner H *et al.* Control of limb dynamics in normal subjects and patients without proprioception. *Journal of Neurophysiology* 1995;73(2):820-835.
17. Misailidis MAL. *Coordenação dos movimentos multiarticulares em indivíduos normais e portadores de neuropatia periférica*. Dissertação mestrado. UNICAMP, Campinas, 2001.
18. Hollerbach JM, Atkeson CG. Deducing planning variables from experimental arm trajectories: pitfalls and possibilities. *Biological Cybernetics* 1987;56:279-292.
19. Georgopoulos AP, Kalaska JF, Caminiti R, Massey JT. On the relations between the direction of two dimensional arm movements and cell discharge in primate motor cortex. *Journal of Neuroscience* 1982;2:1527-1537.
20. Kalaska JF, Cohen DAD, Prud'homme, M, *et al.* Parietal area 5 neuronal activity encodes movement kinematics, not movement dynamics. *Experimental Brain Research* 1990;80(2):351-364.
21. Sakata H, Takaoka A, Kawarasaki A *et al.* Somatosensory properties of neurons in superior parietal cortex (area 5) of the rhesus monkey. *Brain Research* 1973;64:85-102.
22. Bastian AJ, Zackowski KM, Thach WT. Cerebellar ataxia: Torque deficiency or torque mismatch between joints? *Journal Neurophysiology* 2000;83:3019-3030.