

REDUNDÂNCIA MOTORA: O PROBLEMA DE GRAUS DE LIBERDADE NA CIÊNCIA DO MOVIMENTO HUMANO

MARCIO A. OLIVEIRA

Department of Kinesiology, University of Maryland, College Park
E-mail: marcio@umd.edu

JAE KUN SHIM

Department of Kinesiology, University of Maryland, College Park
Neuroscience and Cognitive Science Program, University of Maryland, College Park
Department of Bioengineering, University of Maryland, College Park
E-mail: jkshim@umd.edu

RESUMO

Nesse artigo objetiva-se apresentar uma visão tutorial e aplicada sobre redundância motora, o problema crítico dos graus de liberdade redundantes a ser resolvido pelo sistema nervoso central. Embora um extenso trabalho científico tenha sido realizado nas últimas décadas, o problema de redundância motora, originalmente postulado por Bernstein, continua sendo não resolvido, mas um tópico excitante para pesquisadores interessados em compreender como a mente controla os movimentos voluntários. Abordagens teóricas e estudos aplicados dos últimos 40 anos são relatados nesse artigo, no sentido de resumir o desenvolvimento desse problema científico e o esforço dos pesquisadores em compreendê-lo. Nossa discussão revolve em torno da habilidade do sistema nervoso central em controlar o infinito número de graus de liberdade existentes no movimento humano. Por fim, apontamos que ainda temos uma vasta área de estudos que requer novas estratégias de análise e uma perspectiva multi-disciplinar para o completo entendimento dos princípios de como a mente controla movimentos humanos.

PALAVRAS-CHAVE: movimento; redundância; controle; coordenação.

PREFÁCIO

O termo redundância motora tem sido um antigo e reconhecido problema científico, o qual foi inicialmente postulado por um dos maiores cientistas do século XX, Nicholai Aleksandrovich Bernstein. Neste artigo nós buscamos oferecer uma visão tutorial e aplicada sobre redundância motora àqueles interessados e iniciantes no estudo da biodinâmica do movimento humano. Uma vez que esse tópico tem sido amplamente explorado por muitos cientistas de diferentes áreas, tais como: biomecânica, comportamento motor, neurociências, fisiologia, robótica, psicologia e outras áreas, nós desculpamo-nos, antecipadamente, por qualquer omissão feita. Ao mesmo tempo, nós reconhecemos que, baseados na antológica literatura existente, o escopo e a profundidade deste artigo poderiam ser muito além do que aqui apresentado e, oportunamente, convidamos outros pesquisadores da área a complementarem essa tarefa.

A DEFINIÇÃO DO PROBLEMA

A definição da palavra redundância remete-nos a sinônimos tais como os termos excessivo ou abundante. Mas o que, no movimento humano, pode ser considerado redundante? Quais elementos, na nossa complexa motricidade humana, poderiam ser considerados excessivos?

Imagine-se realizando um movimento de alcançar para pegar um copo de água que está sobre uma mesa. Quando você pega o copo de água, a trajetória final percorrida pelo braço não é definida por somente um conjunto de trajetórias de ângulos articulares – problema de cinemática inversa (MUSSA IVALDI; MORASSO; ZACCARIA, 1988) – ou a força exercida pela mão para pegar o copo não é determinada por somente um conjunto de torques articulares – problema da dinâmica inversa (ATKESON, 1989). Quando você segura o copo de água na mão, um infinito número de combinações de ângulos articulares (redundância cinemática) e de combinações de forças das pontas dos dedos (redundância cinética) pode ser usado, sem que você, sequer, mude a posição ou orientação do copo de água. Para a maioria dos movimentos humanos, assim como no exemplo do copo de água, o sistema nervoso central (SNC) confronta-se com a necessidade de selecionar uma forma de movimento entre uma infinidade de possibilidades. Esse problema tem sido historicamente investigado como um problema de redundância motora ou problema de Bernstein (BERNSTEIN, 1967; LATASH, 1996; TURVEY, 1990).

Em matemática, se você tentar resolver um problema no qual o número de equações usadas para descrever o sistema é menor do que o número de variáveis

conhecidas nas equações, isto é chamado de indeterminância. Por exemplo, considerando a equação $x + y = 2$, nós podemos observar que o número de variáveis desconhecidas é maior do que o número de variáveis conhecidas, o que torna infinito o número de soluções possíveis para essa equação. Na área da ciência do movimento humano o termo redundância motora tem sido usado para entender a *performance* do movimento voluntário humano, o qual, usualmente, envolve um número maior de elementos que contribuem para a *performance* (forças musculares, ângulos articulares etc.) do que o número de elementos requeridos para a execução de uma determinada tarefa. Esse problema motor não acontece somente no nível cinemático e cinético, mas também pode ser observado em outros níveis de análise do movimento humano. Por exemplo, quanta força deve ser gerada por cada um dos inúmeros músculos que atravessam o punho humano para gerar um determinado valor de torque articular do punho? Quantas unidades motoras devem ser recrutadas pelo SNC e quais as frequências necessárias para produzir o nível de ativação muscular que precisamos para realizar um certo movimento? Aparentemente, esses problemas não possuem uma única solução, a não ser que restrições (ou parâmetros) adicionais sejam introduzidas à tarefa em análise (LATASH, 2000).

A IMPORTÂNCIA DO PROBLEMA

Mas porque o estudo da redundância motora é importante? A redundância motora torna-se uma questão científica relevante a partir do momento em que compreendemos que a reprodução acurada de uma ação motora humana em duas tentativas consecutivas é, na realidade, impossível.

Por volta de 1920, Bernstein observou esse fenômeno em seu famoso estudo com ferreiros profissionais que batiam com o martelo para moldar formões. Naquela época, ele desenvolveu um método sofisticado de análise usando pequenas lâmpadas posicionadas em específicos pontos do corpo dos sujeitos. Os movimentos dos ferreiros foram fotografados com obturadores em lentes com alta velocidade (aproximadamente 500 quadros por segundo), os quais produziram uma série de fotos instantâneas das pequenas lâmpadas em movimento, e permitiram-lhe calcular o movimento das articulações dos sujeitos. Os resultados desse experimento mostraram que a variabilidade da ponta do martelo ao longo de uma série de tentativas era menor do que a variabilidade das trajetórias das articulações do braço direito dos ferreiros. Isso levou Bernstein a concluir que as articulações não agiam de forma independentemente, mas, ao contrário, “corrigiam” os erros uma das outras de alguma forma, para atingir a meta de uma determinada tarefa (acertar

na ponta do formão). Os achados desse estudo permitiram a interpretação de que o SNC não busca encontrar uma única solução para o problema da redundância cinemática existente no movimento humano, diferentemente, o SNC parece usar um conjunto de combinações possíveis das articulações para assegurar uma *performance* precisa (menos variável) da tarefa.

Todavia, uma série de questões surge a partir dessa inferência, por exemplo: como o SNC escolhe um determinado conjunto de combinações articulares possíveis para executar determinada tarefa? Em quais princípios probabilísticos a mente humana se baseia para realizar suas escolhas? O que significa ter escolhas do ponto de vista do controle motor? A existência de infinitas possibilidades de escolha não poderia levar ao aumento de variabilidade (ruído) no sistema? Não é a nossa intenção oferecer respostas a todas essas questões neste artigo. Nossa finalidade é ilustrar que a busca de respostas a questões similares a essas é o que nos guia ao entendimento de como movimentos precisos emergem em um sistema altamente complexo como o corpo humano.

A complexidade do sistema neuromotor reside na infinidade de graus de liberdade (GL) disponíveis no sistema. A noção de como os GL são controlados pelo SNC é, indubitavelmente, uma das questões que norteiam os estudos na área de comportamento motor por várias décadas. Bernstein, analisando a aparente redundância das articulações do braço humano no espaço tridimensional, considerou a eliminação dos GL redundantes no sistema um dos problemas mais essenciais da área de controle motor. Foi baseado nessa premissa que Bernstein realizou uma de suas mais famosas formulações teóricas: que a essência do controle motor é a eliminação dos GL redundantes no sistema. No entanto, anos mais tarde, estudiosos do movimento humano têm contra-argumentado essa formulação. Teóricos têm questionado se o controle pode sempre reduzir o número de GL redundantes do sistema levando à eliminação (LATASH, 1996). Na realidade, a eliminação dos GL na tarefa motora, aparentemente, somente reduz o esforço do SNC de resolver o problema da redundância, mas não o exclui por completo.

ABORDAGENS TEÓRICAS ATUAIS DO PROBLEMA

Duas maiores abordagens conceituais têm gerado o nosso atual entendimento para o problema da redundância motora. Uma das abordagens é baseada na idéia proposta por Bernstein e baseia-se na premissa de que a redundância motora deve ser removida (1967). Essa abordagem assume que o SNC elimina GL biomecanicamente redundantes nos sistemas para resolver o problema da redundância. Em aprendizagem motora, por exemplo, o conceito de “congelar” ou “libe-

rar" os GL tem sido aplicado como uma explicação para diferentes estágios e níveis de aquisição da habilidade motora.

Uma abordagem alternativa tem sido proposta por Gelfand e Tsetlin (1966). Nessa abordagem os autores sugerem que o SNC explora GL abundantes associados aos sistemas biológicos no sentido de manter um conjunto de soluções flexíveis. Dessa forma, todos os GL mecânicos redundantes existentes no sistema motor são utilizados pelo SNC para estabilizar e/ou desestabilizar variáveis consideradas importantes para a *performance* de uma tarefa (SHIM; LATASH; ZATSIORSKY, 2005a). Gelfand e Tsetlin aprofundaram as premissas teóricas dessa abordagem e formularam o chamado princípio de controle não-individualizado (GELFAND; TSETLIN, 1966). Esse princípio afirma que elementos de um sistema complexo são alocados por uma unidade estrutural específica da tarefa, a qual é, comumente, referida como "sinergia" na literatura contemporânea. Esses autores introduziram o princípio de interação mínima (PIM) de dois níveis hierárquicos: um em nível local (PIM-2), no qual os estímulos individuais dos elementos são minimizados, e um em nível global (PIM-1), no qual a resposta funcional do sistema é minimizada pela relativa contribuição dos elementos.

Mais tarde, seguindo essa abordagem teórica, Gelfand e Latash propuseram uma visão complementar à tradicional visão bernsteiniana dos excessivos graus de liberdade: o princípio da abundância motora (GELFAND; LATASH, 1998; LATASH, 2000). Esse princípio fundamenta-se no entendimento de que todos os elementos ou graus de liberdade são usados pelo SNC e, no entanto, formam um "abundante" conjunto de soluções. Dentro dessa visão, a redundância motora é baseada na compensação de erros e sinergias entre os elementos que compõe o sistema. Nas últimas décadas, Gelfand e Tsetlin, Latash e colaboradores têm realizado extensivos estudos experimentais sobre sinergias dos dedos da mão. Nesses estudos os autores têm buscado descrever e explicar as estratégias utilizadas pelo SNC para resolver o problema da redundância motora. Para tanto eles têm focado, eminentemente, em tarefas manipulativas, em particular, aquelas que envolvem habilidades multidígitos (DANION et al., 2003; KANG et al., 2004; LATASH; KANG; PATTERSON, 2002; LATASH; SHIM; ZATSIORSKY, 2004; LI; LATASH; ZATSIORSKY, 2004; SCHOLZ et al., 2003; ZATSIORSKY; LI; LATASH, 2000; ZATSIORSKY; GAO; LATASH, 2003a; ZATSIORSKY; GAO; LATASH, 2003b; ZATSIORSKY; LATASH, 2004).

Por que esses autores escolheram investigar habilidades manipulativas? Como o uso da mão pode oferecer aos pesquisadores idéias sobre as estratégias utilizadas pelo SNC para solucionar do problema da redundância motora? A mão humana é uma "conveniente" ferramenta para o estudo do problema da redundância, por ser uma estrutura do corpo humano com características mecânicas únicas. A mão hu-

mana possui conexões seriais das falanges, as quais constituem a formação independente dos dedos, além disso, o paralelo alinhamento dos dedos forma a estrutura da mão em si. As estruturas paralelas e seriais, respectivamente, criam redundância cinemática e cinética (SHIM; LATASH; ZATSIORSKY, 2005a). Por exemplo, um infinito número de combinações das articulações dos dedos é possível quando a ponta do dedo indicador é mantida fixa sobre um ponto de uma superfície. Isso é conhecido como redundância cinemática. Similarmente, durante a apreensão estática de um copo de água, vários dedos produzem mais forças e torques no copo, do que o absolutamente necessário, o que é conhecido como redundância cinética.

Dada a existência de redundância motora para a realização de uma tarefa manipulativa com sucesso, o SNC precisa ser capaz de realizar ações individuais dos dedos (HAGER-ROSS; SCHIEBER, 2000; SCHIEBER, 1991; SCHIEBER; SANTELLO, 2004), assim como necessita ser capaz de executar interações sinérgicas entre os dedos da mão (LATASH; SHIM; ZATSIORSKY, 2004; SHIM et al., 2005; SHIM; LATASH; ZATSIORSKY, 2005b; ZATSIORSKY; GAO; LATASH, 2003a). Por exemplo, quando nós utilizamos o teclado para digitar, erros no movimento de um dos dedos podem ter uma consequência crítica para a *performance*. Por exemplo, a flexão voluntária de um dos dedos pode induzir maior flexão/extensão involuntária de outros dedos (ENGEL; FLANDERS; SOECHTING, 1997; FISH; SOECHTING, 1992; LI et al., 2004; SOECHTING; FLANDERS, 1992). No caso da flexão involuntária dos dedos, o SNC precisa realizar uma adicional ativação muscular para estendê-los, acarretando menor eficiência na digitação como um todo. Alternativamente, tarefas multidígitos, tais como a de escrever, requerem uma aumentada interação sinérgica das forças e torques dos dedos para produzir a cinética resultante desejada e necessária para a própria manipulação do lápis (SHIM; LATASH; ZATSIORSKY, 2003a; SHIM et al., 2005; SHIM; LATASH; ZATSIORSKY, 2005a). Além disso, o não-desenvolvimento ou a existência de déficits no controle independente e sinérgico dos movimentos dos dedos da mão podem levar à pobre *performance* de tarefas manipulativas, freqüentemente requeridas em nosso cotidiano.

Finalmente, destaca-se que o recente desenvolvimento da hipótese chamada *uncontrolled manifold* (UCM) tem facilitado também o entendimento do conceito de sinergias (LATASH; SCHOLZ; SCHONER, 2002; SCHOLZ; SCHONER, 1999) expandindo o leque de aplicação dos conceitos teóricos não só dos movimentos dos dedos da mão (LATASH et al., 2001; SCHOLZ et al., 2003), mas também para a coordenação multiarticular (SCHOLZ; SCHONER; LATASH, 2000; TSENG; SCHOLZ; SCHONER, 2002; SCHOLTZ; SCHONER; LATASH, 2000) e o controle postural (KRISHNAMOORTHY et al., 2003; KRISHNAMOORTHY et al., 2004).

A APLICABILIDADE TEÓRICA DO PROBLEMA

Para explicar a aplicabilidade das abordagens conceituais nós continuaremos a referir-nos aos estudos de tarefas multidígitos que constam na literatura. Revisando os estudos anteriores sobre o controle de tarefas manipulativas, duas categorias distintas podem ser facilmente identificadas: os estudos de independência dos dedos e os de sinergias multidígitos.

Independência dos dedos: dedos de mãos robóticas, freqüentemente, têm elementos atuadores separados para cada dedo e articulação. Assim, cada dedo pode ser controlado e movido completamente independente um do outro (MASON; SALISBURY, 1985; MURPHY, 2000). Isso poderia ser uma situação ideal para a mão humana, visto que a manipulação habilidosa, usualmente, requer o controle preciso e independente dos dedos. No entanto, tem sido documentado na literatura que seres humanos são incapazes de controlar os dedos da mão individualmente. Nós não podemos mover exclusivamente um dos dedos sem afetar os demais (HAGER-ROSS; SCHIEBER, 2000; LI et al., 2004; SCHIEBER; SANTELLO, 2004) ou produzir força com um dos dedos sem produzir força com os outros (LI et al., 1998; MASON; SALISBURY, 1985; MURPHY, 2000; REILLY; HAMMOND, 2000). Existem fatores centrais e periféricos que contribuem para essa incapacidade do controle independente dos dedos. Fatores periféricos incluem a conexão anatômica dos dedos e antebraço – por exemplo: conexões dos dedos pela pele e a inserção do *flexor digitorum profundus* em vários dedos (MALERICH et al., 1987). Além disso, reflexos com não envolvimento de “intenção” podem ser um outro fator considerado para explicar a dependência dos dedos da mão (por exemplo: reflexos de estiramento tônico e fásico dos músculos dos dedos da mão). Fatores centrais, em contrapartida, incluem: a) a interdependência do controle dos dedos da mão pelo SNC, em virtude da sobreposição da representação digital na área da mão no córtex motor primário; b) disparo sincrônico das células corticais; e c) o estímulo neural comum para múltiplos músculos (BREMNER; BAKER; STEPHENS, 1991; FETZ; CHENEY, 1980; MATSUMURA et al., 1996).

O fenômeno denominado de “escravidão” tem sido descrito na literatura (ZATSIORSKY; LI; LATASH, 2000) para explicar a força não intencional que produzimos com os dedos que não estão envolvidos em uma tarefa de força de um dos dedos (por exemplo: força não intencional exercida pelos dedos médio, anelar e mínimo, em uma tarefa que envolva somente a força de pressão do dedo indicador). Esse fenômeno é representativo da dependência das forças dos dedos umas das outras.

A medida de escravidão dos dedos, denominada na literatura em inglês de *force enslaving* (FE), é oposta à independência dos dedos, ou seja, quanto maior a

FE, menor a independência dos dedos. A independência dos dedos tem sido considerada um fator crítico para o controle motor durante tarefas de vida diária (LEIJNSE et al., 1997; LI et al., 2004; SCHIEBER, 1991; SCHIEBER; SANTELLO, 2004; SHIM et al., 2007; SHINOHARA; LATASH; ZATSIORSKY, 2003; SHINOHARA et al., 2003; ZATSIORSKY; LI; LATASH, 1998). Conforme explicitado anteriormente, nós poderíamos cometer erros mais frequentes na tarefa de digitação ou tocando piano se os nossos dedos não fossem capazes de certa independência (ENGEL; FLANDERS; SOECHTING, 1997; FISH; SOECHTING, 1992; HAUZEISEN; KNOSCHE, 2001; SCHMUCKLER; BOSMAN, 1997). Para evitar erros, o SNC tem de disparar comandos adicionais para os músculos dos dedos que nós não temos a intenção de mover, provocando um uso ineficiente do sistema neuromuscular.

Embora o desenvolvimento da capacidade de mover os dedos independentemente seja considerado desejável para a *performance* de tarefas manipulativas, as implicações funcionais da independência dos dedos para o comportamento habilidoso são questionáveis. Estudos anteriores têm demonstrado que perdas em destreza manual com o envelhecimento podem estar mais relacionadas com a ação sinérgica dos dedos do que com a sua capacidade de independência (OLIVEIRA et al., 2007; SHIM et al., 2004; SHINOHARA; LATASH; ZATSIORSKY, 2003; SHINOHARA et al., 2003). Embora a habilidade de controlar a força dos dedos com precisão possa ser melhorada com o treinamento (CARSON, 2006; RANGANATHAN et al., 2001), indivíduos idosos têm mostrado perfis menos precisos para produzir forças/torques multidigitais. Na realidade, a relação entre a independência dos dedos e a destreza manual não é tão direta quanto aparenta ser e o desafio de maiores investigações nessa área ainda permanece. Durante a preensão prismática (ou seja, pegar um objeto com o polegar em oposição com os demais dedos), por exemplo, a FE dos outros dedos induzida pela força do dedo envolvido na tarefa pode ajudar a estabilizar o torque resultante atuante no objeto (SHIM; LATASH; ZATSIORSKY, 2005b; SHIM et al., 2006). Nesse sentido, a diminuição da FE poderia ter um impacto negativo na estabilidade de tarefas que envolvam esse tipo de preensão.

Sinergia multidígitos: muitas das tarefas de manipulação requerem não só o envolvimento de múltiplos dígitos, mas também que a interação entre os dedos deva ser propriamente controlada pelo SNC. A manipulação multidígitos é notoriamente um sistema comportamental redundante, no qual o SNC deve acomodar e integrar estratégias de controle em tempo real. Por exemplo, em uma tarefa de preensão multidígitos, como a de segurar uma taça com água usando todas as pontas dos dedos, o total de trinta variáveis mecânicas, três componentes de força e três de torque para cada ponta do dedo precisam ser, simultaneamente, controlados em um específico local de interface entre a ponta dos dedos e a taça com água.

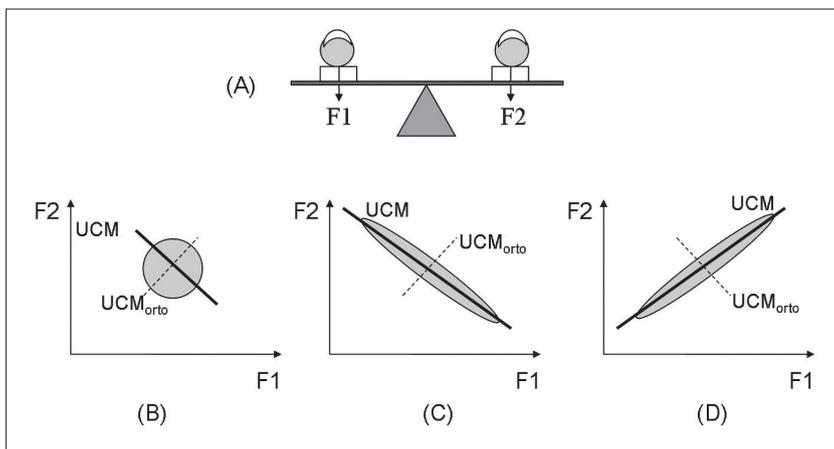
Nesse caso, existem seis restrições estáticas em três dimensões; três forças resultantes e três torques resultantes, cuja soma deverá ser zero em uma situação em que seguramos a taça de maneira estática (SHIM; LATASH; ZATSIORSKY, 2005a; SHIM; LATASH; ZATSIORSKY, 2005b). Além disso, 24 ($30 - 6 = 24$) GL cinéticos redundantes devem ser propriamente controlados pelo SNC para prevenir que você quebre a taça, não a deixe escorregar da mão e, ao mesmo tempo, que você não gire a taça de maneira imprópria evitando que a água entorne (SHIM; LATASH; ZATSIORSKY, 2003a; SHIM; LATASH; ZATSIORSKY, 2005a; SHIM; LATASH; ZATSIORSKY, 2005b).

Para solucionar problemas como o de “escravidão” (FE) dos dedos, um novo conjunto de variáveis chamadas modos de força foi introduzido recentemente na literatura (DANION et al., 2003; LATASH et al., 2001; SCHOLZ; SCHONER, 1999). Os modos de força são variáveis hipotéticas e latentes no sistema (não observável em nível comportamental), as quais correspondem ao envolvimento desejado de cada dedo em uma tarefa de produção de força.

Nessa perspectiva, sinergias de preensão multidígitos têm sido descritas como covariações de forças que estabilizam um valor particular de uma importante variável de *performance*, tal como a força total ou o torque total. Dois tipos de sinergias durante tarefas de preensão digital têm sido analisados, a sinergia para estabilizar a força total e a sinergia para estabilizar o torque total. Esses dois tipos de sinergias permanecem em constante competição, pois enquanto a primeira favorece covariações negativas entre as forças dos dedos, a segunda favorece covariações positivas sobre as forças produzidas pelo subgrupo de dedos que produzem torques em direções opostas (e em relação a um ponto pivô). Isso é facilmente observável em uma tarefa que envolve somente dois dedos (Figura 1A). Nessa tarefa existem somente duas variáveis que podem covariar negativamente para estabilizar a soma das respostas de força (força total), ou positivamente para estabilizar a diferença entre as respostas (relacionadas ao torque total em relação ao ponto do meio de aplicação das duas forças).

Conforme a hipótese UCM (SCHOLZ; SCHONER, 1999; SCHONER, 1995), as sinergias multidígitos são definidas como covariações das forças dos dedos, as quais estabilizam a competição entre as variáveis de *performance* tais como a força total dos dedos (covariações negativas entre as forças dos dedos, Figura 1C) ou equilíbrios rotacionais (covariações positivas entre as forças dos dedos, Figura 1D) em subespaços. As Figuras 1C e 1D representam sinergias analisadas com base na UCM. Como se pode observar, em ambas as figuras (1C e 1D) a variabilidade ao longo da direção da UCM é maior do que a variabilidade ortogonal à UCM (UCM_{orto}).

FIGURA 1: UM SIMPLES EXEMPLO DA ANÁLISE DA UCM DURANTE A TAREFA DE PRESSÃO DE DOIS DEDOS (A).



$F1$ e $F2$ são as forças dos dedos. Os círculos e as elipses representam a distribuição dos dados de força em um modo de espaço bidimensional. A variabilidade ao longo da UCM está representada pela linha sólida e a UCM_{orto} está representada pela linha tracejada; (B) as direções são iguais, o que significa inexistência de sinergias; (C) a variabilidade ao longo da direção da UCM é maior do que a variabilidade ao longo da direção UCM_{orto} ; sinergia de estabilização da força total; (D) a variabilidade ao longo da direção da UCM é maior do que a variabilidade ao longo da direção UCM_{orto} ; sinergia de estabilização da força rotacional (torque) no eixo virtual (isto é, no ponto do meio) entre os dois dedos.

Estudos anteriores têm demonstrado que em experimentos que envolvam a produção de força dos dedos de maneira relativamente rápida o torque total tem estabilizado melhor do que a força total. Isso ocorre em razão das covariações positivas das forças individuais dos dedos (LATASH et al., 2001; SCHOLZ et al., 2002). Esse fenômeno ocorre independente do fato de que a produção de padrões particulares da força total tenha sido um componente explicitamente apresentado aos sujeitos por *feedback* visual contínuo, e em situações nas quais o torque total não fora sequer apresentado aos sujeitos como *feedback* visual. A estabilização da força total, por sua vez, tem mostrado ser mais evidente durante tarefas lentas de produção de força e em condições de contínuo *feedback* visual. No entanto, mesmo nas tentativas extremamente lentas, covariações positivas das forças individuais dos dedos foram observadas durante a primeira metade de segundo, as quais se tornam, posteriormente, em covariações negativas e adequadas à estabilização da força total (SHIM; LATASH; ZATSIORSKY, 2003b).

Vários estudos anteriores envolvendo jovens e adultos idosos têm demonstrado que forças e torques individuais dos dedos podem interagir ou serem interagidos pelo SNC para compensar os erros e atingir metas de tarefas específicas. Além

disso, tem sido demonstrado que com o envelhecimento a interação sinérgica dos dedos se torna deficitária (LATASH et al., 2004; SCHOLZ et al., 2003; SHIM et al., 2004; SHIM; LATASH; ZATSIORSKY, 2004; SHIM; LATASH; ZATSIORSKY, 2005b).

Independência dos dedos e sinergias podem requerer o uso de diferentes estratégias pelo SNC, mas ambos os fatores parecem estar relacionados. Melhoria em um dos fatores parece estar associada com a melhoria de outro fator, como por exemplo tem sido evidenciado em experimentos que envolvam habilidade de digitação e caligrafia (ROGERS; CASE-SMITH, 2002).

QUAIS SÃO AS PERSPECTIVAS?

Embora vários estudos sobre redundância motora já tenham sido desenvolvidos ao longo da história do controle motor, um longo caminho científico ainda está para ser percorrido. É importante reconhecer que nos dias de hoje existem muito mais perguntas do que respostas elaboradas sobre como o SNC controla os GL redundantes em um sistema tão complexo como o corpo humano.

É incrível como um problema formulado por Bernstein em 1967 ainda guarde de um futuro científico tão promissor com possibilidades excitantes e inigualáveis para os pesquisadores da área da ciência do movimento humano. Indiscutivelmente, a utilização de técnicas de neuroimagem combinadas com dados comportamentais pode levar-nos não só a novas descobertas, mas também oferecer subsídios para o desenvolvimento de modelos matemáticos e computacionais que guiarão novos experimentos e simulações. Não obstante, é importante destacar que investigar o problema da redundância motora em nível comportamental ainda é uma excelente estratégia para a compreensão dos princípios de funcionamento da mente humana. A exploração experimental de variáveis de controle, por exemplo, pode dar-nos indícios sobre algum um tipo de linguagem interna usada pelo SNC para comunicar-se com o aparelho executor – músculos e conexões reflexas centrais (LATASH, 1996).

O desenvolvimento de estudos multidisciplinares, unindo cientistas de áreas como ciências do movimento humano, biomedicina, matemática, bioengenharia, biofísica, psicologia, entre outras, viabilizará a execução de experimentos mais flexíveis e abrangentes integrando diferentes níveis de análise. Tais estudos, em última instância, oferecerão não só a base para o entendimento dos mecanismos neurais e mecânicos subjacentes ao controle motor humano, mas também nos conduzirão a futuras pesquisas sobre estratégias de intervenções clínicas e pedagógicas baseadas em evidências científicas.

Motor Redundancy: the problem of degrees of freedom in human movement science

ABSTRACT: The purpose of this paper is to present a tutorial and applied view of motor redundancy, that is, the critical problem of redundant degrees of freedom in human movement that the central nervous system must deal with. Although extensive scientific work has been done over the past decades, the motor redundancy problem, originally postulated by Bernstein, is still an unresolved and exciting topic for researchers interested in understanding how the brain controls voluntary movements. In our attempt to summarize the development of this scientific problem and researchers' efforts to understand it, we discuss theoretical approaches and applied studies from the last 40 years. Our discussion focuses on the central nervous system's ability to control the infinite number of degrees of freedom that exist in human movements. Lastly, we indicate that there is still a vast area of study requiring new analytical strategies and a multidisciplinary perspective for a fuller understanding of how the human brain controls bodily movement.

KEY WORDS: movement; redundancy; control; coordination.

Redundancia Motora: el problema de grados de libertad en la ciencia del movimiento humano

RESUMEN: En este artículo nos proponemos a presentar una visión didáctica y aplicada sobre la redundancia motora, un problema crítico de grados de libertad redundantes a ser resuelto por el sistema nervioso central. Aunque haya sido hecho un extenso trabajo científico en las últimas décadas, el problema de redundancia motora, originalmente postulado por Bernstein, sigue sin resolución, pero ese es un tema apasionante para los investigadores interesados en comprender como el cerebro controla los movimientos voluntarios. Abordajes teóricos y estudios aplicados en los últimos 40 años son reportados en este artículo para resumir el desarrollo de ese problema científico y el esfuerzo de los investigadores en comprenderlo. Nuestra discusión gira alrededor de la habilidad del sistema nervioso central de controlar el número infinito de grados de libertad existentes en el movimiento humano. Finalmente, apuntamos que todavía tenemos una vasta área de estudio que requiere nuevas estrategias de análisis y una perspectiva multidisciplinar para el entendimiento completo de los principios de cómo el cerebro controla los movimientos humanos.

PALABRAS CLAVES: movimiento; redundancia; control; coordinación.

REFERÊNCIAS

- ATKESON, C. G. Learning arm kinematics and dynamics. *Annu. Rev. Neurosci.*, n. 12, p. 157-183, 1989.
- BERNSTEIN, N. A. *The co-ordination and regulation of movements*. Oxford: Pergamon Press, 1967.

BREMNER, F. D.; BAKER, J. R.; STEPHENS, J. A. Effect of task on the degree of synchronization of intrinsic hand muscle motor units in man. *J. Neurophysiol.*, v. 66, n. 6, p. 2.072-2.083, 1991.

CARSON, R. G. Changes in muscle coordination with training. *J Appl. Physiol.*, v. 101, n. 5, p. 1.506-1.513, 2006.

DANION, F.; SCHONER, G.; LATASH, M. L.; LI, S.; SCHOLZ, J. P.; ZATSIORSKY, V. M. A mode hypothesis for finger interaction during multi-finger force-production tasks. *Biol. Cybern.*, v. 88, n. 2, p. 91-98, 2003.

ENGEL, K. C.; FLANDERS, M.; SOECHTING, J. F. Anticipatory and sequential motor control in piano playing. *Exp. Brain Res.*, v. 113, n. 2, p. 189-199, 1997.

FETZ, E. E.; CHENEY, P. D. Postspike facilitation of forelimb muscle activity by primate corticomotoneuronal cells. *J. Neurophysiol.*, v. 44, n. 4, p. 751-772, 1980.

FISH, J.; SOECHTING, J. F. Synergistic finger movements in a skilled motor task. *Exp. Brain Res.*, v. 91, n. 2, p. 327-334, 1992.

GELFAND, I. M.; LATASH, M. L. On the problem of adequate language in motor control. *Motor Control*, v. 2, n. 4, p. 306-313, 1998.

GELFAND, I. M.; TSETLIN, M. L. On mathematical modeling of the mechanics of the central nervous system. In: GELFAND, I. M.; GURFINKEL, V. S.; FOMIN, S. V.; TSETLIN, M. L. *Models of the structural-functional organization of certain biological systems*. MIT Press: Cambridge, 1966. p. 9-26.

HAGER-ROSS, C.; SCHIEBER, M. H. Quantifying the independence of human finger movements: comparisons of digits, hands, and movement frequencies. *J. Neurosci.*, v. 20, n. 22, p. 8.542-8.550, 2000.

HAUEISEN, J.; KNOSCHE, T. R. Involuntary motor activity in pianists evoked by music perception. *J. Cogn Neurosci.*, v. 13, n. 6, p. 786-792, 2001.

KANG, N.; SHINOHARA, M.; ZATSIORSKY, V. M.; LATASH, M. L. Learning multi-finger synergies: an uncontrolled manifold analysis. *Exp. Brain Res.*, v. 157, n. 3, p. 336-350, 2004.

KRISHNAMOORTHY, V.; GOODMAN, S.; ZATSIORSKY, V.; LATASH, M. L. Muscle synergies during shifts of the center of pressure by standing persons: identification of muscle modes. *Biol. Cybern.*, v. 89, n. 2, p. 152-161, 2003.

KRISHNAMOORTHY, V.; LATASH, M. L.; SCHOLZ, J. P.; ZATSIORSKY, V. M. Muscle modes during shifts of the center of pressure by standing persons: effect of instability and additional support. *Exp. Brain Res.*, v. 157, n. 1, p. 18-31, 2004.

LATASH, M. L. How does our brain make its choices? In: LATASH, M. L.; TURVEY, M. T. *Dexterity and its development*. Mahwah: Erlbaum, 1996. p. 277-304.

_____. There is no motor redundancy in human movements. There is motor abundance. *Motor Control*, v. 4, n. 3, p. 259-261, 2000.

LATASH, M. L.; KANG, N.; PATTERSON, D. Finger coordination in persons with Down syndrome: atypical patterns of coordination and the effects of practice. *Exp. Brain Res.*, v. 146, n. 3, p. 345-355, 2002.

LATASH, M. L.; SCHOLZ, J. P.; SCHONER, G. Motor control strategies revealed in the structure of motor variability. *Exerc. Sport Sci. Rev.*, v. 30, n. 1, p. 26-31, 2002.

_____.; SCHONER, G. Structure of motor variability in marginally redundant multifinger force production tasks. *Exp. Brain Res.*, v. 141, n. 2, p. 153-165, 2001.

LATASH, M. L.; SHIM, J. K.; GAO, F.; ZATSIORSKY, V. M. Rotational equilibrium during multi-digit pressing and prehension. *Motor Control*, v. 8, n. 4, p. 392-404, 2004.

LATASH, M. L.; SHIM, J. K.; ZATSIORSKY, V. M. Is there a timing synergy during multi-finger production of quick force pulses? *Psychopharmacology (Berl)*, v. 177, n. 1-2, p. 217-223, 2004.

LEIJNSE, J. N.; WALBEEHM, E. T.; SONNEVELD, G. J.; HOVIUS, S. E.; KAUER, J. M. Connections between the tendons of the musculus flexor digitorum profundus involving the synovial sheaths in the carpal tunnel. *Acta Anat. (Basel)*, v. 160, n. 2, p. 112-122, 1997.

LI, S.; LATASH, M. L.; ZATSIORSKY, V. M. Effects of motor imagery on finger force responses to transcranial magnetic stimulation. *Brain Res. Cogn Brain Res.*, v. 20, n. 2, p. 273-280, 2004.

LI, Z. M.; DUN, S.; HARKNESS, D. A.; BRININGER, T. L. Motion enslaving among multiple fingers of the human hand. *Motor Control*, v. 8, n. 1, p. 1-15, 2004.

LI, Z. M.; LATASH, M. L.; NEWELL, K. M.; ZATSIORSKY, V. M. Motor redundancy during maximal voluntary contraction in four-finger tasks. *Exp. Brain Res.*, v. 122, n. 1, p. 71-78, 1998.

MALERICH, M. M.; BAIRD, R. A.; MCMASTER, W.; ERICKSON, J. M. Permissible limits of flexor digitorum profundus tendon advancement—an anatomic study. *J. Hand Surg. [Am.]*, v. 12, n. 1, p. 30-33, 1987.

MASON, M. T.; SALISBURY, K. J. *Robot hands and the mechanics of manipulation (artificial intelligence)*. Cambridge: MIT Press, 1985.

MATSUMURA, M.; CHEN, D.; SAWAGUCHI, T.; KUBOTA, K.; FETZ, E. E. Synaptic interactions between primate precentral cortex neurons revealed by spike-triggered averaging of intracellular membrane potentials in vivo. *J. Neurosci.*, v. 16, n. 23, p. 7.757-7.767, 1996.

MURPHY, R. R. Using robot competitions to promote intellectual development. *Ai Magazine*, v. 21, n. 1, p. 77-90, 2000.

MUSSA IVALDI, F. A.; MORASSO, P.; ZACCARIA, R. Kinematic networks. A distributed model for representing and regularizing motor redundancy. *Biol. Cybern.*, v. 60, n. 1, p. 1-16, 1988.

OLIVEIRA, M. A.; HSU, J.; PARK, J.; CLARK, J. E.; SHIM, J. K. Age-related changes in multi-finger interactions in adults during maximum voluntary finger force production tasks. S.I.: Human Movement Science, 2007.

RANGANATHAN, V. K.; SIEMIONOW, V.; SAHGAL, V.; LIU, J. Z.; YUE, G. H. Skilled finger movement exercise improves hand function. *J Gerontol. A Biol. Sci. Med. Sci.*, v. 56, n. 8, p. M518-M522, 2001.

REILLY, K. T.; HAMMOND, G. R. Independence of force production by digits of the human hand. *Neurosci. Lett.*, v. 290, n. 1, p. 53-56, 2000.

ROGERS, J.; CASE-SMITH, J. Relationships between handwriting and keyboarding performance of sixth-grade students. *Am. J Occup. Ther.*, v. 56, n. 1, p. 34-39, 2002.

SCHIEBER, M. H. Individuated finger movements of rhesus monkeys: a means of quantifying the independence of the digits. *J. Neurophysiol.*, v. 65, n. 6, p. 1.381-1.391, 1991.

SCHIEBER, M. H.; SANTELLO, M. Hand function: peripheral and central constraints on performance. *J. Appl. Physiol.*, v. 96, n. 6, p. 2.293-2.300, 2004.

SCHMUCKLER, M. A.; BOSMAN, E. L. Interkey timing in piano performance and typing. *Can. J. Exp. Psychol.*, v. 51, n. 2, p. 99-111, 1997.

SCHOLZ, J. P.; DANION, F.; LATASH, M. L.; SCHONER, G. Understanding finger coordination through analysis of the structure of force variability. *Biol. Cybern.*, v. 86, n. 1, p. 29-39, 2002.

SCHOLZ, J. P.; KANG, N.; PATTERSON, D.; LATASH, M. L. Uncontrolled manifold analysis of single trials during multi-finger force production by persons with and without Down syndrome. *Exp. Brain Res.*, v. 153, n. 1, p. 45-58, 2003.

SCHOLZ, J. P.; SCHONER, G. The uncontrolled manifold concept: identifying control variables for a functional task. *Exp. Brain Res.*, v. 126, n. 3, p. 289-306, 1999.

SCHOLZ, J. P.; SCHONER, G.; LATASH, M. L. Identifying the control structure of multijoint coordination during pistol shooting. *Exp. Brain Res.*, v. 135, n. 3, p. 382-404, 2000.

SCHONER, G. Recent developments and problems in human movement sciences and their conceptual implications. *Ecological Psychology*, n. 8, p. 291-314, 1995.

SHIM, J. K.; LATASH, M. L.; ZATSIORSKY, V. M. Prehension synergies: trial-to-trial variability and hierarchical organization of stable performance. *Exp. Brain Res.*, v. 152, n. 2, p. 173-184, 2003a.

_____. The human central nervous system needs time to organize task-specific covariation of finger forces. *Neurosci. Lett.*, v. 353, n. 1, p. 72-74, 2003b.

_____. Finger coordination during moment production on a mechanically fixed object. *Exp. Brain Res.*, v. 157, n. 4, p. 457-467, 2004.

_____. Prehension synergies in three dimensions. *Journal of Neurophysiology*, v. 93, n. 2, p. 766-776, 2005a.

_____. Prehension synergies: trial-to-trial variability and principle of superposition during static prehension in three dimensions. *J. Neurophysiol.*, v. 93, n. 6, p. 3.649-3.658, 2005b.

SHIM, J. K.; KIM, S. W.; OH, S. J.; KANG, N.; ZATSIORSKY, V. M.; LATASH, M. L. Plastic changes in interhemispheric inhibition with practice of a two-hand force production task: a transcranial magnetic stimulation study. *Neurosci. Lett.*, v. 374, n. 2, p. 104-108, 2005.

SHIM, J. K.; LAY, B. S.; ZATSIORSKY, V. M.; LATASH, M. L. Age-related changes in finger coordination in static prehension tasks. *J. Appl. Physiol.*, v. 97, n. 1, p. 213-224, 2004.

SHIM, J. K.; OLIVEIRA, M. A.; HSU, J.; HUANG, J.; PARK, J.; CLARK, J. E. Hand digit control in children: age-related changes in hand digit force interactions during maximum flexion and extension force production tasks. *Exp. Brain Res.*, p. 374-386, 2007.

SHIM, J. K.; PARK, J.; ZATSIORSKY, V. M.; LATASH, M. L. Adjustments of prehension synergies in response to self-triggered and experimenter-triggered load and torque perturbations. *Exp. Brain Res.*, v. 175, n. 4, p. 641-653, 2006.

SHINOHARA, M.; LATASH, M. L.; ZATSIORSKY, V. M. Age effects on force produced by intrinsic and extrinsic hand muscles and finger interaction during MVC tasks. *J. Appl. Physiol.*, v. 95, n. 4, p. 1.361-1.369, 2003.

SHINOHARA, M.; LI, S.; KANG, N.; ZATSIORSKY, V. M.; LATASH, M. L. Effects of age and gender on finger coordination in MVC and submaximal force-matching tasks. *J. Appl. Physiol.*, v. 94, n. 1, p. 259-270, 2003.

SOECHTING, J. F.; FLANDERS, M. Organization of sequential typing movements. *J. Neurophysiol.*, v. 67, n. 5, p. 1.275-1.290, 1992.

TSENG, Y.; SCHOLZ, J. P.; SCHONER, G. Goal-equivalent joint coordination in pointing: affect of vision and arm dominance. *Motor Control*, v. 6, n. 2, p. 183-207, 2002.

TURVEY, M. T. Coordination. *Am. Psychol.*, v. 45, n. 8, p. 938-953, 1990.

ZATSIORSKY, V. M.; GAO, F.; LATASH, M. L. Finger force vectors in multi-finger prehension. *J. Biomech.*, v. 36, n. 11, p. 1.745-1.749, 2003a.

ZATSIORSKY, V. M.; GAO, F.; LATASH, M. L. Prehension synergies: effects of object geometry and prescribed torques. *Exp. Brain Res.*, v. 148, n. 1, p. 77-87, 2003b.

ZATSIORSKY, V. M.; LATASH, M. L. Prehension synergies. *Exerc. Sport Sci. Rev.*, v. 32, n. 2, p. 75-80, 2004.

ZATSIORSKY, V. M.; LI, Z. M.; LATASH, M. L. Coordinated force production in multi-finger tasks: finger interaction and neural network modeling. *Biol. Cybern.*, v. 79, n. 2, p. 139-150, 1998.

ZATSIORSKY, V. M.; LI, Z. M.; LATASH, M. L. Enslaving effects in multi-finger force production. *Exp. Brain Res.*, v. 131, n. 2, p. 187-195, 2000.

Recebido: 30 maio 2007

Aprovado: 6 set. 2007

Endereço para correspondência

Marcio Alves de Oliveira

School of Public Health, Department of Kinesiology

University of Maryland – College Park

Maryland-USA

CEP 20742