

# Implementação de um simulador de um circuito neuro-medular que atua no controle da força motora

Luiz Jurandir Simões de Araújo e André Fábio Kohn

Laboratório de Engenharia Biomédica, Escola Politécnica da USP, Depto de Engenharia Eletrônica, Cx.P. 61548, CEP 05424-970, São Paulo, SP

**Resumo** - O simulador implementado permite estudar e analisar quantitativamente um circuito neuro-medular que atua entre os comandos voluntários gerados no cérebro e uma contração muscular, podendo mostrar as interações entre fibras descendentes, motoneurônios- $\alpha$ , células de Renshaw e fibras musculares.

**Abstract** - The simulator that was implemented allows the study and the quantitative analysis of a spinal cord neuronal network that links the cerebral voluntary commands and a muscle contraction. Interactions between descending fibers, alpha-motoneurons, Renshaw cells and muscle fibers may be analyzed.

## Introdução

A ação coordenada de vários músculos é controlada pelo sistema nervoso. Este controla movimentos musculares complexos e regula a força gerada por cada grupo muscular envolvido através do recrutamento/desrecrutamento de unidades motoras e da variação da taxa de disparo das mesmas. Comandos gerados no cérebro controlam a força a partir da variação da frequência de potenciais de ação conduzidos nos tratos descendentes.

Em vários trabalhos científicos observou-se uma relação linear entre a frequência de potenciais de ação descendentes e a força muscular em regime estacionário [1]. Na tentativa de analisar esse fenômeno Akazawa, Kato e Fujii [2,3] modelaram e simularam uma parte da rede neuronal da medula espinal que agrupa uma célula cortico-motora (CMN), n unidades motoras (cada qual composta de um moto-neurônio- $\alpha$  e o conjunto de fibras musculares enervadas - MN) e n células de Renshaw (RC).

No presente trabalho inicia-se uma linha de pesquisa em nosso laboratório que trata da modelagem e simulação da medula espinal no que tange o controle motor. Selecionamos a abordagem de Akazawa et al por ser de implementação relativamente fácil e não exigir descrição muito complexa de cada elemento da rede (isto representaria dificuldades na obtenção de valores de parâmetros da literatura experimental).

## Metodologia

O simulador foi totalmente implementado em C a partir das equações, parâmetros e condições de contorno expostas pelos autores do modelo.

O macro esquema apresentado na figura 1 mapeia os componentes do modelo e as suas inter-relações. CMN representa célula cortico-motora; MN, moto-neurônio- $\alpha$ ; RC, célula de Renshaw ;

FG as fibras musculares e  $K_s$ ,  $K_j$  e  $G_j$  os parâmetros do modelo;  $j$  ( $j=1, \dots, n$ ) representa as diversas classes de unidades motoras, agrupadas por tamanho (do menor para o maior). Como muitas propriedades biofísicas das unidades motoras estão intimamente vinculadas ao tamanho do moto-neurônio, os diversos parâmetros que as representam também variam com  $j$ . Cada MN representa um conjunto de moto-neurônios com as mesmas propriedades biofísicas.

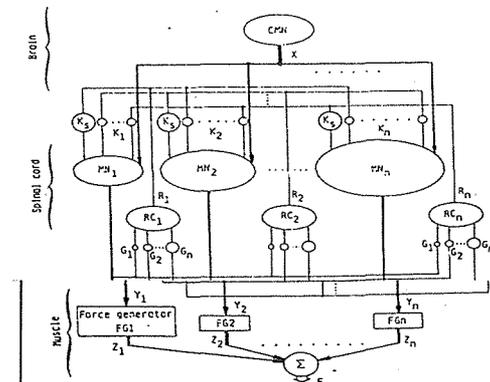


Figura 1 - Circuito neuro-medular implementado

O estímulo de entrada ao circuito é um trem de potenciais de ação cortico-motora:

$$CMN(t) = \sum_{i=1}^N \delta(t - t_i)$$

onde:  $\delta(t)$  Delta de Dirac e

$t_i$  representa os instantes de ocorrência dos potenciais de ação da célula cortico-motora. O intervalo entre cada PA é gerado aleatoriamente com uma distribuição Gaussiana truncada (para  $t \leq 0$ ) com média igual ao desvio padrão. O efeito excitatório da CMN sobre os MN's é simulado pela expressão:

$$E_j(t) = EP_j \sum_{i=1}^q \exp(-(t - t_j) / \tau_{aj})$$

onde  $EP_j$  é a amplitude de um potencial excitatório pós-sináptico da CMN sobre o MNj e  $\tau_{aj}$ , a respectiva constante de tempo e q o número

de PA's disparados pelo MN<sub>j</sub>. Ambos diminuem com o aumento de j.

O efeito inibitório das células de Renshaw é simulado pela expressão:

$$I_j(t) = K_s \cdot IP_j \cdot \sum_{i=1}^{q_j} \exp(-(t - t_{ri}) / \tau_{aj}) +$$

$$K_j \cdot IP_j \cdot \sum_{m=1}^n \sum_{(m \neq j)} \exp(-(t - t_{rm}) / \tau_{ar})$$

onde K<sub>s</sub> é o ganho sináptico da célula de RC adjacente ao MN<sub>j</sub>, K<sub>j</sub> é o ganho sináptico das demais RC's, IP<sub>j</sub> é a amplitude do potencial inibitório pós sináptico das RC's sobre o MN<sub>j</sub>, tr são os instantes de ocorrência dos potenciais de ação das RC's.

Um moto-neurônio MN<sub>j</sub> dispara um potencial de ação quando o potencial de membrana(P<sub>j</sub>(t)) for maior que o limiar de disparo (H<sub>j</sub>(t)) estes variando de acordo com as fórmulas:

$$P_j(t) = P_\infty + (P_o - P_\infty) \cdot \exp(-(t - t_o) / \tau_{aj}) + E_j(t) - I_j(t)$$

$$H_j(t) = H_o + (H_\infty - H_o) \exp(-(t - t_o) / \tau_{hj})$$

onde P<sub>∞</sub> é o potencial de repouso da membrana, P<sub>o</sub> o potencial de reversão, τ<sub>pj</sub> a constante de tempo do período de hiperpolarização pós potencial de ação, H<sub>∞</sub> é o limiar de disparo no repouso, H<sub>o</sub> o limiar de disparo após o potencial de ação, τ<sub>hj</sub> é a constante de tempo de decaimento do período refratário relativo e t<sub>o</sub> é a duração do período refratário absoluto.

As células de Renshaw disparam um salva de potenciais de ação toda vez que algum MN dispare um potencial de ação. A duração da salva é fixa igual a Δt<sub>r</sub> = 40ms, e a frequência é calculada pela expressão:

$$fr_j(t) = fr_{max} \text{ se } W(t) \geq fr_{max} \text{ ou}$$

$$fr_j(t) = W(t) = \sum_{k=1}^n \sum_{i=1}^{q_k} G_k(u(t - t_{ki}) - u(t - t_{ki} - \Delta t_r))$$

onde fr<sub>max</sub> é a frequência máxima de disparos da RC, G<sub>k</sub> é o ganho sináptico do MN<sub>k</sub> sobre a RC<sub>j</sub> e u(.) é a função degrau. Pela definição acima, apenas os potenciais de ação dos MN's que ocorreram nos últimos Δt<sub>r</sub> milissegundos influenciarão na frequência de disparos da RC.

A força muscular gerada pelo conjunto de unidades

$$\text{será: } F(t) = \sum_{i=1}^n S_i N_i \sum_{k=1}^{q_i} gm(t - t_{ik})$$

onde S<sub>i</sub> e N<sub>i</sub> são o tamanho relativo e o número das unidades motoras da classe i, q<sub>i</sub> é o número de potenciais de ação do MN<sub>i</sub>, gm(t) é o "twitch" associado a cada MN e t<sub>ik</sub> os instantes de ocorrência dos potenciais de ação do i-ésimo MN.

### Resultados e Discussão

Nossa implementação do modelo nos permite observarmos os potenciais de membrana e os limiares de disparo de cada classe de MN, assim como os instantes de ocorrência dos potenciais de ação dos MN's, da RC e da CMN (figuras 2 e 3).

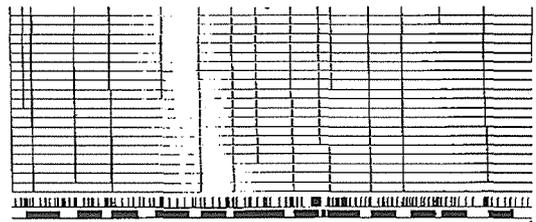


Figura 2 - Instantes de ocorrência dos potenciais de ação de 20 moto-neurônios juntamente com os PA's da célula cortico-motora e da célula de Renshaw

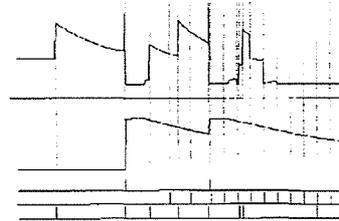


Figura 3 - Potencial da membrana e limiar de disparo do moto-neurônio j, PA's do MN<sub>j</sub>, da CMN e da RC<sub>j</sub>

Outra prioridade do nosso simulador é podermos obter as estatísticas de disparos dos MN's e da RC observando-se os histogramas e o diagrama de espalhamento dos intervalos entre disparos de todos os moto-neurônios da rede (figuras 4 e 5).

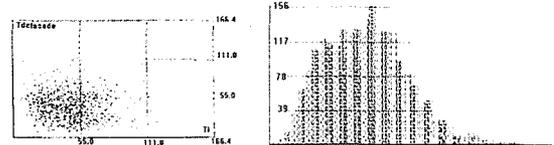


Figura 4 - Diagrama de espalhamento de intervalos adjacentes entre PA's de um moto-neurônio. Figura 5 - Histograma dos intervalos adjacentes entre PA's de um moto-neurônio.

De acordo com as variáveis que desejamos observar e o número de unidades motoras escolhidas (até 60), uma simulação pode despendar de 10 a 50 MegaBytes de espaço em disco e de 1 a 10 horas de simulação.

### Referências

[1]-CHENEY, P.D. e FETZ, E.E., Functional classes of primate corticomotoneuronal cells and their relation to active force. *J. Neurophysiol.* 44, 773-791 (1980).  
 [2]-AKAZAWA, K. KATO, K. e FUJII, K., A neural network model of force control based on the size principle of motor unit, in *Proc.Int.Joint Conf. on Neural Network*, pp.1739-1746, 1989.  
 [3]- AKAZAWA, K.e KATO, K.: Neural network model for control of muscle force based on the size principle of motor unit, *Proc. IEEE*, 78, 1990.