

基于 CPG 的上肢周期性运动控制的研究*

吴炯^{1,2} 王如彬^{1,2} 张志康^{1,2}

(1. 华东理工大学信息科学与工程学院, 认知神经动力学研究室, 上海 200237) (2. 华东理工大学理学院数学系, 上海 200237)

摘要 依据 Ken 等人所提供的曲柄转动机构中人体手臂运动的实验及其力学模型, 根据互抑制神经振荡器原理和 EMG 信号的特点, 构造了上肢屈肌和伸肌的中枢模式发生器(CPG)模型, 由 CPG 的输出建立上肢运动的六肌模型, 并得到所需要的驱动转矩. 根据上肢运动的最小转矩原理, 通过遗传算法优化 CPG 的参数. 仿真结果表明: 基于 CPG 模型基础上的上肢动力学模型所得到的计算结果与实验数据有很好的 consistency.

关键词 曲柄转动机构, 力学模型, CPG, 遗传算法, 最小转矩原理

引言

自然界中, 人类运动的稳定性和适应性是任何机器人无法比拟的, 这得益于其运动控制机理. 人类经过漫长进化所形成的控制机理是十分精巧的, 因此借鉴人类的运动控制机理是提高机器人运动能力和运动稳定性的有效方法, 这方面的研究已经成为机器人技术领域中新的研究热点.

肌电信号是中枢神经系统支配肌肉活动时伴随的电位变化, 这种电位变化与肌肉的结构、运动时的力学特性、收缩时的化学变化有关. 因此, 肌电信号的变化是用来研究中枢神经系统如何控制和协调运动动作的重要依据. 通过肌电信号来辨识人体肘关节的运动状态是生物力学领域内的一项重要研究内容, 因为信号辨识的结果不仅可以作为类人机械手和人工假肢的控制信号, 还可以作为神经假肢的刺激信号, 用于对人体进行康复治疗^[1].

在动物的运动产生机制中, 像大脑皮层, 小脑, 基底神经节, 脑干, 脊髓等许多脑神经子系统是相互依赖的. 产生的运动可以根据相关的脑区和潜伏时间划分为随意运动, 机械运动和反射. 在这三者中像行走, 游泳和呼吸等机械运动是生命维系的基本运动, 而且均具有一定的周期性.

人体最优轨道的设计必须要把手臂动力学考虑在内, 这一点已经由前人大量的研究所证明. 基于这个想法, Uno 等人(1989a)提出一条最小关节转矩变化准则^[2], 认为中枢神经系统在关节上是基

于动力学公式设计点-点之间伸展运动的. 这条准则由公式

$$J = \int_0^T \dot{\tau}^T \dot{\tau} dt \quad (1)$$

给出, 其中 τ 是连接点转矩的联合向量.

Tadashi 等人(1998 年)^[3]在引入手臂动力学的基础上, 考虑加入肌骨系统的生理特性, 提出了一条由等效肌肉转矩导数得到的准则, 验证了手臂切向速度呈钟口状以及手臂的轨道问题.

$$J = \int_0^{t_f} \sum_{i=1}^2 (dn_{iso_i}/dt)^2 dt \quad (2)$$

但是, 究竟代谢消耗的能量有多少, 对肌肉力和转矩的形成有着怎样的定量影响仍然未知.

2000 年, Tadashi 等人确认了上肢运动由关节转矩驱动, 而每个转矩均由各个肌肉群产生^[4,5]. 从屈肌和伸肌的角度着手研究, 发现神经输入在肌肉激活时存在一个阈值, 并作为神经输入的约束体现在下面的优化准则中:

$$J = \frac{1}{2} \int_0^{t_f} \sum_{i=1}^2 (u_i - f_i)^2 dt \quad (3)$$

第一次利用 EMG 信号将神经输入和肌肉力联系起来, 之后根据解剖学理论, 还发展了上肢 6 肌模型, 对人体上肢运动的研究起了重大的推动作用.

基于 Uno 和 Tadashi 等的理论和实验结果, Toshiyuki Kondo 等人^[6]利用 Matsuoka 振荡器建立上肢 CPG 模型, 得到控制转矩的肌肉力输出信号, 通过一个比例关系(转矩常数) T_i 来得到上肢运动

所需的转矩. 将上肢肌肉力与肘关节处的转矩用 EMG 模型联系起来, 得到了很好的仿真结果. 唯一缺憾的是, 文中对上肢肌肉结构的简化处理, 忽略了 6 块肌肉的生理事实, 处理过于简单.

因此, 基于上述提到的研究成果, 本文对上肢最主要肌肉群(屈肌和伸肌)建立 CPG 模型, 并对另外 4 块肌肉所构造的肌肉力函数^[10], 建立了一个新的上肢 6 肌模型. 在 Ken 等人的动力学模型中进行计算模拟, 以此检验该上肢肌肉 CPG 模型的正确性.

1 上肢旋转运动装置及 CPG 模型

1.1 曲柄旋转实验

我们沿用了 Ken Ohta 等人的曲柄机构转动实验^[7](如图 1 所示), 以便将我们的仿真结果与其实实验数据和图像进行比较, 凡是与模型有关的初始数据请参阅 Ken Ohta 等人的论文.

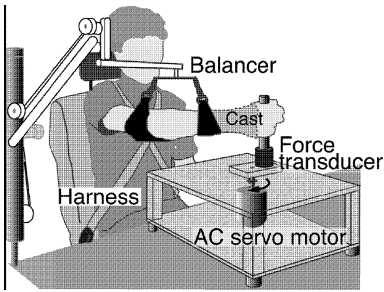


图 1 曲柄旋转机构的实验装置
Fig.1 The crank - rotation task

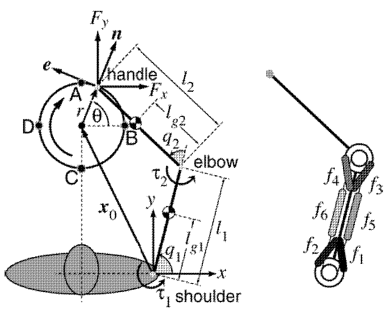


图 2 曲柄转动装置的动力学模型(平面两连杆)和 6 块肌肉模型(f_1 到 f_6 分别表示上肢的 6 块肌肉)

Fig.2 Model of crank - rotation task. a Kinematic model of crank and arm. b Six muscle model

由 Ken 等给出的曲柄转动装置和动力学模型为

$$\dot{I}\theta + \dot{B}\theta = re^T F \tag{4}$$

$$M(q)\ddot{q} + h(q, \dot{q}) = \tau^* - J(q)^T F \tag{5}$$

$$\tau^* \equiv \tau - b\dot{q} \tag{6}$$

$$J(q)\ddot{q} + \dot{J}(q, \dot{q})\dot{q} = r(\ddot{\theta}e - \dot{\theta}^2 n) \tag{7}$$

其中 $F = [F_x, F_y]^T$ 是手上的触点压力, $\tau = [\tau_1, \tau_2]^T$ 是关节转矩向量, e 和 n 表示旋转接触结构的单位向量, b 是接合点粘滞矩阵, M 为手臂的惯性矩阵, J 为雅可比矩阵.

1.2 上肢 CPG 模型

Matsuoka 振荡器是目前使用较多的构成 CPG 的非线性振荡器模型. 它是由 2 个相互抑制的人工神经元构成, 2 个神经元分别对应于屈肌和伸肌控制神经元, 它们的输出合成作为振荡器的输出. Matsuoka 振荡器的特点是能够较好地模拟 CPG 的生物学特性, 在没有外部激励或者外部激励太小时, 只需要有稳定的常激励, 就能输出稳定的振荡波形. 其输出可以作为肌肉力, 关节角度或力矩控制信号.

根据上肢肌肉的生理结构特点, 选取对上肢转动具有决定性作用的屈肌(肱二头肌 f_6)和伸肌(肱三头肌 f_5)建立 CPG 模型^[8,9]如图 3 所示, 得到其输出的肌肉力控制信号, 并构成肌肉力向量, 进而可以得到曲柄运动所需要的转矩.

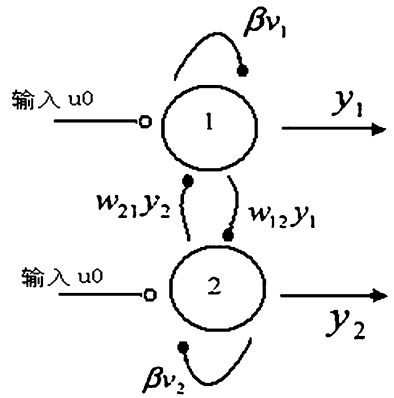


图 3 上肢肌肉 CPG 模型
Fig.3 CPG model of upper limb

$$\begin{aligned} \tau_1 \dot{u}_1 &= -u_1 - \beta v_1 + \omega_{12} y_2 + u_0; \\ \tau_2 \dot{v}_1 &= -v_1 + y_1; \\ \tau_1 \dot{u}_2 &= -u_2 - \beta v_2 + \omega_{12} y_1 + u_0; \\ \tau_2 \dot{v}_2 &= -v_2 + y_2; y_i = f(u_i) = \max(u_i, 0), i = 1, 2 \end{aligned} \tag{8}$$

这里, 黑点表示抑制性联接, 空心点表示兴奋性联接. u_i 和 v_i 表示内部状态变量, 分别对应膜电位和膜电流, β 为疲劳常数, u_0 为强直性输入, ω_{12} 和 ω_{21} 为振荡器之间的互抑制权重. 为简便起见, 也是从上

肢肌肉的作用特点考虑,此处不考虑屈肌和伸肌间的相互作用,因此令 $\omega_{12} = \omega_{21} = 0$, 其余参数由遗传算法迭代确定. 将其余 CPG 参数选作遗传算法的样本,以最小转矩原理为算法终止条件,对模型进行仿真,直到得到满意的参数和图像结果.

2 计算机数值模拟与实验结果比较

本文中,以待定的 CPG 参数为初始样本,以最小转矩变化原理为算法终止条件,对上述 Ken 的上肢动力学模型进行仿真计算,得到最终计算结果如下:

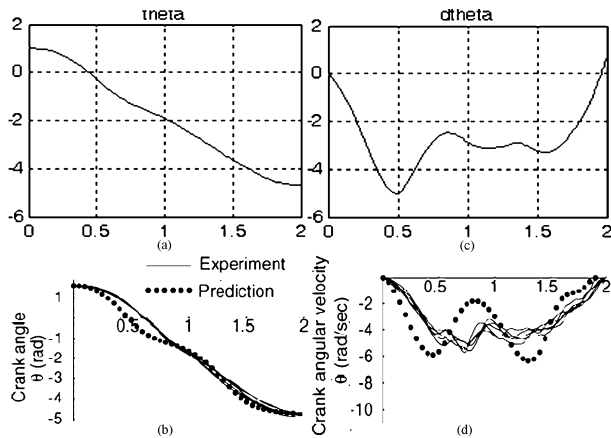


图4 (a, c) 分别为 CPG 程序运算所得 θ 和 $\dot{\theta}$ 图像.

(b, d) 分别为由实验数据绘成的和图像.

实线为实验数据,虚线为 Ken 文中理论计算结果

Fig. 4 (a, c) Obtained by CPG simulating. (b, d) Experimental data.

Solid lines mean the experiment data and

dotted lines mean the results from Ken. et. al

我们可以看到,较之肌肉力函数算法^[10], CPG 模型在关节角度图像上所表现出来的与实际图像的吻合程度要大大好于作者之前发表的结果. 这也验证了本文一开始对于 CPG 模型算法基础上对上肢周期性运动研究的合理性与正确性.

图1,图2和图4(b)与(d)著作权均属于 Ken Ohta. Etc^[6].

3 结论

人体上肢(不包括手)有7个自由度,每一个自由度都有相关的肌肉(或肌肉群),如果不限人体上肢运动的自由度,涉及的肌肉会很多,而且有的肌肉的肌电信号无法通过表面电极获得. 本文将上肢限制为一个平面内的周期运动,肘关节只有一个转动自由度. 而肘关节的旋转运动主要与肱二头肌(屈肌)和肱三头肌(伸肌)有关,因此,依据互

抑制神经振荡器原理和屈肌伸肌 EMG 信号的特点,本文在 Ken 等人所提供的曲柄转动机构中人体手臂运动的实验及其力学模型的基础上,构造了上肢曲肌和伸肌的 CPG 模型,由 CPG 的输出建立上肢运动的六肌模型,并得到所需要的驱动转矩. 并依据上肢运动的最小转矩原理,通过遗传算法优化 CPG 的参数. 仿真结果表明基于 CPG 模型的上肢动力学模型的计算结果与实验数据非常吻合.

参 考 文 献

- 李醒飞,史颖,杨晶晶等. 用肌电信号实时控制虚拟机械手臂. 中国机械工程, 2006, 17(2):187~190 (Li X F, Shi Y, Yang J J, et al. Real-Time controlling virtual manipulator using EMGs. *China Mechanical Engineering*, 2006, 17(2):187~190 (in Chinese))
- Uno Y, Kawato M, Suzuki R. Formation and control of optimal trajectory in human multi-joint arm movement. *Biol Cybern*, 1989, 61:89~101
- Kashima T, Isurugi Y. Human arm trajectory formation (in Japanese). *Trans SICE*, 1998,34:1440~1447
- Kashima T, Isurugi Y, Masasuke Shima. An optimal control model of a neuromuscular system in human arm movements and its control characteristics. *Artif Life Robotics*, 2002,6:205~209
- Tadashi Kashima, Yoshihisa Isurugi, Masasuke Shima. Analysis of a muscular control system in human movements. *Biol. Cybern*,2000, 82: 123~131
- Toshiyuki Kondo, Koji Ito. Periodic Motion Control by Modulating CPG Parameters Based on Time-Series Recognition. ECAL, 2005, LNAI 3630, 906~915
- Ken Ohta, Mikhail M. Svinin, Zhiwei Luo, Shigeyuki Hosoe, Rafael Laboissiere. Optimal trajectory formation of constrained human arm reaching movements. *Biol Cybern*, 2004,91 :23~36
- 王斐斐,张奇志,周亚丽. 构成 CPG 的非线性振荡器模型的介绍. 北京机械工业学院学报,2007,22(4):31~36 (Wang F F, Zhang Q Z, Zhou Y L. Introduction of nonlinear oscillator model of CPGs. *Journal of Beijing Institute of Machinery*, 2007,22(4):31~36 (in Chinese))
- 董玮,王如彬,沈恩华,张志康. 节律性步态运动中 CPG 对肌肉的控制模式的仿真研究. 动力学与控制学报, 2008,6(4):327~331 (Dong W, Wang R B, Zhang Z K. The simulation study on the pattern of muscles controlled by

CPG in rhythm gait movement. *Journal of Dynamics and Control*, 2008, 6(4): 327 ~ 331 (in Chinese))

10 吴炯,王如彬,沈恩华,张志康. 人体上肢运动轨道计算的新算法. 振动与冲击, 2008, 27(9): 147 ~ 149 (Wu J,

Wang R B, Shen E H, Zhang Z K. A new algorithm in the trajectory-calculating of human arm movement. *Journal of Vibration and Shock*, 2008, 27(9): 147 ~ 149 (in Chinese))

PERIODIC MOTION CONTROL OF HUMAN ARM MOVEMENT BASED ON CPG MODEL *

Wu Jiong^{1,2} Wang Rubin^{1,2} Zhang Zhikang^{1,2}

(1. *Institute of Cognitive Neurodynamics, College of Information Science and Engineering, East China University of Science and Technology, Shanghai 200237, China*)

(2. *Institute of Cognitive Neurodynamics, College of Science, East China University of Science and Technology, Shanghai 200237, China*)

Abstract The Central Pattern Generator (CPG) model of a flexor and an extensor was developed, according to the experiments implemented in a crank-rotation task. The drive torque, which achieves the arm movement, was obtained by six muscles models consisted of outputs of the CPG model. The parameters of CPG model was optimized by minimum torque-change criterion and genetic algorithm. Finally, the simulation results were compared with the experimental data, and the CPG model of six muscles were discussed.

Key words central pattern generator, periodic motion control, six muscles models, minimum torque change criterion, genetic algorithm