

# 节律性步态运动中 CPG 对肌肉的控制模式的仿真研究\*

董玮 王如彬 沈恩华 张志康

(华东理工大学信息学院认知神经动力学研究所, 上海 200237)

**摘要** 以神经振荡器理论和 Dingguo Zhang 等人研究的 CPG 模型为基础, 结合了神经生物学和生物动力学的观点, 并根据人体腿部的肌肉结构修正了 Dingguo Zhang 等提出的中枢模式发生器 (CPG) 的数学模型. 修正后的 CPG 模型突破了原来仅反映单腿的节律性运动的局限性, 能够更好地描述步态运动中双腿的节律性与协调性, 使得修正后的 CPG 模型与实际情况更为一致. 依据本文所提出的修正模型所做的数值模拟结果表明, 我们所得到的 CPG 的输出模式能够很好的表现出人体节律性步态运动中神经系统的调节作用.

**关键词** 节律性运动, 运动控制, 中枢模式发生器 (CPG), 神经振荡器

## 引言

人体运动控制的机理以及神经控制模型, 一直以来受到神经科学、智能科学与控制科学等领域内许多研究者的广泛关注. 神经科学关注于神经系统是如何控制人体的运动以及动态平衡的, 生物力学则关注于肌肉骨骼系统的动力学特性. 近几年来, 计算机的建模与仿真技术发展的非常迅速. 这是因为越来越多的研究者认为, 对于神经系统以及肌肉骨骼系统是如何相互作用而产生一个精确的运动控制这一研究课题, 在实验基础上给出的神经控制模式, 用计算机模拟的方法并结合实验结果可以得到更好的研究<sup>[1]</sup>. 其中, 以节律性运动为典型的研究内容包括站立、坐下、步行、跳跃及骑车等的运动, 受到了广泛的关注.

## 1 CPG 的理论介绍

生物学家普遍认为动物的节律运动是低级神经中枢的自激行为, 它是由位于脊髓 (脊椎动物) 或胸腹神经节 (无脊椎动物) 中的中枢模式发生器 (central pattern generator, 简称 CPG) 所控制的. 动物的运动控制系统是一个复杂的网络, 涉及中枢神经系统、感受器、感觉器官以及骨骼 - 肌肉执行系统, 如图 1 所示. 其中, 脊髓中的 CPG 作为中心控制单元, 产生节律信号, 控制效应器实现运动. 高层中枢 (大脑、小脑), 发出运动指令, 控制节律运

动的起始, 并综合 CPG 的中枢反馈信息、本体感受信息、视觉信息等对运动进行监控. 来自躯体感受器的反馈信息通过生物反射机制, 协调 CPG 与环境以及本体的关系, 对 CPG 的输出进行调节. 整个控制系统组成一个分级模块化反馈控制系统, 确保节律运动的稳定产生, 并且适应复杂的外部环境.

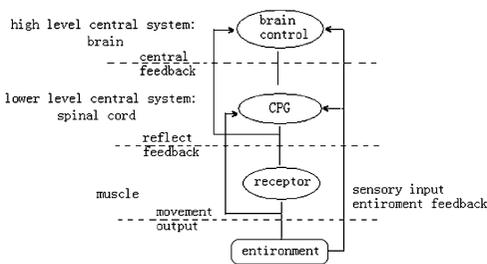


图 1 动物节律运动控制网络

Fig. 1 The control network of the creature rhythmic movement

对人体而言, 人类的步行运动是典型的节律性运动. 因此, CPG 理论非常有利于建立人体的运动模型<sup>[4,5]</sup>. 最初, 由 Taga 构建了一个由 8 个部分 20 块肌肉组成的运动模型<sup>[4]</sup>. 然而, 在他所构建模型中肌肉动力学的特性被忽略了.

在这个研究中, 我们所强调的运动模型<sup>[4]</sup>, 是从神经科学和生物力学相结合的观点来模拟人体步行运动的节律性. 该 CPG 模型由 6 部分 9 块肌肉组成, 其产生的肌肉运动模式更加稳定, 同时也能够很好的反映出两腿共同作用时运动模式的相位关系, 即表现出很好的运动协调性.

## 2 运动的肌肉骨骼系统

运动的肌肉骨骼模型的构建如图2所示<sup>[8]</sup>. 双腿模型一共包含了七个部分18块肌肉. 各部分包括HAT(表示头、手臂、躯干的集合体)、两个大腿、两个小腿以及两双脚. 两条腿是匀称的, 没有损耗. 一条腿上显示9块肌肉, 该肌肉模型是由典型的Hill型肌肉模型发展得到<sup>[1,2]</sup>, 在工程上具有广泛的应用. 其中, 肌肉群①表示臀部的伸展肌, 肌肉群②表示臀部的收缩肌; 同样的, 肌肉群③④分别表示膝关节的伸缩肌, 肌肉群⑤⑥分别表示踝关节的伸缩肌. 而肌肉群⑦⑧⑨是双关节肌肉, 是跨越两个关节而运作的. 对于本文所提到的CPG模型, 就是根据这一肌肉模型而进行建模的, 是以六块单关节肌肉作为建模基础的.

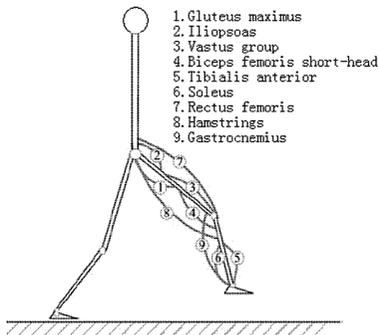


图2 人体步行运动时的肌肉骨骼系统

Fig. 2 Musculoskeletal model of human walking

## 3 运动控制系统 - CPG 模型

这里, 我们将要介绍的CPG模型是根据人体腿部的肌肉结构, 以神经振荡器理论为基础来进行建模的. 该模型很好的表现出了运动的节律性与稳定性, 同时也反映出了两腿运动时产生模式的相位差关系.

### 3.1 神经振荡器理论

生物神经元振荡器是指能够产生振荡行为的活体组织, 它们往往由相互之间存在复杂连接的大量神经元细胞构成, 在运动、感知、记忆等方面扮演不可或缺的重要角色. 脊髓动物脊髓内的神经组织—中枢模式发生器(CPG)—就是由一些耦合的神经元振荡器构成的复杂非线性系统, 负责控制行走、奔跑、游泳、飞行等节律性运动. 由于很难通过试验的方法建立生物神经元振荡器的精确数学模型, 不少学者开始采用少量人工神经元来设计功能相似的人工神经元振荡器<sup>[11]</sup>.

目前比较典型的神经振荡器模型是由Matsuoka<sup>[3]</sup>创建的. 一个神经振荡器包含了两个神经元, 各神经元之间由权重关系进行相互连接. 其结构图参见图3.

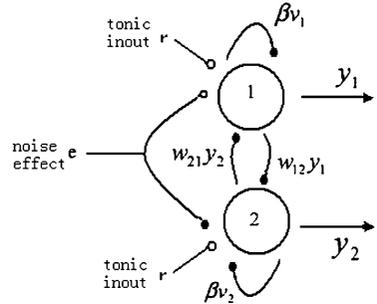


图3 神经振荡器的结构

Fig. 3 The structure of the neural oscillator

这里, 黑点表示抑制性联接, 空心点表示兴奋性联接.  $\beta v_i$  表示自抑制联接,  $\omega y_i$  表示互抑制联接.

一个神经振荡器的数学方程式表示如下<sup>[8]</sup>:

$$\begin{aligned} \tau_1 \dot{x}_1 &= -x_1 - \beta v_1 + \omega_{12} y_2 + L e + r_1, \\ \tau_2 \dot{v}_1 &= -v_1 + y_1, \\ \tau_1 \dot{x}_2 &= -x_2 - \beta v_2 + \omega_{21} y_1 - L e + r_2, \\ \tau_2 \dot{v}_2 &= -v_2 + y_2, \\ y_i &= f(x_i) = \max(x_i, 0), i = 1, 2 \end{aligned} \quad (1)$$

这里,  $x_i$  是膜电位,  $v_i$  表示神经元恢复过程的膜电流,  $y_i$  是神经元的输出信号,  $\beta$  和  $\tau_1$  分别表示与恢复过程相关的阻抗和电阻, 参数  $\tau_2$  相当于膜电容.  $e$  是噪声信号,  $r$  是强直性输入,  $L$  是噪声的影响因子.

根据Matsuoka<sup>[3]</sup>对于神经振荡器网络的理论分析, 该互抑制振荡器具有以下主要特点:

1) 振荡器的振幅: 强直性输入  $r$  决定了振荡器的幅值, 与  $r$  成正比;

2) 振荡器的频率: 时间常数  $\tau_1$  和  $\tau_2$  决定了振荡器输出信号的频率和形状. 振荡器的输出频率大约与  $1/\tau_1$  成正比.

### 3.2 CPG 模型

CPG的行为及动态特性可以通过多种方法进行描述或模拟. 从工程上讲, CPG神经电路可以看作由一组互相耦合的非线性振荡器组成的分布系统, 其通过相位耦合实现节律信号的发生, 而改变振荡器之间的耦合关系可以产生具有不同相位关系的时空序列信号, 实现不同的运动模式.

根据简化了的腿部肌肉模型建立了一个以神经振荡器理论为基础的CPG网络模型, 以此模拟腿部

行走时所产生的节律性运动模式. 通过详细的分析模型的动态特性及频率、模式产生机制, 表明该数学模型能够较好地模拟 CPG 的生物学特性<sup>[12]</sup>.

根据图 2 所示的腿部肌肉模型, 可以构建的 CPG 模型如图 4 所示.

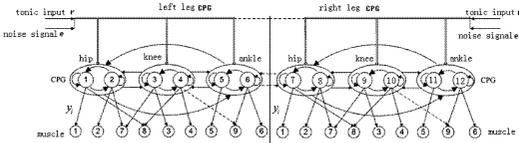


图 4 腿部运动的 CPG 模型图

Fig. 4 the leg CPG model

图 4 中表示的两条腿的两组 CPG 之间是相互联接的, 虚线表示联接较弱, 可忽略. 值得一提的是 CPG 所产生的运动模式作用于肌肉使其产生一定的节律性运动.

由图 4 所示, 我们简化了 CPG 网络的外部输入信号—仅由强直性输入  $r$  及噪声信号  $e$  组成, 这是因为生物体内部的 CPG 网络是个低级神经中枢系统, 它的工作仅是在接受大脑发出的指令后, 再由自身来完成节律性运动的. 因而对于 CPG 网络而言, 我们认为不应该有过多的外部感应信号, 而是由网络内部自身的神经振荡器的联接来完成节律性运动, 对此我们认为简化 CPG 的输入信号更能体现 CPG 的工作特点, 可以更好的将其与中枢神经(脑)直接相关的运动进行区别. 同时我们也将网络模型内部的权重关系更加细化, 这样修正后的 CPG 模型可以明显的证明出节律性步态运动时, 双腿的节律性和协调性.

这里, 对于单关节肌肉①②③④⑤⑥是由 CPG 产生的相应运动模式直接作用的, 而双关节肌肉⑦⑧⑨的运动模式则分别由单关节肌肉的运动模式线性组合得到的. 本文中着重介绍 CPG 产生的单关节肌肉的运动模式.

双腿 CPG 修正的数学模型表示如下:

$$\begin{aligned} \frac{1}{k_f} \tau \dot{x}_i &= -x_i - \beta v_i + k_i r + \sum_{i \neq j} \omega_{ij} y_j + L e \\ T \dot{v}_i &= -v_i + y_i, \\ y_i &= f(x_i) = \max(x_i, 0), \\ i, j &= 1, 2, \dots, 12 \end{aligned} \quad (2)$$

这里  $k_f, k_i$  分别是节律性感应增益和强直性输入增益,  $i, j$  表示神经元 1-12,  $x_i$  表示第  $i$  个关节的神经元集群的两种状态—伸长肌群与收缩肌群,  $v_i$  表示肌

肉恢复过程的适应性,  $\omega_{ij}$  表示双腿共 12 个神经元集群之间的相互联接权重,  $\tau$  是状态常数,  $T$  是适应度常数, 详细的参数介绍可参见文献[4,6,7].

### 4 仿真研究

根据文献[4,6,7], 得到 CPG 模型各个参数, 使其产生稳定的节律性模式. 调节状态参数  $\tau$  与适应度参数  $T$ , 使模型的输出模式达到期望的频率.

为了产生节律为 1HZ 的双足运动模式, 参数设定如下:  $T=2.5, \beta=2.5, r=1, L=1.5$ , 状态参数  $\tau=0.12$ , 该取值是细胞内时间常数的整数倍. 其中,  $k_f=1, k_i=1$ . 初始值  $(x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6, x_7, x_8, x_9, x_{10}, x_{11}, x_{12}) = (1, -1, 1, -1, 1, -1, 1, -1, 1, -1, 1, -1)$ ,  $v_i=1$ . 另外, 对于权重  $\omega_{ij}$ , 根据振荡器的不同位置, 其值也有差异. 各权重值如下,

$$\omega_{i,j} = \begin{bmatrix} \omega_{1,1} & \omega_{1,2} & \dots & \omega_{1,12} \\ \vdots & \dots & & \vdots \\ \vdots & \dots & & \vdots \\ \vdots & \dots & & \vdots \\ \omega_{12,1} & \omega_{12,2} & \dots & \omega_{12,12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0, -2.5, 1, 1, 1, 1, -1, 0, 0, 0, 0, 0; \\ -2.5, 0, -1, -1, -1, -1, 0, -1, 0, 0, 0, 0; \\ 0.1, 0.1, 0, -2.5, 0, 0.2, 0.2, 0, 0, -1, 0, 0, 0; \\ -0.1, -0.1, -2.5, 0, -0.2, -0.2, 0, 0, 0, -1, 0, 0; \\ 0.2, 0.2, 0.1, 0.1, 0, -2.5, 0, 0, 0, 0, -1, 0; \\ -0.2, -0.2, -0.1, -0.1, -2.5, 0, 0, 0, 0, 0, -1; \\ -1, 0, 0, 0, 0, 0, 0, -2.5, 1, 1, 1, 1; \\ 0, -1, 0, 0, 0, 0, -2.5, 0, -1, -1, -1, -1; \\ 0, 0, -1, 0, 0, 0, 0.1, 0.1, 0, -2.5, 0.2, 0.2; \\ 0, 0, 0, -1, 0, 0, -0.1, -0.1, -2.5, 0, -0.2, -0.2; \\ 0, 0, 0, 0, -1, 0, 0.2, 0.2, 0.1, 0.1, 0, -2.5; \\ 0, 0, 0, 0, 0, -1, -0.2, -0.2, -0.1, -0.1, -2.5, 0 \end{bmatrix}$$

对于 CPG 模型各个参数, 具有以下特点:

- 1) 强直性输入信号  $r$  的取值决定了节律性运动的振幅大小;
- 2) 状态常数  $\tau$  和时间常数  $T$  决定了节律性运动模式的频率和形状;
- 3) 权重  $\omega_{ij}$  包含了三类: 一是同一关节位置的神经元之间的连接权重, 二是同侧腿的不同关节位置的神经元之间的连接权重, 三是不同腿的各神经元之间的连接权重. 这三类权重之间近似于相差一

个数量级.同时,对于臀部关节处神经元权重的选择也与其他关节位置的权重有所不同.

4) 参数 $\beta$ 和 $\nu_i$ 反映的是肌肉恢复期的适应性.

在 Matlab 环境中进行数值模拟,得到的输出模式不仅具有节律性,同时还体现了双腿之间的相位关系,这是先前的研究中所没有体现的.对于目前的大多数关于 CPG 模型的研究中,均是以单腿同侧的 CPG 输出模式作为研究对象的.本文的 CPG 研究重点强调了双腿之间的协调性作用.当人体在 1HZ 作用下做步行运动时得到的模拟结果如图 5a,5b 所示.

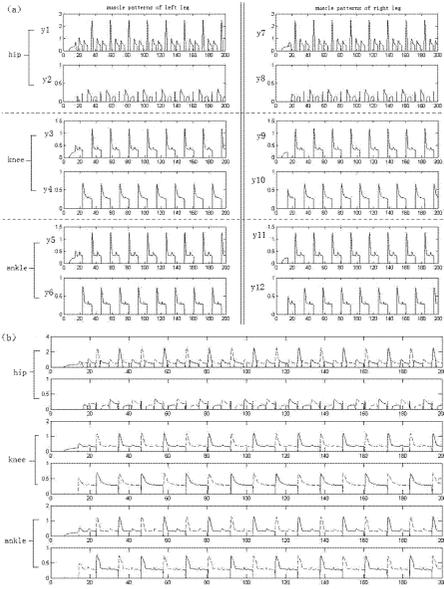


图 5 表示双腿节律性行走时产生的运动模式图 (a)图表现出腿部运动的节律性;(b)图表现出双腿运动的协调性,相位为互补关系

Fig. 5 The outputs of CPG during rhythmic walking

(a) The rhythm characteristic of the leg movement; (b) The harmonized characteristic of the leg movement, the locked out-of-phase

可以清楚的看到,双腿的节律性表现的非常好,各个肌肉的运动模式均表现为相同或相似的频率状态,即在一定的周期时间内各个肌肉的运动模式是大致相同的,充分表现出节律性运动中肌肉模式的重复性.这里要解释一下,臀部的输出模式( $y_1, y_2$ 及 $y_7, y_8$ )与膝关节的输出模式( $y_3, y_4$ 及 $y_9, y_{10}$ )和踝关节的输出模式( $y_5, y_6$ 及 $y_{11}, y_{12}$ )有所不同,这是根据生理学特性,臀部的肌肉对步态运动过程的作用明显大于其他部位,因此,在臀部 CPG 的内部参数的设定与其他部位是不一样的.

在图 5a 中我们可以观察到,分别表示出双腿 12 个单关节肌肉的运动模式,可见左右两腿相对应部位的肌肉运动节律是一样的,表现出了很好的

节律性.而在图 5b 中,将双腿相应位置的两个肌肉放在一幅图中,可以明显的看出两腿的肌肉运动模式的相位是完全互补的,表现出了很好的协调性.

由于各个肌肉群和肌肉纤维由脊髓中运动神经元控制,每一根运动神经元可以支配达 2000 根肌肉纤维,用于产生强大的肌肉张力.而运动神经元的轴突与肌肉纤维中的神经突触末梢相连接.我们知道在神经突触连接处,由于突触前膜和后膜处离子的不规则运动与碰撞会产生大量的热噪声,这类突触噪声对步态的节律运动有何影响?也是我们所关心的问题.为此我们在 CPG 模型中施加白噪声作用,以进一步观察步态节律的变化<sup>[11,12]</sup>.

在施加噪声条件下的 CPG 模型的模拟实验结果如图 6 所示.

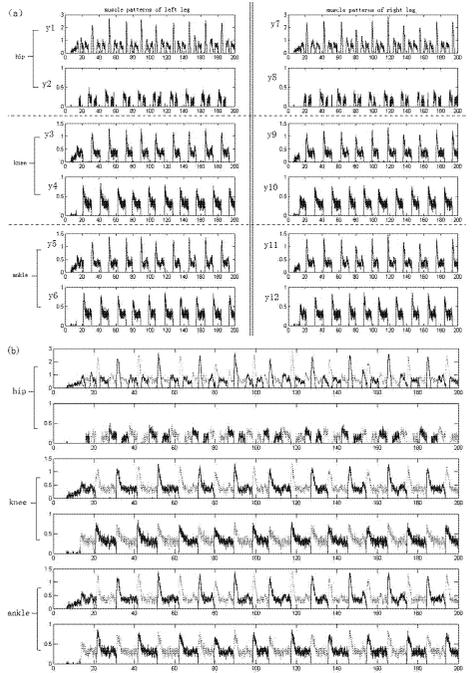


图 6 施加了白噪声后的 CPG 输出模式图

Fig. 6 CPG patterns diagram with white noise

观察图 5 和图 6,我们发现施加白噪声后,输出模式的节律性未发生根本性的变化,双腿之间的相位关系仍然符合互补的特性,即白噪声对强直性信号输入的步态运动的节律性不产生本质影响.这个结果可以帮助我们在建立强直性输入信号的步态运动的神经控制模型时,可不考虑噪声的效应.

### 5 结论

本文,根据神经振荡器理论,结合人体腿部的肌肉骨骼模型修正了人体腿部步态运动的 CPG 模

型,该模型直观地反映出了步态运动的节律性、协调性特点,以及各个神经元系统之间的相互作用关系,进一步解释了双腿节律性步行运动时的相关性,这对于工程应用是极其有利的。

对于人体的运动控制的研究是一项任重而道远的工作,而人体步态的节律性分析还有待进一步的发展,将来我们还要继续研究步态的稳定性以及外部反馈对行走的影响,以便使这类研究能够更接近于实际的情况,并对行走机器人的研究和肢体残障人士康复工程都具有十分重要的意义。

### 参 考 文 献

- 1 M G Pandy. Computer modeling and simulation of human movement. *Annu. Rev. Biomed Eng*, 2001, 3: 245 ~ 273
- 2 Winter DA, Biomechanics and motor control of human movement, 3rd edn. Wiley, Singapore, 2005
- 3 K. Matsuoka. Sustained oscillations generated by mutually inhibiting neurons with adaptation. *Biol Cybern*, 1985, 52: 367 ~ 376
- 4 Taga G, A model of the neuro - musculo - skeletal system for human locomotion. *Biol Cybern*, 1995, 73: 97 ~ 121
- 5 Ogihara N, Yamazaki N, Generation of human bipedal locomotion by a bio - mimetic neuro - musculo - skeletal model. *Biol Cybern*, 2001, 84: 1 ~ 11
- 6 Dingguo Zhang, Kuanyi Zhu, Hang Zheng. Model the leg cycling movement with neural oscillator. *IEEE Inter. Conf. on systems, Man and Cybern*, 2004: 740 ~ 744
- 7 Jianjue J Hu, Matthew M Williamson, Gill A Pratt. Bipedal locomotion control with rhythmic neural oscillators. *IEEE intern. Conf. on Intelligent Robots and Systems*, 1999: 1475 ~ 1481
- 8 Dingguo Zhang, Kuanyi Zhu. Modeling biological motor control for human locomotion with function electrical stimulation. *Biol Cybern*, 2007, 96: 79 ~ 97, 2007
- 9 王如彬, 张志康, 沈恩华. 大脑皮层内神经元集团的能量演变. *动力学与控制学报*, 2008, 6(1): 55 ~ 60 (Wang Rubin, Zhang Zhikang, Shen Enhua. Energy evolution of neural population in cerebral cortex. *Journal of Dynamics and Control*, 2008, 6(1): 55 ~ 60 (in Chinese))
- 10 王青云, 陆启韶. 兴奋性化学突触耦合的神经元的同步. *动力学与控制学报*, 2008, 6(1): 35 ~ 39 (Wang Qingyun, Lu Qishao. Synchronization of coupled neurons with excitatory chemical synapse. *Journal of Dynamics and Control*, 2008, 6(1): 35 ~ 39 (in Chinese))
- 11 Ermentrout G B, Chow C C. Modeling neural oscillations. *Physiology and Behavior*, 2002, 77(4): 629 ~ 633
- 12 K. Matsuoka, Mechanisms of Frequency and Pattern Control in the Neural Rhythm Generators. *Biol Cybern*, 1987, 56: 345 ~ 353

## SIMULATION STUDY ON THE PATTERN OF MUSCLES CONTROLLED BY CPG IN RHYTHM GAIT MOVEMENT\*

Dong Wei Wang Rubin Shen Enhua Zhang Zhikang

(Institute for Cognitive Neurodynamics, School of Information Science and Engineering,  
East China University of Science and Technology, Shanghai 200237, China)

**Abstract** According to the structure of human leg muscles, the Dingguo Zhang's CPG model was modified. The CPG model was based on neural oscillator theory, which was developed from the combination of neuroscience and biomechanics's perspective. The modified CPG model can overcome the limitations of movement that only reflect the rhythm of single leg, and can show the rhythm and harmony of two legs in gait movement, which is more approximate to the reality. By numerical simulation, the gait movement patterns were obtained. The result shows the rhythm characteristic of human gait movement, and can reflect the nervous system's regulatory role in human rhythm gait movement.

**Key words** rhythmic movement, movement control, central pattern generator (CPG), neural oscillators