

DOI:10.3969/j.issn.1005-202X.2022.04.018

医学信号处理与医学仪器

一种基于生理神经网络智能步行机器人构建方法

周俊雅, 张强, 戴跃

华东师范大学通信与电子工程学院, 上海 200241

【摘要】提出一种基于生理神经网络(CPG网络)调节的智能步行机器人设计方法。研究调节肢体节律性运动的神经网络中离子通道的作用机制,提出一种新型智能行走机器人的设计模型,即神经-肌肉-骨骼模型。该模型能够实现基于生理神经网络智能机器人两腿有节奏交替的行进运动。本研究对今后基于神经网络调节关节运动的机器人的发展具有重要参考意义。

【关键词】中枢模式发生器;生理神经网络;离子通道;智能行走机器人

【中图分类号】R318

【文献标志码】A

【文章编号】1005-202X(2022)04-0493-05

Construction of an intelligent walking robot based on physiological neural network

ZHOU Junya, ZHANG Qiang, DAI Yue

School of Communication and Electronic Engineering, East China Normal University, Shanghai 200241, China

Abstract: An intelligent walking robot based on physiological neural network (central pattern generator network) regulation is designed in the study. The mechanism of action of ionic channels in neural networks regulating the rhythmic movements of limbs is studied, and a scheme for designing a novel intelligent walking robot is presented, which is a neuro-muscular-skeletal model. The established model enables the two legs of the intelligent walking robot based on central pattern generator network to move rhythmically and alternately. The study is of great significance to the development of the next generation of robots that rely on neural networks to regulate joint motion.

Keywords: central pattern generator; physiological neural network; ionic channel; intelligent walking robot

前言

行进运动是哺乳动物(如人类)最基本的运动之一(如走、跳、跑),它能够有节奏、重复地运动并产生位移。这种经典的运动是由分布在脊髓上的神经网络控制的,该网络被称为中枢模式发生器(Central Pattern Generator, CPG)。传统的智能行走机器人运动是一种关节间的机械运动,大大简化了神经网络的调节和控制。具体来说,这类机器人通过一系列机械装置和相关的控制算法来执行任务或与人互动^[1-3]。也就是说,传统智能行走机器人的运动控制并没有引入CPG网络的引导和控制机制。然而,从生理角度出发,人类的肢体之所以可以精确地表现

出各种复杂而精细的关节运动是由于CPG网络在其中起着重要的作用^[4-5]。在智能行走机器人领域,CPG网络可以通过控制肌肉(人造肌肉材料)的收缩来驱动骨骼的运动。基于这样的理论推断,CPG网络模型可以构建具有生理机制的智能行走机器人。

控制肢体运动的原始神经网络模型是“半中心”模型^[6-8],它由一对相互抑制的屈伸神经元组成,控制骨骼肌的收缩。目前,CPG网络的应用是基于“半中心”模型发展起来的。神经系统中存在许多这样的CPG网络模型,如呼吸神经系统模型^[9]、肌肉收缩神经系统模型等^[10]。尽管CPG神经网络得到了发展,但很少有研究将CPG应用于机器人。本文主要研究控制骨骼肌收缩的CPG模型的实现。CPG模型的神经信号转导可以用Hodgkin-Huxley动力学方程^[11]来描述。此外,神经元之间的交流是通过兴奋性或抑制性突触进行的,兴奋性和抑制性信息的传递保证了神经元之间的正常交流。本文提出基于CPG网络的智能行走机器人设计方法,将为下一代智能行走机器人的发展奠定一定的理论基础。

【收稿日期】2021-10-23

【基金项目】国家自然科学基金(32171129)

【作者简介】周俊雅,硕士,研究方向:生物信息仿真,运动控制机制,智能行走原理,E-mail: 51191214031@stu.ecnu.edu.cn

1 单神经元模型

神经元信号通过离子通道的开启和关闭来传递,从而产生动作电位。神经元电信号的传播模型等效于基尔霍夫电路,离子通道相当于一系列的非线性电导。这些导体的数学方程服从霍奇金-赫胥黎(Hodgkin-Huxley, H-H)模型。换句话说,神经元电位的变化可以通过一个由并联导体组成的电路来模拟。在这个模型中,本文建立了两种类型的神经元:一种是运动神经元,另一种是中间神经元。控制骨骼肌收缩的神经元被称为运动神经元。根据电生理研究结果,本文构建了运动神经元模型(图1)。运动神经元模型的结构为胞体和树突。瞬时性钠通道(NaT)、持续性钠通道(NaP)、延迟整流钾通道[K(DR)]、钙依赖的钾离子通道[K(AHP)]、L型钙通道(CaL)和超极化内向电流(H)分布在运动神经元上(图1)。瞬时性钠通道和延迟整流钾通道是参与动作电位形成的两个重要渠道。持续性钠通道是神经网络节律性放电的关键通道。

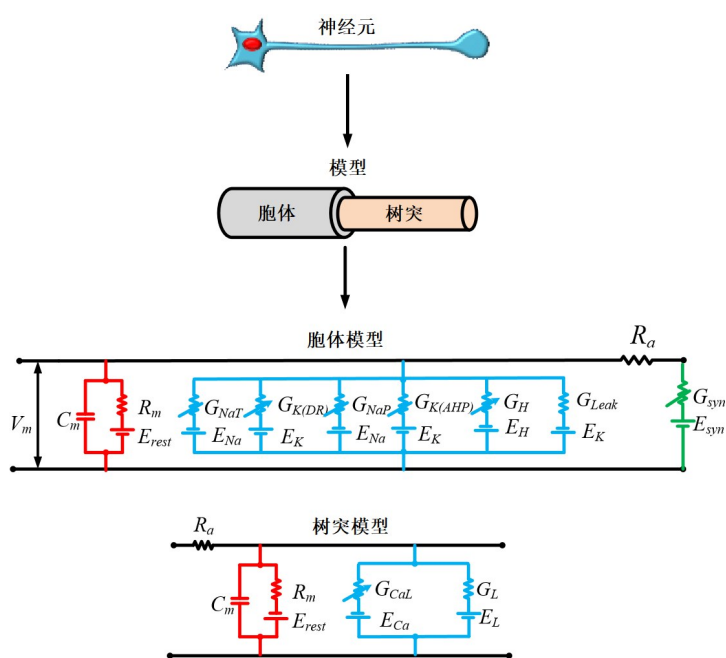


图1 运动神经元模型(包括胞体和树突,CPG网络中的其他神经元模型进一步简化,只包括胞体)

Figure 1 Motor neuron models (including soma and dendrite, and the other neuron models in the CPG network are further simplified, including only soma)

由图1可知,神经元模型可以等效为一个由膜电容(C_m)、膜电阻(R_m)和一系列平行连接的离子通道组成的电路。根据基尔霍夫电流定律,可以得到膜电流方程:

$$C_m \frac{dV_m}{dt} = \frac{V_m - E_{rest}}{R_m} - I_{ionic} - I_{Syn} \quad (1)$$

其中, V_m 和 E_{rest} 分别代表膜电位和静息膜电位。不同哺乳动物的静息膜电位略有不同,从-90 mV到70 mV不等。 I_{ionic} 和 I_{Syn} 分别表示离子电流和突触电流。电流方程的具体表达式如下:

$$NaT: I_{NaT} = g_{NaT} \cdot m^3 \cdot h \cdot (V_m - E_{Na}) \quad (2)$$

$$NaP: I_{NaP} = g_{NaP} \cdot m \cdot s \cdot (V_m - E_{Na}) \quad (3)$$

$$K(DR): I_{K(DR)} = g_{K(DR)} \cdot n^4 \cdot (V_m - E_K) \quad (4)$$

$$K(AHP): \begin{cases} I_{K(AHP)} = g_{K(AHP)} \cdot q \cdot (V_m - E_K) \\ I_{CaL} = g_{CaL} \cdot m_{CaL} \cdot (V_m - E_{Ca}) \end{cases} \quad (5)$$

$$H: I_H = g_H \cdot m_H \cdot (V_m - E_H) \quad (6)$$

$$CaL: I_{CaL} = g_{CaL} \cdot m_{CaL} \cdot (V_m - E_{Ca}) \quad (7)$$

$$Leak: I_{Leak} = g_{Leak} \cdot (V_m - E_L) \quad (8)$$

$$Syn: I_{Syn} = g_{Syn} \cdot w_{Syn} \cdot \left(e^{\frac{t}{\tau_1}} - e^{\frac{t}{\tau_2}} \right) \cdot (V_m - E_{Syn}) \quad (9)$$

其中, g_{NaT} 是瞬时性钠电流的最大电导, g_{NaP} 是持续性钠电流的最大电导,同理, $g_{K(DR)}$ 、 $g_{K(AHP)}$ 、 g_{CaL} 、 g_H 、 g_{Leak} 、 g_{Syn}

分别是延迟整流钾电流、钙依赖的钾电流、L型钙电流、超极化内向电流、漏电流及突触电流的最大电导, E_{Na} 、 E_K 、 E_{Ca} 、 E_H 、 E_L 、 E_{Syn} 分别是 Na^+ 、 K^+ 、 Ca^{2+} 和突触的平衡电位。 w_{Syn} 是突触的重量。状态变量 m 、 h 、 n 、 q 是随时间和电压变化的函数,表示离子通道的开启和关闭。这些状态变量是由霍奇金-赫胥黎方程定义的。

除了运动神经元,CPG网络还有其他神经元(如抑制性中间神经元)。为了简化模型,本文将其他神经元模型只设置胞体,并且胞体上离子通道的分布与运动神经元模型相同。

2 CPG

CPG中枢模式发生器是产生哺乳动物节律性运动行为的生理神经环路,它由一系列神经振荡器组成,是神经振荡器与多重反射回路系统集成在一起组成的一个复杂的分布式神经网络。图2是控制智能行走机器人两条腿交替运动的CPG网络模型。CPG网络模型的神经元基于单神经元模型的理论进行设计。CPG网络模型由左、右四肢交替控制层、节律及模式生成层和神经-肌肉-骨骼层组成。

CPG网络最大的特点是控制两条腿前后运动的兴奋性信号交替出现,任意一条腿的屈伸肌也交替刺激,从而保证了四肢的正常运动。CPG网络的功能类似于推挽电路。具体地说,两个相位相反信号在序号①、②处生成,此时CPG神经网络收到一个兴奋性信

性钠通道失活数量达到最大时,神经元的兴奋性受到抑制。相反,当失活数量达到最小时,神经元的兴

奋性增加,如图 4 所示。

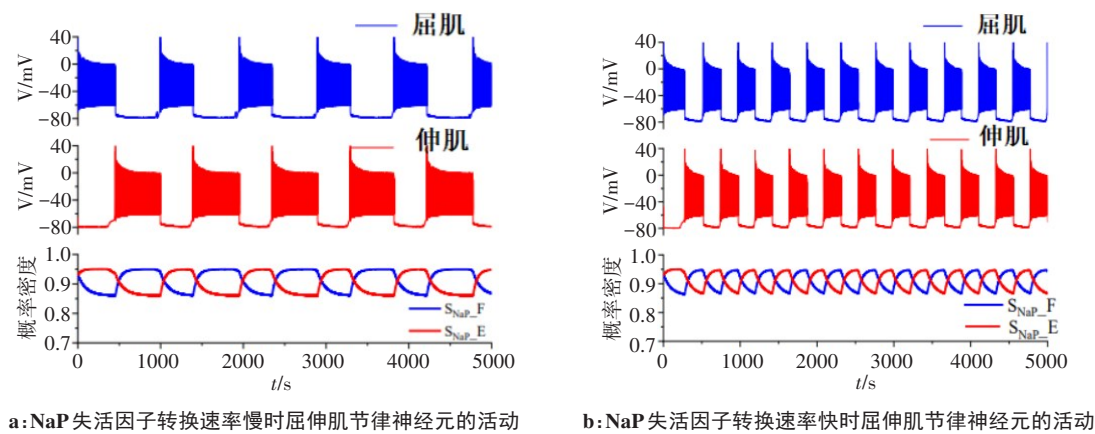


图 4 持续性钠通道作用下 CPG 网络产生的节律信号
Figure 4 Rhythm signals generated by CPG network under the action of persistent sodium channels

步态的频率可以在行进运动过程中改变,这是因为 CPG 网络可以合理地改变输出的节律频率。通过增加持续性钠通道的数目(增加持续性钠通道的电导)增加神经元的节律频率。节律性频率的变化是由于持续性钠通道失活的速率变化。持续性钠通道失活(α)越快,节律性信号变化越快(图 4b)。

来自运动神经元池的信号可以控制骨骼肌的收缩,并导致骨骼运动。当左腿屈肌兴奋时,左腿抬起。同时,当右腿伸肌兴奋时右腿保持站姿。同理,左肢伸肌的兴奋使左腿站立,与此同时,右腿弯曲。这个过程就使得智能行走机器人的双腿可以交替行走(图 5)。

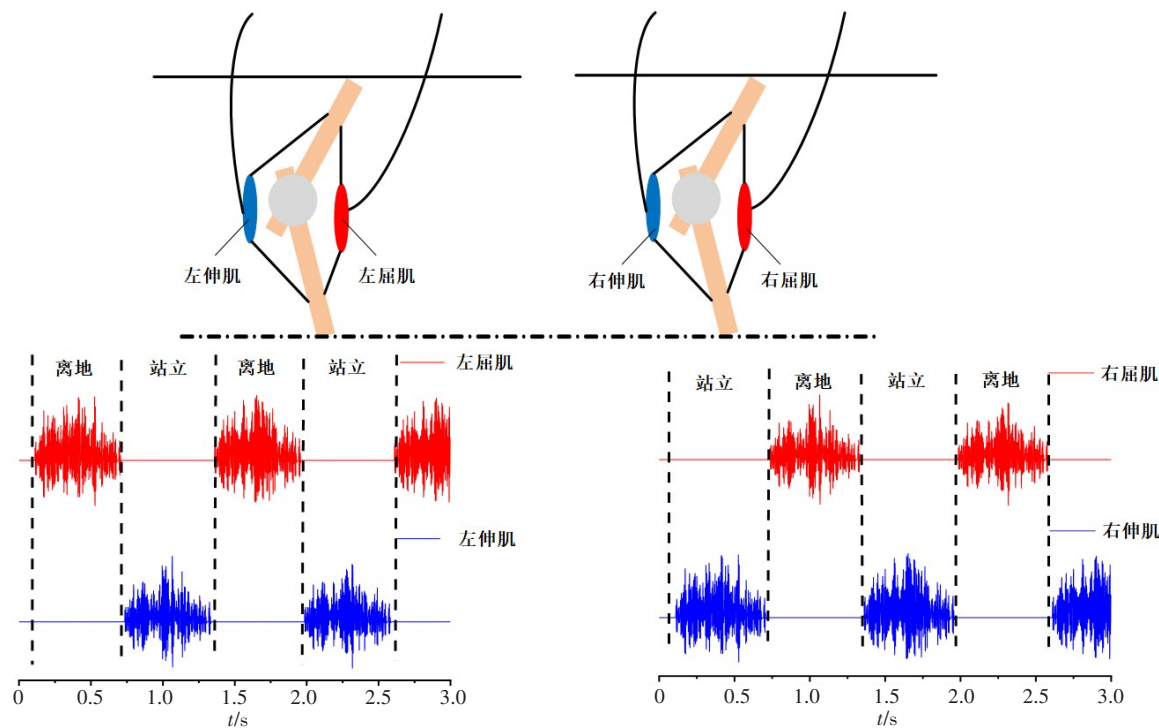


图 5 骨骼肌产生肌电图信号,使左右四肢交替运动
Figure 5 Skeletal muscle produces EMG signals to make the left and right limbs move alternately

5 讨论

本文提出了一种不同于传统机器人关节运动的

智能行走机器人构造方法,这种新型机器人基于生理神经网络的原理控制四肢的交替^[15-26]。该设计方

法最大的特点是采用了基于真实神经元电传播的神经网络模型(CPG模型),这对于我们更好地理解生理神经网络的结构和功能具有重要意义。当然,由于生理神经网络的复杂性,本文设计的步行机器人有以下局限性:神经元一般由胞体、树突和轴突组成。神经元的兴奋性与其结构密切相关。为了提高运算速度,CPG模型将神经元简化为胞体和树突;目前,CPG模型只能实现固定模式行走,人类的腿在现实生活中可以实现多种步态模式。接下来,我们将进一步研究肌电信号和步态模式与机器人做出更复杂动作之间的关系。

【参考文献】

- [1] ATOOFI P, HAMKER F H, NASSOUR J. Learning of central pattern generator coordination in robot drawing[J]. Front Neurobot, 2018, 12. DOI:10.3389/fnbot.2018.00044.
- [2] HE W, CHEN Y H, YIN Z. Adaptive neural network control of an uncertain robot with full-state constraints[J]. IEEE Trans Cybern, 2017, 46(3): 620-629.
- [3] CHURCHILL E, BOWSER A, PREECE J. Teaching and learning human-computer interaction[J]. Concurr Comp-Pract E, 2016, 28(4): 1291-1309.
- [4] RYBAK I A, SHEVTSOVA N A, LAFRENIERE-ROULA M, et al. Modelling spinal circuitry involved in locomotor pattern generation: insights from deletions during fictive locomotion[J]. J Physiol, 2006, 577(2): 617-639.
- [5] AUSBORN J, SHEVTSOVA N A, CAGGIANO V, et al. Computational modeling of brainstem circuits controlling locomotor frequency and gait[J]. Elife, 2019, 8. DOI: 10.7554/eLife.43587.
- [6] MCCREA D A. Organization of mammalian locomotor rhythm and pattern generation[J]. Brain Res Rev, 2008, 57(1): 134-146.
- [7] STUART D G, HULTBORN H. Thomas Graham Brown (1882-1965), Anders Lundberg (1920-), and the neural control of stepping[J]. Brain Res Rev, 2008, 59(1): 74-95.
- [8] GUERTIN P A. The mammalian central pattern generator for locomotion[J]. Brain Res Rev, 2009, 62(1): 45-56.
- [9] RYBAK I A, SMITH J C. Computational modeling of the respiratory network. encyclopedia of neuroscience [M]. Springer Berlin Heidelberg, 2009: 824-832.
- [10] PRILUTSKY B I, KLISHKO A N, WEBER D J, et al. Computing motion dependent afferent activity during cat locomotion using a forward dynamics musculoskeletal model [M]//Neuromechanical Modeling of Posture and Locomotion. New York: Springer, 2016, 273-307.
- [11] HODGKIN A L, HUXLEY A F. A quantitative description of membrane current and its application to conduction and excitation in nerve[J]. Bull Math Biol, 1990, 52(1-2): 25-71.
- [12] KOIZUMI H, SMITH J C. Persistent Na⁺ and K⁺-dominated leak currents contribute to respiratory rhythm generation in the pre-Botzinger complex *in vitro*[J]. J Neurosci, 2008, 28(7): 1773-1785.
- [13] BROCARD F, SHEVTSOVA N A, BOUHADFANE M, et al. Activity-dependent changes in extracellular Ca²⁺ and K⁺ reveal pacemakers in the spinal locomotor-related network[J]. Neuron, 2013, 77(6): 1047-1054.
- [14] MCCREA D A, RYBAK I A. Modeling the mammalian locomotor CPG: Insights from mistakes and perturbations[J]. Prog Brain Res, 2007, 165: 235-253.
- [15] ZENGEL J E, REID S A, SYPERT G W, et al. Membrane electrical properties and prediction of motor-unit type of medial gastrocnemius motoneurons in the cat[J]. J Neurophysiol, 1985, 53(5): 1323-1344.
- [16] VIEIRA M F, KOHN A F. Compartmental models of mammalian motoneurons of types S, FR and FF and their computer simulation[J]. Comput Biol Med, 2007, 37(6): 842-860.
- [17] MCCREA D A, RYBAK I A. Modeling the mammalian locomotor CPG: insights from mistakes and perturbations[M]//CISEK P, DREW T, KALASKA J F. Computational Neuroscience: Theoretical Insights into Brain Function, 2007: 235-253.
- [18] DAI Y, JONES K E, FEDIRCHUK B, et al. A modelling study of locomotion-induced hyperpolarization of voltage threshold in cat lumbar motoneurons[J]. J Physiol, 2002, 544(2): 521-536.
- [19] GOSLOW JR G E, CAMERON W E, STUART D G. The fast twitch motor units of cat ankle flexors. 1. Tripartite classification on basis of fatigability[J]. Brain Res, 1977, 134(1): 35-46.
- [20] HECKMAN C J, BINDER M D. Analysis of effective synaptic currents generated by homonymous Ia afferent fibers in motoneurons of the cat[J]. J Neurophysiol, 1988, 60(6): 1946-1966.
- [21] TANSEY K E, BOTTERMAN B R. Activation of type-identified motor units during centrally evoked contractions in the cat medial gastrocnemius muscle. 1. Motor-unit recruitment[J]. J Neurophysiol, 1996, 75(1): 26-37.
- [22] LOMBARDO J, HARRINGTON M A. Non-reciprocal mechanisms of up- and down-regulation of spinal motoneuron excitability by modulators of KCNQ/Kv7 channels[J]. J Neurophysiol, 2016, 116(5): 2114-2124.
- [23] DANNER S M, WILSHIN S D, SHEVTSOVA N A, et al. Central control of interlimb coordination and speed-dependent gait expression in quadrupeds[J]. J Physiol, 2016, 594(23): 6947-6967.
- [24] DANNER S M, SHEVTSOVA N A, FRIGON A, et al. Computational modeling of spinal circuits controlling limb coordination and gaits in quadrupeds[J]. Elife, 2017, 6: e31050.
- [25] SHEVTSOVA N A, RYBAK I A. Organization of flexor-extensor interactions in the mammalian spinal cord: insights from computational modelling[J]. J Physiol, 2016, 594(21): 6117-6131.
- [26] SONG J R, PALLUCCHI I, AUSBORN J, et al. Multiple rhythm-generating circuits act in tandem with pacemaker properties to control the start and speed of locomotion[J]. Neuron, 2020, 105(6): 1048-1061.

(编辑:薛泽玲)