Journal of System Simulation

Volume 29 | Issue 12 Article 21

6-6-2020

Gait CPG Adjustment for a Quadruped Robot Based on Hopf Oscillator

Haidong Xu
School of Mechanical and Electrical Engineering, China Jiliang University, Hangzhou 310000, China;

Gan Su
School of Mechanical and Electrical Engineering, China Jiliang University, Hangzhou 310000, China;

Ren Jie
School of Mechanical and Electrical Engineering, China Jiliang University, Hangzhou 310000, China;

Binrui Wang
School of Mechanical and Electrical Engineering, China Jiliang University, Hangzhou 310000, China;

See next page for additional authors

Follow this and additional works at: https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal

Part of the Artificial Intelligence and Robotics Commons, Computer Engineering Commons, Numerical Analysis and Scientific Computing Commons, Operations Research, Systems Engineering and Industrial Engineering Commons, and the Systems Science Commons

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

Gait CPG Adjustment for a Quadruped Robot Based on Hopf Oscillator

Abstract

Abstract: CPG (central pattern generator) plays an important role for rhythm motion of the mammals. *According to gait characteristics and kinematic relationship of hound, a full symmetric CPG network was built by considering the structure features of quadruped robot. Hopf oscillators model were chosen as core neuron models of CPG network, and the rotation matrix was used to connect four oscillators. After transformation by mapping function, output signals of CPG network were used to control joint angle of the virtual prototype robot. Quick and smooth transition between walk gait and trot gait were achieved by adjusting the parameters of CPG network such as duty ratio and changing the rotation matrix.* The performance and effectiveness of adjusting the parameters in CPG network to realize gait transition were verified by coordinated simulation between MATLAB and ADAMS.

Keywords

quadruped robot, Hopf oscillator model, rhythmic signal, rotation matrix, gait transition

Authors

Haidong Xu, Gan Su, Ren Jie, Binrui Wang, and Yinglian Jin

Recommended Citation

Xu Haidong, Gan Su, Ren Jie, Wang Binrui, Jin Yinglian. Gait CPG Adjustment for a Quadruped Robot Based on Hopf Oscillator[J]. Journal of System Simulation, 2017, 29(12): 3092-3099.

This paper is available in Journal of System Simulation: https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal/vol29/iss12/21

第 29 卷第 12 期 系统仿真学报© Vol. 29 No. 12
2017 年 12 月 Journal of System Simulation Dec., 2017

基于 Hopf 振荡器的四足机器人步态 CPG 调节

徐海东，干苏，任杰，王斌锐*，金英连
（中国计量大学机电工程学院，浙江 杭州 310000）

摘要：中枢模式发生器(CPG)对于哺乳动物的节律运动有着重要作用。*依据猎狗的步态特征和肢体运动关系，针对四足机器人的结构特点，以 Hopf 振荡器模型为核心，使用旋转矩阵连接四个振荡器，建立全对称的 CPG 网络模型。CPG 网络输出信号通过映射函数变换作为机器人虚拟样机关节转角的控制信号。通过调节 CPG 网络中占空比等参数，改变旋转矩阵的值，可以实现在 walk 与 trot 两种典型步态间的快速平滑转换。*通过 MATLAB 与 ADAMS 联合仿真实验，验证了调节 CPG 模型参数实现四足机器人的步态转换的有效性。

关键词：四足机器人；Hopf 振荡器模型；节律信号；旋转矩阵；步态转换
中图分类号：TP391.9 文献标识码：A 文章编号：1004-731X (2017) 12-3092-08
DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.201712021

Gait CPG Adjustment for a Quadruped Robot Based on Hopf Oscillator

Xu Haidong, *Gan Su*, *Ren Jie*, *Wang Binrui**, *Jin Yinglian*
(School of Mechanical and Electrical Engineering, China Jiliang University, Hangzhou 310000, China)

Abstract: CPG (central pattern generator) plays an important role for rhythm motion of the mammals. *According to gait characteristics and kinematic relationship of hound, a full symmetric CPG network was built by considering the structure features of quadruped robot. Hopf oscillators model were chosen as core neuron models of CPG network, and the rotation matrix was used to connect four oscillators. After transformation by mapping function, output signals of CPG network were used to control joint angle of the virtual prototype robot. Quick and smooth transition between walk gait and trot gait were achieved by adjusting the parameters of CPG network such as duty ratio and changing the rotation matrix.* The performance and effectiveness of adjusting the parameters in CPG network to realize gait transition were verified by coordinated simulation between MATLAB and ADAMS.

Keywords: quadruped robot; Hopf oscillator model; rhythmic signal; rotation matrix; gait transition

引言

CPG 存在于动物的脊髓或胸腹神经节中，是由中间神经元构成的分布式振荡网络，能产生具有稳定相位互锁关系的节律信号[1]。CPG 中各神经元之间的突触连接具有可塑性，表现出多种输出行为，控制动物实现多种运动模式[2-3]。将 CPG 应用于多足移动机器人的步态调节是研究热点。数学上，可用非线性振荡器对 CPG 进行建模，通常有 Hopf、Rayleigh、Matsuoka、Kimura 等振荡器[4]。通过调节 CPG 模型的参数，可改变步态特征[5-6]。CPG 与上层神经网络、下层多种传感器的动态交互，可实现对非规则地形的适应[7-8]。四足机器人对复杂地形具有高度适应性，比双足机器人承载能

收稿日期：2015-10-23 修回日期：2015-12-29；
基金项目：国家自然科学基金(51575503)；
作者简介：徐海东(1991-)，男，安徽马鞍山，硕士，研究方向为机器人运动规划与控制。

Published by Journal of System Simulation, 2017

Journal of System Simulation, Vol. 29 [2017], Iss. 12, Art. 21

力强、稳定性好，同时比六足、八足机器人的结构简单，具有广阔的前景[9]。张秀丽等人总结出了具有普遍意义的四足哺乳类动物同一腿膝、髋关节之间的运动规律：(1) 在正常行走时，同一腿的膝、髋关节具有固定的相位关系；(2) 摆动相时，膝、髋关节同步运动，髋关节摆动前期，膝关节收缩；摆动中点，膝关节收缩到最大；摆动后期，膝关节伸展；摆动终点，膝关节恢复原位；(3) 支撑相时，髋关节后摆，膝关节基本保持不动[10]。Santos C P 等人建立了基于 Hopf 振荡器的 CPG，并对 Hopf 振荡器进行参数调节，在 AIBO 机器狗上验证了调节方法的有效性[11]。Wang J 等研究了可实现速度平滑变化的 CPG 模型[12]。

由于四足机器人结构较复杂，造价较高，因此在开发实物样机之前需进行虚拟样机仿真分析。席伟俤等人利用 Simulink 中的 SimMechanics 模块对四足机器人进行建模分析。王鹏飞等人采用 ADAMS 软件对四足机器人的步态进行规划和仿真分析。蔡云等人采用了 ADAMS 和 ANYSYS 软件对仿马四足机器人进行了步态和应力分析。赵彦等人使用三角函数曲线规划四足机器人关节运动，使用 MATLAB 与 ADAMS 联合仿真进行验证[13]。

本文利用 Hopf 振荡器组建四足机器人的 CPG 网络模型，建立四腿髋关节振荡器之间的腿间耦合关系、髋与膝关节之间的腿内耦合关系，分析行走速度变化时的步态特征及其参数调节。通过在 ADAMS 和 MATLAB 联合仿真环境下进行验证，最后归纳出结论。

1 四足机器人机构与虚拟样机

1.1 四足机器人机构

通过对四足哺乳动物形态学研究可知，其前、后腿部关节往往采用膝、肘对顶的配置方式，有助于改善运动的稳定性[14]。在生物行走过程中，肩胛和骨盆实现了腿部运动空间的扩展，腿部的多个自由度使得生物能很好地适应各种地形，迅速灵活地调整自身的姿态与运动步态[15]。

参照猎狗的骨骼结构并做简化，设计了四足机器人，如图 1 所示。

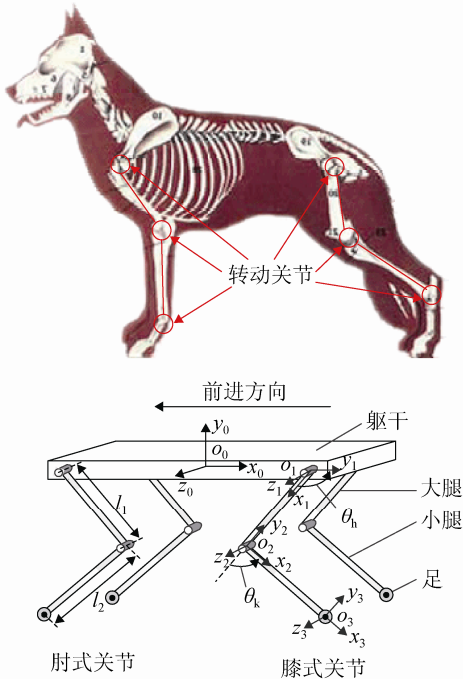


图 1 仿生四足机器人机构简图
Fig.1 Schematic of bionic quadruped robot mechanism

机器人由躯干和 4 条腿组成，每条腿有 2 个主动转动关节(髋关节，膝/肘关节)和 1 个被动转动关节(踝关节)，包括大腿、小腿和足三部分。前后腿关节采用对称配置，为表达方便，对于前腿肘关节、后腿膝关节，本文统一称为膝关节。四足机器人步行过程中是开链和闭链交替变换的复杂机构。当四足机器人对角线上的两条腿处于摆动相时，两腿与机体构成具有两开链的串联机构；当两条腿处于支撑相时，两腿与机体和地面构成一个具有两闭-链的并联机构。机器人步行过程中，腿机构始终处于摆动相和支撑相交替动作状态。

对四足机器人进行运动学分析，以左后腿为例，在机体质心处建立坐标系{0}，x_0 轴正向与机体前进方向相反，y_0 轴正向与重力方向相反，由右手法则确定 z_0 轴方向。在髋关节处建立坐标系{1}，在膝关节处建立坐标系{2}，在足端处建立坐标系{3}。θ_h、θ_k 分别为髋关节和膝关节转角，l_1、l_2

https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal/vol29/iss12/21
DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.201712021

第 29 卷第 12 期 系统仿真学报 Vol. 29 No. 12
2017 年 12 月 Journal of System Simulation Dec., 2017

分别为大腿和小腿长度。

1.2 虚拟样机建模

在 SolidWorks 中建立四足机器人三维模型，将其导入到 ADAMS 中，在躯体与大腿连接处的髋关节、大腿与小腿连接处的膝关节添加旋转约束，并在其上添加旋转驱动。足部被动旋转，主要起到减震缓冲作用，因此只添加旋转约束，不添加驱动。

四足机器人在行走过程中，足端与地面间断性接触，产生了接触力和摩擦力，使得机器人可以稳定地行走。ADAMS 中定义接触力通常采用基于碰撞函数(IMPACT)的接触算法，定义摩擦力通常采用库伦摩擦。

2 行走步态的生成

2.1 四足机器人步态特征

机器人的节律运动可认为是四条腿产生的具有固定相位关系的、合适的、稳定的移动序列。本文模仿猎狗的步态生成方法，使用 CPG 模型来产生耦合的、具有稳定相位关系的输出信号，然后用映射函数将其变换为四足机器人的关节角度轨迹。

步态反映为行走时的姿态。一个完整的步态周期分为支撑相和摆动相两个部分。足端抬起标志着支撑相的结束和摆动相的开始，足端落地标志着摆动相的结束和支撑相的开始。一个步态周期时间 T 包含支撑相时间 T_{st} 和摆动相时间 T_{sw}。占空比 β 可表示为：

$$\beta=\frac{T_{st}}{T}=\frac{T_{st}}{T_{st}+T_{sw}} \tag{1}$$

根据 β 可将机器人步态分为静态步态与动态步态。$0<\beta<0.75$ 时为动态步态，$0.75<\beta<1$ 时为静态步态。当 $\beta=0.75$，为临界步态，是静态步态中最不稳定的一种。因此，若分析静态稳定性，只需分析 $\beta=0.75$ 时候的情况即可。动态步行中，当 $0<\beta<0.5$，行走过程中任意时刻都只有不足两条腿处于支撑相；当 $\beta=0.5$，行走过程中，两组腿交替摆动，同一时刻有两条腿处于支撑相，另两条腿处于摆动相；当 $0.5<\beta<0.75$，行走过程中有两条腿或三条腿处于支撑相的情况，是一种中间过渡状态。

四足机器人一个步态周期内质心前进的距离称为步幅 d。摆动腿从上一个落脚点到下一个落脚点移动的距离称为步长 s，步长与步幅的关系为 $s=\beta d$。

四足机器人左前腿、右前腿、左后腿、右后腿分别用 LF、RF、LH、RH 表示，观察自然界中各类四足动物的运动，大多数动物是按照 LF－RH－RF－LH 的抬腿顺序循环运动，这种顺序下在静态步行时，稳定裕量最大，稳定性最好。四足机器人三种不同步态的时序图如图 2 所示。

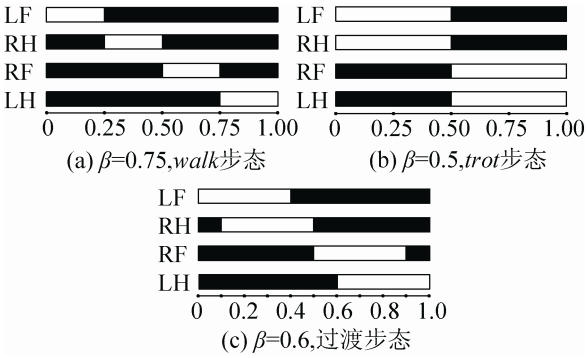


图 2 四足机器人的步态时序图

Fig.2 Gait sequence of the quadruped robot

图 2 中，白色部分表示摆动相，黑色部分表示支撑相，可以清晰看出各腿摆动顺序及每条腿的占空比。

2.2 CPG 模型和网络结构

为了生成每条腿的节律信号，本文采用了 Hopf 振荡器模型，单个 Hopf 振荡器表达式为：

$$\begin{cases}\dot{x}=\alpha(\mu-r^2)x-\omega z\\ \dot{z}=\alpha(\mu-r^2)z+\omega x\end{cases} \tag{2}$$

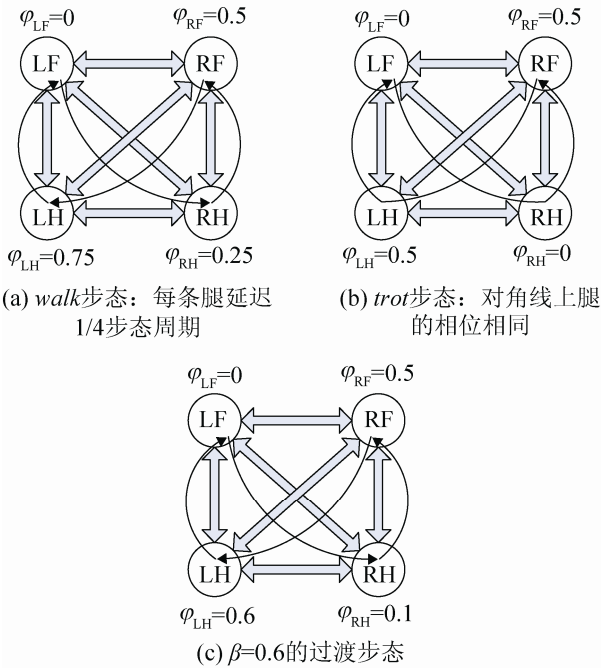
式中：x、z 是状态变量，描述振荡器谐波输出或者稳定固定点；r 是系统的扰动，$r=\sqrt{x^2+z^2}$；α 用于控制振荡器收敛到极限环的速度；$\sqrt{\mu}$ 是极限环的半径和振荡器的幅值；ω 表示极限环的频

Published by Journal of System Simulation, 2017

Journal of System Simulation, Vol. 29 [2017], Iss. 12, Art. 21

率(振荡频率)。

本文设计的 CPG 网络采用全对称连接的网络拓扑结构，由四个相互耦合的振荡器组成，振荡器之间的相互作用为激励或抑制，如图 3 所示，分别是机器人*walk*步态和*trot*步态的CPG网络结构图，黑色箭头代表抬腿顺序。



(a) *walk*步态：每条腿延迟1/4步态周期　(b) *trot*步态：对角线上腿的相位相同

(c) β=0.6的过渡步态

图 3　四足机器人典型步态的 CPG 网络结构简图

Fig.3　Schematic of the CPG network structure in the typical gait of quadruped robot

图 3 中，φ_i (i=LF、RF、LH、RH)表示的是i腿相对 LF 腿的相位。定义φ_{LF}=0，可以分析得到其他三条腿的相位：

$$\begin{cases}\varphi_{\mathrm{LF}}=0\\ \varphi_{\mathrm{LH}}\neq 0,\ \varphi_{\mathrm{RF}}=\beta-\varphi_{\mathrm{RH}},\ \varphi_{\mathrm{LH}}=\beta\end{cases} \tag{3}$$

$$\phi_i^j=2\pi(\varphi_i-\varphi_j) \tag{4}$$

式中：ϕ_i^j 是 i 腿和 j 腿间的相位差。

本文研究占空比范围在$0.5\leqslant\beta\leqslant 0.75$所表示的步态，即 *trot* 步态、*walk* 步态及两者之间的过渡步态。β 和φ_{RH}是变化的。由于β=0.5 和β=0.75 时，φ_{RF}都等于 0.5，可以令φ_{RF}=0.5 进行简化，所以$\varphi_{\mathrm{RH}}=\beta-0.5$。

四个 Hopf 振荡器按照 LF、RF、LH、RH 的顺序依次标号为 1、2、3、4，组成 CPG 网络，其表达式为：

$$\begin{pmatrix}\dot{x}_i\\ \dot{z}_i\end{pmatrix}=\begin{pmatrix}\alpha\left(\mu_i-r_i^2\right) & -\omega_i\\ \omega_i & \alpha\left(\mu_i-r_i^2\right)\end{pmatrix}\begin{pmatrix}x_i\\ z_i\end{pmatrix}+\sum_{j=1,j\neq i}^{4}\boldsymbol{R}(\phi_i^j)\begin{pmatrix}x_j\\ z_j\end{pmatrix} \tag{5}$$

式中：$\boldsymbol{R}(\phi_i^j)$是 CPG 网络连接权重矩阵，用于调节振荡器之间的相位差，对应机器人不用的步态，其表达式为：

$$\boldsymbol{R}(\phi_i^j)=\begin{bmatrix}\cos\phi_i^j & -\sin\phi_i^j\\ \sin\phi_i^j & \cos\phi_i^j\end{bmatrix} \tag{1}$$

由式(5)可求得状态变量 x_i 的曲线，将其上升沿对应机器人的摆动相，下降沿对应机器人的支撑相。当 ω_i 为常量时，由 x_i 的周期曲线可知，上升沿和下降沿持续时间相同。四足机器人不同速度行走时，每条腿的摆动相和支撑相的持续时间不同。为调整摆动相与支撑相的时间，本文设计：

$$\omega_i=\frac{\omega_{\mathrm{st}}}{1+\mathrm{e}^{-az_i}}+\frac{\omega_{\mathrm{sw}}}{1+\mathrm{e}^{az_i}} \tag{2}$$

式中：ω_{st}、ω_{sw} 分别是支撑相和摆动相的频率，$\omega_{\mathrm{st}}=\omega_{\mathrm{sw}}(1-\beta)/\beta$；$a$ 是较大的正常数，决定 ω_i 在 ω_{st}、ω_{sw} 之间变化的速度。

2.3 映射函数

四个 Hopf 振荡器实际对应四足机器人的四条腿，模型参数与四足机器人行走步态之间的关系为：振荡器输出 x_i 作为机器人 i 腿髋关节旋转的角度值 $\theta_{\mathrm{h}i}(t)$。$\sqrt{\mu_i}$ 决定了髋关节的最大摆动角度；ω_i 决定了髋关节的摆动快慢；β 用于改变机器人支撑相的时间，影响机器人的步幅大小。这些参数都可以影响机器人行走的速度。膝关节与髋关节单向耦合，并且存在着固定的相位差。振荡器输出 x_i 和 z_i 也存在固定的相位差，因而可以将振荡器输出 z_i 经过变换作为 i 腿膝关节旋转的角度值 $\theta_{ki}(t)$。

针对四足机器人前后腿对称的结构，根据髋、膝关节之间的运动规律：膝式关节，摆动前期髋、膝反向，摆动后期髋、膝同向；肘式关节与膝式关

https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal/vol29/iss12/21
DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.201712021

第 29 卷第 12 期 系统仿真学报 Vol. 29 No. 12
2017 年 12 月 Journal of System Simulation Dec., 2017

节恰好相反，摆动前期髋、膝同向，摆动后期髋、膝反向，髋、膝关节角度设计为：

$$\begin{cases}\theta_{\mathrm{hi}}(t)=x_i \\ \theta_{\mathrm{ki}}(t)=\begin{cases}\mathrm{sgn}(\psi)\dfrac{A_{\mathrm{k}}}{A_{\mathrm{h}}}z_i, & z_i\geqslant 0(\text{摆动相}) \\ 0, & z_i<0(\text{支撑相})\end{cases}\end{cases} \tag{8}$$

式中：A_{h}、A_{k} 分别为规划的髋、膝关节幅值，分别决定了四足机器人的步长和抬腿高度；$\mathrm{sgn}(\psi)=\begin{cases}-1, & \psi=\text{膝式关节}\\ 1, & \psi=\text{肘式关节}\end{cases}$。

2.4 步态转换

利用 CPG 模型实现步态转换的本质是调节 CPG 网络中各振荡器之间的相位关系。本文主要研究的是 *walk* 步态和 *trot* 步态间的步态转换。如图 3 所示，无论是 *walk* 步态还是 *trot* 步态，LF 和 RF、LH 和 RH 之间的相位差都是固定值 π。不同步态之间的区别在于对角线上两腿间的相位差的不同。典型的 *walk* 步态中对角线上两腿间相位差是 π/2(β=0.75)，*trot* 步态中对角线上两腿间相位差是 0(β=0.5)。所以可通过改变 β 和 φ_{RH} 的值来改变矩阵 $\boldsymbol{R}(\phi_i^j)$ 的值，进而得到不同的步态。

3 虚拟样机仿真平台及步态调节分析

本文采用 MATLAB 和 ADAMS 联合仿真进行实验。在 MATLAB/Simulink 中建立 CPG 仿真模型。为方便参数调节，建立了多层子系统，使得 CPG 仿真模型非常简明，图 4 所示为仿真模型最外层。

在 ADAMS 中建立虚拟样机模型，并创建 8 个变量对应每个转动关节。通过这 8 个变量，ADAMS 和 MATLAB 可以进行数据交换，实现联合仿真。

3.1 *walk* 步态仿真

将 CPG 模型参数设定为：α=10，μ=100，a=100，$\omega_{\mathrm{sw}}=2\pi$，$\beta$=0.75，$\varphi_{\mathrm{RH}}$=0.25。根据式(1)，可计算出振荡器输出曲线的上升沿时间 $T_{\mathrm{sw}}=0.5\,\mathrm{s}$，下降沿时间 $T_{\mathrm{st}}=1.5\,\mathrm{s}$，周期 $T=2\,\mathrm{s}$。

图 5(a)为仿真得到的 *walk* 步态时 LF 腿髋、膝关节转角曲线。可见，CPG 模型能够快速输出具有稳定相位关系的髋、膝转角曲线，二者的相位差为 π/2。从图中可计算得，$T_{\mathrm{sw}}\approx 0.5\,\mathrm{s}$，$T_{\mathrm{st}}\approx 1.5\,\mathrm{s}$，与式(1)理论计算结果一致。其他腿的髋、膝间相位关系与 LF 腿类似。注意：内膝肘式配置时，前腿与后腿的膝关节曲线是正负相反的。

图 5(b)为仿真得到的 *walk* 步态时四条腿的髋关节转角曲线。可见，相位调节时间约为 1.7 s，各腿间相序为 LF、RH、RF、LH，四条曲线间相位差稳定，约为 1/4 周期，与 φ_{RH}=0.25 时式(3)、(4)理论计算结果一致。仿真结果符合图 2 所示 *walk* 步态特征。

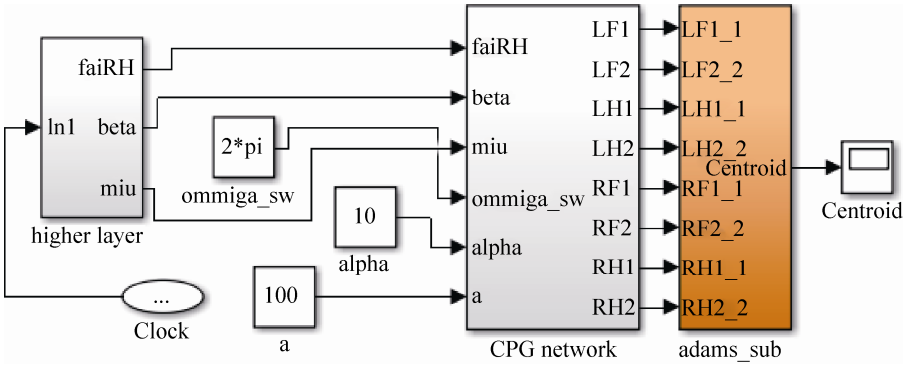
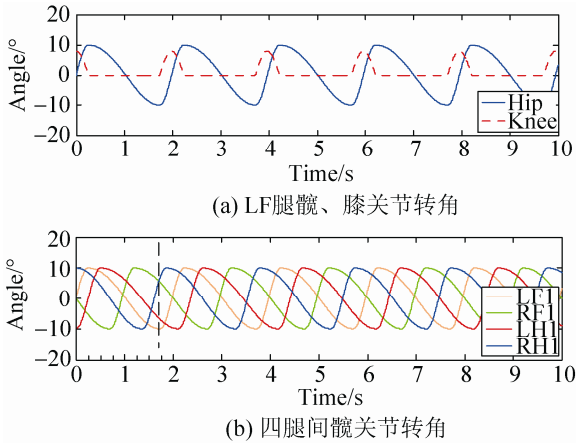


图 4 Simulink 仿真模型
Fig.4 Simulation model in Simulink

Published by Journal of System Simulation, 2017



(a) LF腿髋、膝关节转角

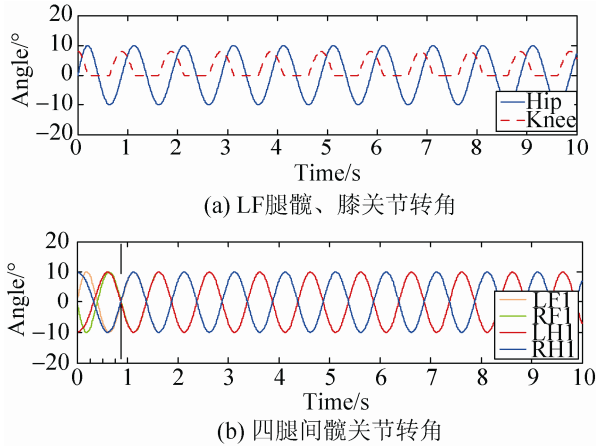
(b) 四腿间髋关节转角

图 5 *walk* 步态关节转角输出曲线
Fig.5 Output curvess of joint angle in walk gait

3.2 *trot* 步态仿真

将 CPG 模型参数设定为：α=10，μ=100，a=100，$\omega_{sw}=2\pi$，β=0.5，φ_{RH}=0。根据式(1)可计算出振荡器输出曲线的上升沿时间 $T_{sw}=0.5$ s，下降沿时间 $T_{st}=0.5$ s，周期 $T=1$ s。

图 6(a)为仿真得到的 *trot* 步态时 LF 腿髋、膝关节转角曲线。可见，CPG 模型能够快速输出具有稳定相位关系的髋、膝转角曲线，二者的相位差为 π/2。从图中可计算得，$T_{sw}\approx0.5$ s，$T_{st}\approx0.5$ s，与式(1)理论计算结果一致。



(a) LF腿髋、膝关节转角

(b) 四腿间髋关节转角

图 6 *trot* 步态时关节转角输出曲线
Fig.6 Output curves of joint angle in trot gait

图 6(b)为仿真得到的 *trot* 步态时四条腿的髋关节转角曲线。可见，相位调节时间约为 0.85 s，LF、RH 腿同相，RF、LH 腿同相，两组腿间的相位差为 1/2 周期，与 φ_{RH}=0 时式(3)、(4)理论计算结果一致。仿真结果符合图 2 所示 *trot* 步态特征。

3.3 两种步态间转换仿真

为实现 *walk* 步态到 *trot* 步态的转换，将 CPG 模型参数设定为：α=10，μ=100，a=100，$\omega_{sw}=2\pi$。初始值 β=0.75，$\varphi_{RH}=0.25$，仿真时间设为 t=20 s。考虑到刚开始阶段，CPG 网络需要较短时间进行耦合，形成相位差，所以设计 *walk* 步态时间为 8 s，*walk* 步态到 *trot* 步态间转换的过渡步态时间为 6 s，*trot* 步态时间为 6 s。因为从 *walk* 转换到 *trot* 步态，φ_{RH} 需要由 0.25 变化到 0，β 需要由 0.75 变化到 0.5。可以令 $\beta=0.5+\varphi_{RH}$，设计 φ_{RH} 为关于时间 t 的线性函数 $\varphi_{RH}(t)=-t/24+7/12$。

同理，对于 *trot* 到 *walk* 步态的变换，CPG 模型的参数只改变 φ_{RH}、β，其他保持不变。设计 *trot* 步态时间为 8 s，*trot* 步态到 *walk* 步态间转换的过渡步态时间为 6 s，*walk* 步态时间为 6 s。初始值 β=0.5，φ_{RH}=0，为了完成转换，φ_{RH} 需要由 0 变化到 0.25，β 需要由 0.5 变化到 0.75。可以令 $\beta=0.5+\varphi_{RH}$，线性函数 $\varphi_{RH}(t)=t/24-1/3$。

将步态转换时间缩短为 2 s，修改 $\varphi_{RH}(t)$，保持其他参数不变，重复上面两个仿真。

步态转换仿真结果如图 7 和图 8 所示。

图 7 可见，关节转角输出曲线经过开始时较短时间的相位自动调节，四条腿相位关系趋于正常。两组仿真结果在 8 s 前，输出曲线与单一步态仿真实验结果相同。8 s 后，图中(a)、(c)输出曲线的占空比开始变小(0.75→0.5)，下降沿时间变短(1.5 s→0.5 s)，各腿相位关系逐渐向对角线上同相过渡；(b)、(d)的占空比开始变大(0.5→0.75)，下降沿时间变长(0.5 s→1.5 s)，对角线上同相的两腿相位差逐渐变大。第一组仿真实验(a)、(b)转换时间为 6 s，和设定时间一致；第二组仿真实验(c)、(d)转换时间约为 2.06 s，与设定的时间基本一致。转换完成后，图中(a)、(c)输出曲线的占空比稳定为 0.5，对角线上两腿同相；(b)、(d)的占空比稳定为 0.75，各腿间相位相差约 1/4 步态周期。

https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal/vol29/iss12/21
DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.201712021

第 29 卷第 12 期 系统仿真学报 Vol. 29 No. 12
2017 年 12 月 Journal of System Simulation Dec., 2017

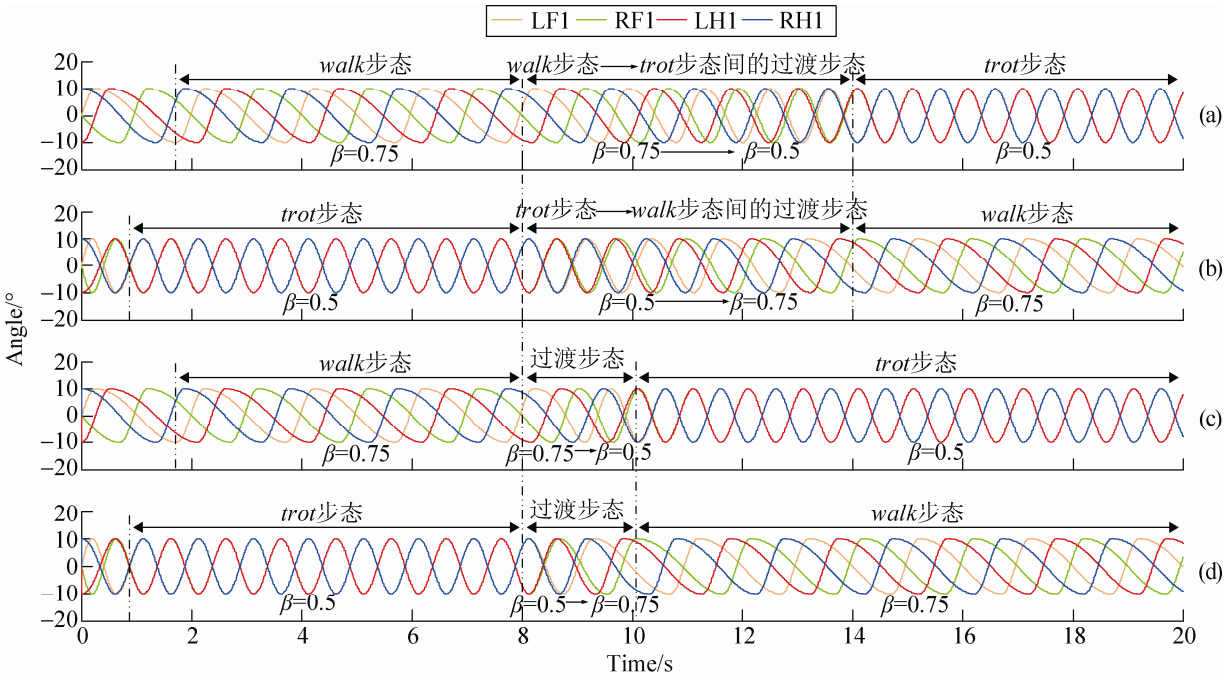


图 7 步态转换时四腿髋关节转角输出曲线
Fig.7 Output curves of four-legged hip joint angle in gait transition

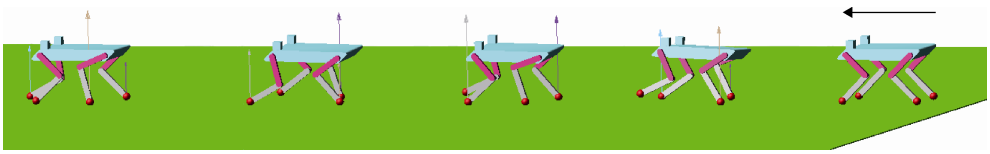


图 8 ADAMS 虚拟样机实验结果
Fig.8 Experimental results of virtual prototype in ADAMS

通过多组仿真实验，可知：转换过程中，摆动相时间不变，支撑相时间变化；两种步态最快可在 *walk* 步态的一个步态周期内转换完成；无论转换时间长短，角度曲线都无剧烈波动和跳变，转换过程平滑；转换前后相位关系保持稳定。

图 8 可见，在 ADAMS 中，以 *walk* 步态到 *trot* 步态的转换为例进行仿真，虚拟样机实现正常行走。样机在关节角度摆动幅值不变的情况下，各腿的占空比在变小，步幅在变大，行走速度在变快。

4 结论

本文利用耦合的 Hopf 振荡器模型建立起适合实现四足机器人协调运动和稳定步态调节的全对称 CPG 网络模型。仿真分析表明：

(1) CPG 输出的各个节律信号间有着严格的相位差，每个信号都保持正确的占空比；

(2) 不同的相位差对应着机器人不同的步态，并且每种步态都对应一定范围的占空比和相应的步速；

(3) 通过对 β 和 φ_{RH} 的值进行连续调节，可实现振荡器之间相位关系的连续改变，从而实现步态的快速平滑转换。

CPG 参数与步态调节方法的研究，为下一步四足机器人实物样机的研发奠定了基础。

参考文献：

[1] Ijspeert A J. Central Pattern Generators for Locomotion Control in Animals and Robots: A Review [J]. Neural Networks (S1045-9227), 2008, 21(4): 642-653.

[2] Kuhlman M J, Hays J, Sofge D and Gupta S K. Central Pattern Generator Based Omnidirectional Locomotion for Quadrupedal Robotics[C]// IEEE/RSJ International

Published by Journal of System Simulation, 2017

Conference on Intelligent Robots and Systems. Chicago, USA: IEEE, 2014.

[3] Li J, Wu C, Ge T. Central Pattern Generator Based Gait Control for Planar Quadruped Robots [J]. Journal of Shanghai Jiaotong University (Science) (S1007-1172), 2014, 19(1): 1-10.

[4] 王斐斐, 张奇志, 周亚丽. 构成 CPGs 的非线性振荡器模型的介绍[J]. 北京机械工业学院学报, 2007, 22(4): 31-36.
Wang Feifei, Zhang Qizhi, Zhou Yali. Introduction of non-linear oscillator model of CPGs[J]. Journal of Beijing Institute of Machinery, 2007, 22(4): 31-36.

[5] Hu Y, Liang J, Wang T. Parameter Synthesis of Coupled Nonlinear Oscillators for CPG-Based Robotic Locomotion [J]. Industrial Electronics, IEEE Transactions on (S0278-0046), 2014, 61(11): 6183-6191.

[6] Barron-Zambrano J H, Torres-Huitzil C. Two-phase GA Parameter Tuning Method of CPGs for Quadruped Gaits[C]// IEEE International Joint Conference on Neural Networks (IJCNN). San Jose, USA: IEEE, 2011: 1767-1774.

[7] Teng L, Wu X, Chen W, et al. Center of Gravity Balance Approach Based on CPG Algorithm for locomotion Control of A Quadruped Robot[C]// IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM). Wollongong, Australia: IEEE, 2013: 325-329.

[8] Wu X, Teng L, Chen W, et al. CPGs with Continuous Adjustment of Phase Difference for Locomotion Control [J]. International Journal of Advanced Robotic Systems (S1729-8806), 2013, 10(269): 1-13.

[9] 李华师. 四足机器人仿生运动控制理论与方法的研究[D]. 北京: 北京理工大学, 2014: 1-12.
Li Huashi. Biomimetic Locomotion Control Theories and Methods of Quadruped Robot[D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2014: 1-12.

[10] 张秀丽. 四足机器人节律运动及环境适应性的生物控制研究[D]. 北京: 清华大学, 2004: 66-72.
Zhang Xiuli. Biological-inspired Rhythmic Motion & Environmental Adaptability for Quadruped Robo[D]. Beijing: Tsinghua University, 2004: 66-72.

[11] Santos C P, Matos V. Gait Transition and Modulation in a Quadruped Robot: A Brainstem-Like Modulation Approach [J]. Robotics and Autonomous System (S0921-8890), 2011, 59(9): 620-634.

[12] Wang J, Wen J, Chen W, et al. A Gait Generating Algorithm with Smooth Speed Transition for the Locomotion of Legged Robots [J]. Transactions of the Institute of Measurement and Control (S0142-3312), 2014, 36(2): 260-275.

[13] 赵彦. 基于 ADAMS 和 MATLAB 的四足机器人联合仿真[D]. 济南: 山东大学, 2014: 17-30.
Zhao Yan. The Simulation of Quadruped Robot Based on MATLAB and ADAMS[D]. Jinan: Shandong University. 2014: 17-30.

[14] Maufroy C, Kimura H, Takase K. Integration of Posture and Rhythmic Motion Controls in Quadrupedal Dynamic Walking Using Phase Modulations Based on Leg Loading/Unloading[J]. Autonomous Robots (S0929-5593), 2010, 28(3): 331-353.

[15] 张玉刚. 四足机器人的运动学分析与仿真研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2012: 8-12.
Zhang Yugang. The Kinematics Analysis and Simulation Research of Quadruped Robot[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2012: 8-12.

https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal/vol29/iss12/21
DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.201712021