

## 基于中枢模式发生器的机器人足端轨迹规划

张峰,曹乐,徐浩洋,张思河

上海工程技术大学电子电气工程学院,上海 201620

**【摘要】**提出一种仿生足端轨迹控制法,与传统方法相比,该方法用单个CPG神经元,将振荡器产生的轨迹直接作用于六足机器人足端,通过逆向求解各关节角度,节律摆动机器人各足实现横向行走。可调节CPG振荡器中的负载因子,周期,幅值等参数,实现六足机器人足端轨迹中的步距,步幅以及在摆动相过程中的前摆轨迹和后摆轨迹调节。通过Matlab与Coppeliassim联合仿真,验证了改进后的模型应用在足端轨迹的可行性,与传统方法相比,参数调节灵活性高,并发处理效果好。

**【关键词】**六足机器人;中枢模式发生器;Hopf振荡器;足端轨迹;节律运动

**【中图分类号】**R318;TP242

**【文献标志码】**A

**【文章编号】**1005-202X(2024)01-0072-09

### Robot foot trajectory planning based on central pattern generator

ZHANG Feng, CAO Le, XU Haoyang, ZHANG Sihe

School of Electronic and Electrical Engineering, Shanghai University of Engineering Science, Shanghai 201620, China

**Abstract:** A foot trajectory control method is proposed for biomimetic robot. Compared with traditional methods, the method uses a single CPG neuron to directly apply the foot trajectory generated by the oscillator to the hexapod robot. The joint angles is solved reversely for realizing the rhythmic foot swing, thereby achieving lateral walking. The step distance and step amplitude in foot trajectory, and the forward and backward swing trajectories during the swing phase can be adjusted by setting the load factor, period, amplitude and other parameters in the CPG oscillator. The feasibility of applying the improved Hopf model to foot trajectory is verified through the joint simulation using Matlab and Coppeliassim. Compared with traditional methods, the improved model has high flexibility in parameter adjustment and performs well in concurrency processing.

**Keywords:** hexapod robot; Central pattern generators; Hopf oscillator; foot trajectory; rhythmic movement

### 前言

生物、仿生技术的发展助力了机器人行业的蓬勃发展。基于仿生思想的运动控制法被应用到了广泛的研究中,也代表着机器人仿生理理论的实例化,继续深入仿生控制法的研究对机器人控制技术有着巨大的推动作用。

目前来说,多足机器人普遍由于本身肢体关节较多,自由度冗余,使得控制起来难度较高。针对多足机器人主流控制方法,常见的足式机器人控制方

法有:(1)模型控制法。控制思路为先建模,再规划,后控制的顺序。这种控制方法常加入反馈项,来动态调节目标输出,代表的产品有ASIMO机器人。(2)行为控制法。控制思路为类触觉的“感知-反射”控制法,机器人的连贯动作是多个简单动作的连续组合,而每种动作包含了多项传感的输入以及相应的控制输出,目标位置由传感器反馈的信号来确定,根据当前点与目标的路径,各种动作经过竞争排定优先级,按优先级顺序组合再确定每个动作执行时间,最后由驱动器控制臂节运动。(3)仿生控制法。仿生控制法是近年来部署在机器人上的一种模仿生物低级中枢神经自激行为的自发节律性运动控制法,该控制法的拓补结构有链式连接和网式连接,通过神经元耦合的方式控制肢体各关节的摆动。

在罗庆生<sup>[1]</sup>著作中,选取脊索动物门、马科为研究对象,总结出了骨骼和肌肉的特点,在其基础上进行仿生构造,又根据仿生思想建立了运动控制策略,

**【收稿日期】**2023-08-10

**【基金项目】**国家自然科学基金青年项目(61703270)

**【作者简介】**张峰,硕士,研究方向:机器人控制,嵌入式硬件, E-mail: 13152838603@163.com

**【通信作者】**曹乐,博士,副教授,研究方向为惯性传感与导航定位、精密生物医疗仪器、智能控制与工业互联网, E-mail: caole00012@163.com

具体为构建分层式全对称的中枢模式发生器(Central Pattern Generators, CPG)控制网络,控制网络的第一层由4个振荡器构成,控制4个髌关节的摆动,第二层由各足髌关节映射到膝关节,单腿连接方式采用单向耦合,各足之间形成网状拓补结构,足间协调通过4个髌关节的相位耦合关系来实现。郑浩峻<sup>[2]</sup>通过对猫科动物的观察,总结出了哺乳类动物同腿膝髌关节之间的运动规律,发现了在正常行走过程中膝髌关节具有固定的相位关系,根据运动时的相位关系与CPG振荡器产生的曲线二者相对应,可以描述出髌关节振荡器和膝关节振荡器之间的相对相位。林知微等<sup>[3]</sup>在此基础上对六足机器人控制构建了环型CPG网络,每个髌关节对应一个振荡器,不同步态下将髌关节分组,同一组相位相同,通过构建不同组间相位差关系来控制运动,而罗庆生等的网状拓补结构区别在一级髌关节网络中,将一级网络中每个髌关节与除本身外的所有髌关节建立相位差的控制方式。

在做验证时,由于六足机器人本身造价昂贵,在实物验证之前需要先进行虚拟仿真,乔栋等<sup>[4]</sup>用机械系统仿真软件Adams建立运动学和动力学模型,用于机器人优化设计与运动仿真。刘玲等<sup>[5]</sup>运用差值拟合对六足机器人的摆动相和支撑相做出分析,使用MATLAB-ADAMS联合仿真。

本文选用参数较少,模型成熟,整定方便的Hopf谐波振荡器,首先将Hopf振荡器作为核心并对Hopf振荡器做改进,目的是能够调节振荡器产生的轨迹。其次在六足机器人的行走上,依据海蟹的横向行走步态规划六足机器人的CPG控制网络、行走步态,采用对称的分布方式将振荡器产生的轨迹直接作用于六足机器人足端。最后在关节控制中,建立机身坐标系,取各足足端点的位置,通过逆向变换求解出各关节角度,再根据CPG控制网络的规划,有节律地摆动机器人各足实现横向行走。最终可通过调节模型参数,改变步距、步态、步速。

## 1 模型改进

### 1.1 CPG振荡器

CPG是生物节律运动的核心单元,它的主要任务是产生节律性的振荡信号,Hopf振荡器是一种简单的谐波振荡器<sup>[6]</sup>,输出频率和幅值易于控制,其中单个神经元模型如式(1)所示:

$$\begin{cases} \dot{x} = \alpha(\mu - r^2)x - \omega y \\ \dot{y} = \alpha(\mu - r^2)y - \omega x \end{cases} \quad (1)$$

其中, $x, y$ 为状态变量, $r^2 = x^2 + y^2$ ,在微分方程中,可以通过 $\alpha$ 调节振荡器收敛到极限环的速度, $\mu$ 调节振

荡器的幅值特性, $\omega$ 用来调节振荡器的周期,Hopf振荡器在单周期内的上升段和下降段时间相同,意味着摆动相和支撑相的相位相同,为了调整两者的时间,引入一个新的参数 $\beta$ 作为负载因子,用来对控制周期的参数 $\omega$ 进行分段,改进如式(2)所示:

$$\begin{cases} \omega = \frac{\omega_{st}}{e^{-\alpha y} + 1} + \frac{\omega_{sw}}{e^{\alpha y} + 1} \\ \omega_{st} = \frac{1 - \beta}{\beta} \omega_{sw} \end{cases} \quad (2)$$

其中, $\omega_{st}$ 表示支撑相的频率, $\omega_{sw}$ 表示摆动相的频率, $\beta$ 的值为常数,可调节 $\omega_{st}$ 与 $\omega_{sw}$ 之间的比值。两者的比值反映行走的姿态,当 $0 < \beta < 0.5$ 时,代表着机器人空中摆动时间大于落足行走时间,当 $0.5 < \beta < 1$ 时,代表着机器人空中摆动时间小于落足行走时间,通常当 $\beta$ 的值为0.75时,处于不稳定态,所以只需分析 $0 < \beta < 0.75$ 的情况即可。

### 1.2 参数对比

为了更好的展现参数变化的效果,用式(2)中参数 $\omega$ 取代式(1)的参数 $\omega$ ,合并式(1),式(2)得到式(3):

$$\begin{cases} \dot{x} = \alpha(\mu - r^2)x - \left( \frac{\omega(1 - \beta)}{\beta(e^{-\alpha y} + 1)} + \frac{\omega}{e^{\alpha y} + 1} \right) y \\ \dot{y} = \alpha(\mu - r^2)y - \left( \frac{\omega(1 - \beta)}{\beta(e^{-\alpha y} + 1)} + \frac{\omega}{e^{\alpha y} + 1} \right) x \end{cases} \quad (3)$$

对式(3)取固定参数 $\alpha=10\,000$ 、 $a=100$ 、 $\mu=0.4$ ,分别对参数 $\beta$ , $\omega$ 取 $\beta=0.5$ 、 $\omega=3\pi$ ;  $\beta=0.25$ 、 $\omega=2\pi$ ;  $\beta=0.75$ 、 $\omega=6\pi$ ;得到3种不同参数下Hopf振荡器的振荡曲线见图1~图3。

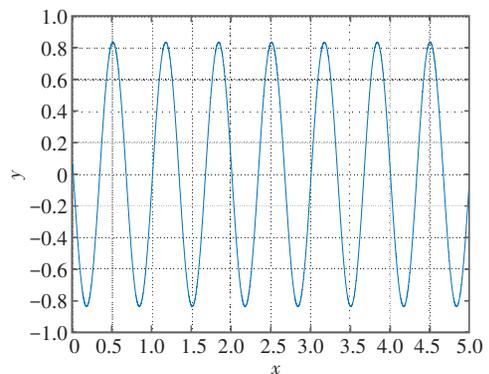


图1  $\beta=0.50$ 、 $\omega=3\pi$ 的Hopf振荡曲线图

Figure 1 Hopf oscillation curve with  $\beta=0.50$  and  $\omega=3\pi$

由图2、3可以看出,对比图1中传统Hopf振荡器上升和下降时间,可以修改不同的 $\beta$ 值来改变摆动相和支撑相在同一周期内的占比,以满足被控对象对

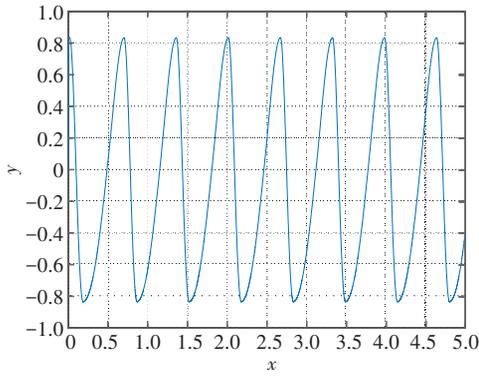


图2  $\beta=0.25$ 、 $\omega=2\pi$ 的Hopf振荡曲线图  
Figure 2 Hopf oscillation curve with  $\beta=0.25$  and  $\omega=2\pi$

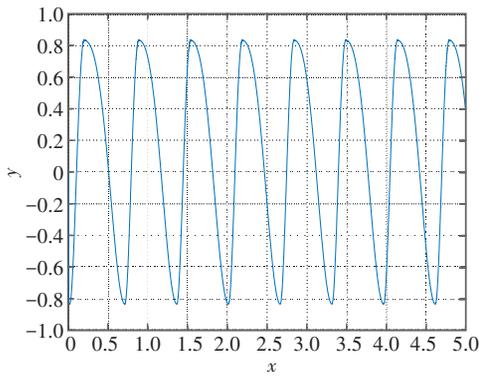


图3  $\beta=0.75$ 、 $\omega=6\pi$ 的Hopf振荡曲线图  
Figure 3 Hopf oscillation curve with  $\beta=0.75$  and  $\omega=6\pi$

不同负载因子节律信号的控制要求。也可调节  $\omega$  的值,满足被控对象对不同频率下振荡器输出的幅值特性曲线的要求。

采用单参数分析法,以  $\beta$  值为变量,坐标点  $x, y$  为输出,动态参数如表1所示。多参数变化在动态分析过程中,Hopf振荡器的输出不受初始位置的影响,在限定的参数范围内,任何参数都可以让振荡器稳定运行,这种改进并没有破坏振荡器极限环的稳定性。由表1可知,取  $\beta=0.5, x=0$ ,两端参数以  $x$  为对称轴互为相反值且对称分布,符合预期改进目标,体现出了Hopf振荡器的极限环稳定性。

表1 动态参数  
Table 1 Dynamic parameters

$\beta$	$x$	$y$
0.25	0	0.837
0.40	0	1.339
0.50	0	0.074
0.60	0	-1.339
0.75	0	-0.837

## 2 机器人控制方法

### 2.1 足端轨迹规划

六足机器人的足端轨迹是在一个周期中机器人各腿的摆动相和支撑相连续运动表现在机器人足端点的平滑曲线<sup>[7-11]</sup>。摆动相指的是六足机器人足端点离地时到足端点再次落地时所经过的时间,支撑相指的是六足机器人足端点落地时刻到再次离地时,足端点接触地面及承受重力的时间。

在实际控制中,六足机器人行走时是多腿同时运动,为了对不同步态下各腿各关节进行相位控制,需要建立网状拓补结构应用在六足控制中,由于六足机器人至少有12个关节,必然带来髌关节之间的相互耦合,髌关节与膝关节的映射,运算量极其复杂,且调控不便。

将Hopf振荡器产生的节律信号直接作为六足机器人的足端点轨迹,采用逆向的控制方法,大大降低多足多关节之间的耦合,用极少的神经元振荡器控制六足机器人行走。以下为处理方法,首先将Hopf振荡器模型反解得到式(4):

$$\begin{cases} x = \frac{y \cdot \omega_{sw} (e^{-ay} + \frac{1}{\beta} + \frac{1-\beta}{\beta} \cdot e^{ay})}{\alpha(e^{-ay} + e^{ay} + 2)(\mu - r^2)} + \frac{\dot{x}}{\alpha(\mu - r^2)} \\ y = \frac{\dot{y}}{\alpha(\mu - r^2)} - \frac{x \cdot \omega_{sw} (e^{-ay} + \frac{1}{\beta} + \frac{1-\beta}{\beta} \cdot e^{ay})}{\alpha(e^{-ay} + e^{ay} + 2)(\mu - r^2)} \end{cases} \quad (4)$$

其中  $x, y$  是连续的,周期性的值,在足端轨迹规划中用来描述足端点位置,既摆动相阶段的轨迹,为了描述支撑相阶段的轨迹,保证机器人三角稳定结构和三角步态做出改进,最终模型如式(5)所示:

$$\begin{cases} x = \frac{y \cdot \omega_{sw} (e^{-ay} + \frac{1}{\beta} + \frac{1-\beta}{\beta} \cdot e^{ay})}{\alpha(e^{-ay} + e^{ay} + 2)(\mu - r^2)} + \frac{\dot{x}}{\alpha(\mu - r^2)} \\ y = \frac{\dot{y}}{\alpha(\mu - r^2)} - \frac{x \cdot \omega_{sw} (e^{-ay} + \frac{1}{\beta} + \frac{1-\beta}{\beta} \cdot e^{ay})}{\alpha(e^{-ay} + e^{ay} + 2)(\mu - r^2)} \\ x_1 = \frac{|x| - x}{2} \\ y_1 = \frac{|y| - y}{2} \\ \omega = \frac{\omega_{st}}{e^{-ay} + 1} + \frac{\omega_{sw}}{e^{ay} + 1} \\ \omega_{st} = \frac{1-\beta}{\beta} \omega_{sw} \\ r^2 = x^2 + y^2 \end{cases} \quad (5)$$

其中  $x_1, y_1$  是对式(4)中的输出项取绝对值后得到的摆动相和支撑相曲线坐标,为了分析改进后的模型各参数以及各参数在足端轨迹规划中的作用,现将  $x_1,$

$y_1$  作为输出得到摆动相和支撑相轨迹, 如图4所示, 对比图1, 保留了Hopf振荡器的上半位图像, 将下半位图像处理为平滑直线段, 平滑曲线段为单足摆动相轨迹, 直线段为支撑相轨迹, 一段平滑曲线和一段直线为单足摆动的一个周期, 采用单参数分析法, 对周期参数  $\omega_{sw}$ , 负载因子  $\beta$  做更改, 得到的对比图像如图5, 图6所示。

对比图5和图6, 改变  $\omega_{sw}$  的值可以改变周期, 既支撑相的轨迹, 在轨迹规划中用来调节机器人单腿单步跨距,  $\omega_{sw}$  越大时, 单腿步距越小, 机身相对位移越小,  $\omega_{sw}$  越小时, 单腿步距越大, 机身相对位移越大。

对比图7和图8, 调节  $\mu$  值可以改变摆动相的幅值。当  $\mu$  越大时单腿步幅越大,  $\mu$  最大值不能超过单腿臂展。

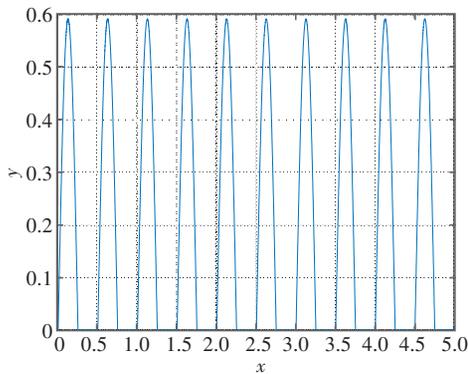


图4 改进后 Hopf 输出曲线  
Figure 4 Improved Hopf output curve

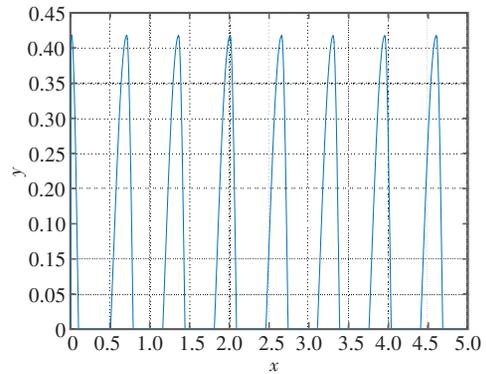


图7  $\mu=0.35, \beta=0.75, \omega_{sw}=6\pi$  的 Hopf 输出曲线  
Figure 7 Hopf output curve with  $\mu=0.35, \beta=0.75$  and  $\omega_{sw}=6\pi$

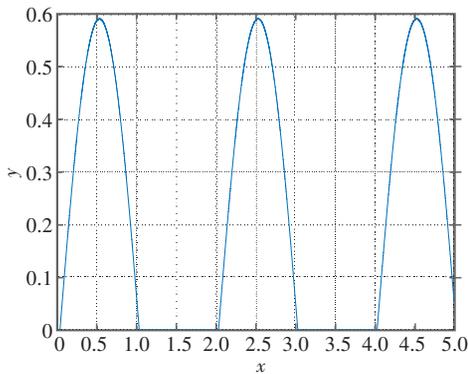


图5  $\omega_{sw}=1\pi, \beta=0.5, \mu=0.7$  的 Hopf 输出曲线  
Figure 5 Hopf output curve with  $\omega_{sw}=1\pi, \beta=0.5$  and  $\mu=0.7$

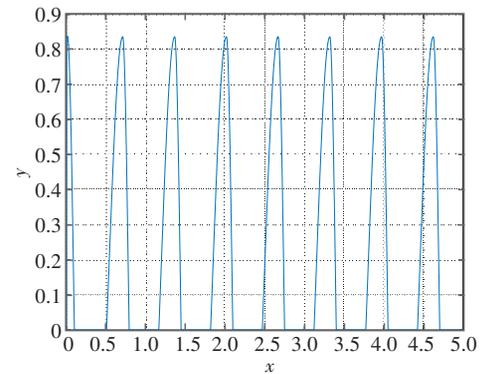


图8  $\mu=1.4, \beta=0.75, \omega_{sw}=6\pi$  的 Hopf 输出曲线  
Figure 8 Hopf output curve with  $\mu=1.4, \beta=0.75$  and  $\omega_{sw}=6\pi$

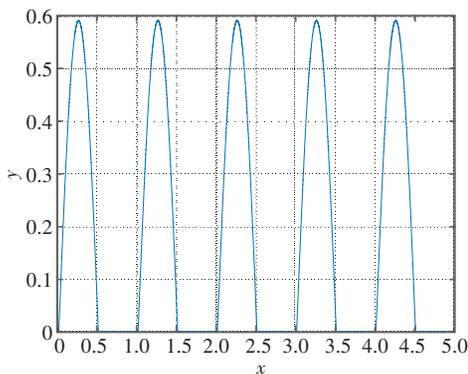


图6  $\omega_{sw}=2\pi, \beta=0.5, \mu=0.7$  的 Hopf 输出曲线  
Figure 6 Hopf output curve with  $\omega_{sw}=2\pi, \beta=0.5$  and  $\mu=0.7$

对比图9和图10, 改变  $\beta$  值可以改变摆动相的上升轨迹和下降轨迹之间的比值, 对机器人来说, 通过  $\beta$  值实现足端空中摆动的前摆和后摆的时间调节, 配合步幅调节, 可以动态调节足端点在摆动相时间内到达最高点的时间。

### 2.2 控制网络结构

根据本文改进的 Hopf 振荡器模型, 建立足端轨迹控制网络<sup>[12-16]</sup>, 根据足端轨迹的形状和参数, 包括周期、振幅、长度等, 建立髌关节控制网络图(图11)。

图11中, 一共有6个髌关节(LF、LM、LH、RF、RM、RH), 在每一个髌关节下对应的一个膝关节, 将

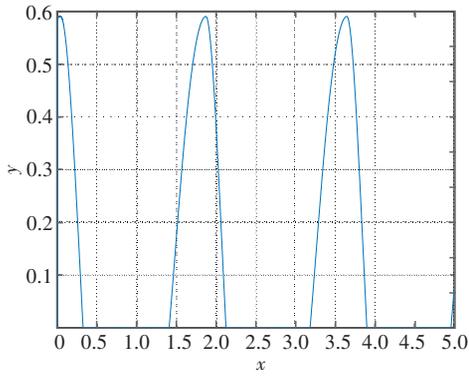


图9  $\beta=0.75$ 、 $\omega_{sw}=2\pi$  的Hopf输出曲线  
Figure 9 Hopf output curve with  $\beta=0.75$  and  $\omega_{sw}=2\pi$

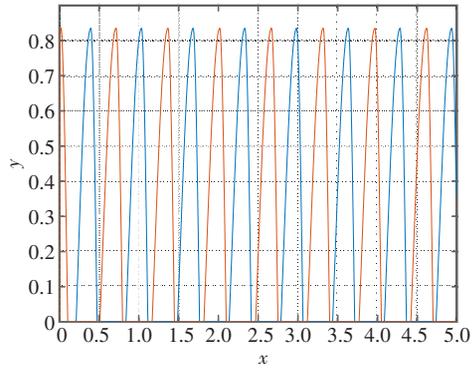


图12 Hopf控制网络  
Figure 12 Hopf control network

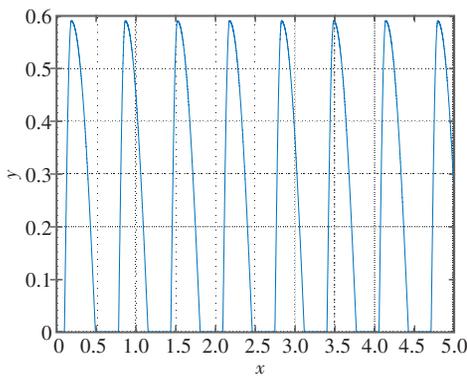


图10  $\beta=0.25$ 、 $\omega_{sw}=2\pi$  的Hopf输出曲线  
Figure 10 Hopf output curve with  $\beta=0.25$  and  $\omega_{sw}=2\pi$

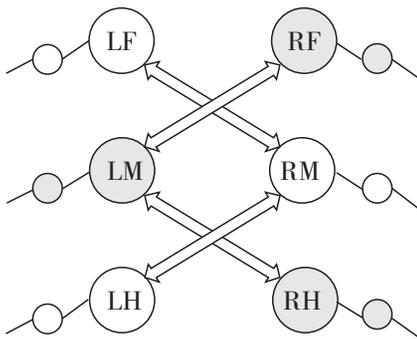


图11 髋关节控制网络  
Figure 11 Hip joint control network

振荡器产生的曲线放置在足末端。通过逆运动学的方式得出各关节转动的角度, LF、RM、LH为组一, RF、LM、RH为组二。

根据足端轨迹规划和控制网络的规划,将单个Hopf神经元放置在组一足端,将组一的神经元后移二分之一周期放置在组二足端,形成神经元控制网络(图12),即组一与组二交替摆动,当组一的各足处在摆动相时,组二的各足处在支撑相。

根据图12的神经元控制网络,在图13中对各组摆动相和支撑相具体摆动规律以及各足在摆动期间的落点位置做图示说明<sup>[17-20]</sup>。黑色部分表示的是六足机器人行走过程中的支撑相,白色部分表示的是六足机器人行走过程中的摆动相。各足按照图中的顺序周期性运动,行走方向参考笛卡尔右手坐标系中x方向(与六足机器人腿足平行方向)作为前进正方向。

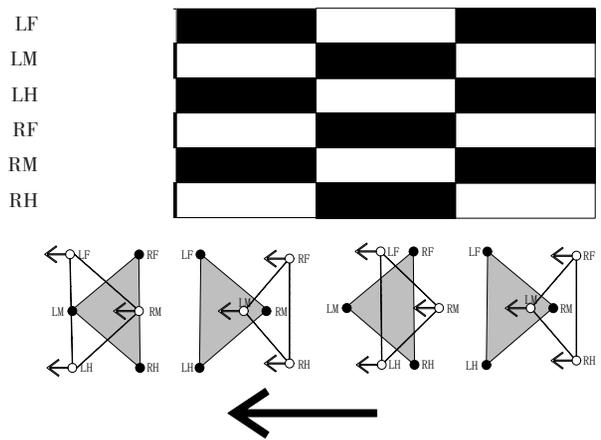


图13 足间协调摆动  
Figure 13 Coordinated swinging between feet

参考海蟹横向三角步态,在图14~图17中,分别对应图13中一个周期内六足机器人行走时各腿足的协调摆动。图14表示的是图13中第一阶段的状态,leg1、leg2、leg6向右移动,处于支撑相,机身向左端移动。图15表示的是图13中第二阶段的状态,leg5、leg3、leg4向左移动,处于摆动相,机身向左端移动。图16表示的是图13中第三阶段的状态,leg1、leg2、leg6向右移动,处于支撑相,机身向左端移动。图17表示的是图13中第四阶段的状态,leg5、leg3、leg4向左移动,处于摆动相,机身向左端移动,图13中循环结束。

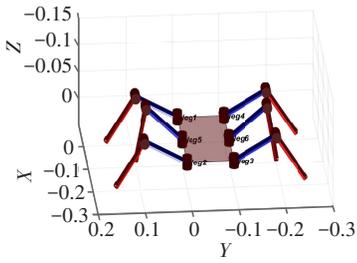


图14 周期初状态

Figure 14 Initial state of a cycle

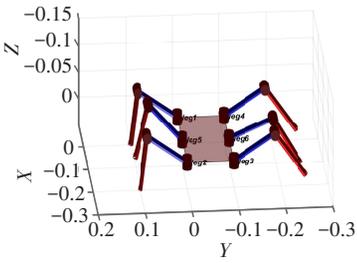


图15 四分之一周期时的状态

Figure 15 State at two quarters of a cycle

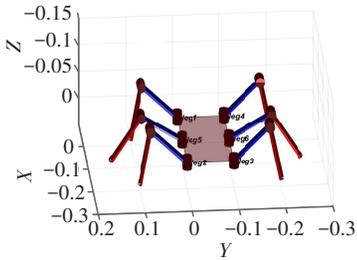


图16 四分之三周期时的状态

Figure 16 State at three quarters of a cycle

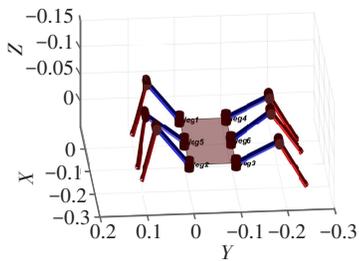


图17 周期末状态

Figure 17 State at the end of a cycle

CPG控制法由于本身极限环的存在,使系统具有一定的抗干扰能力,但三角行走作为一种中速步态,行走过程中自身腿足摆动带来的重心偏移,须对机器人进行姿态稳定控制,在控制过程中引入虚拟力阻抗的方式,建立足端控制,模型如式(6)所示:

$$\ddot{x} = \ddot{x}_r + M_d^{-1}[-B_d(\dot{x} - \dot{x}_r) - K_d(x - x_r) + F_e] \quad (6)$$

其中,  $M_d$ 、 $B_d$ 、 $K_d$  分别为期望惯量、期望阻尼、期望刚度,  $x$ 、 $x_r$  为足端当前位置和目标位置, 其值在单周期内, 相对机身位移差值  $(x - x_r)$  不变, 此处等同于式(5)中的  $\omega_{sw}$ , 将式(6)的阻抗模型放置在两组足端点上, 阻力方向与运动方向相反, 足端瞬时位移越大产生的阻抗越大, 经过闭环后, 参考轨迹与阻尼相加作为内环输入, 在腿足摆动时, 有效避免瞬时启动, 加速摆动等带来的不稳定。

### 2.3 关节转角控制

为了将上述文中规划的网络放置在足端中形成轨迹, 那么各关节的旋转摆动是必不可少的, 本章根据六足机器人单腿关节, 做如图18所示的运动学分解。

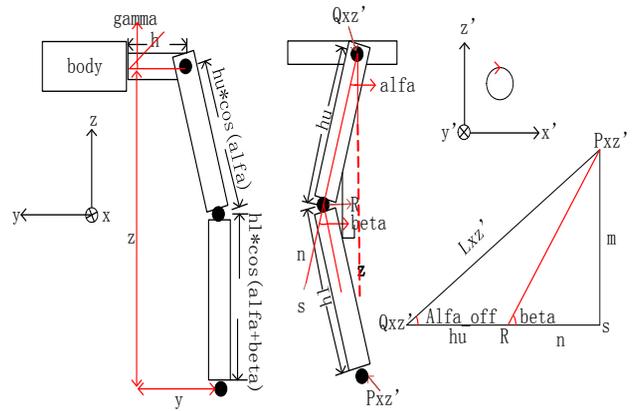


图18 单腿运动分解图

Figure 18 Exploded view of a single leg motion

在图19所示的六足机器人单腿模型截图中, 各关节转动方向参照以顺时针旋转为正, 逆时针旋转为负, 除此之外各参数如图18中标注, 其中  $h$ 、 $hu$ 、 $h1$  分别表示身体到髋关节的距离、机器人大腿长度, 机器人小腿长度。  $\gamma$ 、 $\alpha$ 、 $\beta$  分别表示髋关节、膝关节、踝关节的转动角度, 通过DH变换求得各关节转角值<sup>[21-25]</sup>, 其中  $\gamma$  角转换如式(7)所示, 其中  $L_{yz}$  表示点  $P_{xz'}$  到机身的垂线距离。

$$\begin{cases} d_{yz} = \sqrt{y^2 + z^2} \\ \gamma_{yz} = -\arctan\left(\frac{y}{z}\right) \\ \gamma_{h\_offset} = -\arctan\left(\frac{h}{L_{yz}}\right) \\ \gamma = \gamma_{yz} - \gamma_{h\_offset} \end{cases} \quad (7)$$

$\beta$ 角转换如式(8)所示, 其中  $n$  为  $hu$  在  $R$  点到  $S$  点的延长线长度,  $m$  为点  $xz'$  到点  $s$  的连线长度,  $L_{xz'}$  表示

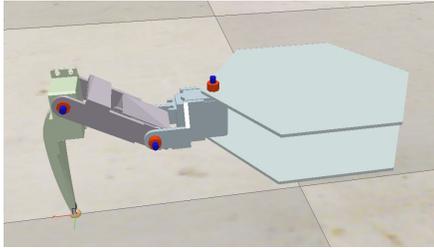


图19 六足机器人单腿模型截图  
Figure 19 Screenshot of a single leg model of the hexapod robot

点  $P_{xz'}$  与点  $Q_{xz'}$  的长度。

$$\begin{cases} (hu + n)^2 + m^2 = L_{xz'}^2 \\ n^2 + m^2 = hl^2 \\ (hu + n)^2 + m^2 - n^2 - m^2 = L_{xz'}^2 - hl^2 \\ 2 \cdot hu \cdot n + hu \cdot 2 = L_{xz'}^2 - hl^2 \\ n = \frac{L_{xz'}^2 - hl^2 - hu^2}{2 \cdot hu} \\ \beta = -\arccos \frac{n}{hl} \end{cases} \quad (8)$$

$\alpha$  角转换如式(9)所示:

$$\begin{cases} \alpha_{xz'} = -\arctan \frac{x}{L_{yz}} \\ \alpha_{off} = \arccos \frac{hu + n}{L_{xz'}} \\ \alpha = \alpha_{xz'} + \alpha_{off} \end{cases} \quad (9)$$

在上述的变换中,  $y$  表示的是单腿限幅, 对应式(5)中  $x_1, z$  表示的是单腿跨距, 对应式(5)中  $y_1$ 。将 Hopf 振荡器中三维坐标点代入到式(7)、式(8)、式(9)中, 即可实现各关节转角控制。调节振荡器的各个参数, 可实现不同步距步幅下的关键转角角度, 在六足机器人中, 各腿等间距分部在机身两端, 行走过程中, 以机身左侧为基准, 右侧腿的关节转动方向与左侧转动方向相反, 在控制过程中, 将左侧求得的关节转动角度取反, 可实现左右两端同步运动。模拟单腿在单周期内摆动相和支撑相的运动(图20), 以足端点位置为参考, 采用分时控制位移量, 多点输出方式, 既提高了运行速度, 也避免了起始点单段控制损失的精度。

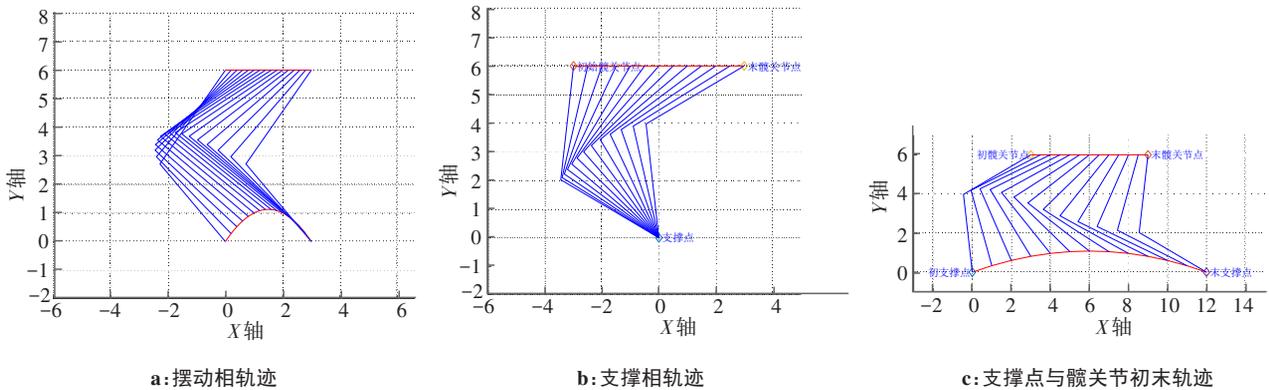


图20 支撑相与摆动相轨迹  
Figure 20 Support phase and swing phase trajectories

### 3 实验结果分析

#### 3.1 六足机器人模型建立

本文采用 CoppeliaSim-Matlab 联合仿真平台作为实验平台, 在 CoppeliaSim 中制作了实验场景与六足机器人模型, 规定机器人重量为 10 kg, 各腿足关节类型为旋转关节, 关节电机力矩为 0.26 N·M, 关节间摩擦系数为 0.5, 建立了腿足与环境的碰撞属性等, 同时增加足端点轨迹标注, 能够实时显示足端点轨迹, 最终建立如图21所示的六组机器人仿真物理模型。

#### 3.2 机器人原始参照模型

将改进后的 Hopf 振荡器部署在六足机器人的足端后, 将行走方向改为横向行走, 得到足端轨迹仿真

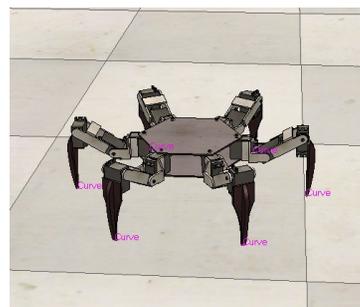


图21 六足机器人仿真物理模型  
Figure 21 Simulation physical model of the hexapod robot

结果(图22), 按照第二章中控制网络划分的组一与组二, 可以明显看出两组腿的摆动相相差二分之一的

周期,足端轨迹与Hopf振荡器的曲线一致,达到了本文预期效果。

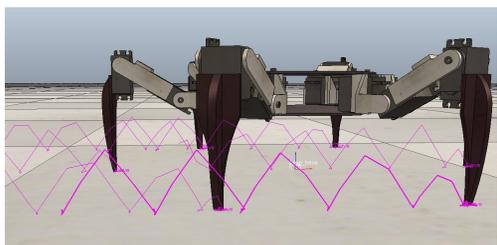


图22 足端轨迹图

Figure 22 Foot trajectory

### 3.3 虚拟力

由于在快速摆动过程中,重心稳定性较差,使得足端轨迹呈现出不稳态的状态。所以加入第二章中控制网络的虚拟阻尼,与加速度成正比,动态调节足端轨迹,最终得到增加虚拟力的足端轨迹图(图23),使得足端轨迹更加平滑,对比未加虚拟力的轨迹图(图22),有效减少瞬时摆动重心不稳带来的轨迹变形。

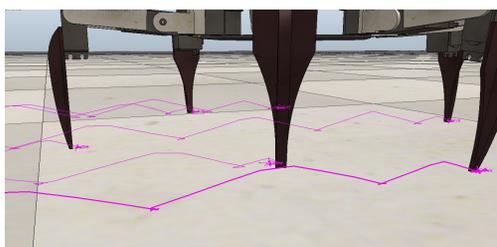


图23 虚拟力足端轨迹图

Figure 23 Virtual force foot trajectory

### 3.4 $\omega_{sw}$ 、 $\mu$ 、 $\beta$ 参数对比

为了将各参数在足端轨迹中的作用展现出来,将虚拟力足端轨迹图23作为参照,通过修改参数 $\omega_{sw}$ 达到了改变机器人行走步距的效果,得到足端轨迹步距对比图(图24)。通过修改参数 $\mu$ ,达到了改变机器人行走步幅的效果,得到足端轨迹步幅对比图(图25)。通过修改参数 $\beta$ ,改变机器人摆动相中上升段和下降段的比值,得到足端轨迹摆动相对比图(图26)。与本文第二章描述一致,符合预期。

通过上述各参数调节对比的效果,可以验证本文改进Hopf振荡器后结合虚拟力应用于足端点轨迹方法的有效性。

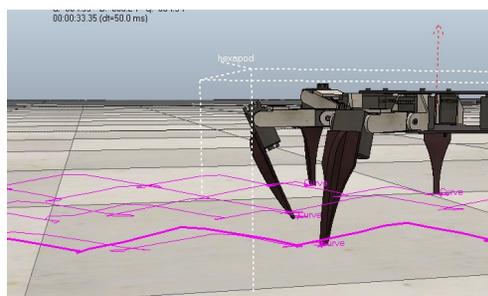


图24 足端轨迹步距对比图

Figure 24 Comparison of step distance

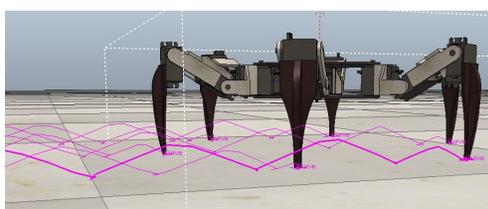


图25 足端轨迹步幅对比图

Figure 25 Comparison of step amplitude

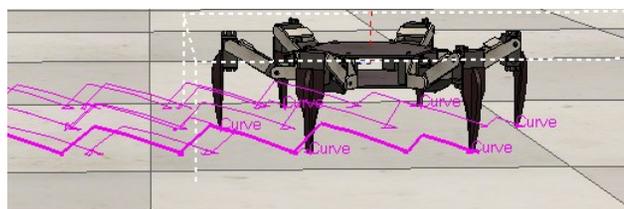


图26 足端轨迹摆动相对比图

Figure 26 Comparison of swing phase

## 4 结果与展望

本文设计并改进了基于Hopf振荡器的六足机器人控制方法,将足端轨迹和Hopf振荡器曲线相结合,利用Hopf振荡器产生的稳定极限环应用到足端路径规划中,可通过参数调节法,轨迹上可自由规划,对六足机器人在越障,复杂地形的表现有很好的提升,最终以节律的,可调节的足端轨迹代入DH逆变换,生成关节转角,仿照海蟹的横向步态,使得六足机器人稳定运行。

在多足机器人控制中,由于肢体关节众多,要求并发处理速度快,传统的多神经元耦合必定带来高计算量,少量的神经元和快速的响应是高速运动的基础,本文用单神经元相位后移的方式,减少了耦合项,能规划足端路径。同时可配合FPGA并行处理,利用硬件优势和少量的神经元形成网状控制结构,大幅提升运算效率。

## 【参考文献】

- [1] 罗庆生, 罗霄. 仿生四足机器人技术[M]. 北京: 北京工业大学出版社, 2016: 81-100.  
Luo QS, Luo X. Biomimetic quadruped robot technology[M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 2016: 81-100.
- [2] 郑浩峻, 张秀丽. 足式机器人生物控制方法与应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2011: 2-33.  
Zheng HJ, Zhang XL. Biological control methods and applications of legged robots[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2011: 2-33.
- [3] 林知微, 林翰文, 刘宗朋. 基于CPG的六足机器人运动步态控制方法[J]. 计算机应用研究, 2020, 37(9): 2749-2753.  
Lin ZW, Lin HW, Liu ZP. CPG-based motion gait control method of hexapod robot[J]. Application Research of Computers, 2020, 37(9): 2749-2753.
- [4] 乔栋, 姚涛, 王玉龙, 等. 六足机器人步态仿真与实验研究[J]. 机床与液压, 2021, 49(19): 32-37.  
Qiao D, Yao T, Wang YL, et al. Gait simulation and experimental research on hexapod robots[J]. Machine Tool & Hydraulics, 2021, 49(19): 32-37.
- [5] 刘玲, 靳伍银, 王洪建. 六足仿生机器人自主爬行步态设计与仿真分析研究[J]. 机械科学与技术, 2021, 40(12): 1885-1891.  
Liu L, Jin WY, Wang HJ. Study on walking gait design and simulation analysis of hexapod bionic robot [J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2021, 40(12): 1885-1891.
- [6] 杨雪峰, 郭振武, 王斌锐, 等. 基于带反馈Hopf振荡器的六足机器人斜坡步态发生器设计[J]. 机械工程学报, 2018, 54(21): 41-48.  
Yang XF, Guo ZW, Wang BR, et al. Gait generator of hexapod robot on slope terrain based on Hopf oscillator with feedback[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2018, 54(21): 41-48.
- [7] 王海龙, 张奇峰, 王刚, 等. 基于CPG的仿海蟹机器人浮游步态生成方法[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2018, 46(4): 86-91.  
Wang HL, Zhang QF, Wang G, et al. Floating gait generation method of crablike robot based on CPG[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2018, 46(4): 86-91.
- [8] Zhu YG, Zhai WW, Bai YB, et al. Research on the motion state control of quadruped running robot based on backward control[C]//2020 IEEE 6th International Conference on Control Science and Systems Engineering (ICCSSE). IEEE, 2020: 105-110.
- [9] 徐海东, 干苏, 任杰, 等. 基于Hopf振荡器的四足机器人步态CPG调节[J]. 系统仿真学报, 2017, 29(12): 3092-3099.  
Xu HD, Gan S, Ren J, et al. Gait CPG regulation of quadruped robots based on Hopf oscillators[J]. Journal of System Simulation, 2017, 29(12): 3092-3099.
- [10] 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 Echatronics(AIM). IEEE, 2013: 325-329.
- [11] 陈斯琴, 李思瑶, 鲁志刚, 等. 六足机器人关键技术综述[J]. 机电工程技术, 2022, 51(11): 146-152.  
Chen SQ, Li SY, Lu ZG, et al. Review of key technologies of hexapod robots[J]. Mechanical & Electrical Engineering Technology, 2022, 51(11): 146-152.
- [12] 徐坤, 郑羿, 丁希仑. 六轮腿式机器人结构设计与运动模式分析[J]. 北京航空航天大学学报, 2016, 42(1): 59-71.  
Xu K, Zheng Y, Ding XL. Structural design and motion mode analysis of a six wheeled legged robot[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2016, 42(1): 59-71.
- [13] Raibert MH, Craig JJ. Hybrid position/force control of manipulators [J]. J Dyn Syst-T ASME, 1981, 102(2): 126-133.
- [14] Chen WH, Ren GJ, Wang JH, et al. An adaptive locomotion controller for a hexapod robot: CPG, kinematics and force feedback[J]. Science China Information Sciences, 2014, 10(11): 18.
- [15] Ijspeert AJ. Central pattern generators for locomotion control in animals and robots: a review[J]. Neural Netw, 2008, 21(4): 642-653.
- [16] 郭建, 梁永杰, 张晓佳, 等. 基于步态规划的六足机器人运动学分析与计算[J]. 机床与液压, 2023, 51(5): 66-73.  
Guo J, Liang YJ, Zhang XJ, et al. Kinematic analysis and calculation of hexapod robots based on gait planning [J]. Machine Tool & Hydraulics, 2023, 51(5): 66-73.
- [17] 严浙平, 杨皓宇, 张伟, 等. 基于模型预测-中枢模式发生器的六足机器人轨迹跟踪控制[J]. 机器人, 2023, 45(1): 58-69.  
Yan ZP, Yang HY, Zhang W, et al. Trajectory tracking control of hexapod robots based on model prediction central mode generator[J]. Robotics, 2023, 45(1): 58-69.
- [18] 李培杰. 基于CPG与强化学习的六足机器人步态研究[D]. 杭州: 杭州电子科技大学, 2022.  
Li PJ. Gait research of hexapod robots based on CPG and reinforcement learning [D]. Hangzhou: Hangzhou University of Electronic Science and Technology, 2022.
- [19] 牛丽周, 丁亮, 高海波, 等. 软体足式机器人驱动、建模与仿真研究综述[J]. 机械工程学报, 2021, 57(19): 1-20.  
Niu LZ, Ding L, Gao HB, et al. Review of actuation, modeling and simulation in soft-legged robot [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2021, 57(19): 1-20.
- [20] 胡勇, 蒋刚, 李昔学, 等. 非结构环境下六足机器人仿真研究[J]. 机械设计与制造, 2021, 365(7): 281-284.  
Hu Y, Jiang G, Li XX, et al. Simulation research of hexapod robot in unstructured environment [J]. Machinery Design & Manufacture, 2021, 365(7): 281-284.
- [21] 张飞飞. 基于CPG的仿生六足机器人行为自适应研究[D]. 西安: 长安大学, 2022.  
Zhang FF. Research on behavior adaptation of biomimetic hexapod robot based on CPG[D]. Xi'an: Chang'an University, 2022.
- [22] 李佳钰, 黄启霖, 尤波, 等. 基于力估计与切换控制的六足机器人三边遥操作[J]. 仪器仪表学报, 2023, 44(1): 253-264.  
Li JY, Huang QL, You B, et al. Trilateral teleoperation of hexapod robot based on force estimation and switching control[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2023, 44(1): 253-264.
- [23] 卢健之, 赵奕, 赵垚杰, 等. 基于树莓派的六足机器人的设计与实现[J]. 物联网技术, 2022, 12(6): 96-99.  
Lu JZ, Zhao Y, Zhao KJ, et al. Design and implementation of a Hexapod robot based on Raspberry Pi [J]. Internet of Things Technology, 2022, 12(6): 96-99.
- [24] 张昊昱. 大型高适应性六足机器人结构及稳定性分析[D]. 长春: 吉林大学, 2021.  
Zhang HY. Structural and stability analysis of large highly adaptive Hexapod robots [D]. Changchun: Jilin University, 2021.
- [25] 何东伦, 孙晓雪, 徐刘杰, 等. 仿生六足机器人的发展现状与应用[J]. 设备监理, 2022, 7(6): 66-68.  
He DL, Sun XX, Xu LJ, et al. Development Status and application of biomimetic Hexapod robots [J]. Equipment Supervision, 2022, 7(6): 66-68.

(编辑: 薛泽玲)