

文章编号: 2095-2163(2022)09-0065-08

中图分类号: TP273

文献标志码: A

四足机器人 CPG 步态规划与坡面运动控制研究

周志华, 周枫林, 聂宇峰, 扬帆, 王瑾元

(湖南工业大学 机械工程学院, 湖南 株洲 412007)

摘要: 针对四足机器人进行坡面运动时, 机体重心不稳定、足端易打滑等问题进行研究。本文提出了一种适用于全肘式四足机器人坡面运动的前庭反射数学模型。首先, 在 Simulink 中以 Hopf 振荡器搭建了中枢模式发生器(CPG)控制网络, 并将四足机器人模型导入 Simulink 中, 通过调整 CPG 网络相位关系生成了 trot 步态, 并以该步态进行上坡仿真实验。为实现坡面运动自适应性、稳定性, 将前庭生物反射数学模型引入控制网络, 使机器人在坡面运动时, 根据坡度信息, 能够调整机体姿态, 使重心保持稳定。仿真结果显示, 坡面运动时前庭反射有效地减少了机器人躯体的震动与打滑程度, 最终证明了将前庭生物反射数学模型与 CPG 进行有机融合能有效地提高四足机器人坡面运动时的稳定性。

关键词: 四足机器人; 前庭反射; 中枢模式发生器; 坡面运动; 步态规划

Research on CPG gait planning and slope motion control of quadruped robot

ZHOU Zhihua, ZHOU Fenglin, NIE Yufeng, YANG Fan, WANG Jinyuan

(College of Mechanical Engineering, Hunan University of Technology, Zhuzhou Hunan 412007, China)

[Abstract] When a quadruped robot moves on a slope, the center of gravity of the robot is unstable and the foot end is easy to slip. In this paper, a mathematical model of vestibular reflex for all-elbow quadruped robot is proposed. The Central Pattern Generator(CPG) control network is built in Simulink, and the quadruped robot model is imported into Simulink. Based on the rhythm signal generated by CPG, the trot gait is generated, and the uphill and downhill simulation experiments are carried out with this gait. In order to realize the adaptability and stability of the slope movement, the vestibular bioreflex mathematical model is introduced into the control network, so that the robot can adjust the body posture according to the slope information when the robot moves on the slope, so as to keep the center of gravity stable. The simulation results show that the vestibular reflex can effectively reduce the vibration and slippage of the robot body during the slope movement. The experimental result proves that the organic fusion of the vestibular bioreflex mathematical model and CPG can effectively improve the quadruped robot's stability of slope movement.

[Key words] quadruped robot; vestibular reflex; central pattern generator; slope movement; gait planning

0 引言

近年来, 四足机器人日益频繁地出现在日常生活中, 在抢险救灾、物资运输、火星探索等恶劣环境都能见到应用实例, 随着美国波士顿的 BigDog 横空出世, 随即也引发了国内外关于四足机器人的研究热潮^[1-2]。面对复杂地形^[3-5], 四足机器人相较于轮式、履带式机器人具有更好的环境适应能力, 同时, 和双足、六足机器人相比也都分别表现出更加优秀的稳定性和控制简易性。为提高四足机器人的环境适应能力, 国内外学者针对其核心运动控制问题, 也相继提出了多种有效的控制方法。目前常见的控制方法有基于仿生原理的中枢模式发生器(CPG)控制、弹簧负载倒立摆(SLIP)、零力矩点(ZMP)、模型

预测控制(MPC)、虚拟模型控制(VMC)等的控制方法^[6-9]。其中, CPG^[10-11]属于低级神经中枢, 即使无外界反馈或高级中枢信号, 也依然能够产生稳定的节律信号。

为了实现四足机器人在斜坡地形的稳定行走, 梁启星等人^[12]在模型预测控制基础上进行扩展, 设计四足机器人在斜坡上的足端位置调整与躯干姿态自适应调整策略, 通过设计的“虚拟斜坡”躯干姿态调整算法, 实现机器人在上坡过程中躯干姿态的自适应调整。葛卓等人^[13]为了提高四足机器人在包含坡面和障碍物等复杂地形中的运动能力与环境自适应能力, 搭建了前庭反射和屈肌反射数学模型, 使四足机器人能够流畅、平稳地完成上下坡运动, 并具备自适应越障运动能力。而为了实现四足机器人在

基金项目: 国家自然科学基金(11602082); 湖南省自然科学基金项目(2021JJ50043); 湖南省自然科学基金项目(2021JJ30211)。

作者简介: 周志华(1998-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向: 仿生四足机器人运动及控制; 周枫林(1986-), 男, 博士(后), 副教授, 主要研究方向: 数值方法、先进设计方法与智能控制研究。

通讯作者: 周枫林 Email: edwal0zhou@163.com

收稿日期: 2022-06-31

坡面上的行走稳定,文献[14]又提出了基于带反馈项的中枢模式发生器的步态控制策略,可根据 ZMP 判据分析四足机器人在斜坡上的运动稳定性,引入参数在线调节机制适应外界环境变化,最终有效提高四足机器人在斜坡上行走的稳定性。韩宝玲等人^[15]提出了一种四足机器人对脚小跑步态下的坡面运动姿态调整策略,能够以机器人质心在斜面上的落点到支撑线的距离为判据进行四足机器人坡面运动稳定性分析,得到其姿态调整的确定值,并最终提高四足机器人坡面运动稳定性。Zhu 等人^[16]提出了一种面向未知斜坡的四足机器人步态规划算法框架,通过惯性测量单元测量的姿态信息来估计地形坡度,可采用爬行步态,基于 ZMP 进行重心轨迹规划,并利用增强随机搜索(ARS)算法对贝塞尔曲线的参数进行调制,实现机器人足部轨迹的规划,最终证明了该算法能够在坡度未知时自适应地调整机器人的姿态,稳定地通过坡度环境。Wang 等人^[17]针对四足爬行机器人越过坡面凸起地形时后腿的地面反作用力较大的问题,提出一种基于分层 CPG 步态生成方法的四足机器人坡三角步态行走策略,并通过仿真验证了算法的有效性。

本文采用 CPG 作为运动控制方法,针对四足机器人的坡面运动,以 CPG 节律信号为基础,采用前庭生物反射进行坡面自适应姿态调节,并在 Matlab/Simulink 中以 Trot 步态进行上坡运动,最终通过仿真验证了该控制方法的可靠性、正确性,实现了四足机器人的坡面自适应性,使机器人在上坡时的运动稳定性得到了有效的提高。

1 四足机器人模型

本文以 YOBOGO 四足机器人为研究对象,采用电驱动方式、全肘式配置,每条腿有髌、膝、侧摆三个关节。为验证控制算法的正确性,本文对此进行二次开发,图 1(a)为机器人的三维模型,图 1(b)为对应的物理样机。



图 1 YOBOGO 四足机器人
Fig. 1 YOBOGO quadruped robot

2 CPG 数学模型

2.1 振荡器

振荡器是 CPG 控制网络的基本组成单元,常见的有神经元振荡器、非线性振荡器两种类型。神经元振荡器虽仿生意义明确,但动态特性相对更为复杂,参数也较多。而非线性振荡器,相对而言参数较少,模型更为成熟,故本文采用 Hopf 非线性振荡器作为基本单元搭建 CPG 网络,Hopf 振荡器的数学模型如下:

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

其中, ω 为振荡器的频率; μ 决定振荡器的幅值; α 为常数,是用于振荡器收敛到极限环的速度控制; x 、 y 为状态变量;由于稳定的状态极限环存在于 Hopf 振荡器中,故能够产生稳定、抗干扰能力强的周期信号,在 CPG 控制网络中,振荡器中的状态变量 x 能直接用于机器人的关节控制,周期信号的上升、下降段分别对应机器人单腿运动的摆动、支撑相。为实现对每相在周期内所占比例的控制,对式(1)中的 ω 进行改进,由此得到:

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

其中, ω_{st} 、 ω_{sw} 分别为支撑相与摆动相频率;正常数 a 决定 ω 在 ω_{st} 和 ω_{sw} 间的变化速度; β 为占空比(负载因子),推得的数学公式为:

$$\beta = \frac{T_{st}}{T} = \frac{T - T_{sw}}{T} \quad (3)$$

其中, T 为步态周期,其他参数同式(2)。 T 与 ω_{sw} 又具有如下关系:

$$T = \pi \sqrt{\frac{a}{\beta}} \frac{1 - \beta}{\beta} \omega_{sw}^{-\frac{1}{a}} + \pi / \omega_{sw} \quad (4)$$

2.2 CPG 连接网络与步态生成

根据连接方式的不同,CPG 控制网络可以分为网式、链式两种连接方式。CPG 广泛存在于生物运动中,如呼吸、行走、游泳等。针对坡面运动,其涉及到四足机器人四条腿的髌、膝关节,针对这 8 个主动关节自由度,本文采用的控制网络拓扑结构如图 2 所示。由图 2 可见,使用 4 个振荡器,每个振荡器输出的状态变量 x 信号直接用于髌关节信号输

入, 状态变量 y 经过足内耦合转化为对应腿膝关节控制信号。此网络简单, 且运算时间少, 利于增强系统实时性。

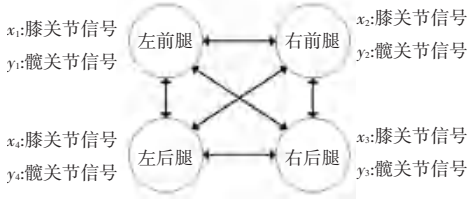


图 2 单层 CPG 控制网络

Fig. 2 Single-layer CPG control network

2.2.1 CPG 控制网络

由 4 个振荡器进行相位耦合而构成的 CPG 控制网络数学模型如式 (5) 所示:

$$\begin{cases} \dot{\hat{e}}_i \dot{\hat{u}}_i = \hat{e} \alpha(\mu - r_i^2) - \omega_i \dot{\hat{e}}_i \dot{\hat{u}}_i + \sum_{j=1}^4 R(\theta_{ij}) \dot{\hat{e}}_j \dot{\hat{u}}_j, i = 1, \dots, 4 \\ r_i^2 = x_i^2 + y_i^2 \\ \omega_i = \frac{\omega_{st}}{e^{-ay_i} + 1} + \frac{\omega_{sw}}{e^{ay_i} + 1} \\ \omega_{st} = \frac{1 - \beta}{\beta} \omega_{sw} \\ \theta_{hi} = x_i \end{cases} \quad (5)$$

其中, θ_{hi} 为髋关节的控制信号; x_i 为振荡器的输出; θ_{ij} 为第 i 和 j 两振荡器之间的相对相位; $R(\theta_{ij})$ 是旋转矩阵, 具体描述了各振荡器间的相对相位耦合关系; 其他参数同上式, 这里的 $R(\theta_{ij})$ 可表示为:

$$R_{ij} = R(\theta_{ij}) = \begin{pmatrix} \dot{\hat{e}} \cos \theta_{ij} & -\sin \theta_{ij} \dot{\hat{u}} \\ \dot{\hat{e}} \sin \theta_{ij} & \cos \theta_{ij} \dot{\hat{u}} \end{pmatrix} \quad (6)$$

其中, $\theta_{ij} = \theta_{ij} = 2\pi(\varphi_i - \varphi_j)$, φ_i 是第 i 个振荡器的相位。将微分方程式 (5) 以矩阵形式表示为:

$$\dot{Q} = F(Q) + RQ \quad (7)$$

其中, R 为控制网络的连接权重矩阵, 可由式 (8) 表示为:

$$R = \begin{pmatrix} \dot{\hat{e}} R_{11} & R_{21} & R_{31} & R_{41} \dot{\hat{u}} \\ \dot{\hat{e}} R_{12} & R_{22} & R_{32} & R_{42} \dot{\hat{u}} \\ \dot{\hat{e}} R_{13} & R_{23} & R_{33} & R_{43} \dot{\hat{u}} \\ \dot{\hat{e}} R_{14} & R_{24} & R_{34} & R_{44} \dot{\hat{u}} \end{pmatrix} \quad (8)$$

CPG 控制网络的输出模式由 R 决定, 通过控制连接权重矩阵 R , 最终能够获得四足机器人的不同步态。

2.2.2 足内协调控制

以 4 个振荡器组成的单层 CPG 控制网络拓扑结构, 结构中的单个振荡器产生的状态信号 y 并不能直接作为机器人膝关节转动信号, 需进行足内协调转化才可用于膝关节控制。四足机器人的单腿运动图解如图 3 所示, 当足端支撑在地时, 膝关节保持不变, 支撑相结束步入摆动相时, 膝关节抬腿摆动, 由几何关系可以得到式 (9):

$$\begin{cases} \dot{\hat{e}} \sin A_h = \frac{S/4}{L} \\ S = vT \\ L = 2l \cos \theta_0 \\ A_h = \arcsin\left(\frac{\beta v T}{4l \cos \theta_0}\right) \end{cases} \quad (9)$$

其中, v 为机器人运动速度; T 为单个运动周期; l 为腿节长度; L 是足端与髋关节间的长度; S 为机器人周期内单腿行走步长; A_h 为髋关节摆动幅值。当处于摆动相中点时, 膝关节抬腿高度最高且等于 h , 由图 3 可得到:

$$h = l \cos \theta_0 - l \cos(\theta_0 + A_k) \quad (10)$$

接下来, 可推得膝关节的摆动幅值 A_k 为:

$$A_k = \arccos[(l \cos \theta_0 - h)/l] - \theta_0 \quad (11)$$

膝关节最终的足内调节控制信号如式 (12) 所示:

$$\theta_{ki} = \begin{cases} -\text{sgn}(\varphi) \frac{A_k}{A_h} y_i & y_i \leq 0 \\ 0 & y_i \geq 0 \end{cases} \quad (12)$$

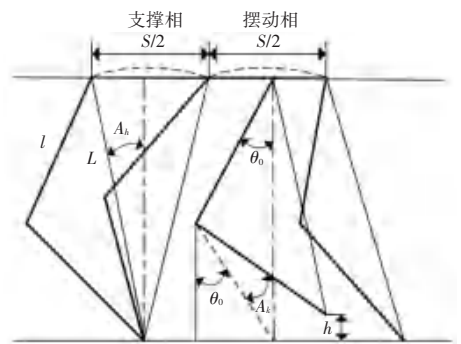


图 3 单腿运动图解

Fig. 3 Diagram of single-leg exercise

2.2.3 trot 步态生成

四足机器人具有多种典型步态, 如 trot、pace、walk 等, 每种步态具有不同的特征, 主要不同在于

占空比 β 、足间相位关系。其中,walk步态的占空比为0.75,相位差为0.25,pace、trot步态的相位差和占空比都为0.5。根据步态规律分析,可以知道相对相位可表示为占空比和右后腿相位的函数,以左前腿为基准,令其相位 $\varphi_{LF} = 0$,若 $\varphi_{LH} \neq 0$,则 $\varphi_{LH} = \beta$, $\varphi_{RF} = \beta - \varphi_{RH}$;若 $\varphi_{LH} = 0$,则 $\varphi_{RF} = \varphi_{RH}$, $\varphi_{LH} = \varphi_{LF}$ 。其中,LF、LH、RF、RH分别代表左前、左后、右前、右后腿。在本文的四足机器人坡面运动中,采用trot步态进行爬坡仿真,其步态相对相位如图4所示。

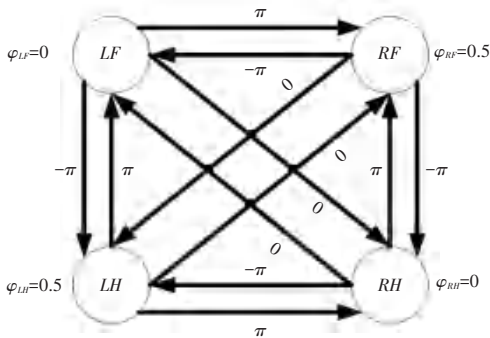


图4 trot步态相对相位

Fig. 4 Relative phase of trot gait

3 前庭生物反射数学模型

3.1 前庭生物反射机理

前庭反射是动物利用前庭器官去感知自身躯体姿态,并通过调整肢体肌肉的松弛,维持运动过程中身体平衡的一种生物反射行为。面对自然界常见的斜坡地形,仿生四足机器人通过前庭反射控制算法能很好地根据上、下坡的不同情况调整自身姿态,使机体重心更加稳定。以本文中全肘式配置的YOBOGO四足机器人为例,当机器人上坡运动时,根据坡面信息,前腿髌关节后摆,其关节平衡位置减小,后腿髌关节前摆,膝关节的平衡位置与同腿髌关节做相反方向调整,最终机器人的躯体姿态呈现为前低后高。

3.2 前庭反射数学模型

进行坡面运动时,根据坡面信息反馈,四足机器人通过前庭反射调整腿部平衡位置,同时,CPG控制网络的输出曲线也随之变化,反馈项是正值时,CPG输出曲线上移;反馈项是负值时,CPG的输出曲线向下移动。根据全肘式配置四足机器人模型,其斜坡运动关节平衡位置调整量见表1。根据表1分析可知,全肘式配置四足机器人的前、后腿在上坡或下坡时同一关节所产生的调整量恰好相反,以此实现前低后高或前高后低的姿态,使其能够适应不同坡面条件。

表1 关节平衡位置调整

Tab. 1 Adjustment of joint balance position

关节	前腿(肘式结构)		后腿(肘式结构)	
	髌关节	膝关节	髌关节	膝关节
上坡	$-\Delta\theta$	$\Delta\theta$	$\Delta\theta$	$-\Delta\theta$
下坡	$\Delta\theta$	$-\Delta\theta$	$-\Delta\theta$	$\Delta\theta$

根据传感器能获得坡度信号 α ,反馈项如下式:

$$feed = feed(\alpha) \quad (13)$$

根据文献[18],当躯体姿态角度与坡面角度呈近似线性关系时,是保持能耗最优的必要条件,且有:

$$\Delta\alpha = k_1 \alpha \quad (14)$$

其中, $\Delta\alpha$ 为躯体姿态角; $k_1 \approx 0.24$;上、下坡时,能够分别检测得到 $\alpha > 0$ 、 $\alpha < 0$ 。为进一步得到每条腿的关节平衡位置改变量 $\Delta\theta$,根据其躯体姿态角 $\Delta\alpha$ 的几何关系能得到式(15):

$$\Delta\alpha = \arctan \frac{l[\cos(\theta_0 - \Delta\theta) - \cos(\theta_0 + \Delta\theta)]}{L + 2l\sin\theta_0 - l\sin(\theta_0 - \Delta\theta) - l\sin(\theta_0 + \Delta\theta)} \quad (15)$$

根据 $\Delta\theta$ 的调整范围,由式(15)求解 $\Delta\alpha$,二者为近似线性关系:

$$\Delta\theta = k_2 \Delta\alpha \quad (16)$$

通过拟合得到 $k_2 \approx 2.26$ 。最终得到的前庭反射数学模型如式(17)所示:

$$Feed = \begin{cases} \hat{e} \cdot \text{sgn}(\psi) \cdot k_1 k_2 \alpha \dot{u} \\ \hat{e} \cdot \text{sgn}(\psi) \cdot k_1 k_2 \alpha \dot{u} \\ \hat{e} \cdot \text{sgn}(\psi) \cdot k_1 k_2 \alpha \dot{u} \\ \hat{e} \cdot \text{sgn}(\psi) \cdot k_1 k_2 \alpha \dot{u} \end{cases} \quad (17)$$

其中, ψ 为关节结构信号标志。当 $\psi = 1$ 时,表示膝式关节; $\psi = -1$ 时,表示肘式关节,其他参数同上。

4 仿真实验

本文在Simulink环境里搭建CPG控制器,将机器人模型导入Simulink,并进行虚拟样机的坡面运动仿真实验。

4.1 模型导入与控制器建模

本文利用SW_URDF_Exporter插件,在三维建模软件SolidWorks中,将四足机器人模型中无相对运动的零件整合,并按照躯体→侧摆关节→大腿→小腿的顺序进行组装,使用旋转关节来连接各部位,最终以URDF(unified robot description format)格式导出,进一步地,将生成的URDF文件导入Simulink,在Simulink

中自动生成对应的关节类型、坐标转换模块、躯干模型。

以该方法将模型导入后,继续搭建四足机器人的CPG控制器。Simulink中具有丰富的模块库,非常适用于搭建具有微分方程、多振荡器耦合的复杂CPG控制网络。将控制器搭建好后利用Simulink-PS模块将输入信号转换为物理信号,再输入给模型关节。紧接着,进行地面建模与机器人足端接触设置,最终实现四足机器人Simulink环境下的CPG驱动控制。

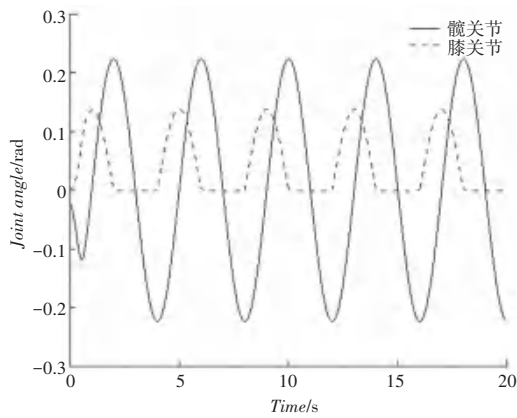
4.2 trot步态生成

设置仿真求解器为ODE45,仿真时间为20s,根据trot步态特征,设定CPG控制网络中的参数见表2。

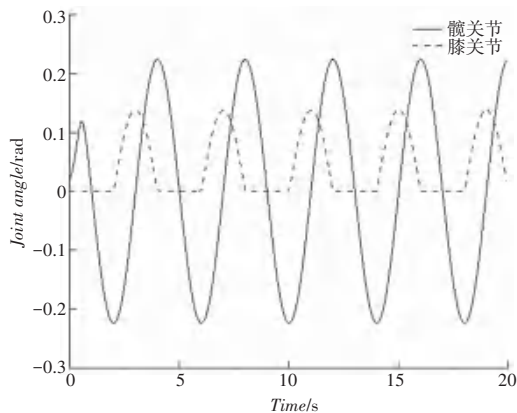
表2 CPG控制网络参数
Tab. 2 CPG control network parameters

μ	ω_{sic}	β	φ_{LH}	S/mm	H/mm
0.04	$\pi/2$	0.5	0.5	245	15

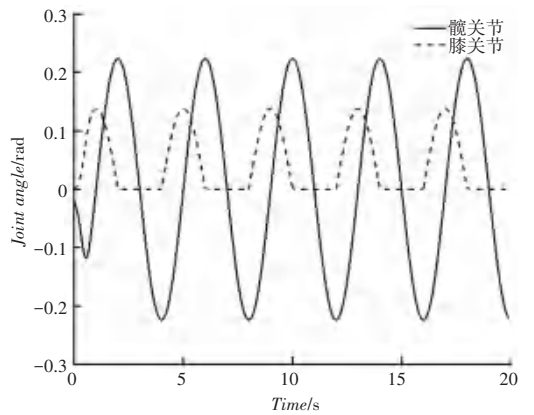
根据公式(4),计算出四足机器人的单腿周期为4s,摆动相、支撑相各占2s。仿真得到的trot步态关节曲线如图5所示,仿真结果与理论计算一致。



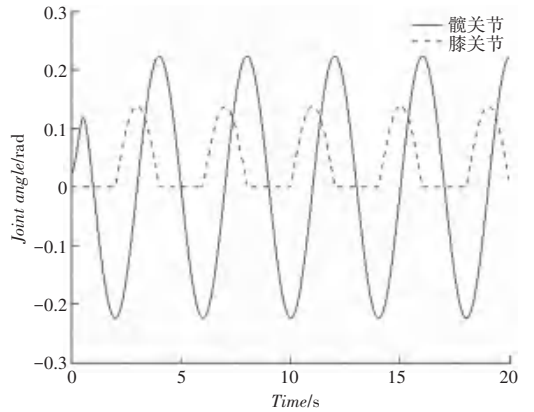
(a) 右后腿关节曲线



(b) 左后腿关节曲线



(c) 右前腿关节曲线



(d) 左前腿关节曲线

图5 trot步态关节曲线

Fig. 5 Joint curve of trot gait

4.3 平面运动

四足机器人以trot步态做平面运动,坐标系中机器人前进方向为X轴方向,竖直方向为Z轴方向,图6为四足机器人平面运动仿真图,图7为机器人质心位移曲线,图8为欧拉角变化曲线。



图6 平面运动仿真

Fig. 6 Plane motion simulation

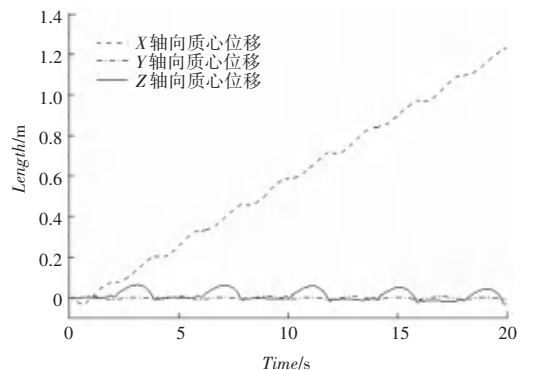


图7 机器人质心位移曲线

Fig. 7 Displacement curve of the robot's centroid

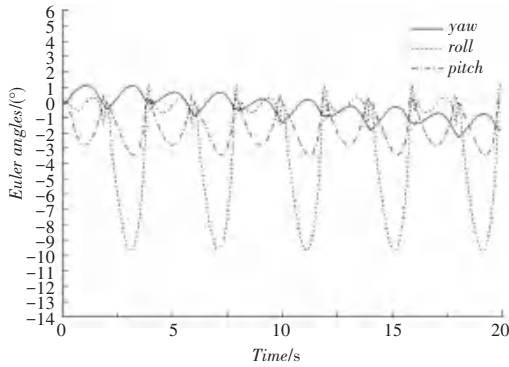


图8 机器人欧拉角变化曲线

Fig. 8 The change curve of the Euler angle of the robot

由图8中的仿真结果显示,在20 s内,以单腿每2 s一个支撑、摆动相的频率运动了1.214 m,根据步长 $S = 245 \text{ mm}$ 计算,理论上应该有1.225 m的运动距离,打滑量较小,符合预期。从图9可以看出,俯仰角在 3° 范围内波动,偏航角在 2° 范围内波动,机体无明显偏航,运动过程较为平稳。

4.4 坡面运动

为实现四足机器人上坡时机身的稳定性,降低运动过程中足端打滑程度,将前庭生物反射数学模型加入了CPG控制网络中,通过获取的坡面信息,进行关节平衡位置调整。四足机器人进行上坡运动的Simulink仿真过程如图9所示。根据有、无前庭反射设置2组对比仿真实验,以验证前庭反射对于坡面运动的稳定性影响,四足机器人以trot步态进行上坡运动,坡面角度为 10° 。

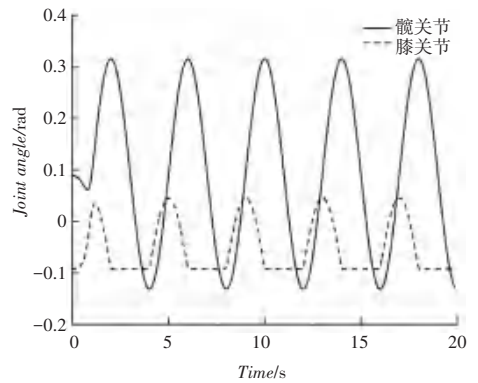


图9 上坡运动仿真

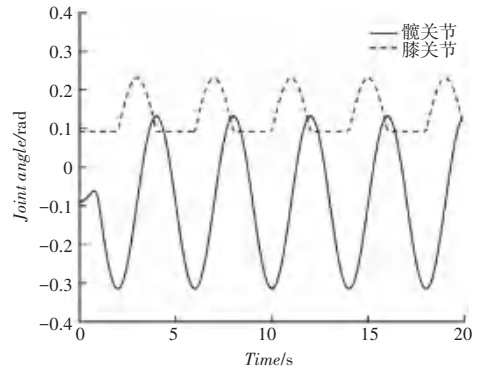
Fig. 9 Simulation of uphill motion

进行上坡运动时,四足机器人的关节运动曲线如图10所示,运动过程中,根据有无前庭反射的欧拉角、Z轴质心方向位移对比分别如图11、图12所示。

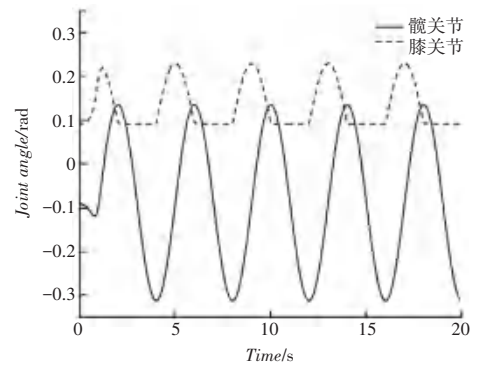
图10中显示,在前庭反射作用下,机器人进行上坡运动时,各个关节曲线要做一定程度调整。其中,左前腿和右前腿髋关节后摆,平衡位置减小,膝关节调整方向则与其相反。右后腿和左后腿髋关节前摆,平衡角度增大,最终机器人呈现前低后高的姿态以适应于上坡地形。



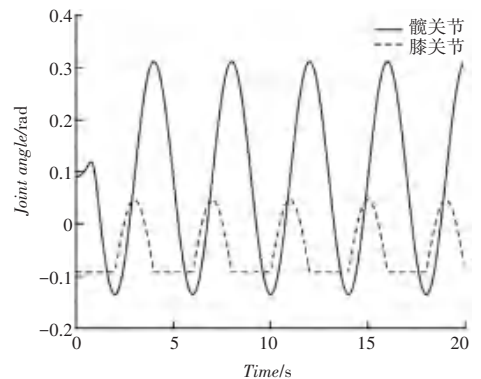
(a) 左前腿关节曲线



(b) 左后腿关节曲线



(c) 右后腿关节曲线



(d) 右前腿关节曲线

图10 上坡运动关节曲线

Fig. 10 Joint curve of uphill motion

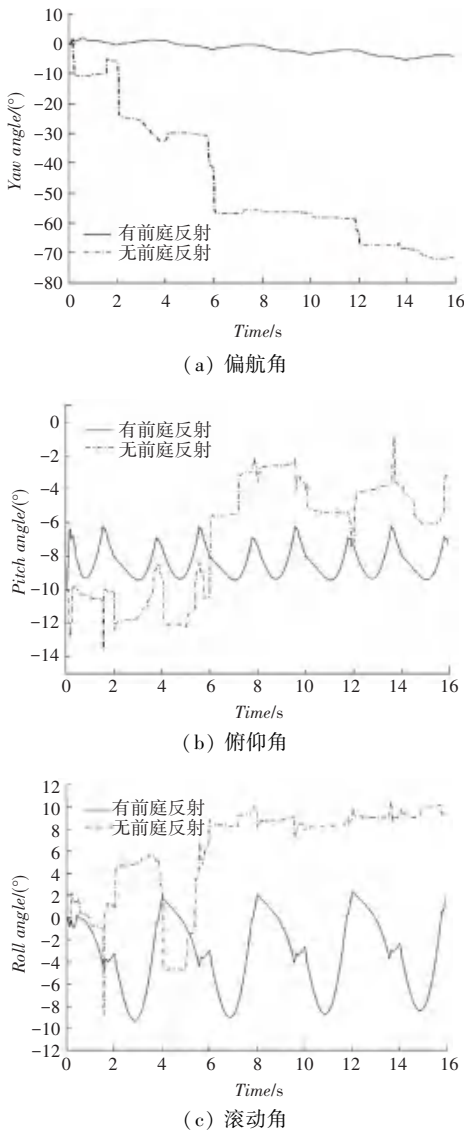


图 11 上坡运动中欧拉角稳定对比曲线

Fig. 11 Euler angle stability comparison curve in uphill movement

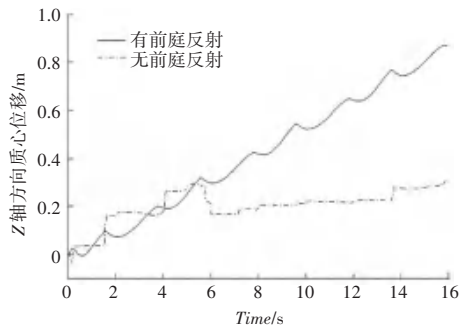


图 12 上坡时 Z 轴向质心位移曲线

Fig. 12 Z-axis centroid displacement curve in uphill movement

由图 11(a)可知,仿真结果显示无前庭反射的四足机器人在进行上坡运动时,偏航角明显发生变化,俯仰、滚动角曲线不平滑,抖动较大,整体打滑严重。从图 11(b)可以看出,无前庭反射的四足机器人俯仰角度变化无规律,波动幅度较大,而有前庭反

射作用的情况下,机器人俯仰角度始终大于 -10° ,机体更加地接近于水平面,这种姿态利于机体的重心稳定。由图 11(c)见到,无前庭反射的机器人滚动角在第 1.3 s 左右时发生剧烈抖动,机器人打滑严重,第 6 s 时,已经超过了 8° 并逐渐增加,而有前庭反射作用的仿真实验中,机器人滚动角度始终保持在一定范围内有规律的抖动。从 Z 轴质心位移曲线可以看出无前庭反射时,机器人无法正常上坡,在第 16 s 时 z 轴方向位移才达到 0.313 m,而加入了前庭反射的四足机器人在第 16 s 时 z 轴质心方向位移已经达到了 0.895 m,这说明其打滑量明显减少,且在前庭反射的作用下能正常地上坡。

5 结束语

(1)在 Matlab/Simulink 中根据 CPG 数学模型搭建了四足机器人运动控制器,并实现了四足机器人 trot 步态生成,且以 trot 步态进行了四足机器人的平面、上坡运动控制仿真实验。

(2)进行坡面运动仿真实验时,针对有、无前庭反射两种情况进行分析,最终的仿真结果表明前庭反射能有效地增强四足机器人坡面运动时重心的稳定性,也能有效地抑制足端打滑。

(3)根据仿生原理,搭建了作为低级神经中枢的 CPG 控制网络,并将前庭生物反射数学模型与其进行有机融合,使四足机器人具备一定坡面自适应能力,能有效地提高四足机器人进行坡面运动时的稳定性。

参考文献

[1] HUANG H, ZHANG Junhui, XU Bing, et al. Topology optimization design of a lightweight integrated manifold with low pressure loss in a hydraulic quadruped robot actuator [J]. Mechanical Sciences, 2021, 12(1):249-257.

[2] CHEN Zhiming, FAN Tingxiang, ZHAO Xuan, et al. Autonomous social distancing in urban environments using a quadruped robot[J]. IEEE Access, 2021, 9:8392-8403.

[3] ZHU Hongwu, WANG Dong, BOYD N, et al. Terrain-perception-free quadrupedal spinning locomotion on versatile terrains: Modeling, analysis, and experimental validation[J]. Frontiers in Robotics and AI, 2021, 8:1-9.

[4] 周坤, 李川, 李超, 等. 面向未知复杂地形的四足机器人运动规划方法[J]. 机械工程学报, 2020, 56(02):210-219.

[5] 韦中, 宋光明, 乔贵方, 等. 脊柱型四足机器人粗糙可变地形对角小跑运动控制[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2020, 50(02):385-394.

[6] KIM J, BA D X, YEOM H, et al. Gait optimization of a quadruped robot Using Evolutionary Computation[J]. 仿生工程学报:英文版, 2021, 18(02):306-318.