

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2311879

中枢模式发生器与足端轨迹的非线性映射*

陈久朋^{1,2}, 陈治帆¹, 伞红军^{1,2}, 祖永斌¹

(1. 昆明理工大学机电工程学院 昆明 650500; 2. 云南省先进装备智能制造技术重点实验室 昆明 650500)

摘要:控制的仿生性和行走的稳定性是四足机器人步态研究中重要的两个方面。为了提高四足机器人运动的稳定性,本文通过 Hopf 振荡器搭建了 CPG 模型,分别实现了多种步态及步态之间的转换。比较了基于 CPG 的步态控制方法和轨迹规划的步态规划方法在行走上的优劣性。为了同时利用 CPG 控制和轨迹规划的优点,提出采用神经网络将 CPG 控制曲线与足端轨迹逆运动学获得的驱动曲线进行非线性映射,使得四足机器人在控制上具备仿生特性,在足端接触上具备零冲击特性。仿真和实验结果表明,采用 CPG 的步态生成方法和轨迹规划方法四足机器人的行走速度理论行走速度 80 mm/s 相近,但采用 CPG 的步态生成方法四足机器人侧向位移在 ± 10 mm 以内且俯仰角在 $\pm 1.5^\circ$ 之间,而采用轨迹规划的控制方法四足机器人侧向位移在 ± 35 mm 以内且俯仰角在 $\pm 4^\circ$ 之间,可见两种控制方式对侧向偏移和俯仰运动的表现不一致。通过实验测量可知,机器人采用 walk 步态行走速度为 18.57 mm/s,与理论行走速度 20 mm/s 接近,步态转换后以 trot 步态行走,行走速度为 76.15 mm/s,与理论行走速度 80 mm/s 接近,少许误差可能是装配和行走过程打滑导致的。测量其侧向偏移程度可知,其侧向的偏移量左侧在 15 mm 内,右侧在 25 mm 内,其侧向偏移量均在合适的范围内,证明所提算法的有效性。

关键词: 四足机器人; CPG 模型; 足端轨迹; 非线性映射; 行走稳定性

中图分类号: TP391.41 TH14 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 520.6040

Nonlinear mapping between central pattern generator and foot trajectory

Chen Jiupeng^{1,2}, Chen Zhifan¹, San Hongjun^{1,2}, Zu Yongbin¹

(1. Faculty of Mechanical and Electrical Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500, China;

2. Key Laboratory of Advanced Equipment Intelligent Manufacturing Technology of Yunnan Province, Kunming 650500, China)

Abstract: The bionics of control and the stability of walking are two important aspects in the gait research of quadruped robots. In order to improve the stability of quadruped robot motion, this paper constructed a CPG model using a Hopf oscillator, which achieved various gaits and transitions between them. We compared the advantages and disadvantages of gait control methods based on CPG and gait planning methods based on trajectory planning in walking. In order to simultaneously utilize the advantages of CPG control and trajectory planning, a neural network is proposed to nonlinearly map the CPG control curve with the driving curve obtained from the inverse kinematics of the foot trajectory, so that the quadruped robot has biomimetic characteristics in control and zero impact characteristics in foot contact. The simulation and experimental results show that the theoretical walking speed of the quadruped robot using CPG gait generation method and trajectory planning method is similar to 80 mm/s. However, the lateral displacement of the quadruped robot using CPG gait generation method is within ± 10 mm and the pitch angle is between $\pm 1.5^\circ$, while the lateral displacement of the quadruped robot using trajectory planning control method is within ± 35 mm and the pitch angle is between $\pm 4^\circ$. It can be seen that the performance of the two control methods on lateral displacement and pitch motion is inconsistent. Through experimental measurements, it is known that the robot adopts a walk gait with a walking speed of 18.57 mm/s, which is close to the theoretical walking speed of 20 mm/s. After gait conversion, it walks in a trot gait with a walking speed of 76.15 mm/s, which is close to the theoretical walking speed of 80 mm/s. A small error may be caused by assembly and slipping during walking. By measuring its lateral displacement, it can be seen that the lateral displacement is within 15 mm on the left and 25 mm on the right, both of which are within an appropriate range, proving the

收稿日期: 2023-09-04 Received Date: 2023-09-04

* 基金项目: 云南省科技厅基础研发计划青年基金项目(202301AU070059)资助

effectiveness of the proposed algorithm.

Keywords: quadruped robot; CPG model; foot trajectory; nonlinear mapping; walking stability

0 引 言

在众多仿生足式机器人中,腿式机器人更适合于粗糙地形和复杂环境的应用,目前四足机器人因具备较高的稳定性和较少的自由度而被广泛的研究^[1-3]。随着机器人技术和人工智能的广泛应用,对四足机器人的稳定性提出了越来越高的要求,例如太空星球的探测以及复杂地形的行走,对四足机器人保持稳定的需求更加迫切。四足机器人的行走稳定性重点还是集中在步态控制上。目前主流的步态控制方法主要有基于模型的控制方法^[4]、基于CPG的步态生成方法^[5-6]、基于弹簧负载倒立摆的方法^[7]和基于智能算法的步态规划方法^[8]。基于弹簧负载倒立摆的方法在高速运动中有着较好的效果,在低速运动时受限制,基于智能算法的步态规划方法需要大量的样本,运算效率实时性不高。目前在中低速步态控制中常用的是基于模型的控制方法和基于CPG的步态生成方法。

在基于模型的步态规划方法中,足端轨迹是应用较为广泛的方法。Liu等^[9]为避免四足机器人足端与地面发生碰撞,在运动学分析的基础上,根据步行步态对足端轨迹进行调度,实现了机器人在平面上的稳定行走。王立鹏等^[10]为解决行走过程拖地、滑动和接触冲击等问题,设计了一种液压四足机器人仿生机构并提出了一种零冲击足端轨迹改进算法,完成了机器人的步态规划。Bellicoso等设计了一种惯性小、质量轻且适用于高速运动的四足机器人腿部结构,提出了基于样条曲线的足端轨迹,比较了样条曲线和Bézier曲线用于足端轨迹规划上的优劣,证明了样条曲线足端轨迹具备更好的稳定性、更低的能量消耗和更高的能量效率^[11]。为了使四足机器人能够在没有任何机器视觉系统的情况下穿越未知的崎岖地形,一种连续静态步态规划方法和一种基于摆动脚着地次数的在线地形复杂度评估算法被提出。采用该方法,四足机器人在行走过程中可以获得足够的稳定裕度,保证了机器人运动的连续性^[12]。Zhang等^[13]提出了一种新的四足机器人连续自由步态生成方法,机器人可通过重心轨迹规划有效的保持稳定,能够在崎岖不平的地面行走。Zhang等^[14]设计了一台山羊四足机器人,采用了一种基于高阶多项式曲线的低接触紧凑型足端轨迹规划方法,实现了机器人摆动阶段和站立阶段的足端轨迹规划,保证了斜坡行走的稳定性。采用“建模-规划-控制”的控制思路可以获得理想的足端轨迹,在足端的冲击特性上得到了明显的改善,但该方法对于不同的步态

以及不同的环境下适应性较差,需要重复建模和完善,环境适应性较差。但因路径规划和抗冲击特性较好,因此可以作为末端的输出控制。

在基于CPG的步态生成方法中, Ma等^[15]分析了Hopf振荡器特性,探讨了其在四足机器人步态生成中的可行性,并构造了两种CPG控制网络。徐海东等^[16]以Hopf振荡器模型为核心,建立了全对称CPG模型,将CPG网络输出信号通过映射函数交换作为机器人虚拟样机关节转角控制信号,实现了四足机器人多种步态的行走。Liu等^[17]为解决传统的单层CPG模型在未知环境和反馈控制工程问题性能不足的问题,提出了一种多层CPG控制模型,保证了四足机器人的自适应行走。Kimura等^[18]提出了在不规则地形上动态稳定行走的必要条件,并依据生物学概念和物理描述的必要条件来设计机械和神经系统,神经系统主要由CPG、反射和响应组成,在Tekken机器人上成功实现了稳定行走。Wang等^[19]构造了一个基于CPG的多模块控制器解决了传统CPG敏捷性差的问题,所提出的CPG控制器能够保证四足机器人平稳运行。Wu等^[20]采用了一种可任意调节振荡器之间相位差的CPG方法,在CPG网络中添加一个过渡状态以增强机器人的静态平衡。通过构造生物神经元的方式获得模拟生物神经中枢的控制方式,在生物神经层面控制机器人行走有着天然优势,可以在振荡器模型和CPG模型中添加一些反馈元素和改变振荡器参数来获得不同步态的生成和同一步态之间的抬腿跨度和抬腿高度。因其模拟生物神经元耦合输出特性,且执行效率极高,因此目前在仿生机器人领域中得到了广泛应用。CPG控制虽然能形成稳定的空间极限环,增加机器人行走的稳定性,但CPG网络的输出一般为正弦信号,大部分学者直接将CPG输出信号直接来控制四足机器人的关节转角,虽然执行效率高,但实际中四足机器人的关节轨迹往往更加复杂。这种在神经层面对机器人控制也有其不可避免的缺点,应用CPG的输出直接控制髋、膝关节生成的足端轨迹在 x 和 y 两个方向的速度和加速度曲线均不平滑,存在明显的突变。突变现象在加速度曲线上更能体现出来,尤其是在摆动相和支撑相换相时速度和加速度不为零,此时为足端与地面接触的瞬间,会导致足端与地面发生严重的冲击,影响四足机器人的运动。解决CPG控制下机器人足端具备零冲击特性是保证机器人高速运动的关键。

基于模型的步态控制方法和基于CPG的步态生成方法均只关注于单一领域的步态研究问题,对其综合控制的研究相对较少,没有充分利用CPG神经控制特性和

足端轨迹规划的优点。若能将二者的控制机理统一起来,在步态生成上采用 CPG 神经控制方法,使之产生具备多路耦合特性的振荡器控制信号,以实现各类步态。在步态不变的基础上,引入理想的轨迹方程利用逆运动学模型,获得具备足端零冲击的髌、膝关节驱动信号。利用神经网络将 CPG 模型中获得的输出控制信号通过非线性映射获得足端轨迹规划下理想的关节控制信号来驱动髌、膝控制信息。该种驱动方式将提高机器人控制层面上的执行效率,并能保证足端零冲击的特性,从而提高了机器人运动的稳定性。本文基于仿生学原理和机构学知识,设计了可在平面地形稳定行走的四足仿生机器人。采用了 CPG 步态规划算法与足端轨迹规划算法分别实现了四足机器人的稳定行走。同时,本文还首次比较了两种步态规划方法行走稳定性最优的问题,进一步揭示了基于 CPG 的步态规划方法具备更高的稳定性。此外,提出了采用神经网络将中枢模式发生器曲线与足端轨迹曲线逆运动学模型驱动曲线实现了非线性映射,使得在控制层面上采用 CPG 模式,在实际驱动时采用已规划的曲线,在行走上具备零冲击特性。

1 CPG 模型的搭建与实现

1.1 Hopf 振荡器的搭建

采用中枢模式发生器(central pattern generator, CPG)对多自由度机器人进行控制是目前主流的控制方式^[21]。常用的搭建 CPG 模型主要有基于神经元的方式和采用非线性振荡器的方式。在众多的振荡器中, Hopf 振荡器每一个参数可独立对输出进行调节,且表达式非常简单,可满足不同占空比下四足机器人步态曲线的生成,因此这种具备解析解的振荡器在很多工程领域得到了广泛的应用。式(1)给出了 Hopf 振荡器的数学模型表达式。

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

式中: x 和 y 代表振荡器的输出曲线; α 的大小决定了振荡器收敛速度; ω 是振荡器的频率; u 决定了振荡器振动的幅值,其与幅值 A 与 u 的关系为 $u = \sqrt{A}$ 。

1.2 改进 CPG 模型

基于中枢模式发生器的步态控制方法是一种节律运动控制方式,其主要是通过模拟生物低级神经中枢产生节律信号。其具有非常多的优点:可以产生不同节律信号,实现不同的运动控制;具有一定的自主控制能力,能够脱离上层神经中枢的参与也能产生稳定的周期振荡信号;可对外部信号进行反馈整合,耦合多种环境因素,达到自稳定状态。为了达到四足机器人的稳定控制的效

果,需要采用多个 Hopf 振荡器搭建 CPG 模型,实现整机的运行和控制。其中分层 CPG 控制网络如图 1 所示。

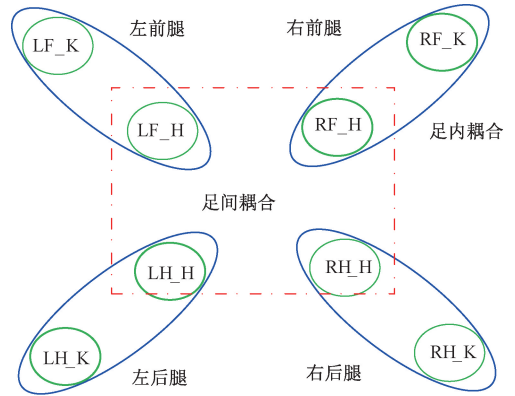


图1 分层 CPG 控制网络

Fig. 1 Layered CPG control network

该网络采用 8 个 Hopf 振荡器分别控制四足机器人的 8 个前进自由度。机器人左前腿、右前腿、左后腿和右后腿分别用 LF、RF、LH 和 RH 表示。每条腿存在两个行走自由度,以左前腿为例,髌关节自由度表示为 LF_H,膝关节自由度表示为 LF_K。因此 4 个髌关节由 4 个 Hopf 振荡器驱动实现足间耦合,保证机器人行走过程相位关系的正确性。另外 4 个振荡器分别用于控制膝关节 4 个自由度,4 个髌关节自由度与 4 个膝关节自由度为单向连接,能够保证行走过程中腿部自由度直接的单向耦合,实现足内协调控制。

采用一个振荡器控制一个关节转角实现机器人运动控制的方式虽然可行,但是这种控制模式使得振荡器的数量使用较多,如果关节较多,实现多关节协同相位驱动会造成一定的麻烦,不易检查问题。由式(1)可得 Hopf 振荡器的输出曲线如图 2 所示,两条曲线具备严格的对应关系,即 x 的上升段对应 y 曲线小于 0 的部分, x 的下降段对应 y 曲线大于 0 的部分。可对 y 曲线进行变化,使其符合机器人关节的驱动规律,这样操作可将振荡器的使用数量降低一倍,大大提高了求解效率。

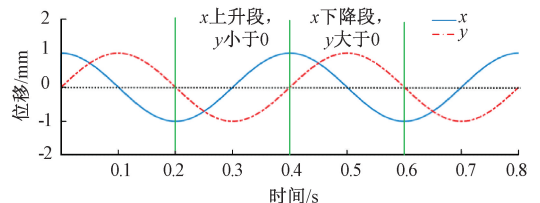


图2 Hopf 振荡器的输出对应关系

Fig. 2 Output correspondence of Hopf oscillator

对于四腿 8 自由度的机器人,通过以上方式处理,振荡器只需要 4 个即可达到行走的目的。4 个振荡器

控制 8 个关节的 CPG 网络布局如图 3 所示, 将 Hopf 振荡器的输出 x 曲线作为机器人髋关节的控制曲线, 将 y 曲线作为机器人的膝关节控制曲线, 则可降低控制的复杂度。

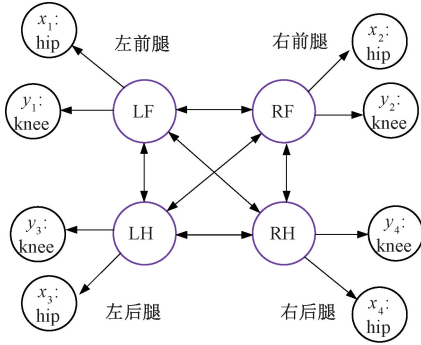


图 3 CPG 网络模型改进

Fig. 3 Improvement of CPG network model

因此所搭建的四足机器人步态控制的 CPG 数学模型如下^[21]:

$$\begin{cases}
 \begin{bmatrix} \dot{x}_i \\ \dot{y}_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \alpha(u - r_i^2) & -\omega_i \\ \omega_i & \alpha(u - r_i^2) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_i \\ y_i \end{bmatrix} + \sum_{j=1}^4 K(\theta_j^i) \begin{bmatrix} x_j \\ y_j \end{bmatrix}, i = 1, \dots, 4 \\
 r_i^2 = x_i^2 + y_i^2 \\
 \omega_i = \frac{\omega_{st}}{e^{-\alpha y_i} + 1} + \frac{\omega_{se}}{e^{\alpha y_i} + 1} \\
 \omega_{st} = \frac{1 - \beta}{\beta} \omega_{st} \\
 \theta_{hipi} = x_i \\
 \theta_{kneei} = \begin{cases} -\text{sgn}(\varphi) G y_i, & y_i \leq 0 \\ 0, & y_i > 0 \end{cases}
 \end{cases} \quad (2)$$

其中, β 为占空比, $K(\theta_j^i)$ 是耦合髋关节相位关系的旋转矩阵, θ_{hipi} 为髋关节驱动曲线; θ_{kneei} 为膝关节驱动曲线; G 是与抬腿高度有关的振荡器 y 方向的幅值, $\text{sgn}(\phi)$ 是符号函数。

以上振荡器的输出曲线直接用于控制机器人虽然可以获得能满足运动的髋膝关节驱动规律, 但是幅值并不符合真实的机器人所需驱动角度。因此要获得期望的髋关节和膝关节角度, 需要根据给定的运行速度求解髋、膝关节实际的角位移幅值。这里以髋关节坐标系下 trot 步态在一个步态周期内运动情况进行说明。机器人单腿的运动情况如图 4 所示, 无论是摆动相还是支撑相机器人均向前移动了 $S/2$ 的距离。

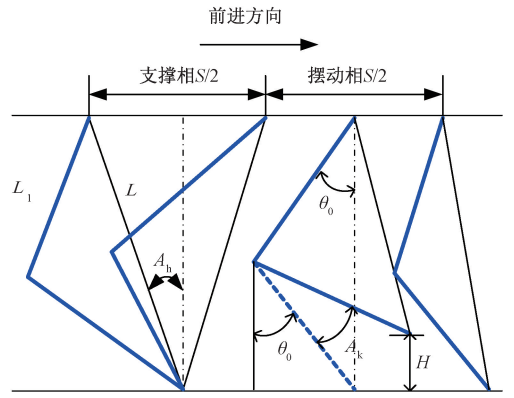


图 4 单腿周期运动图

Fig. 4 Single leg periodic motion diagram

根据几何关系和运动方程可得:

$$\begin{cases}
 \sin \omega_k = S/4L \\
 S = vT \\
 L = 2L_1 \cos \theta_0
 \end{cases} \quad (3)$$

其中, θ_0 为机器人初始位置髋关节与膝关节与竖直方向夹角, L 为髋关节到足端的距离, L_1 为大腿和小腿腿长均, A_h 为髋关节转角, A_k 为膝关节转角, v 为机器人的移动速度, H 为机器人摆动相中点足端与地面的高度。

因此根据式(3) 机器人髋关节摆动角度 A_h 为:

$$A_h = \arcsin\left(\frac{vT}{8L_1 \cos \theta_0}\right) \quad (4)$$

为了保证机器人行走过程不出现拖地现象, 同时也使得机器人能够跨越一定高度的障碍物, 需要保证摆动相时摆腿高度始终大于 0。膝关节角度决定了机器人摆腿的高度。由图 4 所示的几何关系可得机器人抬腿高度为:

$$H = L_1 \cos \theta_0 - L_1 \cos(\theta_0 + \omega_k) \quad (5)$$

因此机器人膝关节角度为:

$$A_k = \arccos[(L_1 \cos \theta_0 - H)/L_1] - \theta_0 \quad (6)$$

在最终的计算中, 需要确定机器人所行走的步态形式, 以此确定占空比, 然后给定机器人的运动速度和周期, 获得髋关节转角后, 再根据实际的情况调整抬腿高度, 抬腿高度过高和过低均会影响行走的稳定性, 确定合适的抬腿高度后可根据初始位置换算为膝关节转角。

2 CPG 模型的搭建与实现

2.1 Hopf 振荡器的搭建

为了获得具有固定相位关系的输入输出曲线, 使其既满足占空比要求, 又满足机器人步态行走需求。这里采用 Simulink 模块求解微分方程, 并搭建振荡器。在搭建振荡器的过程中, 初值的选取非常重要, 这决定了振荡器收敛到极限环的速度和时间, 一般而言, 只需要设置第

一个振荡器的初值,其它振荡器的初值默认是零,这样设置有利于其它振荡器的输出可根据第一个振荡器的变化而变化,可保证确定的相位关系。四个振荡器的搭建过程是一致的,唯一不同的是振荡器之间的耦合关系,这里以 LF 腿振荡器的搭建过程进行说明。图 5 所示是 LF 腿髌、膝关节驱动信号的求解过程,其中 x_1 和 y_1 是振荡器的输出,是髌膝关节的控制信号; x_{11}, y_{11} 是振荡器耦合相输出,决定了髌关节和膝关节之间的相对相位关系。其中 x_1 和 y_1 不是孤立存在,受到其它振荡器值 $x_2, y_2, x_3, y_3, x_4, y_4$ 和耦合相输出值 $x_{11}, y_{11}, x_{12}, y_{12}, x_{13}, y_{13}, x_{14}, y_{14}$ 的影响。 x_{11}, y_{11} 也不是孤立存在,其受到 $x_1, y_1, x_2, y_2, x_3, y_3, x_4, y_4$ 和 $x_{12}, y_{12}, x_{13}, y_{13}, x_{14}, y_{14}$ 值的影响。

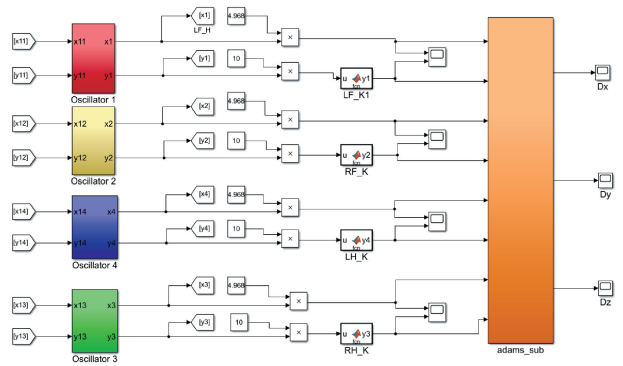


图 6 CPG 控制系统的搭建

Fig. 6 Construction of CPG control system

$\theta_0 = 30^\circ$, 以下仿真均以此参数为基础进行。

2.2 Walk 步态仿真分析

walk 步态是稳定性最好的静步态,每条腿按照固定的相序移动从而完成四足机器人行走,占空比为 0.75,将机器人按照 1-4-2-3 的相序进行移动。以左前腿 LF 为零相位,两条腿之间的相对相位可根据左前腿的相对相位进行描述。给出振荡器参数 $\alpha = 10\ 000, u = 1, a = 100, \omega_{sw} = 5\pi, \beta = 0.75$, 抬腿高度 $H = 20\text{ mm}$, 设定理论运行速度 100 mm/s 。此时根据式(4)同样可以得髌关节角位移幅值是 4.968° , 由式(6)可得膝关节角位移幅值是 10° 。根据联合仿真模型,walk 步态的髌关节相位关系如图 7 所示,左前腿髌关节和膝关节转角对应关系如图 8 所示,四条腿严格按照给定驱动规律交替运动,证明所搭建 CPG 模型的正确性。

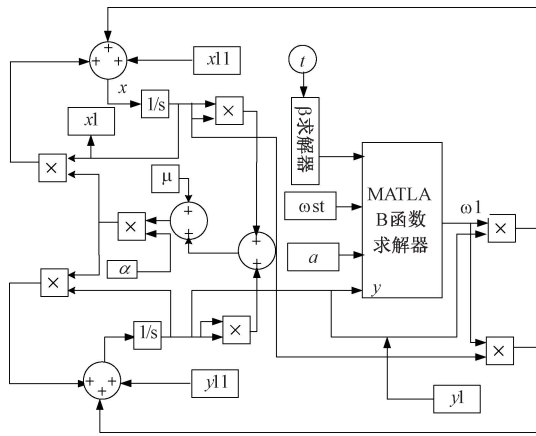


图 5 搭建振荡器求解模型

Fig. 5 Building an oscillator solution model

将振荡器产生的 8 个输出信号 $x_1, y_1, x_2, y_2, x_3, y_3, x_4, y_4$ 值作为耦合项的输入值,经过旋转矩阵可获得具体的耦合项的输出值 $x_{11}, y_{11}, x_{12}, y_{12}, x_{13}, y_{13}, x_{14}, y_{14}$, 将耦合项的输出值以正反馈的形式叠加进入振荡器中,可获得具有相对相位关系的 8 个振荡器的输出,需要注意的是对振荡器输出的 y 值需要按照髌膝关节运动规律进行变化,CPG 控制网络的搭建仿真过程如图 6 所示。对 4 个振荡器 (Oscillator 1, Oscillator 2, Oscillator 3, Oscillator 4) 的输出曲线进行变化处理后,获得所需的控制曲线,以达到驱动四足机器人运行的目的。在上述振荡器的搭建过程中取振荡器幅值为 $u = 1$, 以保证振荡器输出得到的 x 和 y 的位移曲线是幅值为 1 的且满足运动规律的角位移曲线,该操作的目的是保证在后续的仿真中,只要计算出髌、膝关节所需的驱动角度,直接与振荡器的输出曲线相乘即可得到能满足给定速度下的髌膝关节角位移驱动曲线。

本文所采用的机器人大腿 L_1 和小腿 L_2 的长度均为 200 mm , 整机重 37.5 kg , 初始位置时髌关节角度 $\theta_1 = -120^\circ$, 膝关节角度 $\theta_2 = 60^\circ$, 大腿与竖直方向的夹角

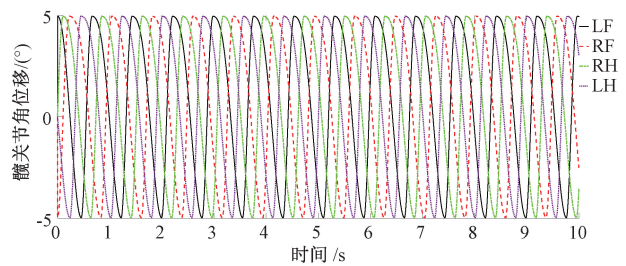


图 7 静步态髌关节相位关系

Fig. 7 Hip joint phase relationship in static gait

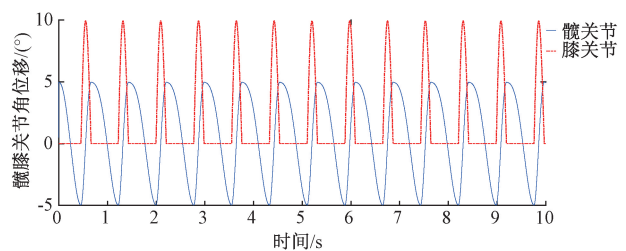


图 8 静步态髌、膝关节旋转角度

Fig. 8 Hip and knee joint rotation angle in static gait

walk 步态的运动仿真如图 9 所示,由图 9 可知机器人能够按照已规划的步态稳定前进。

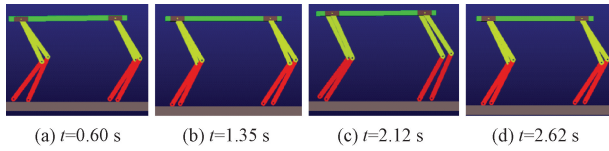


图 9 walk 步态仿真过程

Fig. 9 Walk Gait Simulation Process

机器人在 walk 步态下运行时质心在前进方向的位移和速度曲线如图 10 所示,四足机器人在 5 s 内前进了 505 mm,速度为 101 mm/s,除去打滑等因素,接近理论行走速度 100 mm/s,证明了 CPG 控制算法的有效性。

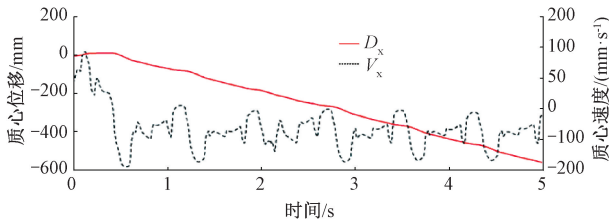


图 10 Walk 步态下前进方向的速度和位移曲线

Fig. 10 Velocity and displacement curves in the forward direction of walk gait

2.3 Trot 步态仿真分析

Trot 步态是稳定性最好的动步态,对角腿按照固定的相位关系交替运动完成行走。为了在后续章节比较在 CPG 内部实现步态转换,这里将 trot 步态的运行速度设置为 300 mm/s,为 walk 步态运行速度 100 mm/s 的 3 倍,同理给出振荡器参数 $\alpha = 10\ 000, u = 1, a = 100, \omega_{sw} = 5\pi, \beta = 0.5$,抬腿高度 $H = 20\text{ mm}$ 。从图 11 所示的四腿髋关节角位移输出曲线可以看出髋关节输出角度曲线严格符合占空比为 0.5 的对角步态行走要求,图 12 是髋膝关节的相对相位关系,其严格符合足内耦合规律。

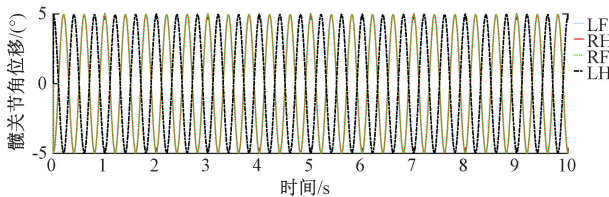


图 11 对角步态髋关节相位关系

Fig. 11 Diagonal gait hip joint phase relationship

将关节角位移曲线驱动四足机器人 8 个关节可得 trot 步态运动仿真如图 13 所示,由图 13 可知机器人能按照给定的运动规律,严格按照对角腿交替运动稳定运行。

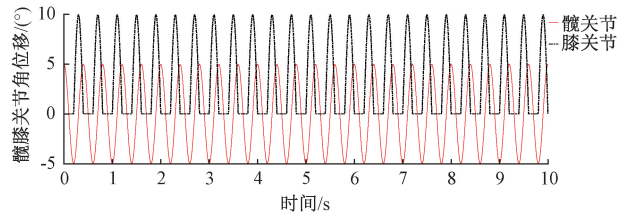


图 12 对角步态髋、膝关节旋转角度

Fig. 12 Diagonal gait hip and knee joint rotation angle

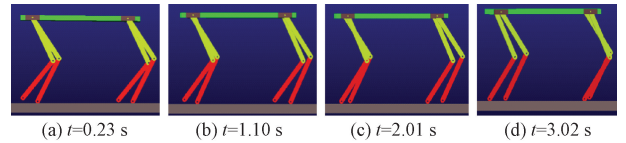


图 13 对角步态仿真过程

Fig. 13 Diagonal Gait Simulation Process

四足机器人在 trot 步态下在前进方向的质心位移和速度曲线如图 14 所示,由于地板长度的限制,因此仿真取 5 s 内的结果。由图 14 可知机器人在 5 s 内行走的位移大概为 1 400 mm,速度为 280 mm/s,除去地面打滑等因素,与理论行走速度 300 mm/s 接近,证明该算法的有效性。

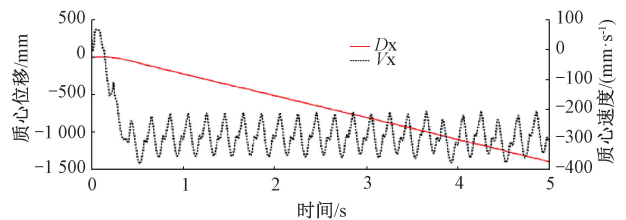


图 14 Trot 步态下前进方向的速度和位移曲线

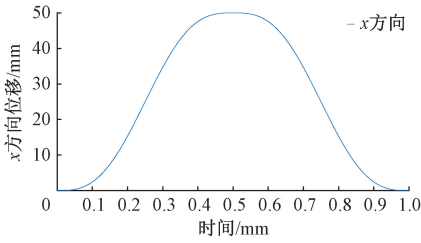
Fig. 14 Velocity and displacement curves in the forward direction of trot gait

3 足端轨迹的实现与控制

3.1 复合摆线轨迹及运动学

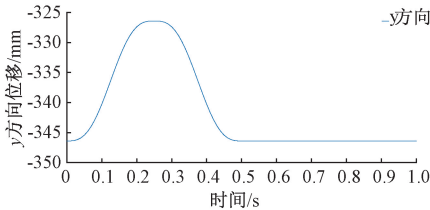
复合摆线轨迹被誉为理想的足端轨迹,在各类轨迹规划中被广泛的应用,本文以复合摆线最为机器人行走的足端轨迹,式(7)是复合摆线在 x 轴和 y 轴方向的运动方程^[22], sw 表示摆动相轨迹, st 表示支撑相轨迹。四足机器人一个周期内复合摆线的运动轨迹如图 15 所示,图 15(a)是一个周期内 x 方向位移随时间变化曲线,图 15(b)是一个周期内 y 方向位移随时间变化曲线,图 15(c)是一个周期内 x 方向位移随 y 方向位移变化变化曲线。

$$\begin{cases}
 x = \begin{cases} S(2t/T - 1/2\pi\sin(4\pi t/T)), & 0 \leq t \leq T/2 \\ -S(2t/T - 1/2\pi\sin(4\pi t/T)) + S, & T/2 \leq t \leq T \end{cases} \\
 y = \begin{cases} 2(H_1 - h)(2t/T - 1/4\pi\sin(8\pi t/T)) - H_1, & 0 \leq t \leq T/4 \\ 2(h - H_1)(2t/T - 1/4\pi\sin(8\pi t/T)) + H_1 - 2h, & T/4 \leq t \leq T/2 \\ -H_1, & T/2 \leq t \leq T \end{cases}
 \end{cases}
 \quad (7)$$



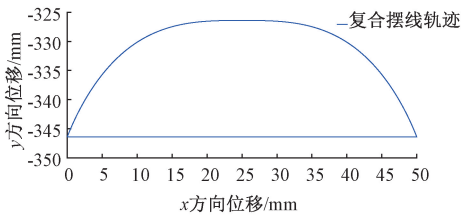
(a) x方向位移随时间变化曲线

(a) Time variation curve of x-direction displacement



(b) y方向位移随时间变化曲线

(b) Time variation curve of y-direction displacement



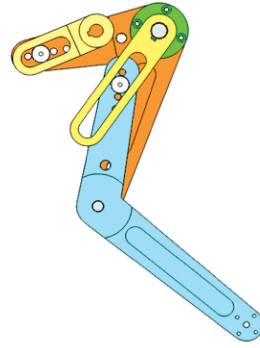
(c) x方向位移随y方向位移变化曲线

(c) Curve of x-direction displacement changing with y-direction displacement

图15 复合摆线足端轨迹

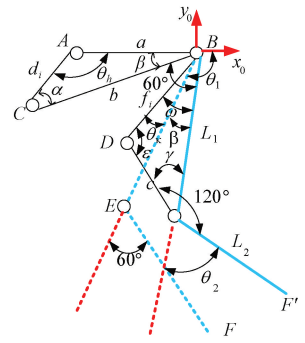
Fig. 15 Compound cycloid foot trajectory

在后续的实验环节,轨迹规划中需要用实验室自研的 KUST canine 四足机器人为研究对象,其左前腿机构简图如图 16 所示,其中图 16(a) 为左前腿三维模型,图 16(b) 是左前腿三维模型机构运动简图。 θ_h 为大腿电机转动角度, θ_k 为小腿电机转动角度。绿色虚线是大腿和小腿所处的初始位置,初始位置时髌关节角度 $\theta_1 = -120^\circ$, 膝关节角度 $\theta_2 = 60^\circ$ 。图示位置腿由 F 摆动到 F' 。这里省去了复杂的运动学推导,直接给出了单腿的逆运动学方程。



(a) 左前腿三维模型

(a) The 3D model of left front leg



(b) 左前腿机构运动简图

(b) Schematic diagram of left front leg mechanism movement

图16 LF腿机构简图

Fig. 16 LF leg mechanism diagram

根据图 16 所示的几何关系结合 D-H 法可得在髌关节坐标系 $B-x_0y_0$ 下的足端的逆运动学方程为:

$$\theta_h = -\arctan\left(\frac{b \sin \beta}{a - b \cos \beta}\right) =$$

$$-\arctan\left[\frac{b \sin\left(\theta_1 + \frac{2\pi}{3}\right)}{a - b \cos\left(\theta_1 + \frac{2\pi}{3}\right)}\right] \quad (8)$$

$$\theta_k = -\arctan\left(\frac{c \sin \gamma}{L_1 - c \cos \gamma}\right) + \beta =$$

$$-\arctan\left[\frac{c \sin\left(\theta_2 - \frac{\pi}{3}\right)}{L_1 - c \cos\left(\theta_2 - \frac{\pi}{3}\right)}\right] + \theta_1 + \frac{2}{3}\pi \quad (9)$$

其中, $a = 65 \text{ mm}$, $b = 125 \text{ mm}$, $c = 133.5 \text{ mm}$, $L_1 = 200 \text{ mm}$, $L_2 = 200 \text{ mm}$ $\theta_1 = \arctan\left(\frac{B - \sqrt{A^2 + B^2 - C^2}}{A + C}\right)$, $A = 2L_1x$, $\theta_2 = \arctan\left(\frac{y - L_1 \sin \theta_1}{L_2}\right) - \theta_1$, $C = x^2 + y^2 + L_1^2 - L_2^2$, $B = 2L_1y$ 。

将足端轨迹方程代入机器人逆运动学方程,可以获得图 17 所示的髌膝关节驱动角速度。

3.2 CPG 步态规划与足端轨迹步态规划对比

基于模型的轨迹规划方法和基于 CPG 的步态生成方法均是四足机器人控制的重要方法,均能实现机器人步态和步态转换,两者均各有优缺点。基于模型的控制方法优点是运用逆运动学方程,容易规划和控制,是检验机构合理性很重要的组成部分;缺点是建模-规划的控制思路不仅执行效率低下且不能满足复杂环境的行走需要,也不符合生物的神经控制模式。CPG 的步态生成方法优点是符合四足动物的神经控制模式,可脱离上层神

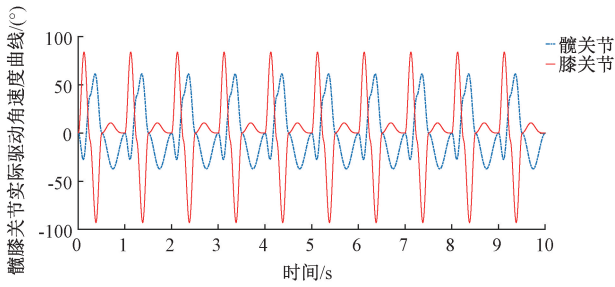


图 17 足端轨迹下髋膝关节运动角度

Fig. 17 Hip and knee joint motion angle under foot trajectory

经中枢独立产生所需节律运动曲线,不依赖建模和规划,具备更高的灵活性和环境适应性,是四足机器人未来发展的热点;缺点是该理论不是特别成熟,调节参数较多,足端不具备规划控制具有的零冲击特性。本节将对这两种控制方法在 trot 步态的控制效果进行对比,为了不失一般性,需要设定两者之间的运行参数一致,通过比较相同时间内的行走位移和质心波动来衡量两者的控制效果。

1) trot 步态足端轨迹仿真设置 1:足端轨迹规划采复合摆线足端轨迹,在该轨迹下,步长为 $S=80\text{ mm}$,运行周期为 $T=1\text{ s}$,抬腿高度 $H=20\text{ mm}$,运动速度为 $v=80\text{ mm/s}$,占空比 $\beta=0.5$ 。

2) trot 步态 CPG 的步态生成仿真设置 2:要保证与足端轨迹规划的步态具有相同的运行速度和抬腿高度,需要设置如下参数: $\alpha=10\ 000$, $u=1$, $a=100$, $\beta=0.75$, $\omega_{sw}=5\pi$,将 $v=80\text{ mm/s}$ 和 $T=1\text{ s}$, $\beta=0.5$ 代入式(4)可得髋关节幅值为 3.31° ,把 $H=20\text{ mm}$ 代入式(6)可得膝关节幅值为 10° 。

四足机器人在 CPG 控制模式和轨迹规划模式下的仿真截图如图 18 和 19 所示,仿真显示两种步态控制方法均能保证机器人按照已规划的对角步态稳定行进。

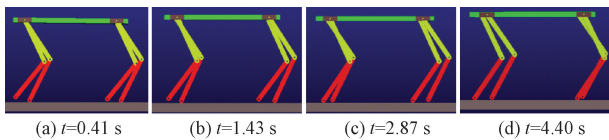


图 18 CPG 控制下四足机器人仿真截图

Fig. 18 Simulation screenshot of quadruped robot under CPG control

图 20 和 21 是在两种控制模式下机器人在前进方向上的位移和速度曲线,采用 CPG 的步态生成方法,机器人在 5 s 内在前进方向上行走了 390 mm ,运行速度为 78 mm/s 。采用轨迹规划方式行走,机器人在 5 s 内在前进方向行走了 395 mm ,运行速度为 79 mm/s ,两个控制方法均基本能达到理论行走速度 80 mm/s 。

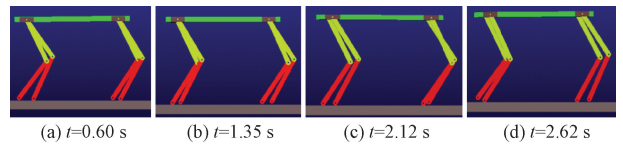


图 19 轨迹规划下四足机器人仿真截图

Fig. 19 Simulation screenshot of quadruped robot under trajectory planning

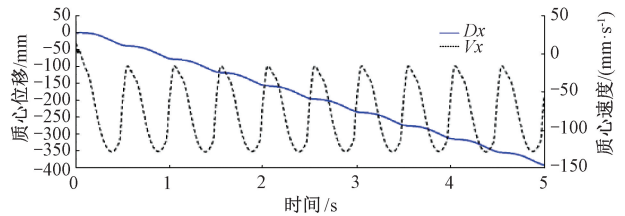


图 20 CPG 控制下四足机器人位移和速度曲线

Fig. 20 Displacement and velocity curves of quadruped robots under CPG control

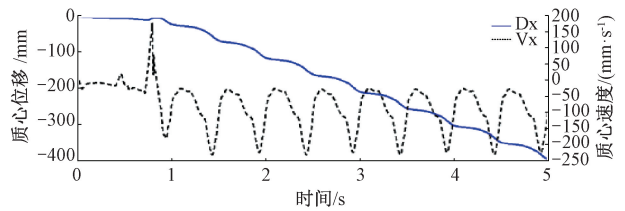


图 21 轨迹规划下质心的位移和速度曲线

Fig. 21 Displacement and velocity curves of the center of mass under trajectory planning

在两种控制模式下,四足机器人质心波动曲线如图 22 和 23 所示。采用 CPG 的步态生成方法机器人侧向位移在 $\pm 10\text{ mm}$ 以内,采用轨迹规划的控制方法,机器人侧向位移最大分别为 28 mm 和 -35 mm ,证明了采用 CPG 的步态生成方法更能够保证机器人沿着直线运行。

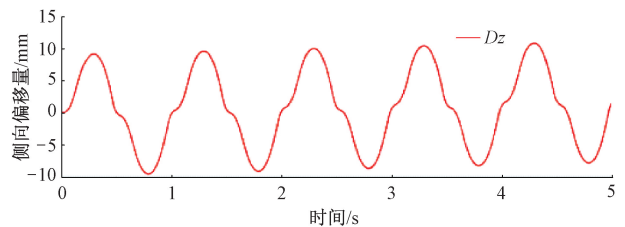


图 22 CPG 控制下质心在 Z 方向位移和速度曲线

Fig. 22 Displacement and velocity curve of the center of mass in the Z direction under CPG control

在两种控制模式下,机器人俯仰角的变化值如图 24 和 25 所示,其中采用 CPG 的步态生成方法,机器人俯仰角在 $\pm 1.5^\circ$ 之间变化。而采用轨迹规划的方法,机器人角

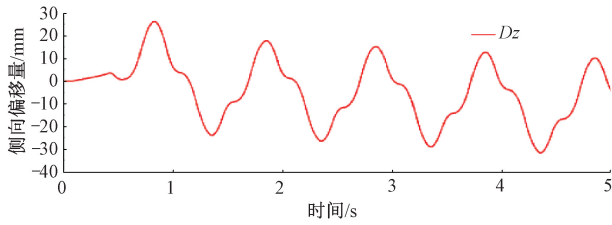


图 23 轨迹规划下质心在 Z 方向位移和速度曲线

Fig. 23 Displacement and velocity curves of the center of mass in the Z direction under trajectory planning

度变化在 $\pm 4^\circ$ 之间,由此可知采用 CPG 的神经控制方式更能保证机器人行走的稳定性。

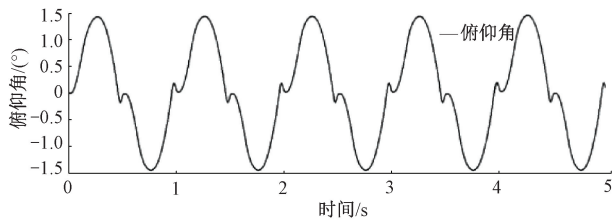


图 24 CPG 控制下机身俯仰角

Fig. 24 CPG controlled fuselage elevation angle

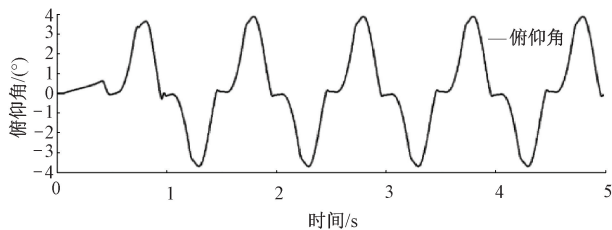


图 25 轨迹规划下机身俯仰角

Fig. 25 Fuselage elevation angle under trajectory planning

通过在相同的运行速度,相同的运动周期和相同的跨步步长下,对四足机器人两种控制模式进行比较分析可以得出结论:采用 CPG 的步态生成方法和轨迹规划的方法均能实现四足机器人的特定步态,均能保证机器人稳定运行。但是在 CPG 的步态生成方法下机器人侧向偏移程度更小,更能够保证沿着直线方向运行,并且机器人俯仰角波动量小于轨迹规划,证明了 CPG 的步态生成方法在控制层面的稳定性优于轨迹规划的方法,保证的行进过程的稳定性,但并未实现机身本身的稳定性。

4 CPG 控制模型与足端轨迹非线性映射原理与实现

根据前面分析可知采用模拟生物低级神经中枢的步态控制方法比基于足端轨迹规划的步态控制方法具备更

高的稳定性,且摆脱了不断规划导致效率不高的问题,在实际控制中被业界广为接受的也是 CPG 的步态生成方法。这种控制方式唯一的不足是支撑相的足端轨迹是向下凸的曲线,会引起机身向上波动,同时抬腿和落足不具备零冲击特性。为了利用复合摆线优点,使得足端不仅具备仿生特性,更具备零冲击的特点,这里需要将所产生的 CPG 输出曲线进行非线性映射,在控制层面保证了机身稳定性和行走稳定性。

Hopf 振荡器输出的两条曲线以坐标轴的形式体现为一一对应的关系,其构成了一个稳定的极限环如图 26 所示,这也就是为什么采用 Hopf 振荡器行走过程稳定性较好的原因。根据之前的分析可知,极限环上的任意一点对应于机器人的一个稳定状态因此要获得 M 点实际的状态,除了已知 x, y 的位移外,还需要确定转角 $angle$ 。

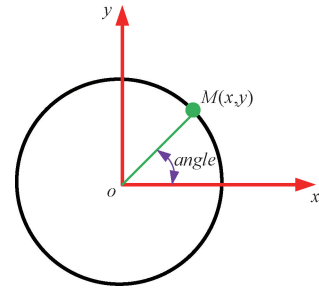


图 26 极限环上点的确定

Fig. 26 Determination of points on limit cycles

根据图 26 所示的几何关系可得:

$$angle = \arctan \frac{y}{x} \quad (10)$$

4.1 映射原理

CPG 模型与足端轨迹模型的映射关系如图 27 所示,对于 KUST-canine 四足机器人来说,需要 8 个关节驱动函数实现整机的步态,每个腿之间的足内耦合关系和四腿的足间耦合关系均可通过 CPG 的旋转矩阵和单腿足内耦合矩阵实现。单腿的 CPG 中的稳定极限环上的点需要三个参量才能确定,因此在使用神经网络拟合之前需要获得整机的 12 个输入参量,把 Hopf 振荡器输出的两个值 x, y 以及对其求反三角函数得到的 $angle$ 作为 3 个输入,利用神经网络的非线性拟合功能将 3 个输入拟合为已规划好的足端轨迹逆运动学求解的髌关节和膝关节角位移方程,这样在今后的步态中可以预先获取已规划好的髌、膝关节角位移,然后采用 CPG 步态控制方式产生符合相位要求的关节驱动曲线,可最大限度的提高机器人行走的稳定性。

建立两个 Excel 表格,在其中一个表格中建立 3 个列向量输入模块,将其命名为“input1”,里面保存 x, y 和 $angle$ 值,在另一个表格中建立 2 个列向量模块,里面保

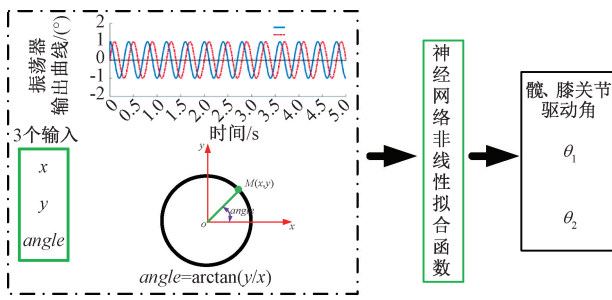


图 27 CPG 模型与轨迹规划模型非线性映射

Fig. 27 Nonlinear mapping between CPG model and trajectory planning model

存髋关节转角 θ_1 和膝关节转角 θ_2 , 将其命名为“output1”, 在 MATLAB 中读取表格内的值到工作空间中, 利用神经网络非线性拟合插件“Neural Net Fitting”模块, 可建立输入和输出所对应的神经网络拟合求解器。

选择数据点中的 8 433 个数据点进行训练, 系统默认是总点数的 70%, 这些数据是用于训练网络, 根据误差对网络进行调整。用于选择验证集为 1 807 个点, 系统默认为总点数的 15%, 选择测试集为 1 807 个点, 这主要用于测量网络泛化, 并在泛化停止改善时停止训练。系统默认为总点数的 15%, 这为训练之后提供了一个独立的网络性能度量。在完成数据集选取后, 设定隐藏层的层数为 10 层, 训练算法选择“Levenberg Marquardt”算法对数据集进行训练, 设置迭代此时为 1 000 次。数据集训练完毕后, 通过命令“Simulink Diagram”将封装好的求解器转换为 Simulink 中的“NNET”块, 通过该求解器可将中枢模式发生器所产生的关节转角驱动曲线转换为足端轨迹、髋、膝关节转角。

4.2 步态转换仿真

根据此前的思路, 在 Simulink 中建立中枢模式发生器, 对 x 和 y 进行处理后, 每条腿获得 3 个输入值 x, y 和 $angle$, 四条腿需要 12 个参数值, 经过非线性映射后可获得 4 个髋关节转角值和 4 个膝关节转角值。给出振荡器参数 $\alpha = 10\ 000, u = 1, a = 100, \omega_{sw} = 5\pi, \beta = 0.5$, 设置步态转换过渡段为 4~6 s, 抬腿高度 $H = 20\text{ mm}$, 迈步步长为 50 mm, 假设步态转换前后速度由 20 mm/s 转换到 80 mm/s, 根据前期推导可知步态转换前后周期发生变化而步长没有发生变化, 因此速度的变化主要由周期变化引起。

图 28 是左前腿髋、膝关节变化规律曲线, 步态转换前后髋、膝关节依然保持其运动规律不变。图 29 是采用 CPG 控制模式由 walk 步态向 trot 步态转换髋关节的相位效果, 由图可以看出曲线在步态转换过程中能够实现曲线的平滑过渡, 解决了 CPG 控制中直接替换步态矩阵出现的锁相、停振和尖角问题。髋关节驱动角度严格符

合 walk 步态和 trot 步态的驱动规律, 在 0~4 s 机器人采用 walk 步态行走, 符合四拍步态 1-4-2-3 的 walk 行走, 在 4~6 s 是步态转换时间段, 机器人由四拍步态向双拍步态转换, 在 6 s 后机器人采用 trot 步态行走。

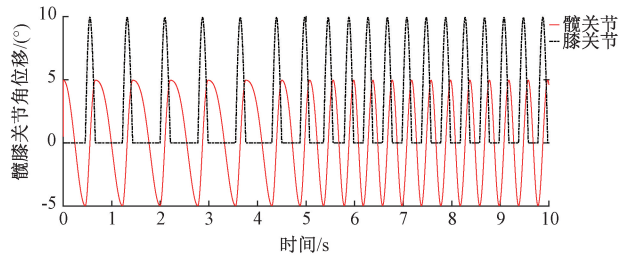


图 28 髋、膝关节转角关系

Fig. 28 Relationship between hip and knee joint angles

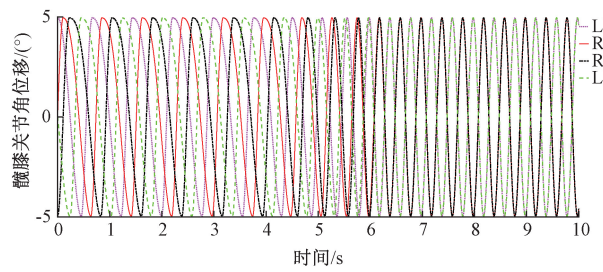


图 29 Walk-trot 步态转换髋关节相位关系

Fig. 29 Walk-trot gait transition hip joint phase relationship

在获得 CPG 输出曲线的基础上, 利用神经网络非线性拟合控制器将 CPG 输出的控制曲线非线性转换为符合摆线拟运动学获得的关节驱动曲线。搭建联合仿真平台, 将经过非线性振荡器输出的控制曲线驱动四足机器人关节可得图 30 所示的仿真运行截图, 由图可知在 0~4 s 四足机器人按照给定相序 1-4-2-3 抬腿运动, 4~6 s 因为步态转换, 步态无规律, 6 s 后机器人按照对角步态交替行走。图 31 所示是质心的变化效果。从图 31 可看出在 0~4 s 内机器人的平均速度为 19.5 mm/s, 与理论行走速度 20 mm/s 相近, 6~10 s 速度为 77.5 mm/s, 其与理论行走速度 80 mm/s 相近, 证明了步态转换算法的有效性。

5 步态控制实验与讨论

5.1 实验设置与平台搭建

为了验证所提算法的有效性, 以德国牧羊犬为仿生蓝本, 设计并加工了一台名为 KUST-canine 的四足仿生机器人作为实验平台。本文设计的 KUST-canine 四足机器人单腿需要 2 电机实现运动, 对整台机器人来说需要 8 个电机, 这里的控制器选用正运动公司的 ZMC432 系列

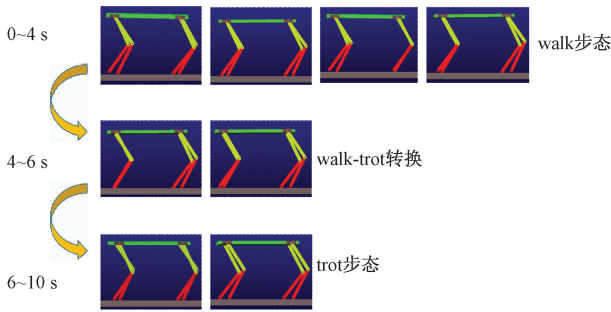


图 30 步态转换仿真图

Fig. 30 Gait transition simulation diagram

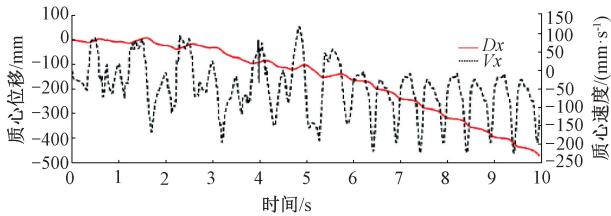


图 31 髋、膝关节转角关系

Fig. 31 Relationship between hip and knee joint angles

该机器人整机采用总线控制,内置 8 个伺服电机作为 8 个腿部关节的驱动。ZMC 硬件控制主要采用两种方式,一种是在 PC 端通过 ZDevelop 编程环境下对基础软件程序进行二次编程。另一种方式是终端用户在 ZMC 控制器支持的编程环境下,在 PC 端或者其他控制台上进行程序的编写与开发,这种编程方式灵活,但需要编程者有着严格紧密的编程思维。编程实现后,往往不能直接用于控制硬件平台,需要用 U 盘导入程序文件,再使用 BASIC 语法对 U 盘内数据进行处理,从而达到控制器硬件驱动的效果,其支持加载运行 3 次程序文件,其行为通过 BASIC 程序来定义,支持超大 3 次程序文件,两种编程方式控制器的开发如图 32 所示。

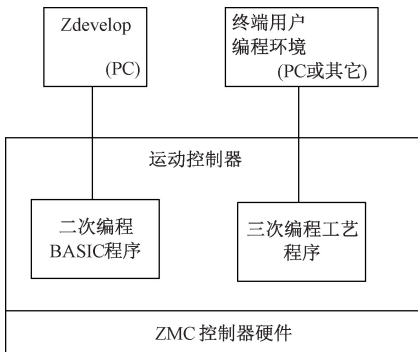


图 32 ZMC 控制器开发

Fig. 32 ZMC controller development

本文的控制方式是在第三方软件 MATLAB 中编程,获得了髋、膝关节的驱动曲线,该曲线以控制器可识别的文件进行存储之后,通过 U 盘插入到控制器硬件平台上。之后利用 ZDevelop 开发环境下的 BASIC 语言在现有的编程框架下对 U 盘中的数据进行处理,软件中设置的插补算法可实现数据加工,从而获得关节的驱动曲线。本实验所选用的电机是德国 Nanotec 公司制造的 DB59M024035-KYAN,该类电机在 24 V 额定电压下工作,额定电流为 8 A,峰值电流为 24 A,无负载转速可达 4 000 r/min,额定转速为 3 500 r/min,额定功率为 135 W,额定输出扭矩为 0.37 N·m,峰值力矩为额定力矩的 1.11 倍,可实现小范围内的过载。减速机选择宁波的中大减速机,减速机型号为 YL60ZDE64,整机由 8 个减速机配备 8 个电机实现增扭的作用。为了获得较大是扭矩输出,且使得电机总装不至于过重,这里选择减速比为 64 的减速机,考虑到传动效率为 94%,则电机经过减速机之后的输出力矩为 22.26 N·m。编码器的型号为 NOE2-05-K14,电机、减速机和编码器总重为 1.8 kg,总长为 206.69 mm。

5.2 单腿实验过程

搭建 ADAMS-Simulink 联合仿真平台,利用机器人逆运动学获得各腿的大腿电机和小腿电机驱动曲线,通过神经网络训练获得神经网络控制器,用于将 CPG 的输出曲线转换为控制四足机器人的实际曲线,具体搭建过程不再赘述,图 33 给出了左后腿(LH)模型的搭建过程,其它腿建模过程均一致。以上求解运动学模型主要运用等效的方法进行。左后腿在一个周期内运动仿真如图 34 所示,可见机器人能根据预期轨迹完成相应动作。

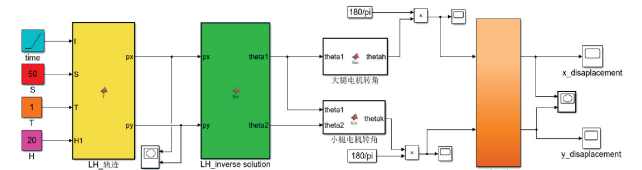


图 33 KUST-canine 单腿运动控制

Fig. 33 KUST-canine single leg motion control

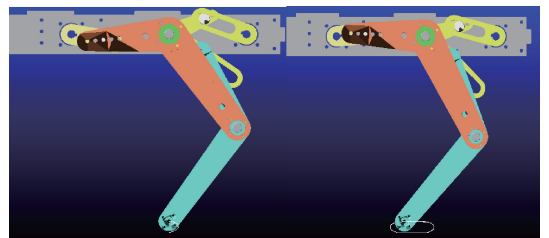


图 34 LH 腿轨迹运动仿真图

Fig. 34 Simulation diagram of LH leg motion trajectory

在确保机器人处于初始位置后,用 ZBasic 语言编写机器人运动控制程序,下载到机器人运动控制器中,观察四足机器人各腿是否运动正常,电机的运动控制过程如图 35 所示。

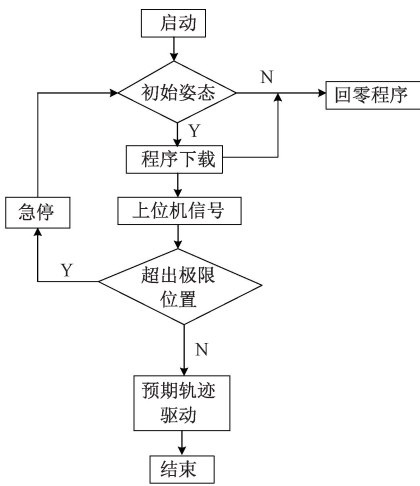


图 35 电机调试过程

Fig. 35 Motor debugging process

执行回零程序后,保证四足机器人各腿处于初始位置,将四足机器人的 CPG 模型产生的输出曲线经过神经网络拟合器获得的髋、膝关节驱动曲线用于驱动机器人行走。将获得的大腿电机和小腿电机驱动曲线以脉冲的形式保存为“SD0.csv”格式,使得控制器能用 U 盘将反解数据写入控制器。在进行实体实验之前需要给控制器供电并连接控制器到电脑上,通过 ZDevelop 软件读取数据进入寄存器,设置示波器相关参数,启动示波器可实时获得足端运行轨迹的电机驱动曲线。在完成控制器输入参数的读取后,用插销插入机构已经设计好的插孔中,以获得四足机器人单腿的初始位置。在标定好电机的初始位置后,即可下载程序开展单腿实验,本文以左后腿为例进行说明。总线控制作用下,左后腿一个周期内单腿运动的实现过程如图 36 所示,机器人能按照预定足端轨迹完成运动,运行过程中固定在机器人足端的把球平稳无抖动现象,证明了整个控制的有效性。

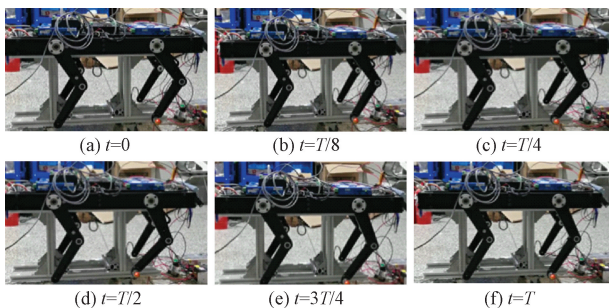


图 36 单腿运动控制实验

Fig. 36 Single leg moving control experiment

在完成单腿运动轨迹实验的基础上,需要开展了四足机器人的步态进行实际运动控制实验,因为 walk 步态和 trot 步态两种步态行走无论从运行稳定性来说,还是从控制复杂度来说均是最佳的选择,其两种步态之间的转换是最常见的。因此本文重点开展了犬类动物最常用的两种步态 walk-trot 的步态转换进行实验。四足机器人整机运动框图如图 37 所示。

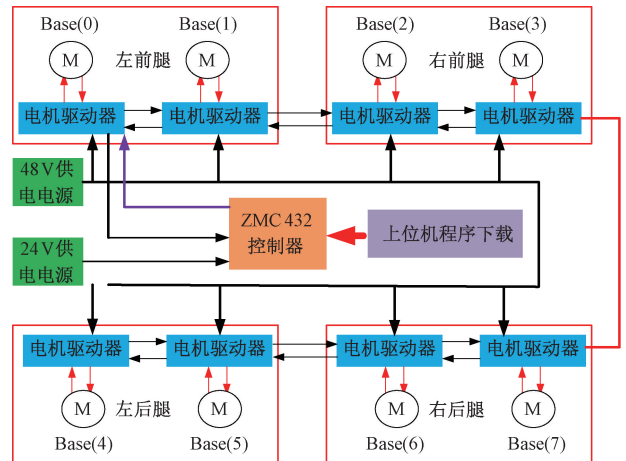


图 37 整机运动控制框图

Fig. 37 Motion control block diagram of the whole machine

8 个电机驱动器采用 1 000 W、48 V 电源供电,控制器采用 24 V 电源供电,各驱动器与控制器,控制器与上位机之间采用总线进行控制,编程语言为 ZBasic。在进行整机实验前,需要确保轴号映射的正确性,以免出现运动过程中机构干涉。8 个驱动器在控制器中以轴号实现映射,其中 1 号电机通过 base(0) 识别,8 号电机通过 base(7) 识别,驱动器的串联顺序决定了其轴号的顺序。通过该方式实现了总线控制。为了防止整机因不可控力导致的机器人摔倒,这里采用铝合金架搭建了防护装置且该机器人足端采用防滑布包裹,以保证机器人行走过程不打滑。通过总线控制机器人行进,可以快速获得结果响应,保证了控制的实时性。实验过程中四足机器人 10 s 内的运动截图如图 38 所示,由 walk 步态转换到 trot 步态的实验效果。

由图 38 可知,设置机器人运行时间为 10 s,机器人能在整个运动能顺利完成步态的行走和平滑转换,行走过程平滑无突变。为了保证机器人不摔倒,安装了防摔倒支架。通过实际测量可知,机器人在 4 s 内以 walk 步态行走了 74.3 mm,行走速度为 18.57 mm/s,与理论行走速度 20 mm/s 接近,在 6 s 后机器人以 trot 步态行走,行走位移为 304.6 mm,行走速度为 76.15 mm/s 与理论行走速度 80 mm/s 接近,少许误差可能是装配和行走过程打滑导致的,证明了所提出方法的有效性。测量其侧向偏移程度可知,其侧向的偏移量左侧在 15 mm 内,右侧

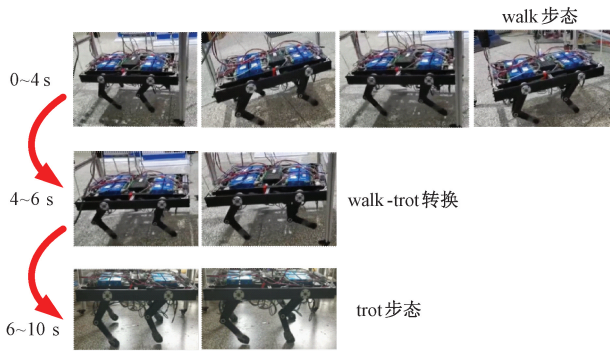


图 38 四足机器人步态转换实验

Fig. 38 Gait transformation experiment of quadruped Robot

在 25 mm 内,其侧向偏移量均在合适的范围内,整机基本沿着直线运行,证明了该机器人行走的稳定性。

6 结 论

针对四足机器人行走稳定性难以保证的问题,本文在仿生学和机构学研究的基础上,采用连杆机构设计了一台仿生四足机器人作为实验样机。从生物神经控制的角度和基于模型的角度两个维度开展了四足机器人行走稳定性控制。首先利用 Hopf 振荡器搭建 CPG 控制器和复合摆线构造足端轨迹,分别比较了基于 CPG 的神经控制方法和基于模型的控制方法在四足机器人上行走上的优劣,结果显示:基于 CPG 的神经控制方法比基于模型的控制方法具有更高的稳定性。为了提高机器人的运行效率,充分利用生物神经控制模式,从控制的角度解决采用 CPG 控制方式导致的支撑项下凸而导致机身波动的现象,提出了中枢模式发生器与足端轨迹的非线性映射控制方法,该方法采用神经网络的非线性拟合功能,将 CPG 输出的具备耦合关系的振荡曲线转换为末端输出具备零冲击特性的关节驱动曲线,使得控制模式上采用中枢模式发生器,且足端能实现零冲击特性,从仿真的角度证明了该控制方式的有效性。搭建了单腿控制和整机的原理样机,完成了在该控制模式下四足机器人的步态转换实验。该实验表明:除了少许打滑外,机器人能按照给定运动规律运行完成步态转换,证明了该方法的可行性。

参考文献

[1] CHEN J P, SAN H J, WU X. Structural design and gait research of a new bionic quadruped robot [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part B-Journal of Engineering Manufacture, 236 (14): 1912-1922.

[2] BELLICOSO C D, JENELTEN F, GEHRING C. Dynamic locomotion through online nonlinear motion optimization for quadrupedal robots [C]. IEEE Robot.

Autom. Lett. 2018 (3); 2261-2268.

- [3] LI X, ZHOU H, ZHANG S, et al. Design and experiments of a novel hydraulic wheel-legged robot. In Proceedings of the 2018 IEEE [C]. RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), Madrid, Spain, 2018: 3292-3297.
- [4] CHEN M F, LI Q, WANG S, et al. Single-Leg structural design and foot trajectory planning for a novel bioinspired quadruped robot [J]. Complexity, 2021: 1- 12, DOI: org/10.1155/2021/6627043.
- [5] OWAKI D, ISHIGURO A. A Quadruped robot exhibiting spontaneous gait transitions from walking to trotting to galloping [J]. Scientific Reports, 2017, 7 (1): 277-286.
- [6] MA Z H, LIANG Y B, TIAN H. Research on gait planning algorithm of quadruped robot based on central pattern generator [C]. Proceedings of the 39th Chinese Control Conference. 39th Chinese Control Conference (CCC), 2020: 3948-3953.
- [7] 韩斌. 外部冲击作用下四足仿生机器人动态稳定控制方法研究 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2013.
- HAN B. Dynamically stable control of bionic quadruped robots under external impact [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2013.
- [8] SUN, L, MENG M Q H, CHEN, W M, et al. Design of quadruped robot based CPG and fuzzy neural network [C]. IEEE International Conference on Automation and Logistics, 2007: 2403-2408.
- [9] LIU M M, XU F, JIA K et al. A stable walking strategy of quadruped robot based on foot trajectory planning [C]. 2016 3rd International Conference on Information Science and Control Engineering (ICISCE), IEEE, 2016: 799-803.
- [10] 王立鹏, 王军政, 汪首坤, 等. 基于足端轨迹规划算法的液压四足机器人步态控制策略 [J]. 机械工程学报, 2013, 49 (1): 39-44.
- WANG L P, WANG X ZH, WANG SH K, et al. Strategy of foot trajectory generation for hydraulic quadruped robots gait planning [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2013, 49 (1): 39-44.
- [11] ZENG X Q, ZHANG S Y, ZHANG H J. Leg trajectory planning for quadruped robots with high-speed trot gait [J]. Applied Sciences-Basel, 2019, 9 (7): 158-179.
- [12] ZHANG S S, LIU M, YIN Y F, et al. Static gait planning method for quadruped robot walking on unknown rough terrain [J]. IEEE Access, 2019 (7): 177651-177660.
- [13] ZHANG S S, FAN M Q. Generation of a continuous free

- gait for quadruped robot over rough terrains [J]. *Advanced Robotics*, 2019, 33(2): 74-89.
- [14] ZHANG F, TENG S, WANG Y F, et al. Design of bionic goat quadruped robot mechanism and walking gait planning[J]. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, 2020, 13(5):32-39.
- [15] MA, Z H, LIANG, Y B, TIAN, H, et al. Research on gait planning algorithm of quadruped robot based on central pattern generator[C]. *Proceedings of the 39th Chinese Control Conference*, 2020: 3948-3953.
- [16] 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 H D, GAN S, REN J, et al. Gait CPG adjustment for a quadruped robot based on hopf oscillator[J]. *Journal of System Simulation*, 2017, 29(12): 3092-3099.
- [17] LIU C J, XIA L, ZHANG C Z, et al. Multi-Layered CPG for adaptive walking of quadruped robots [J]. *Journal of Bionic Engineering*, 2018, 15(2): 341-355.
- [18] KIMURA H, FUKUOKA Y, COHEN A H. Biologically inspired adaptive walking of a quadruped robot [J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society A-mathematical Physical and Engineering Sciences*, 2007, 365(1850): 153-170.
- [19] WANG B X, WAN Z W, ZHOU C L, et al. A multi-module controller for walking quadruped robots [J]. *Journal of Bionic Engineering*, 2019, 16(2):253-263.
- [20] WU X M, TENG L, CHEN W H, et al. CPGs with continuous adjustment of phase difference for locomotion control regular paper [J]. *International Journal of Advanced Robotic Systems*, 2013, 10(269):1-10.
- [21] 罗庆生, 罗霄. 仿生四足机器人技术[M]. 北京理工大学, 2015: 87-88.
- LUO Q SH, LUO X. Bionic quadruped robot technology[M]. *Beijing University of Technology*, 2015: 87-88.
- [22] 罗红艳. 仿生机器狗机构特性与步态规划[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2018.
- LUO H Y. Mechanical characteristic and gait planning of bionic dogs [D]. *Wuhan: Wuhan University of Technology*, 2018.

作者简介



陈久朋, 2016 年于昆明理工大学获得学士学位, 2018 年于昆明理工大学获得硕士学位, 2021 年于昆明理工大学获得博士学位, 现为昆明理工大学讲师, 主要研究方向为机器人技术及应用、机械电子工程、机械设计。
E-mail:18314490225@163.com

Chen Jiupeng received his B.Sc. degree in 2016 from Kunming University of Science and Technology, received his M. Sc. degree in 2018 from Kunming University of Science and Technology, received his Ph. D. degree in 2021 from Kunming University of Science and Technology. Now he is a lecturer in Kunming University of Science and Technology. His main research interests include Robot technology and applications, mechanical, electronic engineering, mechanical design.



陈治帆, 2022 年于昆明理工大学获得学士学位。现为昆明理工大学硕士研究生, 主要研究方向为机器人技术及应用、机器视觉、机械设计。

E-mail:zhifanczf@163.com

Chen Zhifan received his B.Sc. degree in 2022 from Kunming University of Science and Technology. Now, he is a M. Sc. candidate at Kunming University of Science and Technology. His main research interests include Robot technology and applications, machine vision, and mechanical design.



伞红军(通信作者), 2000 年于东北农业大学获得学士学位, 2003 年于哈尔滨工业大学获得硕士学位, 2009 年于哈尔滨工业大学获得博士学位, 现为昆明理工大学付家副教授, 主要研究方向为机器人技术及应用、机械设计。

E-mail:sanhjun@163.com

San Hongjun (Corresponding author) received his B.Sc. degree in 2000 from Northeast Agricultural University, received his M. Sc. degree in 2003 from Harbin Institute of Technology, received his Ph. D. degree in 2009 from Harbin Institute of Technology. Now he is an associate professor in Kunming University of Science and Technology. His main research interests include Robot technology and applications, mechanical design.



祖永斌, 2023 年于安徽科技学院获得学士学位, 现为昆明理工大学硕士研究生, 主要研究方向为机器人技术及应用、深度学习、机械设计。

E-mail:mochou_2018@163.com

Zu Yongbin received his B. Sc. degree in 2023 from Anhui Science and Technology University. Now he is a M. Sc. candidate at Kunming University of Science and Technology. His main research interests include Robot technology and applications, Deep learning, and mechanical design.