

基于模型的四足机器人步态转换控制研究

陈久朋¹ 李春磊¹ 伞红军¹ 康伟¹ 巴光玉² 杨晓园¹

(1. 昆明理工大学机电工程学院, 昆明 650500; 2. 昆明市农业机械技术推广站, 昆明 650500)

摘要: 为了解决基于模型的控制方法在四足机器人步态转换过程中稳定控制问题, 本文在仿生学和机构学基础上设计了一款四足机器人样机平台, 并推导了机器人单腿运动学模型。在足端可达工作空间内规划了机器人抬腿高度和迈步步长, 利用理想的复合摆线轨迹, 通过合理控制步态周期, 提出了一种过渡段变周期控制方法, 实现了步态转换前后定速度控制和变步长控制, 保证了步态转换前后速度不变或可变。为了验证所提算法的正确性和稳定性, 分别开展了单腿足端轨迹实验和整机步态转换实验。在完成整机运动控制的基础上, 对比了基于模型的控制方式和基于中枢模式发生器的控制方式在四足机器人步态转换过程的应用。仿真和实验结果表明, 在基于模型的控制算法下, 四足机器人可以实现步态的平滑转换, 且速度能伴随步长和周期的变化实现调节, 满足了不同速度下的行走要求, 为四足机器人的运动控制提供了参考。

关键词: 四足机器人; 步态转换; 稳定性

中图分类号: TP242; TH112

文献标识码: A

文章编号: 1000-1298(2024)03-0431-10

OSID:



Model Based Gait Transition Control for Quadruped Robots

CHEN Jiupeng¹ LI Chunlei¹ SAN Hongjun¹ KANG Wei¹ BA Guangyu² YANG Xiaoyuan¹

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

2. Kunming Agricultural Machinery Technology Promotion Station, Kunming 650500, China)

Abstract: In order to solve the problem of stable control in the gait transition process of quadruped robots by using model-based control methods, a quadruped robot prototype platform was designed based on bionics and mechanics, and the robot's single leg kinematic model was derived. The robot's leg height and step length were planned within the reachable workspace at the foot end. By using an ideal compound cycloid trajectory and controlling the gait period reasonably, a transition period variable control method was proposed, which achieved fixed speed control and variable step length control before and after gait transition, ensuring that the speed remained unchanged or variable before and after gait transition. In order to verify the correctness and stability of the proposed algorithm, single leg foot trajectory experiments and whole machine gait transformation experiments were conducted, respectively. On the basis of completing the overall motion control, the application of model-based control and central pattern generator based control in the gait transition process of quadruped robots was compared. The simulation and experimental results showed that under the model-based control algorithm, the quadruped robot can achieve smooth gait transformation, and the speed can be adjusted with changes in step size and period, meeting the walking requirements at different speeds, providing a reference for the motion control of quadruped robots.

Key words: quadruped robots; gait transition; stability

0 引言

生物学研究表明, 动物为了降低运动过程所产

生的能耗, 往往根据运行速度对步态进行切换, 从而达到维持体能的效果^[1-2]。在负重的工况下为了使四足仿生机器人适应不同的路况条件, 且保证其有

收稿日期: 2023-12-13 修回日期: 2024-01-22

基金项目: 云南省科技厅基础研发计划-青年基金项目(202301AU070059)和昆明理工大学人才培养项目(KKZ320230104)

作者简介: 陈久朋(1993—), 男, 讲师, 博士, 主要从事机器人技术及应用研究, E-mail: 18314490225@163.com

通信作者: 康伟(1992—), 男, 讲师, 博士, 主要从事机器人故障诊断研究, E-mail: kmkangw@163.com

足够的续航能力,机器人像生物一样调整步态,使能量消耗最低,所以需研究不同步态之间的切换控制算法^[3-4]。

目前四足机器人步态转换上主要有 2 种方法:①模拟生物低级神经控制系统的方法,称为中枢模式发生器(CPG)算法。②基于模型的控制方法^[5-6]。目前使用较多的步态切换主要是中枢模式发生器算法,如清华大学设计的 Biosbot 四足机器人,利用 CPG 控制原理实现了 walk 步态向 trot 转换^[7]。文献[8]构建了四足机器人仿生控制方法的层次架构,利用相位振荡器构造中枢模式发生器,实现了肢体协调运动,并采用贝塞尔曲线和粒子群算法实现了足端轨迹规划。为了解决直接替换步态矩阵会出现步态转换锁相、停振和尖角问题,文献[9]利用 Hopf 振荡器搭建了 CPG 控制网络,充分考虑了足内和足间耦合关系,通过改变神经振荡器本身的特性实现了步态的平滑转换。文献[10]提出了基于 CPG 的六足机器人步态生成方法,可在多模式步态之间实现平稳的步态转换^[10]。尽管 CPG 步态控制方法在步态转换上获得了较好的应用效果,但是其数学模型存在较大的局限性,应用到机械本体上存在较大的困难^[11]。

在基于模型的控制方法上,文献[12]将静步态和动步态建立了统一的数学模型,通过改变参数来实现步态转换。文献[13-14]基于能量消耗原理规划了机器人的步态转换过程。罗红艳等^[15]提出同时改变相位与机器人足端轨迹的方法来达到步态切换的效果,可实现步态实时转换。为了达到步态切换平滑稳定,辛亚先等^[16]利用改进的泛稳定裕度判别法,通过调整足端与质心的相对位置,消除步态转换过程中由惯性力导致的零力矩点后移对稳定性的影响。LIU 等^[17]通过改变四腿之间的相对相位实现了机器人步态的调整。文献[18]提出改变倒立摆系数,间接改变机器人腿部的柔性,实现了机器人不同步态之间的切换。文献[19]对具备躯体自由度的四足机器人进行了实验,直接改变占空比来实现步态转换。YUAN 等^[20]改进了摆线轨迹,在摆动相中间加了一条水平线,将足端轨迹分为抬腿、跨步和落腿 3 个阶段,增强了足端的跨障能力。为了使加速度连续,BUSCHMANN^[21]提出基于分段五次多项式的足端轨迹,该轨迹可保证加速度曲线连续。周坤等^[22]利用五次多项式规划了摆动腿跨步阶段的足端轨迹,并在四足机器人赤兔上进行了实验验证。CORKE^[23]在其开发的 Robotics Toolbox 中使用五次多项式进行点对点的关节空间轨迹规划,获得了两点之间的关节平滑曲线。DEGHANI 等^[24]使

用规划控制的方法实现五连杆两足动物的循环步态规划和运动控制。张春燕等^[25]提出可重构仿生四足机器人,可通过躯干与腿部协调运动来实现倾覆后的自我恢复。

以上的步态转换方法均未考虑步长和周期变化引起的稳定性和平滑性问题。通过复杂的算法实现步态转换会使得计算效率低下,本文在 walk 步态和 trot 步态规划实现的基础上,提出过渡段变周期控制方法,以实现不同步态之间的平滑转换。

1 结构设计及运动学分析

1.1 仿生参数确定

德国牧羊犬原产于德国,因其动作敏捷、体型高大、外观威猛、强健和发达的肌肉以及紧凑和谐的身体布局被许多科研机构作为仿生对象^[20],根据德国牧羊犬研究中心发布的数据以及可查阅的相关资料,其属性参数如表 1 所示^[26]。

表 1 德国牧羊犬属性参数

Tab.1 German shepherds attribute parameters	
参数	数值
身高/mm	600 ~ 650 (雄性)
	550 ~ 600 (雌性)
胸深与身高比/%	45 ~ 48
体长与身高比/%	110 ~ 117
头部长与身高比例/%	40
前身与后身比例	11:9

取标准德国牧羊犬公犬身高 625 mm 为基准值,使机器人机身为刚性躯体并且腿部采用二段式结构,根据表 1 的相关参数可获得山地四足机器人设计尺寸,如表 2 所示。

表 2 四足机器人设计目标

Tab.2 Design goals for quadruped robots	
参数	数值
整机尺寸 $L \times W \times H_1 / (\text{mm} \times \text{mm} \times \text{mm})$	$\leq 800 \times 600 \times 500$
步长 S/mm	50 ~ 120
步高 H/mm	10 ~ 40
行走速度 $/(\text{mm} \cdot \text{s}^{-1})$	≥ 50
承载能力/kg	2 ~ 3
整机质量 M/kg	≤ 40
大腿、小腿长度 L_1/mm	200

对犬类动物腿部形态进行测量分析,得到犬类动物运动到极限位置时关节转角如图 1 所示^[27]。其中图 1a、1d 为髋关节转角极限值;图 1b、1e 为膝关节转角极限值;图 1c、1f 为踝关节转角极限值。根据图 1 可获得犬类动物的髋关节转角范围为 $50^\circ \sim 162^\circ$,膝关节转角范围为 $41^\circ \sim$

162°,踝关节转角范围为 38°~165°。以上关节角指骨骼之间的相对位置变化的姿态角,而在实际控制中需要将其转换到所设定的髋关节坐标系下。因为踝关节的运动基本与膝关节运动呈相同的运动规律,所以本文设计的四足机器人忽略踝关节,仅采用具备俯仰自由度的髋关节和膝关节作为关节自由度。根据肘式关节、膝式关节与机身连接情况可将四足机器人分为前肘后膝式、前膝后肘式、全肘式和全膝式关节配置^[28]。全肘式关节配置更符合生物的仿生特性^[29],因此设计的四足机器人整机配置为全肘式。

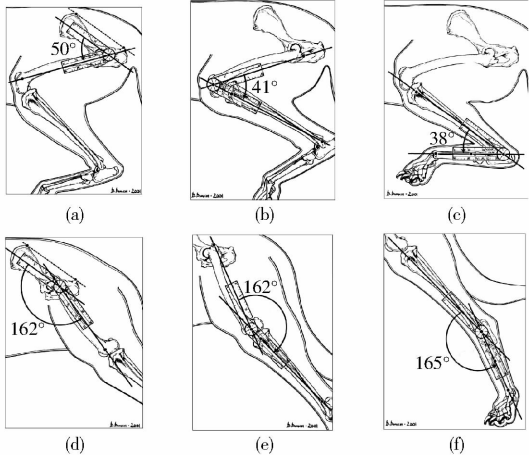


图1 犬类关节转角变化极限值

Fig.1 Limit values of joint angle variation in dogs

1.2 运动学模型求解

在质心处建立机体坐标系 O_{xyz} , x 轴为机器人前进方向, y 轴竖直向上, z 轴由右手定则确定。在髋关节处建立坐标系 $O_0x_0y_0$, 其中 x 轴指向前进方向, y 轴垂直地面向上。将图 1 所示的关节转角范围转换到给定髋关节坐标系下, 可确定髋关节转角 θ_1 为 $-150^\circ \sim -20^\circ$, 膝关节转角 θ_2 为 $18^\circ \sim 139^\circ$, 给定机器人单腿初始位置: 髋关节 θ_1 为 -120° , 膝关节 θ_2 为 60° 。根据四足机器人结构参数可得机构简图如图 2 所示。

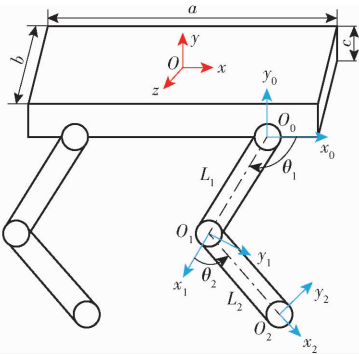


图2 四足机器人机构简图

Fig.2 Schematic of quadruped robot mechanism

以右前腿为例对机器人单腿进行运动学分析,

在髋关节处建立坐标系 $O_0x_0y_0z_0$, 在膝关节处建立坐标系 $O_1x_1y_1z_1$, 在足端建立坐标系 $O_2x_2y_2z_2$ 。根据坐标系之间关系可直接获得 D-H 参数如表 3 所示。

表3 D-H 参数

Tab.3 D-H parameters

连杆 i	连杆转角 α_{i-1}	连杆长度 a_{i-1}	连杆偏距 d_i	关节转角 θ_i
1	0	L_1	0	θ_1
2	0	L_2	0	θ_2

1.2.1 简化模型运动学分析

一般情况下, 连杆坐标系 $\{i\}$ 相对与 $\{i-1\}$ 的位姿变化可用齐次变换描述, 即

$$T_i^{i-1} = \text{Rot}(x, \alpha_{i-1}) \text{Trans}(a_{i-1}, 0, 0) \text{Rot}(z, \theta_i) \text{Trans}(0, 0, d_i) =$$
$$\begin{bmatrix} \cos\theta_i & -\sin\theta_i & 0 & a_{i-1} \\ \sin\theta_i \cos\alpha_{i-1} & \cos\theta_i \cos\alpha_{i-1} & -\sin\alpha_{i-1} & -d_i \sin\alpha_{i-1} \\ \sin\theta_i \sin\alpha_{i-1} & \cos\theta_i \sin\alpha_{i-1} & \cos\alpha_{i-1} & d_i \cos\alpha_{i-1} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$
(1)

将 D-H 参数代入式 (1) 可得足端相对于髋关节坐标的齐次变换矩阵为

$$T_0^2 = T_0^1 T_1^2 = \begin{bmatrix} c_{12} & -s_{12} & 0 & L_1 c_1 + L_2 c_{12} \\ s_{12} & c_{12} & 0 & L_1 s_1 + L_2 s_{12} \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$
(2)

其中 $c_1 = \cos\theta_1$ $s_1 = \sin\theta_1$
 $c_{12} = \cos(\theta_1 + \theta_2)$ $s_{12} = \sin(\theta_1 + \theta_2)$

根据式 (2) 可得足端相对于髋关节的位移方程为

$$x = L_1 c_1 + L_2 c_{12}$$
(3)

$$y = L_1 s_1 + L_2 s_{12}$$
(4)

联立式 (3) 和式 (4) 可得

$$\theta_1 = 2 \arctan \frac{B - \sqrt{A^2 + B^2 - C^2}}{A + C}$$
(5)

$$\theta_2 = \arcsin \frac{y - L_1 \sin\theta_2}{L_2} - \theta_1$$
(6)

其中 $A = 2L_1 x$ $B = 2L_1 y$
 $C = x^2 + y^2 + L_1^2 - L_2^2$

1.2.2 腿型运动学

图 3 为设计的腿型结构, 其大小腿与简化模型一致。在髋关节处建立坐标系 Bx_0y_0 , 大腿电机驱动角为 θ_h , 小腿电机驱动角为 θ_k , 点 A 为大腿电机所处位置, 点 B 为小腿电机所处的位置, 图示时刻足端由 F 摆动到 F', 实体模型大腿由连杆 CB 和连杆 BE 组成, 两段杆之间夹角为 60°, 其中 BE 段等效于

仿真模型中的大腿 L_1 。实体模型小腿由连杆 DE 和连杆 EF 段组成,两杆之间的夹角为 120° ,其中 EF 段等效于仿真模型中的小腿 L_2 。髌关节转角 θ_1 和膝关节转角 θ_2 与仿真模型定义一致,这里不再赘述,设定图示时刻大腿摆动量为 β ,小腿摆动量为 γ ,当机器人单腿位于初始位置时,髌关节转角 θ_1 为 -120° ,膝关节转角 θ_2 为 60° ,图中 EF 虚线为初始时刻大腿和小腿所处的位置。

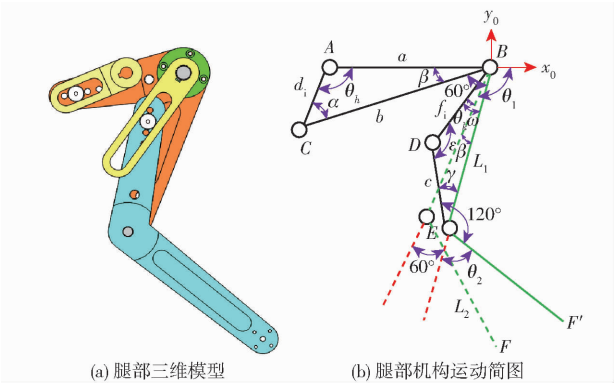


图 3 四足机器人腿部结构
Fig. 3 Leg structure diagrams of quadruped robots

根据图 3 所示的几何关系可得大腿摆动量和小腿摆动量为

$$\beta = \theta_1 + \frac{2\pi}{3} \tag{7}$$

$$\gamma = \theta_2 - \frac{\pi}{3} \tag{8}$$

在 $\triangle ABC$ 中,根据正弦定理可得

$$\frac{b}{\sin\theta_h} = \frac{a}{\sin\alpha} = \frac{a}{\sin(\theta_h + \beta)} \tag{9}$$

由式(9)可得

$$\theta_h = \arctan \frac{b\sin\beta}{a - b\cos\beta} \tag{10}$$

考虑电机转向,修正髌关节电机转角为

$$\theta_k = -\arctan \frac{b\sin\beta}{a - b\cos\beta} \tag{11}$$

在 $\triangle BDE$ 中,根据正弦定理可得

$$\frac{c}{\sin\omega} = \frac{L_1}{\sin\varepsilon} = \frac{L_1}{\sin(\omega + \gamma)} \tag{12}$$

由式(12)可得

$$\omega = \arctan \frac{c\sin\gamma}{L_1 - c\cos\gamma} \tag{13}$$

图 3 中腿机构中存在耦合,所以 ω 不再是膝关节电机转角,需要获得真正的膝关节电机转角,根据图示关系可得膝关节电机转角为

$$\theta_k = -\omega + \beta = -\arctan \frac{c\sin\gamma}{L_1 - c\cos\gamma} + \theta_1 + \frac{2}{3}\pi \tag{14}$$

因此左前腿(LF)髌、膝关节逆运动学表达式为

$$\theta_h = -\arctan \frac{b\sin\beta}{a - b\cos\beta} = -\arctan \frac{b\sin\left(\theta_1 + \frac{2\pi}{3}\right)}{a - b\cos\left(\theta_1 + \frac{2\pi}{3}\right)} \tag{15}$$

$$\theta_k = -\arctan \frac{c\sin\gamma}{L_1 - c\cos\gamma} + \beta = -\arctan \frac{c\sin\left(\theta_2 - \frac{\pi}{3}\right)}{L_1 - c\cos\left(\theta_2 - \frac{\pi}{3}\right)} + \theta_1 + \frac{2}{3}\pi \tag{16}$$

1.3 工作空间分析

由于关节转角和连杆结构的限制,电机不能完成整周旋转,为了使得电机在合理范围内转动,需要限制其关节转角范围。由图 4 可得腿部在左、右两侧极限位置的极限运动角度。

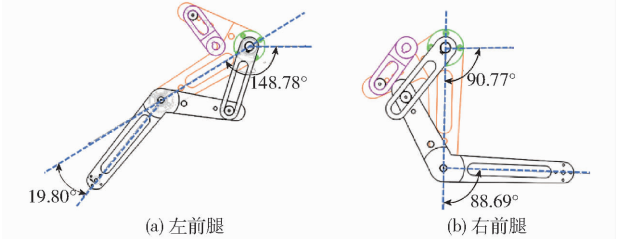


图 4 腿部左、右运动极限位置
Fig. 4 Extreme position for left and right leg movements

由图 4 可知,在髌关节坐标系下,若腿部摆动到左极限位置时,髌关节转动角为 -148.78° ,膝关节转动角为 19.80° ;若腿部摆动到右极限位置时,髌关节转动角 -90.77° ,膝关节转动角为 88.69° 。因此在髌关节坐标系下,设计的四足仿生机器人单腿髌关节转角 θ_1 范围为 $19.80^\circ \sim 88.69^\circ$,膝关节转角 θ_2 范围为 $-148.78^\circ \sim -90.77^\circ$ 。确定单腿极限位置后,根据逆运动学方程,采用蒙特卡洛法可以获得单腿在髌关节坐标系下足端可达工作空间,如图 5 所示。

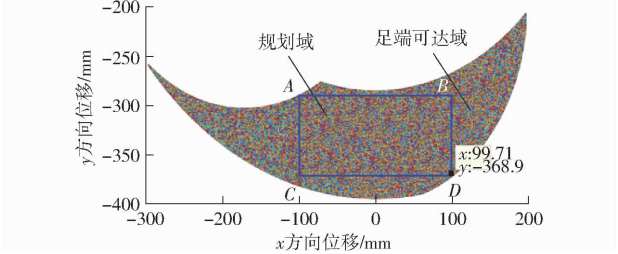


图 5 足端工作空间
Fig. 5 Foot end workspace

取步长 S 为 $-100 \sim 100$ mm,可得所需矩形区域内的足端可达工作空间 $ABCD$,矩形框的水平边长 CD 为最大步长,竖直边长 BD 为最大抬腿高度。用游标可得 BD 的距离为 77.3 mm,因此在所设计的机器人腿部结构下,腿部步长可达到 200 mm,抬腿高度可达到 77.3 mm。在后续的轨迹规划和步态

分析中,需要保证足端在工作空间范围内。

2 轨迹规划与实现

2.1 经典步态

静步态(walk)是4条腿按照相序依次交替运动的步态形式,由于任意时刻至少有3条腿支撑地面,支撑相时间是摆动相时间的3倍,因此其具有较高的静态稳定性,这种较高的稳定性是以牺牲速度为代价,行走过程相对缓慢。图6a为生物犬腿部按照LF-RH-RF-LH的相位关系进行行走的相序图,这种相序也被称为最稳定的行走相序。对角步态(trot)作为动步态中最稳定的步态,其对角腿具有相同的运动形式,任意时刻均有两条腿支撑地面,支撑相时间等于摆动相时间,是目前生物使用最多的步态形式。图6b为trot步态的相序图,可知生物犬对角腿来回交替运动,实现机器人稳定行走。由于walk步态和trot步态在轨迹规划上本质相同,只是在摆动相和支撑相所用的时间不同,本文主要给出trot步态的复合摆线轨迹。

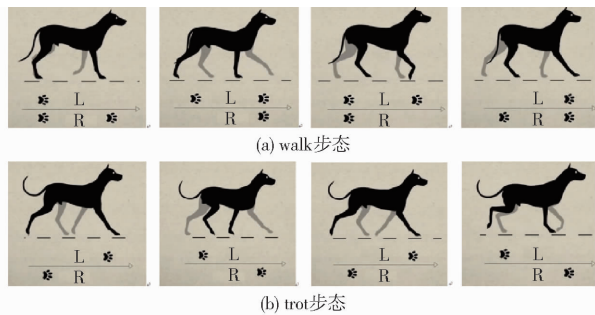


图6 两种步态行走相序

Fig. 6 Two gait walking phases

2.2 复合摆线轨迹

目前针对机器人轨迹设定需要满足以下要求：
① 抬腿和落腿时刻,足端对地面的冲击较小,最好实现足端零冲击。
② 机身在运行过程中平稳,无太大抖动。
③ 保证足端与地面接触时滑动量较小。
④ 关节速度、加速度平滑无畸变。

复合摆线被誉为理想的足端行走轨迹,在四足机器人步态规划中得到了广泛应用,主要探讨步态转换稳定性,因此采用的足端轨迹方程为复合摆线方程,即

$$\begin{cases} x = \begin{cases} S \left(\frac{2t}{T} - \frac{1}{2} \pi \sin \left(\frac{4\pi t}{T} \right) \right) & (0 \leq t \leq \frac{T}{2}) \\ -S \left(\frac{2t}{T} - \frac{1}{2} \pi \sin \left(\frac{4\pi t}{T} \right) \right) + S & (\frac{T}{2} < t \leq T) \end{cases} \\ y = \begin{cases} 2(H_1 - h) \left(\frac{2t}{T} - \frac{1}{4} \pi \sin \left(\frac{8\pi t}{T} \right) \right) - H_1 & (0 \leq t \leq \frac{T}{4}) \\ 2(h - H_1) \left(\frac{2t}{T} - \frac{1}{4} \pi \sin \left(\frac{8\pi t}{T} \right) \right) + H_1 - 2h & (\frac{T}{4} < t \leq \frac{T}{2}) \\ -H_1 & (\frac{T}{2} < t \leq T) \end{cases} \end{cases} \quad (17)$$

式中 h ——足端摆动到 midpoint 时刻与髋关节之间的距离

H_1 ——初始时刻足端与髋关节之间的距离

x ——前进方向位移

y ——竖直方向足端位移

T ——周期

t ——运动时间

给定参数 $S = 50 \text{ mm}$, $T = 1 \text{ s}$, $h = (200\sqrt{3} - 20) \text{ mm}$, $H_1 = 200\sqrt{3} \text{ mm}$ 。图7为一个周期内足端复合摆线运动轨迹。由图7可以看出, x 和 y 方向曲线平滑无突变, x 方向上的位移变化为先增大后减小,符合机器人前进运动的需求。 y 方向的位移在摆动相呈现先增大后减小,支撑相保持不变,符合竖直方向运动的需求。机器人在摆动相和支撑相阶段速度和位移均有变化实现机器人跨步,驱动机身向前移动。

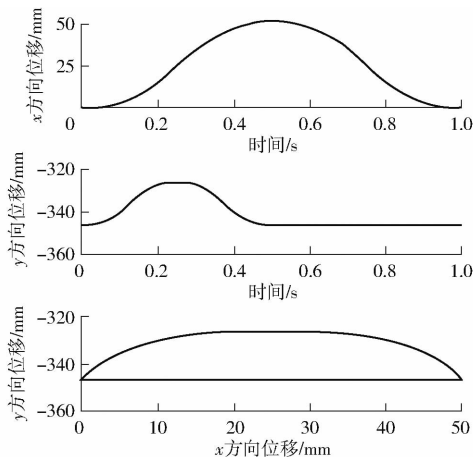


图7 复合摆线轨迹

Fig. 7 Compound cycloid trajectory

3 步态转换稳定性

以左前腿(LF)为参考相位,图8给出了walk步态和trot步态之间的相对相位关系图。因为步态切换前后左前腿(LF)和右前腿(RF)相位差没有发生变化,因此可直接在切换时间点将左后腿(LH)和右后腿(RH)的输出直接替换可达到步态切换的目的。通过直接在特定时间结点完成步态切换理论上可行,可在实际应用中会对控制器和电机造成较大的冲击。图9给出了完成步态转换质心在前进方向上的位移和速度曲线。由图9可知,速度曲线在4s时刻发生较大的突变,严重影响了机器人行走稳定性。

3.1 过渡段变周期控制

提出了一种过渡段变周期控制方法,该方法引入一个特殊周期,通过控制延时时间,改变过渡段曲线周期,可实现两种步态的平滑转换。步态转换有多种形式,其中定速度控制、变步长控制和变周期控

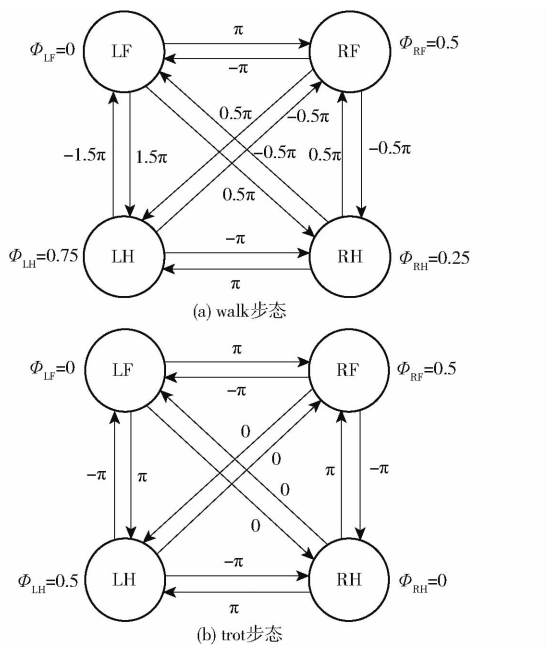


图 8 walk 步态和 trot 步态之间的相对相位关系
Fig. 8 Relative phase relationship between walk gait and trot gait

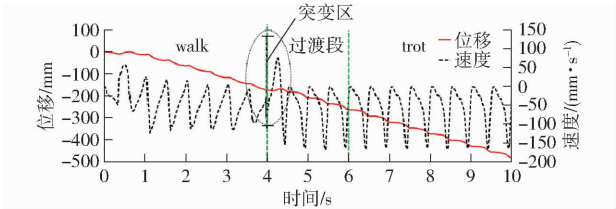


图 9 直接在切换点完成步态转换的质心位移和速度曲线
Fig. 9 Centroid displacement and velocity curves for completing gait transitions directly at switching points

制是 3 种典型的步态转换形式,由于变步长控制和变周期控制在本质上一致,因此主要讨论步态转换中的定速度控制和变步长控制。

图 10 为步态转换控制流程图。首先给定复合摆线的具体方程,通过逆运动学方程获得各腿髋关节和膝关节的转动角,通过加入延时模块获得不同占空比下的 walk 步态和 trot 步态,通过对两种步态采用过渡段变周期控制完成步态的转换。

(1) 过渡段周期 T_1 确定

设转换前后基本周期为 T ,过渡段周期为 T_1 ,过渡段左边界为 t_1 ,过渡段右边界为 t_2 ,初始延时为 M ,则过渡段所需周期 T_1 为

$$T_1 = \frac{t_2 - t_1}{M + n}$$

(18)

n 的取值需要与基本周期相近,若 n 的取值过小,则过渡段周期 T_1 过大会使得左后腿和右后腿运行速度过慢,从而导致机器人在过渡段内出现偏转角过大,使其不能沿着原来的直线方向行走;若 n 的取值过大,过渡段周期 T_1 过小会使得左后腿和右后

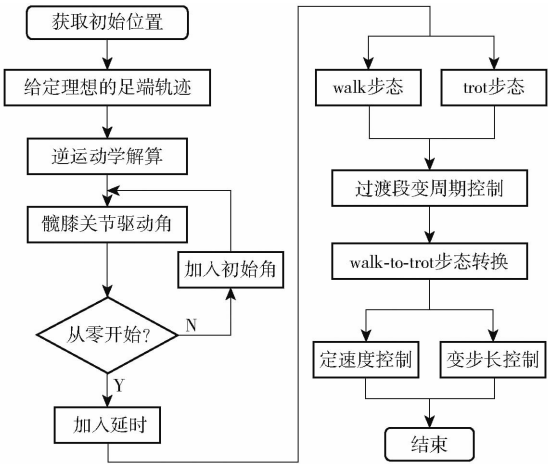


图 10 过渡段变周期控制流程图
Fig. 10 Transition section variable cycle control flowchart

腿运行速度过快,导致机身不稳定。

(2) 过渡段延时时间确定

在确定左后腿和右后腿在过渡段周期 T_1 后,需要获得过渡段在整个周期上的延时时间 T_2 ,根据转换前后相位的初始延时和过渡段周期可得过渡段延时时间为

$$T_2 = (T - M) T_1$$

(19)

(3) 将过渡段周期 T_1 引入到轨迹中,可获得大周期的髋膝关节转角,再将延时模块中的延时时间设为 T_2 ,可实现过渡段变周期控制。

3.2 步态转换前后定速度控制

图 11 为机器人髋关节和膝关节角位移曲线。由图 11 可知,四足机器人在过渡段内由四相的 walk 步态过渡到两相的 trot 步态,在过渡段内满足左前腿和右前腿周期不变,左后腿和右后腿实现变周期平滑过渡。

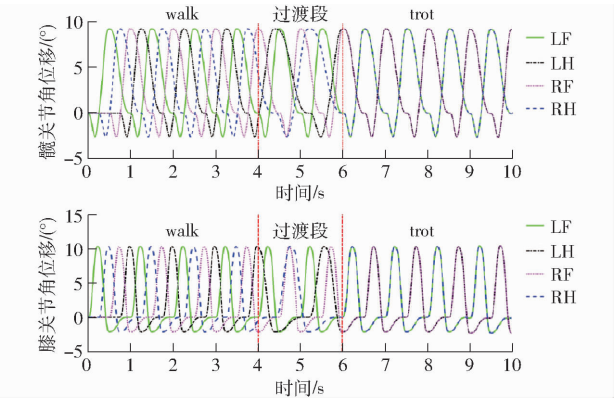


图 11 定速度控制下髋、膝关节角位移曲线
Fig. 11 Angular displacement curves under constant speed control

四足机器人由 walk 步态转换到 trot 步态迈步步长 S 不变,步态周期 T 也保持不变,因此转换前后速度不发生变化,这种步态转换方式称为定速度控制。为了将控制算法应用于机器人模型,搭建了

ADAMS-Simulink 联合仿真平台,如图 12 所示。该仿真平台主要由轨迹规划控制端、步态转换控制器和 ADAMS 机械部分构成。其中控制部分主要在 Simulink 中搭建,ADAMS 中主要搭建机械模块。由轨迹规划逆运动学产生的关节驱动曲线通过延时模块实现各腿之间的相位变化。通过过渡段变周期控制思想,可以实现 walk 步态向 trot 步态转换,同样也可以实现 trot 步态向 walk 步态变化,其步态转换的过程平稳无突变。

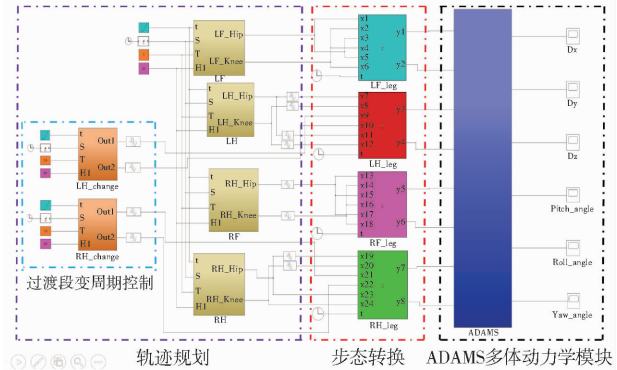


图 12 过渡段变周期控制程序

Fig. 12 Transition section variable period control program

图 13 为四足机器人在 ADAMS 环境下的实时运行效果,在 0~4 s 四足机器人根据已规划的 walk 步态按照 LF-RH-RF-LH 的方式行走,在 4~6 s 发生步态转换,在 6 s 后以 trot 步态行进,对角腿交替完成行进运动。由图 13 可看出,机器人步态转换过程平稳,无明显的抖动发生,步态转换前后步长和周期没有发生改变,证明步态转换前后速度没有发生变化。

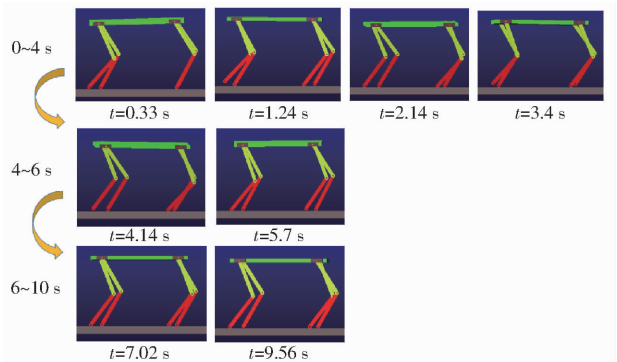


图 13 定速度控制下步态转换过程

Fig. 13 Gait transition process under constant speed control

通过 ADAMS 的后处理功能获得机器人质心位移和速度曲线,如图 14 所示。由图 14 可看出,机器人在过渡段质心位移曲线和速度曲线非常平滑,步态切换平稳且不发生抖动。机器人在 10 s 内前行 580 mm,速度为 58 mm/s,略高于理论行进速度,除去机身摩擦打滑现象与预期速度基本吻合。

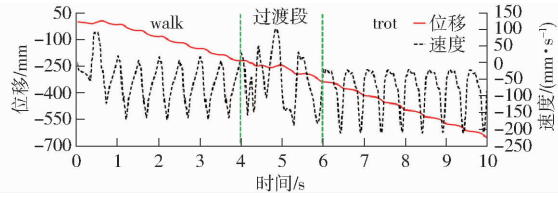


图 14 定速度控制下机器人质心位移和速度曲线

Fig. 14 Robot centroid displacement and velocity curve under constant speed control

3.3 步态转换前后变步长控制

改变速度可以有两种方式,一种是在周期 T 一定的情况下改变步长 S ,可获得速度的变化,这种方法称之为变步长控制;另一种是在步长 S 一定的情况下,改变周期 T ,同样可以获得速度变化,这种方法称之为变周期控制。由于变步长和变周期控制两种切换方法在理论上具有相同的步态切换效果,本文主要采用变步长控制进行说明。

由于髋关节转动角决定了机器人行走步长 S ,间接影响了机器人运动速度,膝关节转动角决定了机器人抬腿高度 H ,间接影响机器人越障能力。因此对四足机器人的速度控制只需要对机器人步长进行控制,可达到改变机器人运动的效果。同样需要保证步态转换前后步长 S 的变化不能突变,以免出现机器人转换过程不稳定。引入分段函数实现步长的连续变化,即

$$S = \begin{cases} s_1 & (0 \leq t \leq t_1) \\ \frac{(s_2 - s_1)t}{t_2 - t_1} + \frac{s_1 t_2 - t_1 s_2}{t_2 - t_1} & (t_1 < t \leq t_2) \\ s_2 & (t_2 < t \leq t_f) \end{cases} \quad (20)$$

式中 s_1 ——转换前步长

s_2 ——转换后步长

t_f ——仿真运行结束时间

给定仿真参数 $s_1 = 40 \text{ mm}$, $s_2 = 50 \text{ mm}$, $t_1 = 4 \text{ s}$, $t_2 = 6 \text{ s}$, $t_f = 10 \text{ s}$,即过渡段时间范围设置为 4~6 s,在此时间段内需要保证步长的连续变化并且需实现左后腿和右后腿的变周期控制,图 15 为变步长转换前后机器人髋、膝关节的运动规律曲线。

由图 15 可知,机器人髋关节角位移曲线在 4~6 s 实现了平滑过渡,左后腿和右后腿实现变周期控制,4 条腿实现了步态平稳转换,髋关节角位移转换后与转换前相比有明显的增大,证明了所提算法的正确性。

为了检验变步长控制在机器人上的运动效果,采用 ADAMS-Simulink 联合仿真的方式,仿真时间设置为 10 s,由图 16 可知,在 0~4 s 采用 walk 步态行走,在 4~6 s 内发生步态转换,在 6~10 s 采用 trot 步态行走。由于步长发生变化导致了速度随着

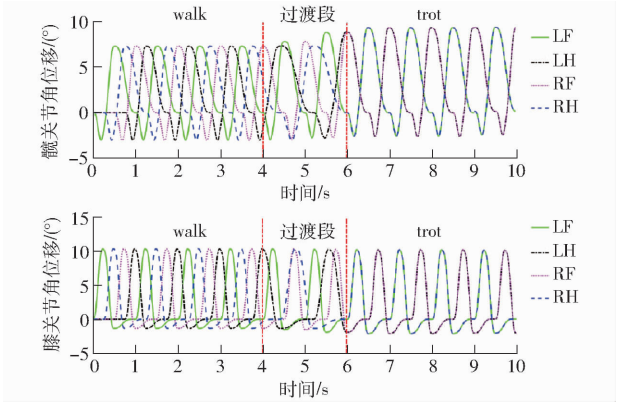


图 15 变步长控制下髋关节和膝关节角位移曲线

Fig. 15 Angular displacement curves under variable step size control

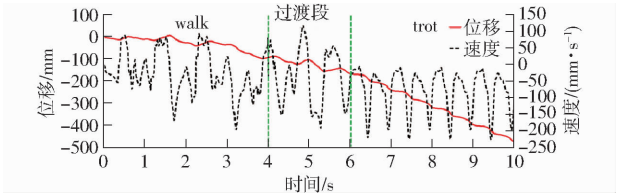


图 16 变步长控制下机器人质心位移和速度曲线

Fig. 16 Robot centroid displacement and velocity curves under variable step size control

发生变化,所以在 6 ~ 10 s 前进方向的位移曲线的斜率大于 0 ~ 4 s 的斜率,机器人在行走过程可实现变步长控制。机器人在 10 s 内行走 480 mm,速度为 48 mm/s。接近理论运行速度 50 mm/s。对比图 14 和图 16 可知,在相同时间内采用变步长的方式行进的距离低于定速度行走的距离,主要是定速度控制方式不符合足式机器人的运动规律,打滑较为严重导致。

通过过渡段变周期控制可知,在定速度控制下,虽然四足机器人能完成步态转换,但是由于步态转换前后速度没有发生改变,但由 3 腿支撑变 2 腿支撑向前打滑比较严重,因此前进位移高于变步长控制。而变步长控制下,四足机器人根据步态的不同采用不同速度行进,更符合四足机器人运动规律,具备更高的稳定性。尽管理论上由 walk 步态向 trot 步态转换可行,还需证明 trot 步态向 walk 步态转换的可行性。与 walk 步态向 trot 步态转换相同,在同样的仿真参数下,设置仿真时间为 10 s,图 17 为过渡段变周期控制下简化模型由 trot 向 walk 转换的步态仿真图,由图 17 可知,四足机器人能顺利的实现不同步态之间的平滑过渡,证明了正逆转换可行。

图 18 为变步长控制下四足机器人髋关节位移曲线,由图 18 可知,由 trot 向 walk 步态转换过程平滑无突变。

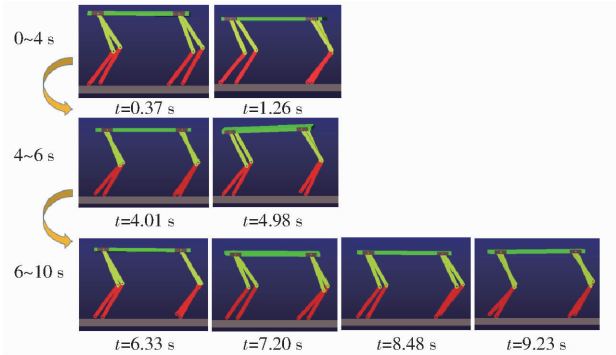


图 17 变步长控制下四足机器人运动仿真图

Fig. 17 Simulation diagram of quadruped robot motion under variable step size control

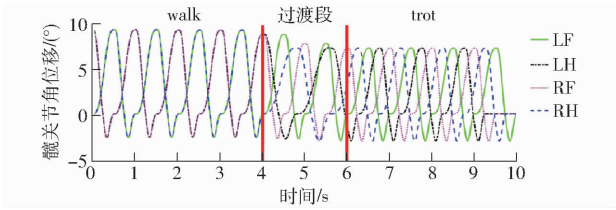


图 18 变步长控制下 walk - trot 转换髋关节角位移曲线

Fig. 18 Hip joint angular displacement curves for trot to walk under variable step size control

4 单腿实验

根据设计模型参数,采用铝合金加工了四足机器人样机,该样机主要由 8 个 DB59M024035 - KYAN 型直流无刷伺服电机、8 个 C5 - E - 2 - 21 型驱动器、8 个 YL60ZDE64 型减速机、8 个 NOE2 - 05 - K14 型编码器、1 个 ZMC432 型运动控制器、1 个 220 V 转 24 V 外接电源、8 个回零插销、2 个按钮开关、2 个固态继电器、2 个中间继电器、4 个压力传感器和变送器、1 个姿态传感器、1 个风扇组成,整机质量为 37.5 kg。在整机运动控制实验前,需要进行单腿运动控制实验,以保证单腿能按照预定轨迹运行,图 19 为左前腿一个周期内的运动情况,该机器人能按照预定轨迹平稳运行,证明了机构设计的合理性和运动学模型的正确性。

5 步态转换实验

实验选用的 8 个电机驱动器均通过总线进行连接,使用 ZMC432 型正运动控制器实现电机控制程序的编写。采用外接电源的方式给机器人供电,其中驱动器采用 2 个电压为 48 V、功率为 1 000 W 的电源,控制器采用 1 个 24 V 电源。在进行实验之前,需要执行回零程序,使得大腿和小腿位于初始位置。与仿真模型设计参数一致,设置运行时间为 10 s,抬腿高度 H 为 20 mm,采用 walk 步态行走时步长 S_1 为 40 mm,采用 trot 步态行走时步长 S_2 为

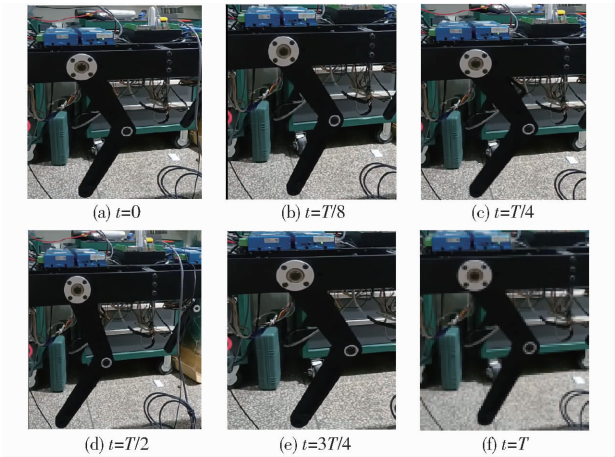


图 19 单腿轨迹规划实验

Fig. 19 Single leg trajectory planning experiment

50 mm。机器人位于初始位置时,大腿在髋关节坐标系下初始角度 θ_1 为 -120° ,小腿在髋关节坐标系下初始角度为 -60° 。图 20 显示了四足机器人在 0~10 s 的运行效果。由图 20 可知,在 0~4 s 机器人按照 walk 步态行走相序 LF-RH-RF-LH 的迈步顺序依次完成机体运动,在 4~6 s 完成步态转换,转换过程平稳无抖动现象发生,在 6~10 s 机器人按照 trot 步态行走。

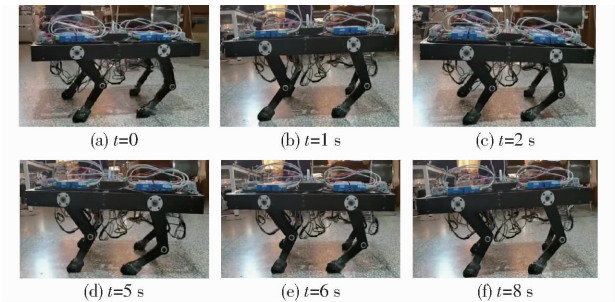


图 20 walk-trot 步态转换实验

Fig. 20 The walk-trot gait transition experiment

为了验证本文所提过渡段变周期控制的有效性。在相同参数的条件下搭建基于中枢模式发生器步态转换控制器,其髋关节和膝关节控制曲线如图 21 和图 22 所示。

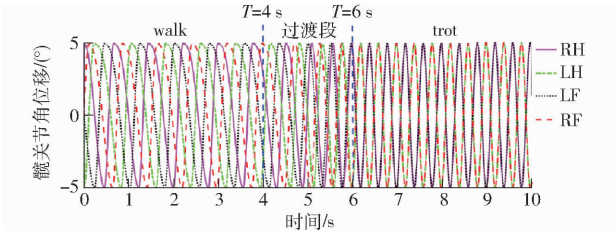


图 21 髋关节驱动曲线

Fig. 21 Hip joint drive curves

在过渡段变周期控制和基于中枢模式发生器的控制下,四足机器人均能实现步态转换,转换过程平

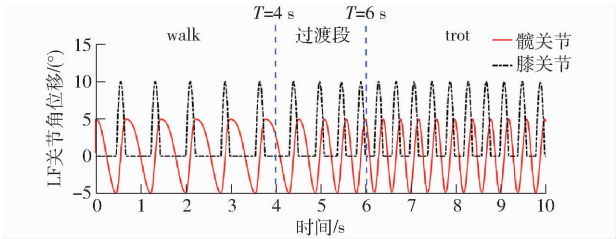


图 22 左前腿髋、膝关节驱动曲线

Fig. 22 Left front leg hip and knee joint drive curves

稳,说明了两种步态方法的实用性。两种算法控制性能对比如表 4 所示。

表 4 两种算法性能对比

Tab. 4 Comparison of performance between

参数	two algorithms		mm
	过渡段变周期控制	基于中枢模式发生器控制	
质心波动量	-11~20	-16~25	
侧向偏移量	-13~15	-35~28	
10 s 内运行位移	493.3	482.8	

通过实际测量可得,机器人在 10 s 内采用过渡段变周期控制行进 493.3 mm,采用中枢模式发生器控制机器人行进 482.8 mm,除去打滑因素,过渡段变周期控制稳定性略高于基于 CPG 的控制方法。但从质心波动量和侧向偏移量上看,过渡段变周期控制具备较小波动量,证明了其沿直线运动的能力以及机体稳定性更强于基于 CPG 的控制方法。本文重点开展了机器人步态转换运动控制仿真与实验,但没有对整机质心进行调整,因此导致足端与地面存在打滑现象,在未来的工作中将结合 ZMP 算法,实现机器人行进过程质心的调整,以提高该四足机器人对环境的适应能力。

6 结论

(1)借鉴仿生学和机构学研究成果,利用连杆滑块机构设计了四足机器人,推导了机器人腿部的逆运动学方程并获得了足端工作空间。

(2)在足端工作空间范围内,采用复合摆线方程作为足端轨迹,提出了过渡段变周期控制,完成了基于模型的步态规划中两种不同步态之间转换,在保证机器人稳定运动的同时,提高了机器人步态转换效率。

(3)利用过渡段变周期控制思想,实现了步态切换前后定速度控制和变步长控制,仿真和实验结果表明,在本文提出的控制方法下,机器人在步态转换过程机体能平稳运行,无抖动和突变现象的发生,验证了该方法的有效性和可行性。

参 考 文 献

- [1] HOYT D F, TAYLOR C R. Gait and the energetic of locomotion in horses[J]. *Nature*, 1981(292): 239 – 240.
- [2] GRIFFIN T, KRAM R, WICKLER S, et al. Biomechanical and energetic determinants of the walk-trot transition in horses [J]. *Journal of Experimental Biology*, 2004, 207(24): 4215 – 4223.
- [3] LIU C J, CHEN Q J, WANG G X. Adaptive walking control of quadruped robots based on central pattern and reflex[J]. *Journal of Control Theory and Applications*, 2013, 11(3): 386 – 392.
- [4] IJSPEERT A. Biorobotics: using robots to emulate and investigate agile locomotion[J]. *Science*, 2014, 346(6206): 196 – 203.
- [5] MORADI K, FATHIAN M, GHIDARY S. Omnidirectional walking using central pattern generator [J]. *International Journal of Machine Learning & Cybernetics*, 2014(6): 1 – 11.
- [6] 李贻斌, 李彬, 荣学文, 等. 液压驱动四足仿生机器人的结构设计和步态规划[J]. *山东大学学报(工学版)*, 2011, 41(5): 32 – 36.
- LI Yibin, LI Bin, RONG Xuewen, et al. Mechanical design and gait planning of a hydraulically actuated quadruped bionic robot [J]. *Journal of Shandong University (Engineering Science)*, 2011, 41(5): 32 – 36. (in Chinese)
- [7] 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.
- ZHANG Xiuli. Biological-inspired rhythmic motion & environmental adaptability for quadruped robot[D]. Beijing: Tsinghua University, 2004. (in Chinese)
- [8] 赵晨亮. 基于中枢模式发生器的移动机器人步态生成方法研究[D]. 北京:北京交通大学, 2020.
- ZHAO Chenliang. Study on central pattern generator based gait generation approach of mobile robots[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2020. (in Chinese)
- [9] NA Q, HAN B L, LI H S, et al. Continuous and smooth gait transition in a quadruped robot based on CPG [J]. *Journal of Beijing Institute of Technology*, 2016, 25(4): 455 – 462.
- [10] BAI L, HU H, CHEN X H, et al. CPG-based gait generation of the curved-leg hexapod robot with smooth gait transition[J]. *Sensors*, 2019(19): 1 – 26.
- [11] 赵爽宇. 四足仿生机器人步态控制与切换策略分析[D]. 成都:电子科技大学, 2014.
- ZHAO Shuangyu. Quadruped bionic robot gait control and analysis on transition strategy [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2014. (in Chinese)
- [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 & Control*, 2014, 36(2): 260 – 275.
- [13] KOO I M, TRONG T D, LEE Y H, et al. Biologically inspired gait transition control for a quadruped walking robot[J]. *Autonomous Robots*, 2015, 39(2): 169 – 182.
- [14] ZHAO D, JING X U, DAN W U, et al. Gait definition and successive gait-transition method based on energy consumption for a quadruped[J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2012, 25(1): 29 – 37.
- [15] 罗红艳, 魏莉, 李彰, 等. 仿生四足机器人运动轨迹与步态转换[J]. *数字制造科学*, 2018, 16(1): 6 – 11.
- LUO Hongyan, WEI Li, LI Zhang, et al. Motion planning and gait transformation of biomimetic quadruped robot[J]. *Digital Manufacture Science*, 2018, 16(1): 6 – 11. (in Chinese)
- [16] 辛亚先, 李贻斌, 李彬, 等. 四足机器人静-动步态平滑切换算法[J]. *山东大学学报(工学版)*, 2018, 48(4): 42 – 49.
- XIN Yaxian, LI Yibin, LI Bin, et al. Smooth walk-to-trot gait transition algorithm for quadruped robot [J]. *Journal of Shandong University (Engineering Science)*, 2018, 48(4): 42 – 49. (in Chinese)
- [17] LIU A, WU H, LI Y Z. Gait transition of quadruped robot using rhythm control and stability analysis [C] // *Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics*, 2013: 2535 – 2539.
- [18] SHAHUAZI M, LOPES G, BABUSKA R. Automated transitions between walking and running in legged robots [C] // *Proceedings of World Congress on the International Federation of Automatic Control*, 2014: 2171 – 2176.
- [19] AOI S, YAMASHITA T, ICHIKAWA A, et al. Hysteresis in gait transition induced by changing waist joint stiffness of a quadruped robot driven by nonlinear oscillators with phase resetting [C] // *Proceedings of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, 2010: 1915 – 1920.
- [20] YUAN S D, ZHOU Y J, LUO C. Crawling gait planning based on foot trajectory optimization for quadruped robot [C] // *Proceedings of the 2019 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation*, IEEE, 2019: 1490 – 1495.
- [21] BUSCHMANN T. Simulation and control of biped walking robots[D]. München: Technische Universität München, 2010.
- [22] 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(2): 210 – 219.
- ZHOU Kun, LI Chuan, LI Chao, et al. Motion planning method for quadruped robots walking on unknown rough terrain[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2020, 56(2): 210 – 219. (in Chinese)
- [23] CORKE P I. A robotics toolbox for MATLAB[J]. *IEEE Robotics & Automation Magazine*, 1996, 3(1): 24 – 32.
- [24] DEHGHANI R, FATTAH A, ABEDI E. Cyclic gait planning and control of a five-link biped robot with four actuators during single support and double support phases[J]. *Multibody System Dynamics*, 2015, 33(4): 389 – 411.