

DOI:10.11784/tdxbz202312014

一种多模式轮腿移动机器人的设计与分析

李晋馥, 于 泽, 连宾宾

(天津大学机构理论与装备设计教育部重点实验室, 天津 300350)

摘要: 移动机器人作为智能勘探与侦察的自动化装备, 在航天探测、抢险救灾等领域具有广阔的应用前景。轮腿式移动机器人因具有良好的机动性与越障能力而受到青睐。然而现有轮腿式移动机器人机身大多不可变形, 导致机器人运动模式较少, 地形适应性一般。且机身易与障碍物发生碰撞, 无法在具备良好的爬坡能力的同时保证跨越障碍物的效率。针对上述问题, 本文提出了一种采用多连杆可变形机构作为机身的轮腿式移动机器人。在设计机器人轮腿及可变形机身的基础上, 建立机器人整体运动学模型, 据此规划机器人 3 种运动模式: 同步步态、翻滚步态和蜷曲-伸展步态。开展机器人在典型地形(平坦地面、松软地形、上升坡度、下降坡度、障碍物)下的运动性能分析, 揭示机器人结构参数与地形特征(爬坡角度、障碍物高度)映射关系。最后基于理论分析结果搭建物理样机并开展实验。实验结果表明, 本文所设计的多模式轮腿移动机器人的最大爬坡角度和越障高度分别为 44° 和 28 mm, 具有良好的爬坡能力与越障性能。此外, 得益于多模式运动特点, 机器人在包含平坦地面及松软地形在内的多地形下均具有良好的通过性, 验证了机器人方案的可行性。本文为多模式轮腿运动机器人的设计与应用提供有益参考。

关键词: 多模式移动机器人; 轮腿式移动机器人; 运动学建模; 实验研究

中图分类号: TP242.6

文献标志码: A

文章编号: 0493-2137(2025)01-0012-12

Design and Analysis of a Multimodal Wheel-Legged Mobile Robot

Li Jinfu, Yu Ze, Lian Binbin

(Key Laboratory of Mechanism Theory and Equipment Design of Ministry of Education,
Tianjin University, Tianjin 300350, China)

Abstract: Mobile robots, which are essential tools for intelligent exploration and reconnaissance, have incredible potential applications in areas such as space exploration and disaster relief. Their maneuverability and obstacle-crossing capabilities make them highly favored. However, most existing wheel-legged mobile robots lack deformability, limiting their motion modes and reducing average terrain adaptability. Moreover, these robots often face challenges like collisions with obstacles, making it difficult to balance climbing capacity and obstacle-crossing performance. To address these issues, this paper proposed a wheel-legged mobile robot equipped with a multibar linkage deformable mechanism for its body. The innovative design of the robot's legs and deformable body formed the basis for establishing an overall kinematic model. Three distinct motion modes were developed: synchronous gait, rolling gait, and coiling-extension gait. The robot's motion performance was analyzed across various terrains (flat ground, soft terrain, ascending slope, descending slope, and obstacle) to reveal the mapping relationship between the robot's structural parameters and terrain features, such as climbing angle and obstacle height. Finally, a physical prototype was built, and experiments were conducted based on the theoretical analysis. The experimental results demonstrate that the designed multimodal wheel-legged mobile robot has a maximum climbing angle of 44° and can overcome obstacles up to 28 mm in height. These findings highlight the robot's excellent climbing capacity and obstacle-crossing performance. Furthermore, owing to its multimodal motion characteristics, the robot exhibits good traversability on

收稿日期: 2023-12-11; 修回日期: 2024-01-22.

作者简介: 李晋馥 (1984—), 女, 博士, 副研究员, lijinfu@tju.edu.cn.

通信作者: 连宾宾, lianbinbin@tju.edu.cn.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (52275028).

Supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 52275028).

various terrains, including flat ground and soft terrain. This effectively validates the feasibility of the robot design. This paper provides valuable references for the design and application of multimodal wheel-legged mobile robots.

Keywords: multimodal mobile robot; wheel-legged mobile robot; kinematics modeling; experimental research

移动机器人应用于非结构化环境,以协助人类进行危险任务,如灾难救援^[1]、军事侦察^[2]与能源勘探^[3]。传统移动机器人采用轮式、腿式或履带式行进机构,仅在机动性能或越障性能单一方面具备优势,难以兼顾两者的特性,无法适应复杂环境。针对此问题,有学者提出了将轮、腿结合于同一行进机构理念,即轮腿式移动机器人^[4]。轮腿式移动机器人将圆形车轮改造为离散支叉形,典型代表有:RHex系列机器人,其具备2种运动模式,可跨越40°的斜坡^[5];Whegs系列机器人,其也具有2种运动模式^[6];Asgard系列机器人,其可适应3种地形^[7]。此类轮腿式移动机器人极大简化了机器人的整体结构和控制难度,机器人尺寸取决于地形尺寸,运动模式较为单一、地形适应性一般,且在障碍物地形下机身易与障碍物发生碰撞,影响机器人运行效率。Oh等^[8]针对这些问题,设计了一款可被动变形的轮腿结构,整体机器人采用2个轮腿,这一方式增加了机器人通过障碍物地形的效率,但是也增加了控制难度。此外,还有学者为了增加机器人的地形适应性对轮腿的可变形结构进行了较为深入的研究。较为典型的有Liu等^[9]研发的可变形机器人,该机器人可在平地及障碍物地形下运动,但同样没有考虑机身与障碍物碰撞的问题。Cao等^[10]研发的OmniWheg机器人通过增加麦克纳姆轮的方式使机器人增加了在平地及障碍物地形下运动的效率,但是在运动过程会出现机身与障碍物的碰撞。Ryu等^[11]研发的攀爬机器人与Niu等^[12]的机器人都拥有2个轮腿,可适应3种地形,同时增加了通过障碍物地形的效率,但是控制方法复杂。这类机器人通过增加额外的机构与驱动的方式增加了机器人的地形适应性,但会导致机构复杂与控制难度大的问题。有学者提出通过附加电机或机构使机器人在轮式和腿式2种状态之间切换的轮腿串联式机器人,该类机器人具备轮式移动机器人与腿式移动机器人的特点,有较强的地形适应性。典型代表有PAW机器人^[13]、ATHLETE机器人^[14]、Medeiros等^[15]研发的轮足机器人与Bjelonic等^[16]研发的可跳跃机器人等。该类机器人具备腿式移动机器人的特性,地形适应性强,但是结构复杂、控制难度大。

尽管轮腿式移动机器人在设计过程中考虑了腿式结构行进过程中的机动性能与越障问题,但当其攀爬大角度斜坡时,机身易与障碍物发生碰撞,影响机

器人运行的效率,地形适应能力不高。通过增加结构或驱动的方式虽然会增加机器人的地形适应性,但往往会增加机器人结构设计及控制的难度。因此,目前轮腿式移动机器人存在结构与地形适应性之间的矛盾。

针对目前研究中的不足,本文提出一种机身可变形轮腿移动机器人。建立了机器人运动学模型,并进行多模式运动规划。在此基础上,分析了机器人在平坦地面、松软地形、上升坡度、下降坡度、障碍物下的运动性能,研究了结构参数对机器人爬坡能力及越障能力的影响。最后通过实验验证了机器人方案的有效性。

1 机器人结构的设计

在轮腿设计方面,本文设计的轮腿结构如图1所示,形状参数有轮辐弦长 R_{\max} 、轮辐曲率半径 r 和轮辐数目,其中轮辐数目为3。轮辐之间的夹角相同,且本文所研究的轮腿轮辐形状均为劣弧。以弦长 $R_{\max}=17.5\text{ mm}$ 为基本尺寸,其余几何参数可由轮腿几何关系得到: $r=\frac{\sqrt{3}}{3}R_{\max}$; $\psi=86.9^\circ$; $\varphi=30^\circ$; $R=0.795R_{\max}$; $\delta_1=33.1^\circ$; $\beta=3.1^\circ$ 。

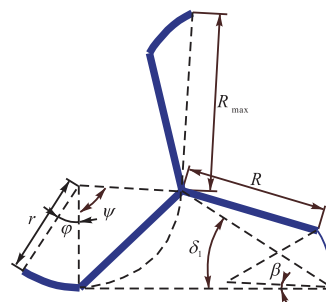


图1 轮腿结构

Fig.1 Wheel-legged structure

在机身设计方面,首先分析轮腿式移动机器人的爬坡稳定性及越障高度与机身尺度之间的关系。如图2所示,在轮腿式移动机器人爬坡时,机器人的质心会随着轮腿的转动而变化,机器人的质心最低点为 O_s ,机器人质心最高点为 O_h 。 O'_h (O'_s)为 O_h (O_s)在竖直方向上的投影点,轮腿与斜面转动的支撑点相对于机身几何中心 O 的移动变化范围为 O'_h (O'_s), A_1 、 A_2 为轮腿与斜坡接触点在竖直方向上的投影点, O'_h O'_s 为机器人重心波动区间在水平面的投影, A_1A_2 为运

动周期内前、后轮腿在水平面的投影点形成的支撑多边形的交集,即机器人的支撑区域.依据重心投影法,若 $O'_h O'_s$ 不在 $A_1 A_2$ 之间则机器人在运动过程中有倾翻的可能.因此为保证机器人在爬坡运动过程中的稳定,则有

$$R_{\max} \sin \alpha_1 \leq \left(\frac{L_b}{2} - R_{\max} \cos \delta_1 \right) \cos \alpha_1 \quad (1)$$

式中: α_1 为斜坡的角度; L_b 为机器人的身长.由式(1)可知,在轮腿尺寸参数 R_{\max} 与 δ_1 确定时,为了增大机器人的爬坡角度 α_1 则需要增加机器人的身体长度 L_b .

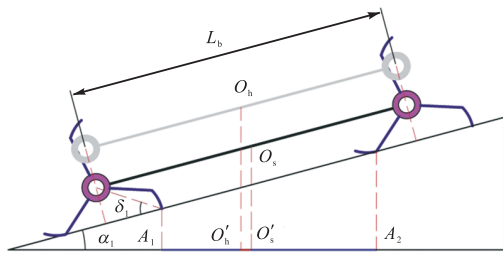


图 2 轮腿机器人爬坡斜坡侧视图

Fig.2 Side view of the wheel-legged robot climbing a slope

在轮腿式移动机器人越障时,机身与障碍物最易发生碰撞的位置如图 3 所示.轮腿尺寸能够满足实现对障碍物的跨越需求,但在越障过程中,机身与障碍物发生碰撞,导致机器人不能完全发挥轮腿的越障功能.为保证机器人在跨越障碍物的全过程中机身与障碍物不发生碰撞,对图 3 所示机器人位置进行分析.

$$\begin{cases} \alpha_2 = \arcsin(H/L_b) \\ \alpha_3 = \arctan\left(\frac{R_{\max} \cos \delta_1}{H - R_{\max} \sin \delta_1}\right) \end{cases} \quad (2)$$

式中: α_2 为机器人的机身 $B_1 B_4$ 与水平线 $B_1 B_2$ 的夹角; α_3 为 $B_1 B_3$ 与 $B_1 B_2$ 的夹角; H 为台阶的高度.结合图 3 与式(2)可知,轮腿式移动机器人的越障能力取决于机器人的身长与轮腿尺寸,当 $\alpha_2 \geq \alpha_3$ 时机器人可无碰撞越过台阶.因此,在轮腿尺寸参数一定时,

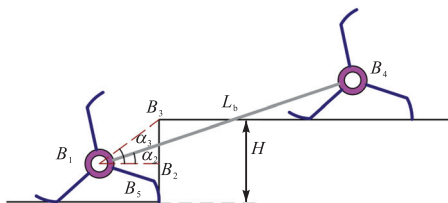
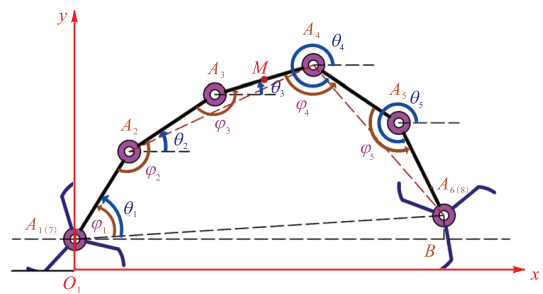


图 3 轮腿机器人攀爬障碍物侧视图

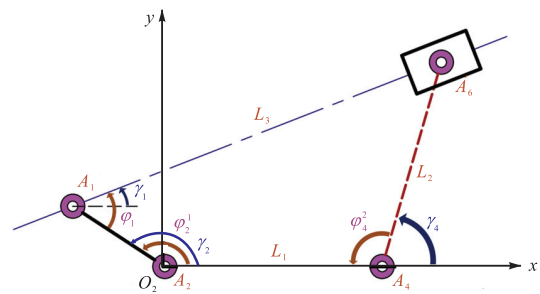
Fig.3 Side view of the wheel-legged robot climbing an obstacle

机器人能否顺利跨越台阶取决于机器人的身体长度 L_b . 身体长度 L_b 越小,机器人跨越台阶的高度越高.

综上所述,若轮腿式移动机器人的机身尺度固定,则难以解决大爬坡角度与高障碍物之间的矛盾.因此,本文采用身体可变形的结构作为轮腿式移动机器人的机身,当机器人需要攀爬大角度斜坡时机身完全展开,当机器人跨越障碍物时机身按需求蜷曲.常见的可变形机构有刚性结构、软体结构、张拉结构等,其中刚性结构中的连杆结构具有结构简单、易加工制造的特点.因此,选择刚性五连杆结构为机器人的机身,得到图 4(a)所示的机器人机构.



(a) 机器人机身的机构



(b) 机器人部分机身的机构

图 4 轮腿机器人机构

Fig.4 Mechanism of the wheel-legged robot

2 机器人的运动学模型

与一般轮腿式移动机器人不同,本文提出的机器人可通过身体的变形与轮腿的转动来实现多种运动模式,以适应不同的地形,同时增大爬坡角度与越障高度.特别地,机器人身体的变形与轮腿的转动通过电机的转角来控制,本节对机器人的运动学模型进行了推导.

为便于分析,对机器人做出以下假设:轮腿式移动机器人零部件的重心位于零部件的几何中心;机身相对几何中心对称分布;为了保证机器人的运动能力,认为轮腿始终接触地面且轮腿与地面的摩擦系数较大,机器人在运动过程中无纵向滑移与横向滑移.

由图4可知,机器人机身各关节角满足

$$\begin{cases} \varphi_2 = \varphi_2^1 + \varphi_2^2 \\ \varphi_4 = \varphi_4^1 + \varphi_4^2 + \varphi_4^3 \end{cases} \quad (3)$$

式中: φ_i 为杆 $A_{i-1}A_i$ 与杆 A_iA_{i+1} ($i=2, 3, 4, 5$) 夹角; φ_2^i ($i=1, 2$) 为 A_iA_{i+1} 与 A_2A_4 之间的角; φ_4^i ($i=1, 2, 3$) 为 A_3A_4 与 A_2A_4 、 A_2A_4 与 A_4A_6 、 A_4A_5 与 A_4A_6 之间的角。

在图4(b)中,从 A_2 点开始可以找到一个闭环。

$$\mathbf{A}_2\mathbf{A}_1 + \mathbf{A}_1\mathbf{A}_6 = \mathbf{A}_2\mathbf{A}_4 + \mathbf{A}_4\mathbf{A}_6 \quad (4)$$

式(4)投影到 x 、 y 轴可得

$$\begin{cases} L\cos\gamma_2 + L_3\cos\gamma_1 = L_1 + L_2\cos\gamma_4 \\ L\sin\gamma_2 + L_3\sin\gamma_1 = L_2\sin\gamma_4 \end{cases} \quad (5)$$

式中: γ_i ($i=1, 2, 4$) 为 A_1A_2 、 A_1A_6 、 A_4A_6 与 x 轴正方向夹角; L_1 、 L_2 、 L_3 分别为 A_2A_4 、 A_4A_6 、 A_1A_6 的长度; L 均为杆 A_iA_{i+1} ($i=1, 2, \dots, 5$) 的长度。

解式(5)可得到

$$\gamma_1 = \arctan\left(\frac{L_2\sin\gamma_4 - L\sin\gamma_2}{L_1 + L_2\cos\gamma_4 - L\cos\gamma_2}\right) \quad (6)$$

$$L_3 = \left((L_1 + L_2\cos\gamma_4 - L\cos\gamma_2)^2 + (L_2\sin\gamma_4 - L\sin\gamma_2)^2\right)^{1/2} \quad (7)$$

根据图4中构件的几何关系可得到出

$$\gamma_1 = \varphi_1 + \varphi_2^1 - \pi, \quad \gamma_2 = \varphi_2^2, \quad \gamma_4 = \pi - \varphi_4^2 \quad (8)$$

$$\begin{cases} \varphi_2^1 = \varphi_2 + \frac{\varphi_3}{2} - \frac{\pi}{2} \\ \varphi_2^2 = \varphi_4^1 = \frac{\pi - \varphi_3}{2} \\ \varphi_4^2 = \frac{\varphi_3}{2} + \varphi_4 + \frac{\varphi_5}{2} - \pi \\ \varphi_4^3 = \frac{\pi - \varphi_3}{2} \end{cases} \quad (9)$$

$$\begin{cases} L_1 = 2L\sin\frac{\varphi_3}{2} \\ L_2 = 2L\sin\frac{\varphi_5}{2} \end{cases} \quad (10)$$

将式(8)~(10)代入式(6)~(7)可得

$$\varphi_1 = \arctan\left(\frac{\cos D_\varphi^1 + \sum_{i=2}^3 (-1)^i \cdot \cos\left(\varphi_i + \frac{\varphi_{i+1}}{2}\right)}{2\sin\frac{\varphi_3}{2} + \sin D_\varphi^1 - \sum_{i=2}^3 \sin\left(\varphi_i + \frac{\varphi_{i+1}}{2}\right)}\right) - \varphi_2 - \frac{\varphi_3}{2} + \frac{3\pi}{2} \quad (11)$$

$$L_3 = L\left(5 + 2\cos\left(\sum_{i=2}^5 \varphi_i\right) + 2\sum_{i=2}^4 \cos(\varphi_i + \varphi_{i+1}) - 2\sum_{i=2}^3 \cos(\varphi_i + \varphi_{i+1} + \varphi_{i+2}) - 2\sum_{i=2}^5 \cos\varphi_i\right)^{1/2} \quad (12)$$

式中

$$D_\varphi^1 = \frac{\varphi_3}{2} + \varphi_4 + \varphi_5 \quad (13)$$

在机身上 A_6 点在平面中的位移可表示为

$$\mathbf{OA}_6 = \mathbf{OA}_1 + \sum_{i=1}^5 \mathbf{A}_i\mathbf{A}_{i+1} \quad (14)$$

式(14)投影在坐标轴上可表示为

$$\begin{cases} x_{A_6} = L\sum_{i=1}^5 \cos\theta_i + x_{A_1} \\ y_{A_6} = L\sum_{i=1}^5 \sin\theta_i + y_{A_1} \end{cases} \quad (15)$$

式中: θ_i 为杆 A_iA_{i+1} ($i=1, 2, \dots, 5$) 与 x 轴的夹角; A_1 、 A_6 点为机身上的点; x_{A_1} 、 y_{A_1} 分别为 A_1 点在 x 、 y 轴上的位移; x_{A_6} 、 y_{A_6} 分别为 A_6 点在 x 、 y 轴上的位移。依据图4(a)可得

$$\varphi_1^2 = \arcsin\left(\frac{A_6B}{A_1A_6}\right) = \arcsin\left(\frac{y_{A_6} - y_{A_1}}{L_3}\right) \quad (16)$$

式中: φ_1^2 为 A_1A_6 与 A_1B 的夹角; y_{A_6} 为前轮腿 y 轴方向上的位移; y_{A_1} 为后轮腿在 y 轴方向上产生的位移。

由图4(b)中的几何关系可得 θ_1 , 即

$$\theta_1 = \varphi_1 + \varphi_1^2 \quad (17)$$

轮腿结构图如图1所示,机器人4个轮腿结构尺寸相同,当轮腿顺时针旋转时,轮腿中心点 A_7 (A_8) 在 x 轴与 y 轴位移一个周期的位移可分别表示为

$$x_{A_7} = \begin{cases} R_{\max} [\cos\delta_1 - \cos(\theta_7 + \delta_1)] & 0 \leq \theta_7 \leq \frac{\pi}{2} - \beta \\ s_1 + r(D_2 - \sin D_2) + R_{\max} [\sin D_1 - \sin(\delta_1 - \beta)] & \frac{\pi}{2} - \beta < \theta_7 \leq \frac{2\pi}{3} \end{cases} \quad (18)$$

$$y_{A_7} = \begin{cases} R_{\max} \sin(\theta_7 + \delta_1) & 0 \leq \theta_7 \leq \frac{\pi}{2} - \beta \\ R_{\max} \cos D_1 + r - r \cos D_2 & \frac{\pi}{2} - \beta < \theta_7 \leq \frac{2\pi}{3} \end{cases} \quad (19)$$

其中

$$\begin{cases} s_1 = R_{\max} \cos\delta_1 - R_{\max} \cos\left(\frac{\pi}{2} - \beta + \delta_1\right) \\ D_1 = \theta_7 - \frac{\pi}{2} + \delta_1 \\ D_2 = \theta_7 - \frac{\pi}{2} + \beta \end{cases} \quad (20)$$

式中 s_1 为轮腿顺时针转动时第一阶段的移动距离。

为了使机器人在运动过程中轮腿与地面之间不

产生相对滑动,则需要机身上的点 A_6 与轮腿的点 A_8 位移相同,得到

$$x_{A_6} = x_{A_8} + 5L, y_{A_6} = y_{A_8} \quad (21)$$

将式(21)代入式(15)得到

$$\theta_7 = f_\theta(\theta_2, \theta_3, \theta_4, \theta_5, \theta_8) \quad (22)$$

式中 θ_7, θ_8 为轮腿的转角.

结合式(15)~(22)可得机器人上点 M 的位移参数化表达为

$$\begin{cases} x_M = f_x^M(\theta_2, \theta_3, \theta_4, \theta_5, \theta_8) \\ y_M = f_y^M(\theta_2, \theta_3, \theta_4, \theta_5, \theta_8) \end{cases} \quad (23)$$

3 机器人多模式运动规划

根据机器人机身结构及运动学模型,拟定机器人可实现 3 种运动模式:同步步态、翻滚步态及蜷曲-伸展步态. 本节对机器人各模式进行运动规划,获得各模式下机器人电机转角的驱动规律,为后续各模式的运动控制提供理论基础.

3.1 同步步态

机器人在同步步态下,机身的位置形状不变化,所有轮腿初始角度相同,并以相同的角速度进行周期性运动. 机器人在平面上的运动序列如图 5 所示.

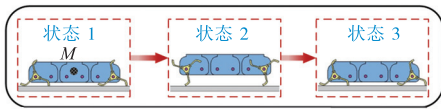


图 5 同步步态运动序列

Fig.5 Locomotion sequence of synchronous gait

状态 1 为机器人的初始状态,所有轮腿相位角相同. 在状态 1—状态 2 时,机身角度保持不变,且每一个关节的相位角相同,所有轮腿以相同的角速度转动将机器人抬起. 在状态 2—状态 3 时,机器人落下,终止状态与初始状态相同,准备下一周期的运动.

因此,可以得到机器人在同步步态下的驱动规律为

$$\dot{\theta}_7 = \dot{\theta}_8 = \omega, \varphi_2 = \varphi_3 = \varphi_4 = \varphi_5 = \alpha_T \quad (24)$$

3.2 翻滚步态

机器人在翻滚步态下,所有轮腿静止. 机器人身体变形后重心位置变化,在重力的作用下机器人向前运动. 为了减少惯性力对翻滚步态的影响,机器人微型变化较慢,可以认为机器人在翻滚过程中处于静态. 机器人在平面上的运动序列如图 6 所示.

在状态 1—状态 2 时,机身的转动将机器人抬起,其规律为

$$\varphi_i = \begin{cases} \pi & i = 2, 3, 4 \\ \pi - \frac{\pi t}{3} & i = 5, 0 \leq t \leq 1 \end{cases} \quad (25)$$

状态 3—状态 6 时,为了保证机器人的顺时针转动,机器人关于 A_{ground} 的重力矩方向必须为顺时针方向,否则机器人将会绕 A_{ground} 进行旋转导致状态 3—状态 5 的运动失效. 另外,机器人关于 B_{ground} 的重力矩方向必须为逆时针方向. 因此,得到状态 3—状态 6 时 φ_i ($i = 2, 3, 4, 5$) 的约束条件,即

$$\begin{cases} M_{\text{Gravity}}^{A_{\text{ground}}} = \sum_{i=1}^9 m_i g r_i^{A_{\text{ground}}} = f_{\text{TB},1} & \varphi_2, \varphi_3, \varphi_4, \varphi_5 \leq 0 \\ M_{\text{Gravity}}^{B_{\text{ground}}} = \sum_{i=1}^9 m_i g r_i^{B_{\text{ground}}} = f_{\text{TB},2} & \varphi_2, \varphi_3, \varphi_4, \varphi_5 > 0 \end{cases} \quad (26)$$

式中: $M_{\text{Gravity}}^{A_{\text{ground}}}$ 和 $M_{\text{Gravity}}^{B_{\text{ground}}}$ 分别为机器人在 A_{ground} 与 B_{ground} 的重力矩; A_{ground} 与 B_{ground} 分别为机器人与地面接触的左接触点与右接触点,在本文中,重力矩的顺时针为负值,逆时针为正值; m_i 为机器人各个零件的质量; $r_i^{A_{\text{ground}}}$ 和 $r_i^{B_{\text{ground}}}$ 分别为零件到 A_{ground} 与 B_{ground} 的距离.

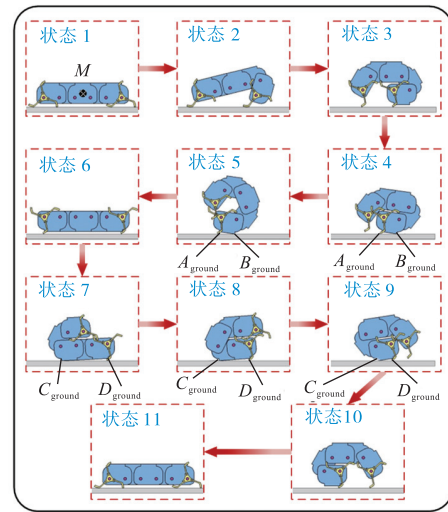


图 6 翻滚步态运动序列

Fig.6 Locomotion sequence of rolling gait

由式(26)可得每个状态下的驱动规律为

$$\varphi_i \in [\varphi_i^t, \varphi_i^f] \quad i = 2, 3, 4, 5 \quad (27)$$

式中: φ_i^t 为上一状态下各个驱动的转角; φ_i^f 为当前状态下满足式(26)要求的转角. 其中 φ_i^f 可以由 $M_{\text{Gravity}}^{B_{\text{ground}}} = 0$ 解出.

在状态 6—状态 9 时,保持机器人顺时针翻滚的机理与状态 3—状态 5 一致,可以得到

$$\begin{cases} M_{\text{Gravity}}^{C_{\text{ground}}} = \sum_{i=1}^9 m_i g r_i^{C_{\text{ground}}} = f_{\text{TB},3} & \varphi_2, \varphi_3, \varphi_4, \varphi_5 \leq 0 \\ M_{\text{Gravity}}^{D_{\text{ground}}} = \sum_{i=1}^9 m_i g r_i^{D_{\text{ground}}} = f_{\text{TB},4} & \varphi_2, \varphi_3, \varphi_4, \varphi_5 > 0 \end{cases} \quad (28)$$

式中： $M_{Gravity}^{C_{ground}}$ 和 $M_{Gravity}^{D_{ground}}$ 为机器人在 C_{ground} 与 D_{ground} 的重力矩； C_{ground} 与 D_{ground} 分别为机器人机身与地面接触的左接触点与右接触点； $r_i^{C_{ground}}$ 和 $r_i^{D_{ground}}$ 分别为零件到 C_{ground} 与 D_{ground} 的距离。

由式(28)可得每个状态下的驱动规律，即

$$\varphi_i \in [\varphi_i^E, \varphi_i^{Ef}] \quad i = 2, 3, 4, 5 \quad (29)$$

式中： φ_i^E 为上一状态下的驱动的转角； φ_i^{Ef} 为当前状态下满足式(28)要求的转角。其中 φ_i^{Ef} 可以由 $M_{Gravity}^{D_{ground}} = 0$ 解出。

在状态 10—状态 11 时，机器人完全展开，完成一个翻滚周期。其驱动规律为

$$\varphi_i \in [\varphi_i^{Ef}, \pi] \quad i = 2, 3, 4, 5 \quad (30)$$

3.3 蜷曲-伸展步态

机器人在蜷曲-伸展步态下，轮腿与机身协同运动进行蜷曲与伸展。机器人在地面上的运动序列如图 7 所示。在状态 1—状态 3 时机器人前轮腿与地面保持相对静止，在状态 3—状态 5 时机器人后轮腿与地面保持相对静止。特别地，由于蜷曲-伸展步态包含同步步态及翻滚步态，因此电机驱动规律可参考式(24)~(30)。

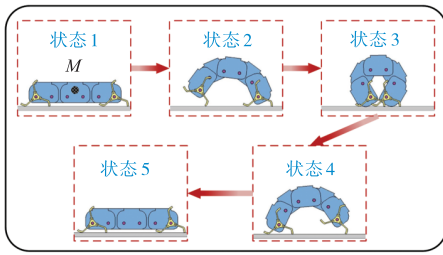


图 7 蜷曲-伸展步态运动序列

Fig.7 Locomotion sequence of coiling-extension gait

3.4 典型地形下机器人运动性能分析

本节分析了机器人在平坦地面、松软地形、上升坡度、下降坡度及障碍物下的运动。对于机器人在地面上的运动，机器人的 3 种步态均可适用。当机器人以同步步态模式在平坦地面上运动时，给定 $\omega_1 = 0.667\pi \text{ rad/s}$ 、 $\alpha_1 = \pi$ 将同步步态下的驱动规律代入式(23)中，点 M 的位移如图 8 所示。

当机器人以翻滚运动模式在平坦地面上运动时，给定 $\varphi_i (i = 2, 3, 4, 5)$ 的驱动规律如图 9 所示，则得到机器人中心点 M 的位移如图 10 所示。

当机器人以蜷曲-伸展步态在平地上运动时，依据图 7，给定 $\varphi_i (i = 2, 3, 4, 5)$ ，驱动规律为

$$\varphi_i = \begin{cases} \pi - \frac{\pi}{6}t & \varphi_8 = 0, 0 \leq t \leq 1.7, i = 2, 3, 4, 5 \\ \frac{\pi}{3} + \frac{\pi}{6}t & \varphi_7 = 0, 2 \leq t \leq 3.4, i = 2, 3, 4, 5 \end{cases} \quad (31)$$

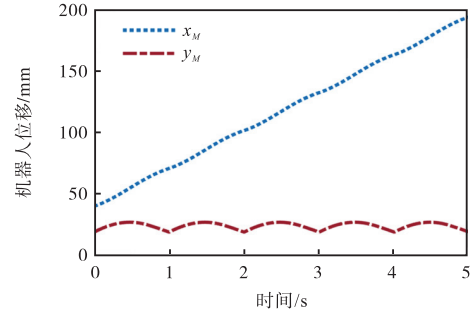
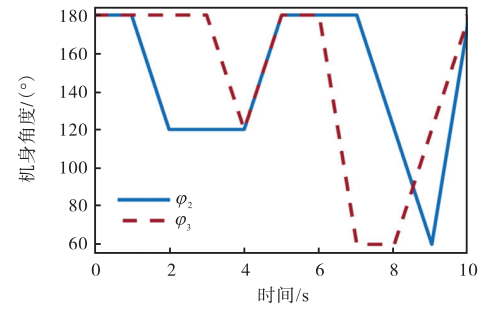
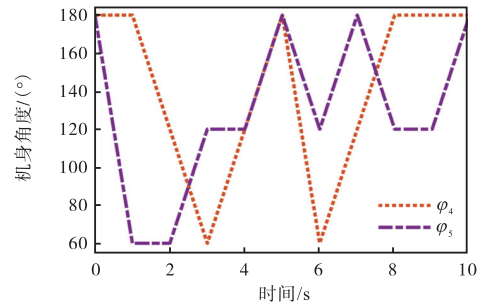


图 8 同步步态下的位移

Fig.8 Displacement of synchronous gait



(a) φ_2 和 φ_3



(b) φ_4 和 φ_5

图 9 翻滚步态的驱动规律

Fig.9 Driving law of rolling gait

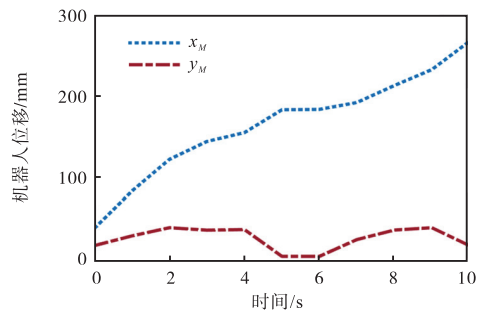


图 10 翻滚步态下的位移

Fig.10 Displacement of rolling gait

将式(31)代入(23)中可以得到机器人的中心点 M 的位移变化如图 11 所示。特别地，在图 11 中，机器人 x 轴方向上的位移不是一直上升的，这是由于轮腿参与了蜷曲-伸展步态的运动过程。

经分析可知，对于平坦地面上的运动，翻滚步态

需要多个电机驱动,能耗大且移动速度慢;蜷曲-伸展步态在 x 轴的方向不能保持一直前进. 因此对于平地同步步态为机器人的最佳运动步态.

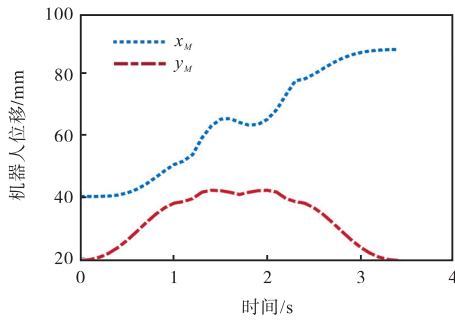


图 11 蜷曲-伸展步态下的位移

Fig.11 Displacement of coiling-extension gait

对于机器人在松软地形的运动. 当机器人以同步步态或者蜷曲-伸展步态在地面上行走时,由于机器人的重力完全由轮腿支撑,容易出现机器人轮腿功能失效的情况. 翻滚步态利用机身与松软地形接触,接触面积大,能够实现有效的运动. 因此采用翻滚步态在松软地形上行走. 由于轮腿结构不产生作用,翻滚步态在松软地形上的运动序列如图 12 所示. 驱动规律与地面上的翻滚步态相同.

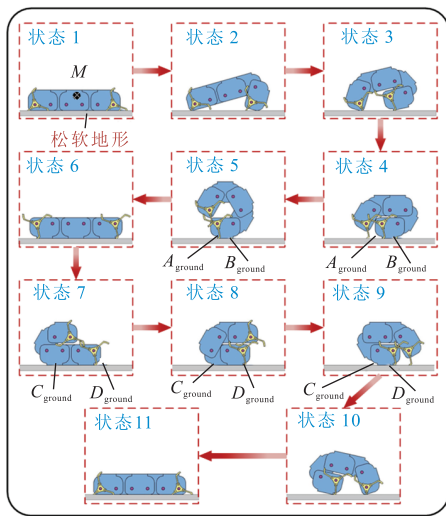


图 12 翻滚步态在松软地形上的运动序列

Fig.12 Locomotion sequence of rolling gait on soft terrain

对于上坡运动,可以采用蜷曲-伸展步态与同步步态. 依据式(1)机器人的最大爬坡角度取决于机器人的身长,身长越长爬坡角度越大. 同步步态为机器人上坡的最佳运动步态,驱动规律与同步步态在平地运动的驱动规律相同,如图 13 所示. 而机器人的最大爬坡角度 α_1^{\max} 则取决于身体长度 L_b 和轮腿与地面的摩擦系数 μ ,当满足式(32)、(33)时机器人可以顺利爬坡. 当 $L_b = 80 \text{ mm}$ 、 $\mu = 1$ 时,最大爬坡角度

$$\alpha_1^{\max} = 45^\circ.$$

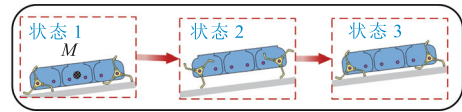


图 13 同步步态在上升坡度上的运动序列

Fig.13 Locomotion sequence of synchronous gait on an ascending slope

$$\alpha_1^{\max} \leq \arctan \left(\frac{\frac{L_b}{2} - R_{\max} \cos \delta_1}{R_{\max}} \right) \quad (32)$$

$$\alpha_1^{\max} \leq \arctan \mu \quad (33)$$

对于下坡运动,机器人可采用多种步态耦合的方式进行运动. 运动序列如图 14 所示. 机器人在初始状态完全展开,在状态 1—状态 3 时,以同步步态向前运动直至机器人完全在斜坡上后,在蜷曲-伸展步态形成圆柱. 在状态 4—状态 5 时机器人依靠重力的作用在下降坡度上进行滚动. 状态 6—状态 8 时机器人以翻滚步态状态 6—状态 7 调整自身位姿,至此完成下坡.

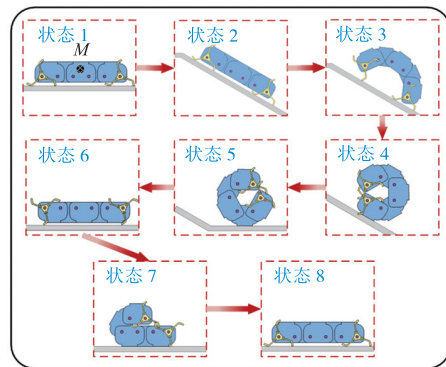


图 14 机器人在下降坡度上的运动序列

Fig.14 Locomotion sequence of the robot on a descending slope

对于障碍物,需要同步步态与蜷曲步态协作进行. 机器人攀爬障碍物的运动序列如图 15 所示. 机

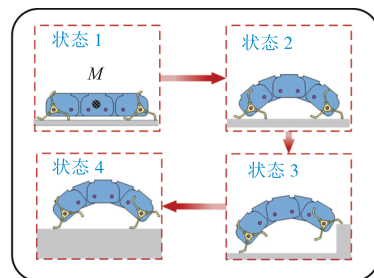


图 15 机器人跨越台阶的运动序列

Fig.15 Locomotion sequence of the robot crossing stairs

器人在状态 1—状态 2 时以蜷曲-伸展步态完成身体的蜷曲,其中各个关节的旋转角度相同,关节的驱动规律可由式(2)与式(18)得到. 状态 3—状态 4 时进行同步步态运动攀爬障碍物. 机器人的越障能力取决于轮腿的尺寸,本文中 $R_{max} = 17\text{ mm}$,机器人的极限越障高度为 28.97 mm.

4 实验

机器人控制系统如图 16 所示. 控制系统以 STM32F429IGT6 嵌入式芯片为核心. 该芯片最大时钟为 180 MHz,具备脉冲宽度调制功能,且有输入捕获功能及串口通讯功能,能够满足现有大部分电机的驱动与反馈控制,同时能够实现运动信号接收. 控制系统都具备信息接受接口用以接收运动信号. 在控制系统中设定机器人 3 种运动模式的运动控制程序,机器人通过运动信号来调用对应的程序进行运动.

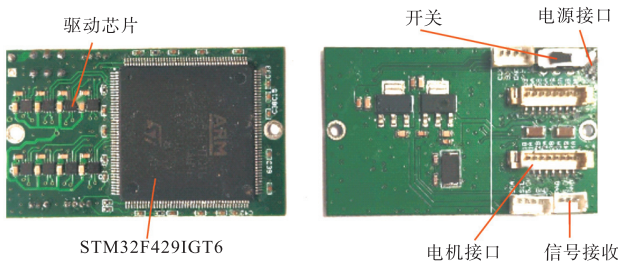


图 16 机器人控制系统

Fig.16 Robot control system

多模式轮腿机器人由刚性结构构造,结构如图 17 所示. 机器人的尺寸为 $10\text{ cm} \times 8\text{ cm} \times 2\text{ cm}$,质量为 200 g,包括铝合金材质的机器人身体和钢材拼接而成的轮腿. 机器人选择平面五连杆四关节的结构为机器人的身体. 每一个关节由单独的直流电机(CHF-GM12-N20VA)驱动. 每个电机通过螺钉固定在一个机身连杆结构上,电机的轴再通过结构与另一根机身连杆连结. 每个轮腿由电机单独驱动,是 4 部分钢材拼接而成的三轮辐轮腿,4 部分之间由螺钉与

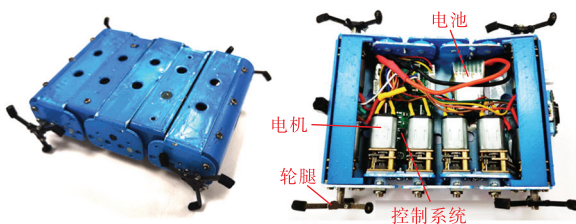
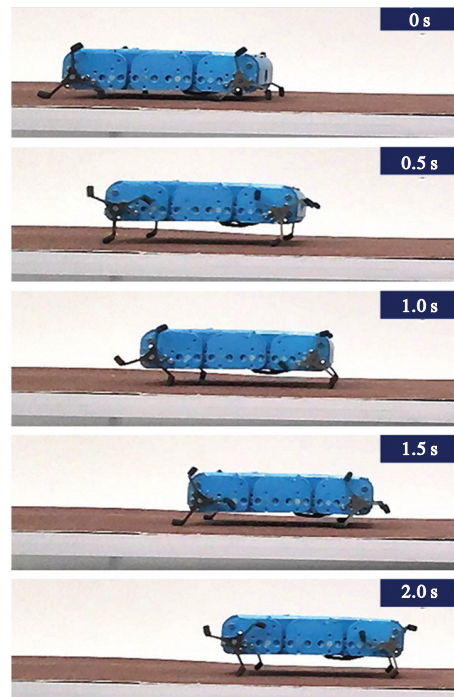


图 17 机器人物理样机

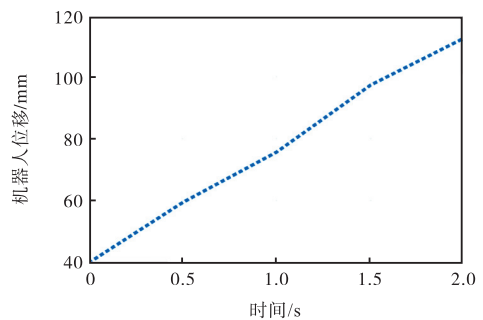
Fig.17 Physical prototype of the robot

机身进行固定. 每个腿的末端增加橡胶材料以增大其与地面之间的摩擦力.

首先,进行机器人 3 种步态在平面上的实验,如图 18~20 所示. 图 18 为机器人同步步态的位移与运动序列. 在图 18(a)中,可以观察到机器人 4 个轮腿初始相位角相同、角速度相同. 机器人在 x 轴方向的位移图如图 18(b)所示.



(a) 机器人同步步态运动序列



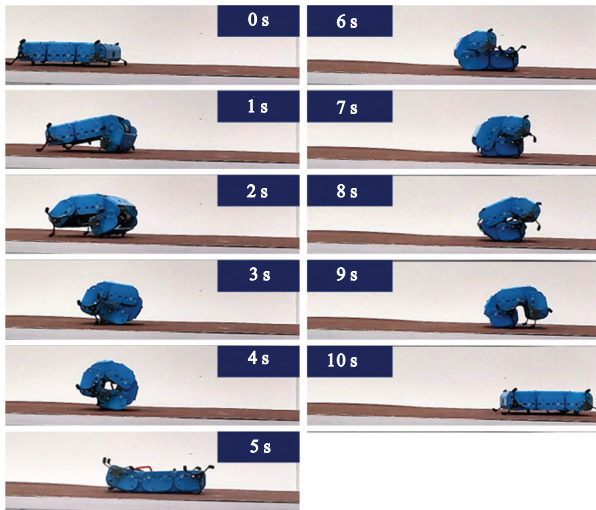
(b) 机器人同步步态位移

图 18 机器人同步步态的位移与运动序列

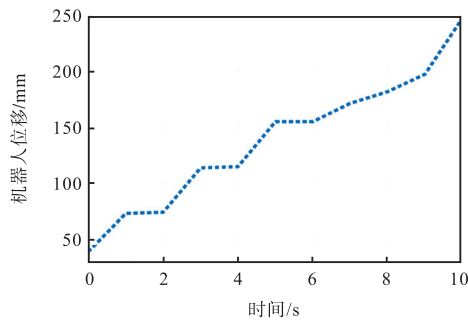
Fig.18 Displacement and locomotion sequence of the robot's synchronous gait

图 19 为机器人翻滚步态的位移与运动序列. 由图 19 可知,机器人在 1~3 s 时,会因为与地面的摩擦力变化而产生滑动,但机器人能够依照理论实现向前运动.

图 20 为机器人蜷曲-伸展步态的位移与运动序列. 由图 20(b)可以看出,机器人运动与理论分析基本一致,机器人在移动过程中会出现一定的滑动.



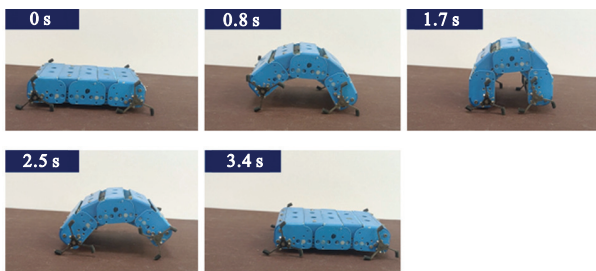
(a) 机器人翻滚步态运动序列



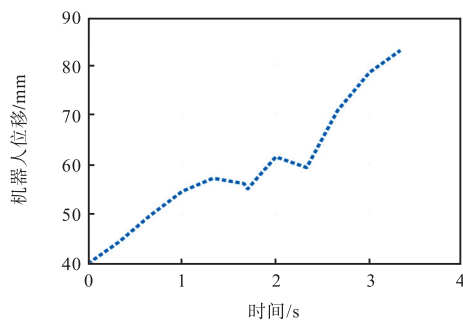
(b) 机器人翻滚步态位移

图 19 机器人翻滚步态的位移与运动序列

Fig.19 Displacement and locomotion sequence of the robot's rolling gait



(a) 机器人蜷曲-伸展步态运动序列



(b) 机器人蜷曲-伸展步态位移

图 20 机器人蜷曲-伸展步态的位移与运动序列

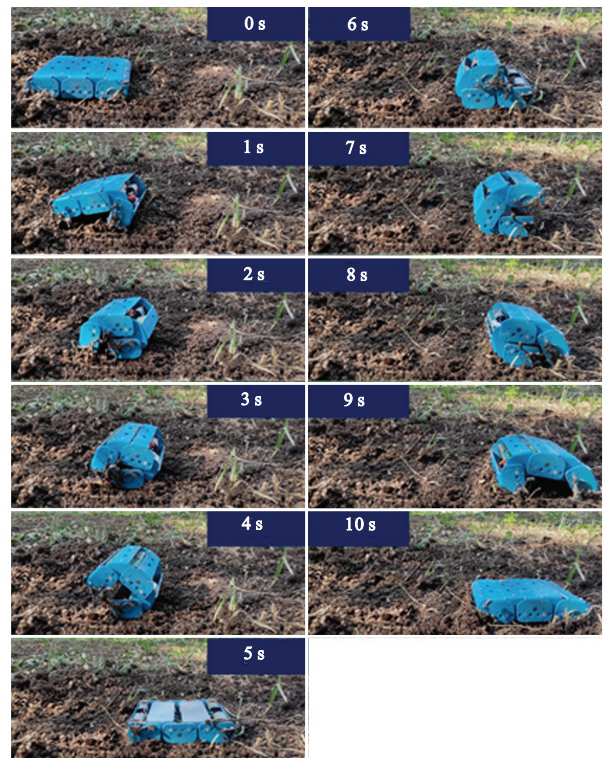
Fig.20 Displacement and locomotion sequence of the robot's coiling-extension gait

通过以上 3 个实验对比可以发现同步步态最适合在平地上运动.

图 21 为机器人在松软地形下的运动序列. 其中图 21(a)、(b)为机器人在同一块松软地形上进行的实验. 在图 22(a)中机器人以同步步态运动一段时间后,其位移基本不变,且移动速度相对于同步步态在平地上时下降很多. 图 22(b)为机器人以翻滚步态在松软地形上的位移,可见机器人的翻滚步态能够发挥作用. 由于轮腿在松软地形上不发挥作用,因此一个周期内的位移相对于翻滚步态在平地上略有减少.



(a) 同步步态在松软地形的运动



(b) 翻滚步态在松软地形的运动

图 21 机器人在松软地形上的运动序列

Fig.21 Locomotion sequence of robot movement on soft terrain

图 23 为机器人在多种角度上升坡度上的运动序列,实验中机器人处于蜷曲状态时蜷曲角度相同. 图 24 为机器人在上升坡度上的位移,图例中的 a~f 对应图 23(a)~(f)的上坡运动. 结合图 23、24,可见机身越长爬坡的最大角度越大,当 $L_b = 80\text{ mm}$ 、 $\mu = 1$ 时,机器人最大爬坡角度可达 44° .

图 25、图 26 分别为机器人在下降坡度上的运动序列与位移. 在 0~5 s 时机器人以同步步态行进到

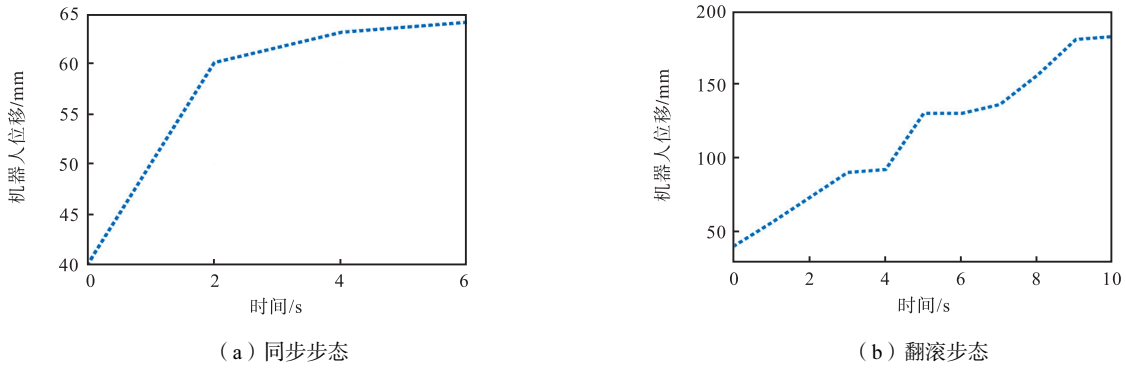


图 22 机器人在松软地形上的位移
Fig.22 Displacement of the robot on soft terrain

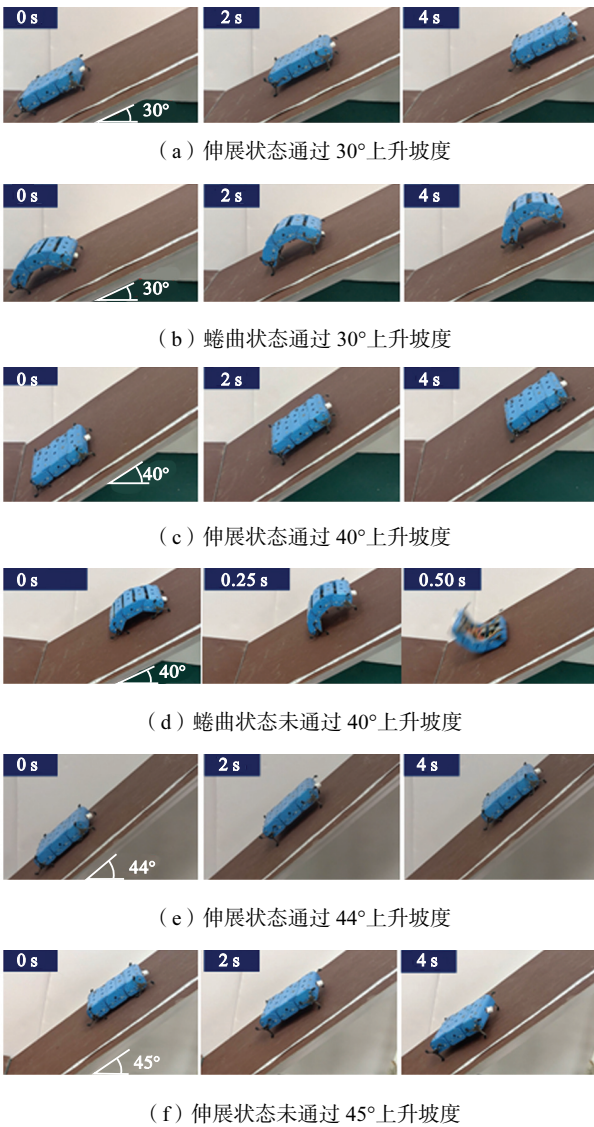


图 23 机器人在不同角度上升坡度上的运动序列
Fig.23 Locomotion sequence of the robot ascending slopes of different angles

下降坡度上. 在 6 ~ 10 s 时机器人以蜷曲-伸展步态进行蜷曲并在重力的作用下完成滚动直至静止. 在 11 ~ 16 s 时机器人以翻滚步态中后半周期的运动实现姿态调整. 可见机器人在下坡时能够实现滚动.

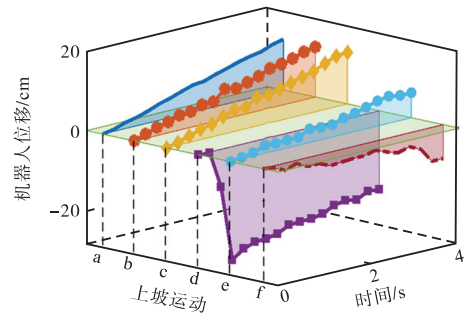


图 24 机器人在上升坡度上的位移
Fig.24 Displacement of the robot ascending slopes

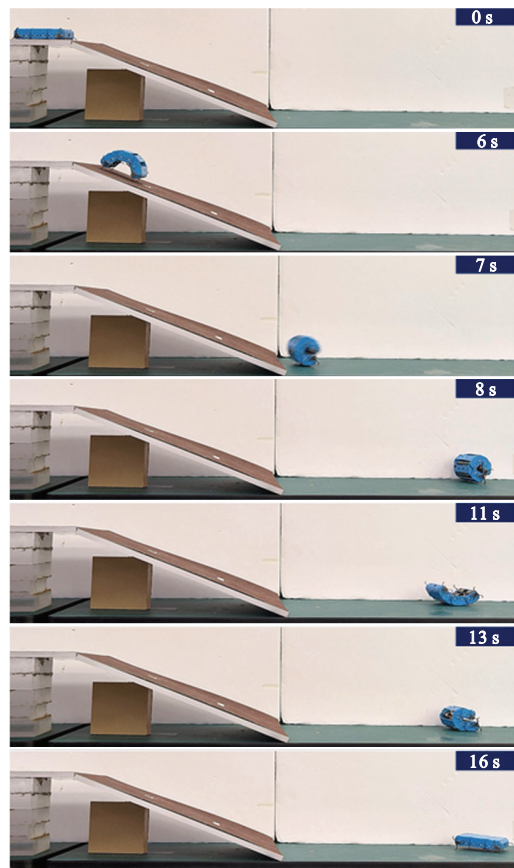


图 25 机器人在下降坡度上的运动序列
Fig.25 Locomotion sequence of the robot descending a slope

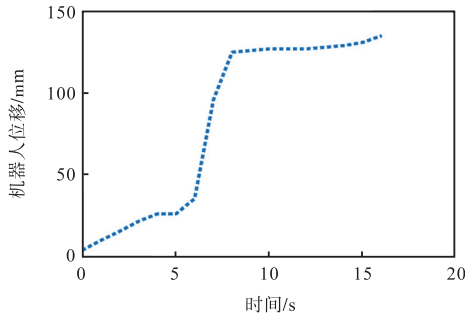
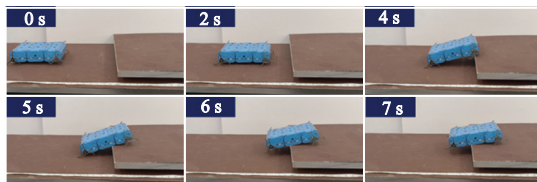


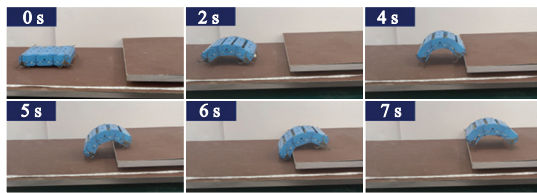
图 26 机器人在下降坡度上的位移

Fig.26 Displacement of the robot descending a slope

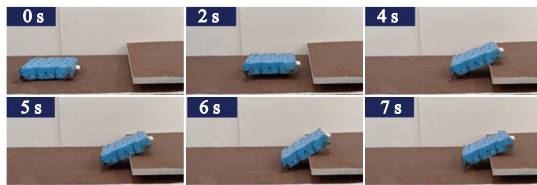
图 27 中展示了多组机器人以不同状态跨越障碍物的实验. 图 28 为机器人跨越障碍物的位移, 图例



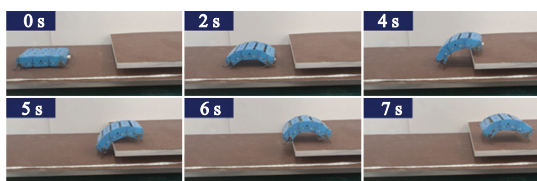
(a) $H = 20\text{ mm}$ 时伸展状态通过台阶实验



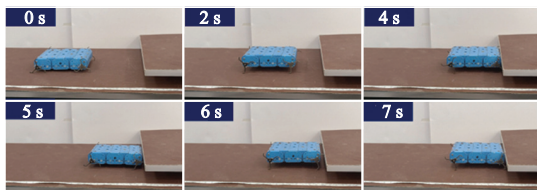
(b) $H = 20\text{ mm}$ 时蜷曲状态通过台阶实验



(c) $H = 28\text{ mm}$ 时伸展状态未通过台阶实验



(d) $H = 28\text{ mm}$ 时蜷曲状态通过台阶实验



(e) $H = 29\text{ mm}$ 时机器人越障极限实验

图 27 机器人以不同步态跨越障碍物的运动序列

Fig.27 Locomotion sequence of the robot crossing obstacles using different gaits

中 a~e 对应图 27(a)~(e) 的实验. 结合图 27 与图 28, 可以认为当机器人完全伸展时对跨越障碍物是不利的, 当机器人蜷曲一定程度时机器人可顺利跨越障碍物. 当 $H = 29\text{ mm}$ 时, 障碍物尺寸超过轮腿越障的极限尺寸, 机器人跨越障碍物的极限高度为 28 mm .

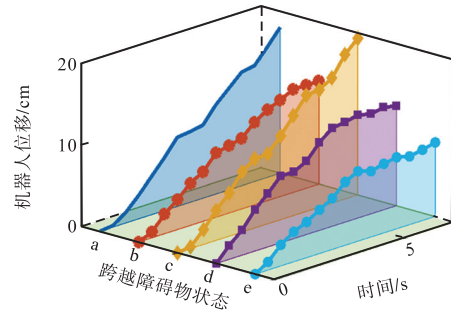


图 28 机器人跨越障碍物的位移

Fig.28 Displacement of the robot crossing obstacles

5 结 语

本文提出了一种具有多种运动模式的轮腿移动机器人, 该机器人可实现 3 种运动步态: 同步步态、翻滚步态和蜷曲-伸展步态. 在研究了一般轮腿移动机器人尺寸参数的矛盾之后进行了机械结构的详细设计. 在此基础上, 实现了机器人基于运动学的运动步态设计. 基于该机器人的运动步态设计, 对各运动模式在 5 种典型地形(平坦地面、松软地形、上升坡度、下降坡度与障碍物)下的运动进行了分析, 探究了身长对机器人移动性能的影响, 为运动控制提供指导. 最后, 通过实验验证了本文中机器人的运动能力. 实验结果表明, 机器人可以有效地使用 3 种步态通过不同的地形, 与现有轮腿式移动机器人对比, 本文机器人能够适应 5 种地形, 处于较高水平. 机器人在平坦地形、上升坡度及障碍物地形下采用同步步态进行运动, 在松软地形下采用翻滚步态进行运动, 在下降坡度地形运动时采用蜷曲-伸展步态运动, 且机器人能够跨越的上升坡度的最大角度为 44° . 本文还解决了机器人在运动过程中机身与障碍物发生碰撞的问题, 增加了机器人的运行效率, 且跨越障碍物的极限高度为 28 mm . 未来的工作将重点放在机器人的动态规划上, 以改善其在非结构化地形中的动力学性能(如能耗、负载能力等).

参考文献:

[1] Niroui F, Zhang K C, Kashino Z, et al. Deep reinforcement learning robot for search and rescue applications : Exploration in unknown cluttered environ-

- ments[J]. IEEE Robotics and Automation Letters, 2019, 4(2): 610-617.
- [2] Hougen D F, Benjaafa S, Bonney J C, et al. A miniature robotic system for reconnaissance and surveillance[C]//IEEE International Conference on Robotics & Automation. San Francisco, USA, 2000: 501-507.
- [3] Picardi G, Chellapurath M, Lacoconi S, et al. Bioinspired underwater legged robot for seabed exploration with low environmental disturbance[J]. Science Robotics, 2020, 5(42): 33022623.
- [4] Velimirovic A, Velimirovic M, Hugel V, et al. A new architecture of robot with “wheels-with-legs(WWL)” [C]//1998 5th International Workshop on Advanced Motion Control. Coimbra, Portugal, 1998: 434-439.
- [5] Altendorfer R, Moore N, Komsuoglu H, et al. RHex: A biologically inspired hexapod runner[J]. Autonomous Robots, 2001, 11(3): 207-213.
- [6] Quinn R D, Offi J T, Kingsley D A, et al. Improved mobility through abstracted biological principles[C]//IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Lausanne, Switzerland, 2002: 2652-2657.
- [7] Eich M, Grimminger F, Kirchner F. A versatile stair-climbing robot for search and rescue applications [C]//2008 IEEE International Workshop on Safety, Security and Rescue Robotics. Sendai, Japan, 2008: 35-40.
- [8] Oh S, Kim H, Jeon S, et al. Design of a mobile robot with 2-DOF compliant wheel-legs by using a linear spring[J]. Microsystem Technologies, 2023, 29(8): 1189-1196.
- [9] Liu R, Yao Y A. A novel serial-parallel hybrid worm-like robot with multi-mode undulatory locomotion[J]. Mechanism & Machine Theory, 2019, 137: 404-431.
- [10] Cao R X, Gu J, Yu C, et al. OmniWheg: An omnidirectional wheel-leg transformable robot[EB/OL]. <https://arxiv.org/abs/2203.02118>, 2022-03-04.
- [11] Ryu S, Lee Y, Seo T W. Shape-morphing wheel mechanism for step climbing in high speed locomotion[J]. IEEE Robotics and Automation Letters, 2020, 5(2): 1977-1982.
- [12] Niu J Y, Wang H B, Shi H M, et al. Study on structural modeling and kinematics analysis of a novel wheel-legged rescue robot[J]. International Journal of Advanced Robotic Systems, 2018, 15(1): 1-17.
- [13] Smith J A, Sharf I, Trentini M. PAW: A hybrid wheeled-leg robot[C]//IEEE International Conference on Robotics & Automation. Orlando, USA, 2006: 4043-4048.
- [14] Wilcox B H, Litwin T, Biesiadecki J, et al. ATHLETE: A cargo handling and manipulation robot for the moon[J]. Journal of Field Robotics, 2007, 24(5): 421-434.
- [15] Medeiros V S, Jelavic E, Bjelonic M, et al. Trajectory optimization for wheeled-legged quadrupedal robots driving in challenging terrain[J]. IEEE Robotics and Automation Letters, 2020, 5(3): 4172-4179.
- [16] Bjelonic M, Bellicoso D, Tiryaki M E, et al. Skating with a force controlled quadrupedal robot[C]//IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Madrid, Spain, 2018: 7555-7561.

(责任编辑: 王晓燕)