

DOI: 10.3901/JME.2022.03.065

一种新型可变形轮腿式机器人的设计与分析^{*}

刘 超^{1,2} 谭稀岑^{1,2} 姚燕安^{1,2} 付志洋^{1,2}

(1. 北京交通大学机械与电子控制工程学院 北京 100044;

2. 载运工具先进制造与测控技术教育部重点实验室(北京交通大学) 北京 100044)

摘要: 提出一种新型可变形轮腿式地面移动机器人, 采用相同动力源实现轮式和腿式两种移动模式。将 Chebyshev 机构与平行四边形机构结合, 提出了具有两种单自由度运动形式的单环闭链 2RP3R 变胞机构, 进行了构型设计和运动学分析。将 2 个单环闭链变胞机构构造成轮腿式移动模块, 进而构建一种可变形轮腿式机器人。机器人具有 256 种运动形式, 这些运动形式均采用相同的动力源, 实现多足切换, 通过不同高度的空间, 在曲柄与机架共线时进行移动模式切换, 实现倾倒后恢复。然后, 分析了机器人的移动性能, 得到腿式模式下的平均越障能力和两种模式下的平均速度比。建立虚拟样机模型, 完成了机器人平地行走、越障、转向和模式切换仿真试验。研制一台样机, 进行了两种模式下的移动试验, 验证了机器人方案的可行性。

关键词: 可变形; 轮腿式机器人; 单环闭链机构; 变胞机构

中图分类号: TP242

Design and Analysis of a Novel Deformable Wheel-legged Robot

LIU Chao^{1,2} TAN Xicen^{1,2} YAO Yanan^{1,2} FU Zhiyang^{1,2}

(1. School of Mechanical and Electronic Control Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044;

2. Key Laboratory of Vehicle Advanced Manufacturing,

Measuring and Control Technology (Beijing Jiaotong University), Ministry of Education, Beijing 100044)

Abstract: A novel deformable wheel-legged ground mobile robot is proposed, which moves in wheeled and legged modes by the same power. Firstly, a single-loop closed-chain 2RP3R metamorphic mechanism is proposed by combining Chebyshev mechanism with parallelogram mechanism, which realizes two single-freedom motion forms. The configuration design and kinematics analysis are carried out. Secondly, a novel deformable wheel-legged robot is constructed by wheel-legged mobile modules which are composed of two single-loop closed-chain metamorphic mechanisms. The robot has 256 motion forms which are achieved through the same power. It can switch between multi-legged states and cross through the space at different heights. The mode-switching is carried out when the crank is collinear with the rack so that the recovery from overturning is achieved. Thirdly, the mobility of the robot is analyzed, and the average obstacle-crossing ability in the legged mode and the average speed ratio in the two modes are obtained. Lastly, the virtual prototyping model is established and the simulations of level-moving, obstacle-crossing, steering and mode-switching are completed. A prototype is fabricated, and the feasibility of the idea is verified by carrying out moving experiments in the two modes.

Key words: deformable; wheel-legged robot; single-loop closed-chain mechanism; metamorphic mechanism

0 前言

轮腿式机器人^[1-3]能够以轮式机器人的形式在

结构化路面上高速高效移动, 又能够以腿式机器人的形式在非结构化路面上跨越障碍, 具有灵活机动的特点。通常, 轮腿式机器人的轮子和腿部机构具有独立的驱动电机, 将轮子安装在腿部机构或机身。

① 轮子安装在腿部机构末端, 通过轮子锁死实现轮-腿模式切换。例如: NAGANO 等^[4]研制了一种

^{*} 中央高校基本科研业务费专项资金(2019JBM046)资助项目。20210527 收到初稿, 20211109 收到修改稿

由具有 3 个转动关节的开链腿部机构组成的四轮四腿式机器人; MORIHIRO 等^[5]研制了一种由具有 2 个转动关节的开链腿部机构组成的六轮六腿式机器人; 马泽润等^[6]研制了一种由交叉四边形腿部机构组成的六轮六腿式机器人; 陈志华等^[7~8]研制了一种基于 Stewart 型并联腿机构的六轮六腿式机器人。

② 轮子安装在机身或腿部连杆上, 通过腿部机构变形实现轮-腿模式切换。例如: LU 等^[9]将轮子安装在机身, 研制了一种由开链腿部机构组成的四轮四腿式机器人; 张程煜等^[10]将轮子安装在腿部机构的尾杆上, 研制了一种由具有 3 个转动关节的开链腿部机构组成的六轮六腿式机器人; 王泽彬^[11]将轮子安装在六杆七副闭链腿机构的小腿杆上, 研制了一种闭链轮腿式变胞机器人。特别地, WEI 等^[12]研制了一种基于 Klann 连杆机构的可重构闭链四轮八腿式机器人, 轮子由四个腿杆组成, 腿式、轮式移动和模式切换均采用独立的驱动电机。这类机器人地形适应能力强, 轮子采用独立的驱动, 增加了控制系统的复杂性。

此外, 还有部分轮腿式机器人的轮子和腿部机构共用相同的驱动电机, 通过相同驱动即可实现轮式和腿式移动。SUN 等^[13]研制了一种基于三辐条腿式机构的可变形两轮两腿式机器人, 通过偏置曲柄滑块机构实现轮-腿切换。CHEN 等^[14]研制了一种基于半圆轮腿部结构的可变形四轮四腿式机器人, 通过半轮、整轮之间转换实现轮-腿切换。KIM 等^[15]研制了一种基于平面连杆机构的自适应两轮两腿式机器人, 通过钉槽触发装置实现轮-腿切换。这类机器人轮子和腿部机构采用相同的电机驱动, 降低了控制的复杂性, 地形适应能力和承载能力一般。

单闭链机构控制简单, 运动稳定, 承载能力强。本文利用 Chebyshev 机构末端能够产生周期性的足端轨迹^[16], 平行四边形机构能够产生周期性的圆形运动轨迹^[17-18], 将 Chebyshev 机构和平行四边形机构结合, 提出一种单环闭链变胞机构。机构具有 Chebyshev 和平行四边形两种运动形式。基于单环闭链变胞机构, 构造轮腿式移动模块, 进一步构建新型可变形四轮八腿式机器人。理论上机器人具有 256 种运动形式, 选择其中两种形式作为腿式和轮式移动模式; 在曲柄与机架共线时进行模式切换, 提高机器人对地形环境的适应能力。对单环闭链变胞机构进行构型设计和运动学分析, 对可变形轮腿式机器人进行移动性能分析, 最后进行虚拟样机仿真和物理样机试验, 验

证机器人方案的可行性。

1 单环闭链变胞机构

1.1 构型设计

在 Chebyshev 机构的基础上增加一个 P 副和一个 R 副, 提出一种单环闭链 2RP3R 变胞机构, 具有 Chebyshev 和平行四边形两种运动形式。如图 1 所示, 单环闭链变胞机构包括: 机架 FA 、曲柄 AB 、调节连杆 BC 、调节腿杆 CD 、辅助连杆 DE 和变形连杆 EF , 依次通过运动副 J_{R1} 、 J_{R2} 、 J_P 、 J_{R3} 、 J_{R4} 和 J_{R5} 相连。按式(1)^[19]求得机构自由度为 3, 需要 3 个驱动。动力电机 M_1 安装在机架 FA 和曲柄 AB 之间, 为机构提供动力输入, 辅助电机 M_2 安装在辅助连杆 DE 和变形连杆 EF 之间, 调整两杆件间的夹角大小, 调节电机 M_3 安装在移动副 J_P 上, 调节转动副 J_{R2} 和 J_{R3} 间距离。

$$F = 3n - 2p_l - p_h \quad (1)$$

式中, n 为活动构件数; p_l 为低副数; p_h 为高副数。

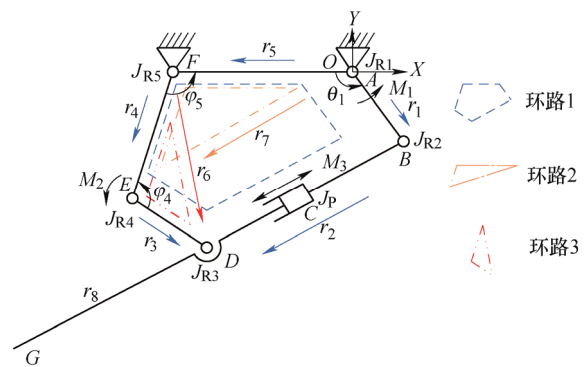


图 1 机构简图

当机构处于两种运动形式时, 如图 2 所示, 按式(1)求得自由度均为 1。在运动形式切换过程中, 辅助电机 M_2 和调节电机 M_3 驱动机构实现平行四边形构型和 Chebyshev 构型间转换, 分别使转动副 J_{R4} 、移动副 J_P 锁住失效和转动副 J_{R5} 、移动副 J_P 锁住失效, 有效杆件数在 4 和 6 间发生两次变化, 自由度数目在 1 和 3 间发生两次变化。

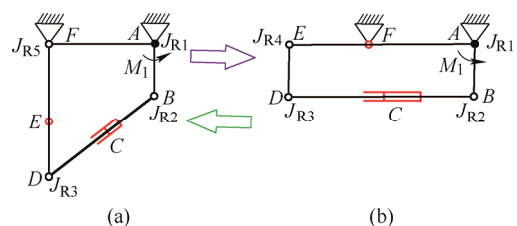


图 2 运动形式切换示意图

1.2 运动学分析

以转动副 J_{R1} 作为坐标原点 O , 建立如图 1 所示的直角坐标系 OXY 。令 $r_i (i=1, 2, \dots, 5)$ 为各杆件转动副间的运动尺寸, r_6 为转动副 J_{R3} 与 J_{R5} 间运动尺寸, r_7 为转动副 J_{R1} 与 J_{R4} 间运动尺寸, r_8 为转动副 J_{R3} 与末端点 G 间运动尺寸, θ_i 为 $r_i (i=1, 2, \dots, 7)$ 对应向量与 x 轴之间的夹角, 其中曲柄 AB 输入角度 $\theta_1=f(t)$, 输入范围为 $0^\circ \sim 360^\circ$, φ_4 为辅助连杆 DE 和变形连杆 EF 之间的夹角, φ_5 为变形连杆 EF 和机架 FA 之间的夹角。机构杆长及夹角关系

$$r_1:r_3:r_4:r_5:r_8=1:1:1.5:2:2.5 \quad (2)$$

$$r_2:r_1=2.5 \text{ 或 } 3.5 \quad (3)$$

$$\cos \varphi_4 = \frac{r_3^2 + r_4^2 - r_6^2}{2r_3r_4} \quad (4)$$

$$\cos \varphi_5 = \frac{r_4^2 + r_5^2 - r_7^2}{2r_4r_5} \quad (5)$$

建立环路矢量方程如下。

环路一

$$r_1 + r_2 - r_3 - r_4 - r_5 = 0 \quad (6)$$

环路二

$$r_4 + r_5 - r_7 = 0 \quad (7)$$

环路三

$$r_3 + r_4 - r_6 = 0 \quad (8)$$

(1) Chebyshev 运动形式。当辅助连杆 DE 和变形连杆 EF 共线时, 转动副 J_{R4} 锁死, 转动副 J_{R2} 和 J_{R3} 间的运动尺寸为曲柄长度的 2.5 倍, 移动副 J_P 锁死, 如图 2a 所示。

环路一矢量方程可以写成

$$r_1 + r_2 - r_5 - r_6 = 0 \quad (9)$$

对式(9)进行欧拉分解可得

$$r_1 \cos \theta_1 + r_2 \cos \theta_2 = r_5 + r_6 \cos \theta_6 \quad (10)$$

$$r_1 \sin \theta_1 + r_2 \sin \theta_2 = r_6 \sin \theta_6 \quad (11)$$

联立式(10)、(11)求得 θ_2 和 θ_6 。式(10)、(11)对时间求一阶导数和二阶导数, 得到调节连杆 BC 与调节腿杆 CD 的组合连杆 BD 角速度 ω_2 和角加速度 α_2 , 辅助连杆 DE 与变形连杆 EF 的组合连杆 DF 角速度 ω_6 和角加速度 α_6 。

调节腿杆 CD 末端点 G 的位置为

$$x_F = -r_1 \cos \theta_1 - r_2 \cos \theta_2 - r_8 \cos \theta_2 \quad (12)$$

$$y_F = -r_1 \sin \theta_1 - r_2 \sin \theta_2 - r_8 \sin \theta_2 \quad (13)$$

(2) 平行四边形运动形式。当变形连杆 EF 与机架 FA 共线时, 转动副 J_{R5} 锁死, 转动副 J_{R2} 和 J_{R3} 间的运动尺寸为曲柄长度的 3.5 倍, 移动副 J_P 锁死, 如图 2b 所示。

环路一矢量方程可以写成

$$r_1 + r_2 - r_3 - r_7 = 0 \quad (14)$$

由几何关系得到

$$\theta_2 = 0 \quad \theta_3 = \theta_1 \quad \omega_2 = 0 \quad (15)$$

调节腿杆 CD 末端点 G 的位置为

$$x_F = -r_1 \cos \theta_1 - r_2 - r_8 \quad (16)$$

$$y_F = -r_1 \sin \theta_1 \quad (17)$$

式(12)、(13)和式(16)、(17)分别对时间求一阶导数和二阶导数, 得到在两种运动形式下末端点 G 的速度和加速度。给定算例参数如表 1 所示, 曲柄匀速转动, 旋转角度 $\theta_1=300t$, 得到末端点 G 的速度和加速度变化如图 3、图 4 所示, 平行四边形形式下末端点 G 的速度和加速度为定值, 相比于 Chebyshev 形式运动过程更稳定。

表 1 算例参数

设计变量	数值	设计变量	数值
r_1/mm	50	r_4/mm	75
r_2/mm	125 或 175	r_5/mm	100
r_3/mm	50	r_8/mm	125

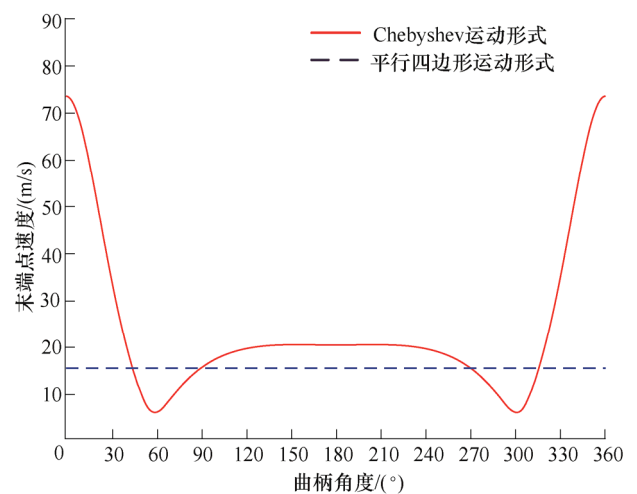
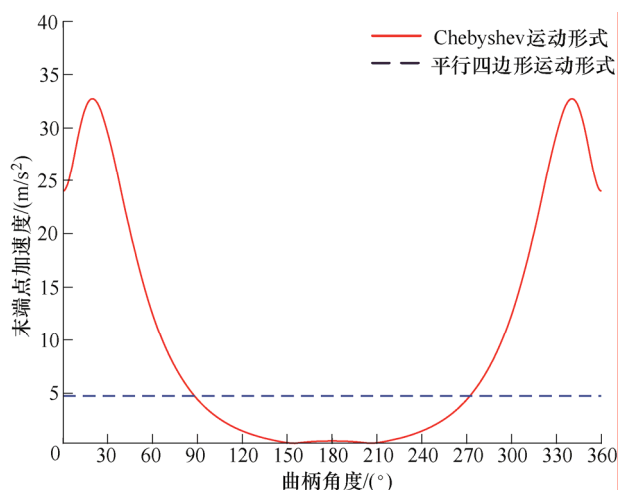


图 3 末端点 G 速度变化

图 4 末端点 G 加速度变化

将单环闭链变胞机构设计为如图 5a 所示的连杆式变胞机构, 将其中的曲柄 AB 设计为圆轮形状即曲柄轮, 组成如图 5b 所示的轮腿式变胞机构。以连杆式变胞机构和轮腿式变胞机构为基本单元, 构造新型的地面移动机器人。

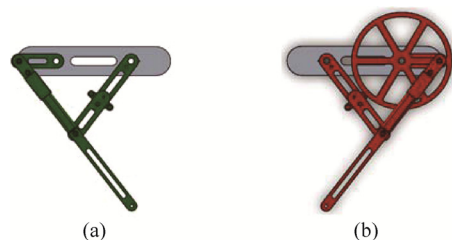


图 5 单环闭链变胞机构

2 机器人方案设计

2.1 轮腿式移动模块

将连杆式变胞机构和轮腿式变胞机构并排布置, 共用一个动力电机, 曲柄间相位差为 180° , 构造如图 6 所示的轮腿式移动模块。

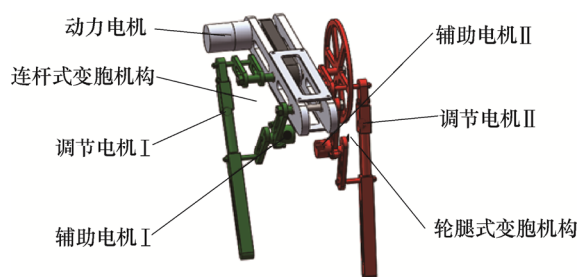


图 6 轮腿式移动模块设计

连杆式变胞机构和轮腿式变胞机构均安装了辅助电机和调节电机, 能够独立完成运动形式切换, 则轮腿式移动模块具有 4 种运动形式, 如图 7 所示。图 7a 为 $2Cv$ 运动形式(Cv 表示单环闭链变胞机构处

于 Chebyshev 运动形式), 图 7b 为 $2Pm$ 运动形式(Pm 表示单环闭链变胞机构处于平行四边形运动形式), 图 7c 和图 7d 为 $1Cv1Pm$ 运动形式。

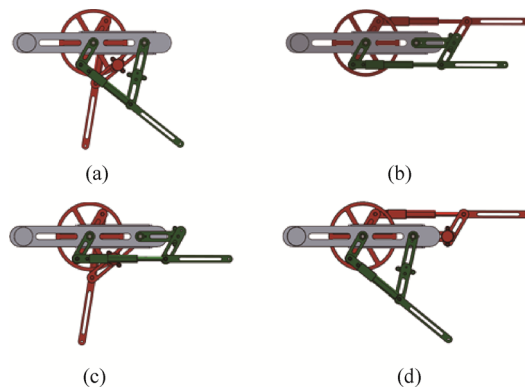


图 7 轮腿式移动模块运动形式

当曲柄与机架间夹角 $\theta_1 \in [0^\circ, 180^\circ]$ 时, 两种运动形式下的变胞机构均能够完成相互切换; 当夹角 $\theta_1 \in (180^\circ, 360^\circ)$ 时, 由于闭链机构运动空间的限制, 两种运动形式下的变胞机构无法完成相互切换, 如表 2 所示。当曲柄与机架不共线时, 必然存在一个变胞机构无法实现运动形式切换, 因此在曲柄与机架共线时进行模式切换。

表 2 变胞机构运动形式切换表

曲柄转角	运动形式	
	Cv	Pm
$0^\circ < \theta_1 < 180^\circ$	✓	✓
$\theta_1 = 0^\circ$ 或 180°	✓	✓
$180^\circ < \theta_1 < 360^\circ$	×	×

2.2 可变形轮腿式机器人

将四个轮腿式移动模块对称布置, 构建可变形轮腿式机器人, 如图 8 所示。通过一个驱动电机实现同侧两个移动模块运动, 即整个机器人仅需要两个驱动电机实现移动。

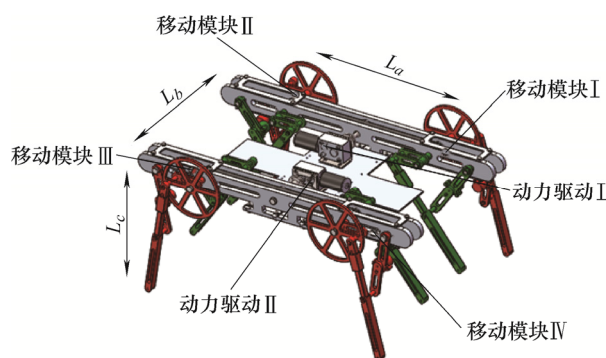


图 8 机器人总体设计

理论上可变形轮腿式机器人具有 256 种运动形

式, 根据每个变胞机构的运动形式不同, 分为 8 类如表 3 所示。其中 8Cv 运动形式下为八腿式机器人^[20], 6Cv2Pm 运动形式下为六腿式机器人, 4Cv4Pm 运动形式下为四腿式机器人。如图 9 所示, 机器人能够在四腿式形式和八腿式形式之间转换。

表 3 机器人运动形式

运动形式	种类数	运动形式	种类数	运动形式	种类数
8Cv	1	5Cv3Pm	56	2Cv6Pm	28
7Cv1Pm	8	4Cv4Pm	70	1Cv7Pm	8
6Cv2Pm	28	3Cv5Pm	56	8Pm	1

机器人将 8Cv 运动形式作为腿式移动模式, 每个轮腿式移动模块的连杆式变胞机构和轮腿式变胞机构末端均为足端, 通过足端依次着地实现腿式移动, 整个机器人至少有四个足端同时着地, 确保移动稳定性。将 8Pm 运动形式作为轮式模式, 四个曲柄轮同时着地实现轮式移动。

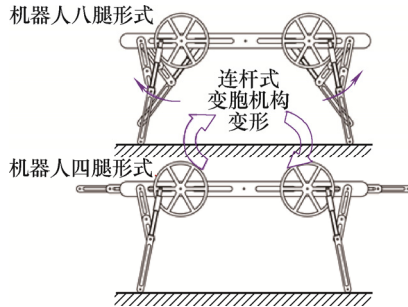


图 9 八腿-四腿切换

机器人移动模式切换过程包括腿-轮切换和轮-腿切换, 如图 10 所示移动模块 I ~ IV 中的连杆式变胞机构和轮腿式变胞机构分别进行模式切换, 四个足端支撑地面, 无侧向滑移。机器人在切换过程中仅存在质心高度变化, 能够具有不同高度空间的通过性能。腿式行走时能够通过的最小空间高度 $h_{\min 1}$, 即机器人高度 L_c 与质心波动 h_b 之和。轮式移动时曲柄轮与地面接触, 能够通过最小空间高度 $h_{\min 2}$, 即曲柄轮直径。

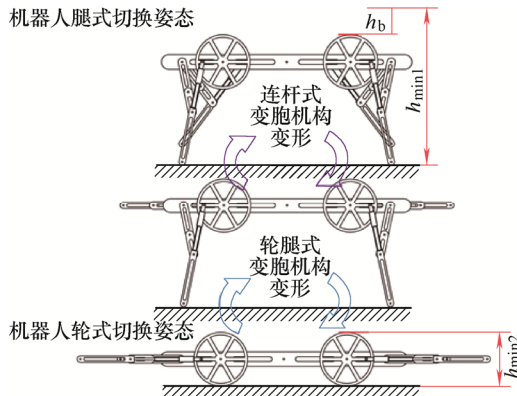


图 10 移动模式切换

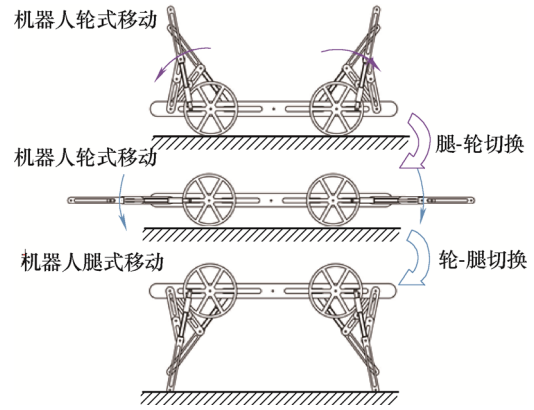


图 11 倾倒后恢复策略

机器人在曲柄与机架共线时进行模式切换, 使机器人具有倾倒后恢复能力^[21]。如图 11 所示, 机器人在任意移动模式下发生倾倒, 都能够选择腿式或轮式模式继续移动。

3 移动性能分析

3.1 越障概率分析

轮腿式移动模块在腿式模式下, 单周期内足端生成一对互相交互的行走轨迹, 其中交错区域为跨越区间, 如图 12a 所示。令连杆式和轮腿式变胞机构分别为变胞机构 I 和 II, 当变胞机构 II 支撑在点 K_1 时, 变胞机构 I 处于跨越相^[22], 足端点向前移动, 跨越障碍物并落到点 K_2 。接下来变胞机构 I 支撑在点 K_2 时, 变胞机构 II 处于跨越相, 足端点向前移动, 跨越障碍物并落到下一个支撑点, 这样就完成了轮腿式移动模块对障碍物的跨越过程。

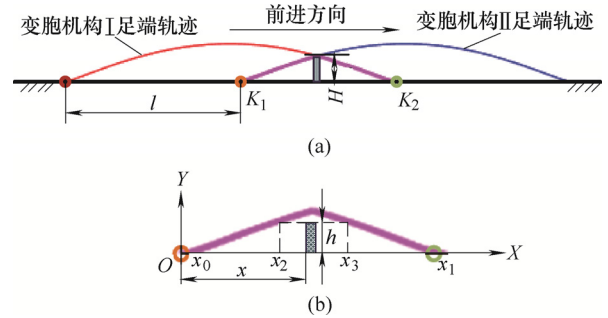


图 12 轮腿式移动模块越障轨迹

腿式移动模块的跨越区间如图 12b 所示, 在跨越过程中, 支撑点 K_1 与垂直墙之间的水平距离 x 在 $[x_0, x_1]$ 之间等概率取值, x 服从均匀分布, 即 $x \sim U[x_0, x_1]$ 。跨越曲线为 x 的函数 $y(x)$, 当垂直墙高度 $h \in (0, H)$ 时, 轨迹曲线上存在两个点 $(x_2, 0)$ 和 $(x_3, 0)$, 并且满足关系 $y(x_2) = y(x_3) = h$ 。

当足端的跨越曲线完全包围障碍物的外部轮廓

且无交叉时,足端实现与障碍物无碰撞跨越,概率密度表示为

$$g(x) = \begin{cases} \frac{1}{x_1 - x_0} & x_0 \leq x \leq x_1 \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (18)$$

当垂直墙的位置落到 $[x_2, x_3]$ 之间时,轮腿式移动模块最大跨越高度为 h ,越障概率表示为

$$P\{Y \geq h\} = P\{x_2 \leq x \leq x_3\} = \int_{x_2}^{x_3} \frac{1}{x_1 - x_0} dx \quad (19)$$

给定算例参数如表 1 所示,采用最小二乘法对跨越轨迹离散点进行多项式逼近,得到式(20)所示的跨越轨迹拟合函数表达式为

$$y(x) = -0.002 \ 6x^2 + 0.526 \ 0x - 2.496 \ 3 \quad (20)$$

分别将 (x_2, y) 、 (x_3, y) 代入式(20)的反函数中,可得

$$x_2 = 101.153 \ 8 - 19.611 \ 6\sqrt{24.107 \ 2 - y} \quad (21)$$

$$x_3 = 101.153 \ 8 + 19.611 \ 6\sqrt{24.107 \ 2 - y} \quad (22)$$

对于越障高度满足 $h \in (0, H)$ 时,轮腿式移动模块越障概率表示为

$$P\{Y \geq h\} = \frac{x_3(h) - x_2(h)}{x_1 - x_0} = \frac{0.203 \ 7\sqrt{24.107 \ 2 - y}}{x_1 - x_0} \quad (23)$$

将障碍物高度表示为 $h = H - y'$,随机变量 y' 表示跨越裕量,式(23)演化为

$$F(y') = \begin{cases} 0 & y' \geq H \\ 0.203 \ 7\sqrt{y'} & 0 \leq y' \leq H \\ 1 & y' \leq 0 \end{cases} \quad (24)$$

由式(24)求导后再积分得到跨越裕量 y' 的数学期望表达式

$$E(y') = \int_{-\infty}^{+\infty} y' f(y') dy' \quad (25)$$

综上分析,求得机器人的平均越障能力,即跨越垂直墙高度的数学期望为

$$E(h) = E(H - y') = H - E(y') = 16.07 \text{ mm} \quad (26)$$

3.2 移动速度分析

如图 13 所示, L_1 为腿式模式下跨步距离, d 为曲柄轮直径。假设曲柄在 t 内旋转角度 θ ,取 $\theta = 2n\pi$ ($n=1, 2, \dots$),则机器人在腿式模式下前进距离为

$$\Delta S_1 = 2nL_1 \quad (n=1, 2, \dots) \quad (27)$$

轮式模式下前进距离为

$$\Delta S_2 = nc = n\pi d \quad (n=1, 2, \dots) \quad (28)$$

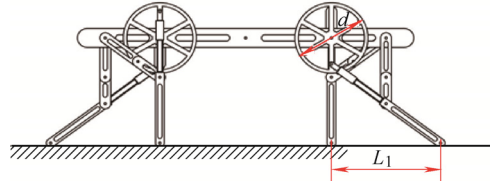


图 13 移动速度分析

根据单环闭链变胞机构的结构限制,曲柄轮半径 $R < r_2 - r_1$ 。由平均速度计算公式求得腿式模式下平均速度为

$$v_1 = \frac{\Delta S_1}{\Delta t} = \frac{2nL_1}{t} \quad (n=1, 2, \dots) \quad (29)$$

轮式模式下平均速度为

$$v_2 = \frac{\Delta S_2}{\Delta t} = \frac{n\pi d}{t} \quad (n=1, 2, \dots) \quad (30)$$

最终得到轮-腿模式下的平均速度比为

$$k = \frac{v_2}{v_1} = \frac{\pi d}{2L_1} \quad (31)$$

给定算例参数如表 1 所示,轮式模式中曲柄轮始终接触地面,曲柄轮半径 $R > r_1$,代入式(31)中求得

$$k \in \left(\frac{\pi}{4}, \frac{3\pi}{8} \right) \quad (32)$$

将 $k=1$ 代入式(32)中,求得 Δd 为 27.32 mm。

综上分析,当曲柄轮直径 $d=134$ mm 时,机器人轮式与腿式模式下移动速度比为 1.05。

4 仿真分析

根据表 1 中的算例参数在 ADAMS 中搭建虚拟样机模型,进行平地移动,跨越垂直墙,倾倒后移动,攀爬斜坡和模式切换仿真试验。

设置机器人两侧动力电机转速为 90°/s,对两种模式下进行平地移动仿真(图 14、15)。如图 14 所示为腿式模式下的移动过程,步长为 200 mm,当曲柄旋转一周时,质心向前移动 400 mm,平均移动速度为 100 mm/s,动力电机扭矩变化如图 16 所示。如图 15 所示为轮式模式下的移动过程,曲柄轮直径为 134 mm,当曲柄旋转一周时,质心向前移动 420.97 mm,移动速度为 105 mm/s,动力电机和辅助电机扭矩变化如图 17 所示,移动速度比值为 1.05。由图 16 和 17 得到,动力电机扭矩最大值约为 3.5 N·m,辅助电机扭矩最大值约为 45 N·mm。

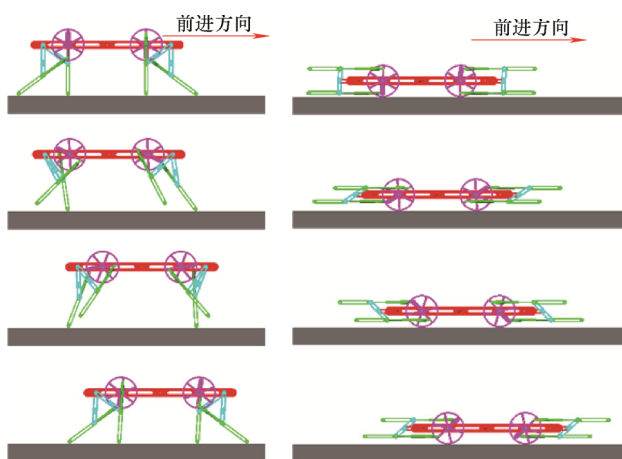


图 14 腿式移动仿真

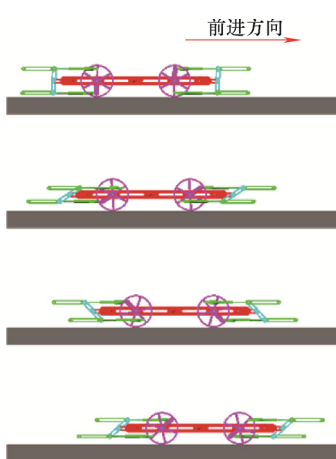


图 15 轮式移动仿真

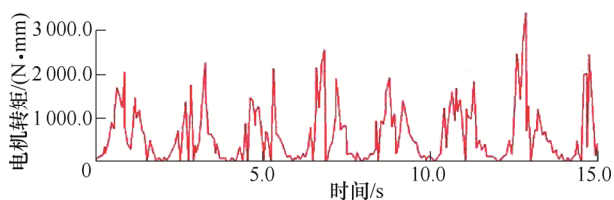


图 16 腿式模式下电机转矩变化

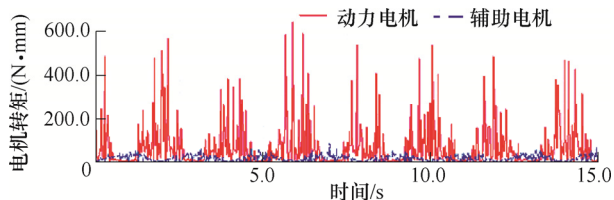


图 17 轮式模式下电机转矩变化

如图 18 所示机器人成功实现了对 16 mm 障碍物的跨越。

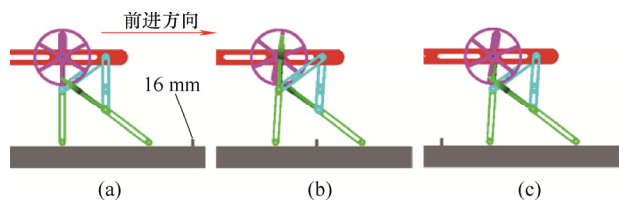


图 18 跨越障碍物仿真

如图 19 所示,当机器人在腿式模式下发生倾倒时,依然能够实现轮式移动。

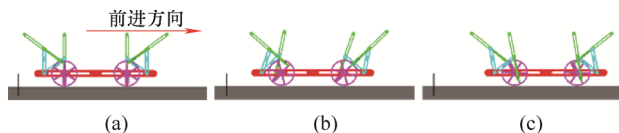


图 19 倾倒后移动仿真

设置机器人与地面间动、静摩擦系数分别为 0.3 和 0.5,对两种模式下进行攀爬斜坡仿真。如图 20 所示,机器人腿式模式下成功攀爬 23° 斜坡,轮式模式下成功攀爬 25° 斜坡。

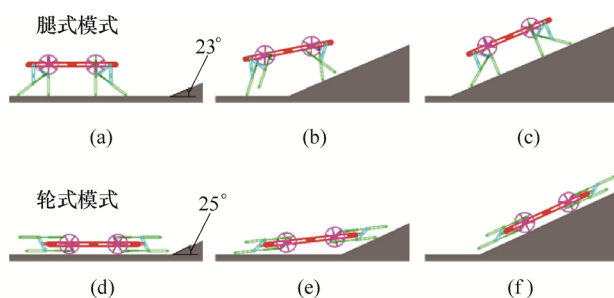


图 20 攀爬斜坡仿真

对两种模式下原地转向过程进行仿真分析,测得转向角位移和曲柄相位变化如图 21 和 22 所示。腿式模式下转向角位移呈周期性变化,当曲柄相位为 0° 和 180° 时,机器人的转向角位移分别为 2.6° 和 49.6° 。轮式模式下转向角位移呈线性变化,平均转向角速度为 $17^\circ/\text{s}$ 。

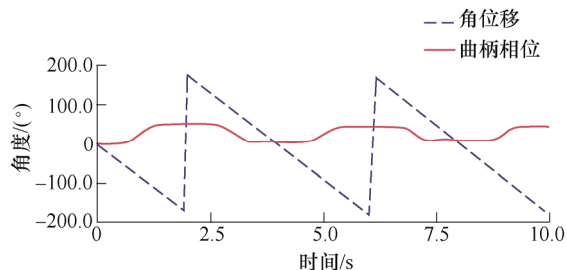


图 21 腿式模式下转向角度变化

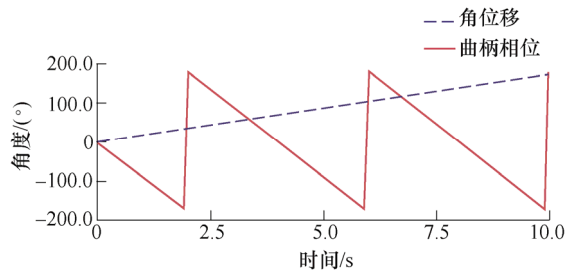


图 22 轮式模式下转向角度变化

对机器人腿-轮模式切换过程进行仿真,如图 23 所示。机身位置变化如图 24 所示,在水平方向上无明显变化,竖直方向上存在 186 mm 高度变换,验证了机器人在模式切换过程稳定,水平方向无滑移,具有不同高度空间的通过能力。

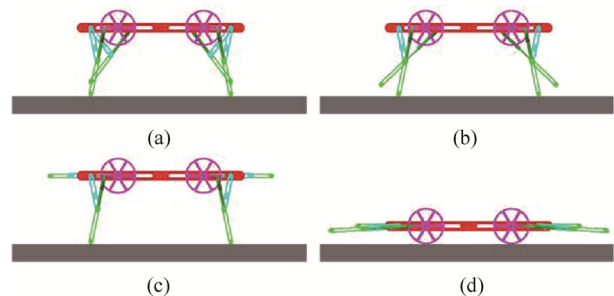


图 23 腿-轮模式切换仿真

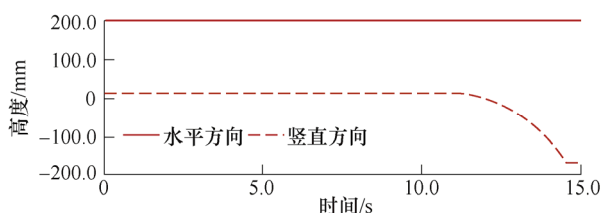


图 24 切换过程中机身高度变化

5 样机试验

研制了一台试验样机, 采用同步带作为动力传动系统, 如图 25 所示。表 4 为样机参数表, 机器人总质量为 7.15 kg, 机身为铝合金材料, 单环闭链变胞机构为碳纤维型材, 关节转轴为 304 不锈钢材料。机器人在腿式模式下八个足端同时触地时的总高度为 274 mm, 轮式模式下的总高度为 134 mm, 则两种模式下能够通过的空间高度比可达 2.39:1。

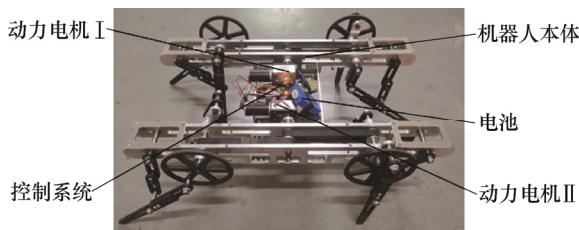


图 25 机器人物理样机图

表 4 样机参数表

参数	数值
质量/kg	7.15
材料	铝合金, 碳纤维, 不锈钢
驱动电机型号	4058GW-31ZY
电机扭矩/(kg · cm)	30.57
工作电压/V	12
高度/mm(腿/轮)	274/134

如图 26 所示样机处于腿式移动模式, 动力电机 I 和 II 同向转动, 轮腿式和连杆式变胞机构的足端依次着地, 实现腿式移动。如图 27 所示样机处于轮式移动模式, 四个曲柄轮着地, 动力电机 I 和 II 同向转动, 实现轮式移动。



图 26 腿式移动模式



图 27 轮式移动模式

进行两种模式下的移动速度试验, 如图 28 所

示。当机器人两种模式下移动相同的距离时, 测得轮式模式下的移动速度约为腿式模式下的 1.36 倍。

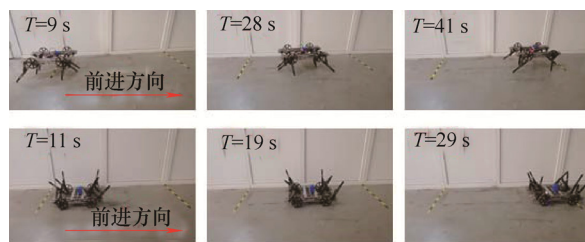


图 28 移动速度试验

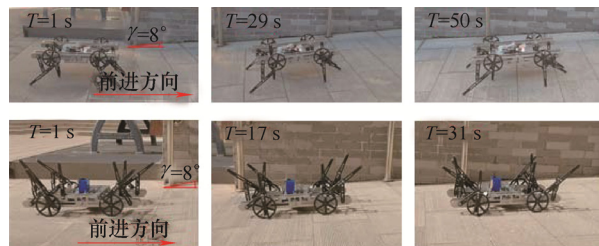


图 29 攀爬斜坡试验

进行两种模式下攀爬斜坡试验, 如图 29 所示。机器人在两种移动模式下都成功实现 8° 斜坡的攀爬, 到达斜坡上同一位置轮式模式所需时间比腿式模式更少, 爬坡效率更高。

对轮式模式下机器人进行原地转向试验, 动力电机 I 和 II 转速相同, 转向相反, 如图 30 所示。机器人平均转向速度为 9°/s, 转向过程稳定。

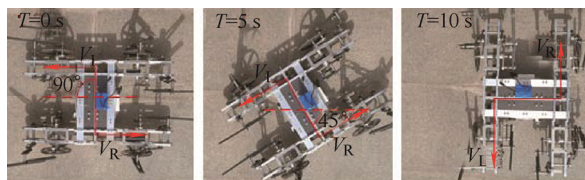


图 30 轮式原地转向试验

6 结论

(1) 将 Chebyshev 机构和平行四边形机构结合, 提出一种 3 自由度六杆单环闭链变胞机构, 进行构型设计和运动学分析。单环闭链变胞机构具有平行四边形和 Chebyshev 两种运动形式, 自由度均为 1, 即仅采用一个驱动即可实现两种运动形式。在平行四边形形式下存在奇异位置。得到了末端点 G 的位置、速度和加速度。

(2) 将 2 个单环闭链变胞机构结合, 构造轮腿式移动模块, 提出可变形轮腿式机器人, 进行了腿式模式下越障概率分析和两种模式下的移动速度分析。机器人具有 256 种运动形式, 具有不同高度空

间的通过能力, 具有倾倒后恢复和多足状态切换的能力, 得到了腿式模式下跨越垂直墙高度的数学期望和轮式与腿式模式下的平均速度比。

(3) 建立了虚拟样机模型, 进行了平地移动, 跨越垂直墙, 倾倒后移动, 攀爬斜坡, 原地转向和模式切换的仿真试验。制作了一台物理样机, 进行了平地移动、移动速度、攀爬斜坡和原地转向试验, 验证了机器人方案的可行性。

参 考 文 献

- [1] DING Xilun, LI Kejia, XU Kun. Dynamics and wheel's slip ratio of a wheel-legged robot in wheeled motion considering the change of height[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2012, 25(5): 1060-1067.
- [2] ADITYA V, CHANDYKUNJU A, MICHAEL M, et al. Amphibious wheels with a passive slip mechanism for transformation[C]// International Conference on Advanced Robotics and Mechatronics, Toyonaka: IEEE, 2019: 960-965.
- [3] LUO Yang, LI Qimin, LIU Zhangxing. Design and optimization of wheel-legged robot: Rolling-wolf[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2014, 27(6): 1133-1142.
- [4] NAGANO K, FUJIMOTO Y. The stable wheeled locomotion in low speed region for a wheel-legged mobile robot[C]// IEEE International Conference on Mechatronics, Nagoya: IEEE, 2015: 404-409.
- [5] MORIHIRO Y, TAKAHASHI N, NONAKA K, et al. Model predictive load distribution control for leg/wheel mobile robots on rough terrain[J]. International Federation of Automatic Control, 2018, 51(22): 441-446.
- [6] 马泽润, 郭为忠, 高峰. 一种新型轮腿式移动机器人的越障能力分析[J]. 机械设计与研究, 2015, 31(4): 6-15.
MA Zerun, GUO Weizhong, GAO Feng. Analysis on obstacle negotiation of a new wheel-legged robot[J]. Mechine Design and Research, 2015, 31(4): 6-15.
- [7] 陈志华, 汪首坤, 王军政, 等. 电动并联六轮足机器人的运动驱动与多模态控制方法[J]. 机器人, 2020, 42(5): 534-549.
CHEN Zhihua, WANG Shoukun, WANG Junzheng, et al. Motion drive and multi-mode control method of an electric parallel six wheel-legged robot[J]. Robot, 2020, 42(5): 534-549.
- [8] CHEN Z H, WANG S K, WANG J Z, et al. Control strategy of stable walking for a hexapod wheel-legged robot[J]. ISA Transactions, 2021, 108: 367-380.
- [9] LU Dongping, ERBAO D, LIU Chunshan, et al. Design and development of a leg-wheel hybrid robot "HyTRo-I"[C]// IEEE International Workshop on Intelligent Robots and Systems, Tokyo: IEEE, 2013: 6031-6036.
- [10] 张程煜, 郭盛, 赵福群. 新型轮腿复合机器人的运动分析及步态研究[J]. 机械工程学报, 2019, 55(15): 145-153.
ZHANG Chengyu, GUO Sheng, ZHAO Fuqun. Motion analysis and gait research of a new wheel-legged compound robot[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2019, 55(15): 145-153.
- [11] 王泽彬. 轮腿式变胞机器人的设计与仿真[D]. 北京: 北京邮电大学, 2018.
WANG Zebin. Design and simulation of metamorphic leg-wheeled robot[D]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications, 2018.
- [12] WEI Chaoran, YAO Yanan, WU Jianxu, et al. Development and analysis of a closed-chain wheel-leg mobile platform[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2020, 33(5): 72-84.
- [13] SUN Tao, XIANG Xu, SU Weihua, et al. A transformable wheel-legged mobile robot: Design, analysis and experiment[J]. Robotics and Autonomous Systems, 2017, 98: 30-41.
- [14] CHEN Shenchiang, HUANG Kejung, CHEN Weihsi. Quatttoped: A leg-wheel transformable robot[J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2014, 19(2): 730-742.
- [15] KIM Y, JUNG G, KIM H, et al. Wheel transformer: A wheel-leg hybrid robot with passive transformable wheels[J]. IEEE Transactions on Robotics, 2014, 30(6): 1487-1498.
- [16] LIONEL B, CARLOS R. Analysis and optimization of one-degree of freedom robotic legs[J]. Journal of Mechanisms and Robotics, 2014, 6(4): 1-8.
- [17] KONG Xianwen. Type synthesis of single-loop overconstrained 6r spatial mechanisms for circular translation[J]. Journal of Mechanisms and Robotics, 2014, 6(4): 1-8.
- [18] 王雁东, 唐昭, 戴建生. 连杆铰接轮腿式机器人的运动学与步态分析[J]. 机械工程学报, 2018, 54(7): 11-19.
WANG Yandong, TANG Zhao, DAI Jiansheng. Kinematics and gait analysis of a linkage-jointed wheel-legged robot[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2018, 54(7): 11-19.
- [19] 张春林, 张颖. 机械原理(英汉双语)[M]. 北京: 机械工业出版社, 2012.
ZHANG Chunlin, ZHANG Ying. Theory of machines and mechanisms (bilingual edition)[M]. Beijing: China Machine Press, 2012.

- [20] WU Jianxu, YANG Hui, LI Ruiming, et al. Design and analysis of a novel octopod platform with a reconfigurable trunk[J]. Mechanism and Machine Theory, 2021, 156: 1-19.
- [21] 秦日鹏, 徐坤, 陈佳伟, 等. 一种星球探测六足轮腿机器人的设计与运动规划[J]. 航空学报, 2021, 42(1): 524244.
- QIN Ripeng, XU Kun, CHEN Jiawei, et al. Design and motion planning of wheel-legged hexapod robot for planetary exploration[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2021, 42(1): 524244.
- [22] 王森, 姚燕安, 武建昀. 一种新型可调整闭链多足机器人的设计与分析[J]. 机械工程学报, 2020, 56(19): 191-199.
- WANG Sen, YAO Yanan, WU Jianxu. Design and analysis of a novel adjustable closed-chain multi-legged robot[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2020, 56(19): 191-199.
-
- 作者简介: 刘超, 女, 1979 年出生, 副教授。主要研究方向为机构与机器人学。
E-mail: lclc@bjtu.edu.cn
- 谭稀岑, 男, 1996 年出生, 硕士研究生。主要研究方向为机构与机器人学。
E-mail: 18121318@bjtu.edu.cn
- 姚燕安(通信作者), 男, 1972 年出生, 教授。主要研究方向为机构与机器人学。
E-mail: yayao@bjtu.edu.cn
- 付志洋, 男, 1997 年出生, 硕士研究生。主要研究方向为机构与机器人学。
E-mail: 19121294@bjtu.edu.cn