

DOI: 10.3901/JME.2022.23.075

基于刚性折纸的新型可折叠移动机器人 折展原理分析及验证^{*}

杨富富^{1,2} 卢帅龙¹ 宋亚庆^{1,3} 张俊^{1,2} 姚立纲^{1,2}

(1. 福州大学机械工程及自动化学院 福州 350108;

2. 福建省制造业数字化设计工程研究中心 福州 350108;

3. 上海师范大学信息与机电工程学院 上海 200234)

摘要: 针对现有轮式机器人的本体相对固定无法适应复杂环境的问题, 将自由度较少、折展比大的刚性折纸机构与高效的轮式运动相结合, 提出一种新型可折叠移动机器人机构, 提升了移动机器人在复杂环境下的通过性能。对此机构折展原理进行分析, 得到机器人三维尺寸与驱动角之间的关系, 并通过建立简化模型, 对动力学进行研究, 得到不同位置的驱动力矩随驱动角的变化, 从而得到最优驱动布置方案, 之后通过运动协调算法研究, 实现了机器人移动与折展协调运动, 使其能够在复杂环境中高效运动。最后搭建物理样机以及控制系统, 并通过试验验证机器人的移动及折展性能。结果表明, 该可折叠移动机器人具有三维折展比大, 运动灵活高效的优点, 可通过切换姿态适应复杂路径, 有望在探测、检测以及救援等工程领域得到应用。

关键词: 刚性折纸; 可展移动机器人; 折展原理; 样机试验

中图分类号: TP242

Analysis and Verification on Working Principle of a New Deployable Mobile Robot Based on Rigid Origami

YANG Fufu^{1,2} LU Shuailong¹ SONG Yaqing^{1,3} ZHANG Jun^{1,2} YAO Ligang^{1,2}

(1. School of Mechanical Engineering and Automation, Fuzhou University, Fuzhou 350108;

2. Digital Design Center for Manufacturing of Fujian Province, Fuzhou 350108;

3. School of Information, Mechanical and Electrical Engineering, Shanghai Normal University, Shanghai 200234)

Abstract: Aiming at the problem that the body of the existing wheeled robot is relatively fixed and cannot adapt to the complex environment, a new type of deployable mobile robot mechanism is proposed by introducing a rigid origami mechanism, which is with less degrees of freedom and large folding ratio, into efficient wheeled motion, and improves the passing performance in complex environments. The working principle analysis of this mechanism is carried out, and the relationship between the three-dimensional sizes of the robot and driving angles is obtained. By establishing a simplified model of the robot, its dynamics is carried out. Then, the change of the driving torque of different positions with the driving angle is obtained, which is used to optimize the driving arrangement scheme. Through a proposed algorithm, the compatible movement between the main body folding and the wheel motion is realized, so that the robot can move efficiently in the complex environment. Finally, a physical prototype and the control system are built, based on which the movement and folding performance are verified through two experiments. The results show that the robot could fit complex paths flexibly by switching its postures, and has the advantages of large deployment and folding ratio. Therefore, the robot owns the potential applications in some engineering fields such as detection, detection and rescue.

Key words: rigid origami; deployable mobile robot; working principle; prototype testing

^{*} 国家自然科学基金(51905101)、福建省自然科学基金(2019J01209)和福建省教育厅中青年教师教育科研项目(JAT200038)资助项目。20220106收到初稿, 20220813收到修改稿

0 前言

移动机器人由于结构简单、移动效率高等优势,已广泛应用于很多工程和生活领域,降低了人们的工作强度和危险性^[1]。但对于复杂环境,尤其是室内复杂环境,传统移动机器人的通过性受到了很大限制,变形移动机器人应运而生。据变形特点,变形移动机器人可分为运动结构变形机器人和躯干变形机器人。

运动结构变形机器人是一类通过改变运动结构形状来提高移动性能的机器人。在轮式方面, KIM^[2]通过平面机械结构改变轮径的方法提升了机器人的通过能力。LEE 等^[3-5]利用折纸机构的形状变化大能吸收来自地面的冲击的优势,提出一种基于折纸结构的可变形轮,并基于此设计了新型移动机器人。在履带方面, BAI 等^[6]提出了一种基于模块化设计的多级自适应横向变形履带式机器人。在多模式运动方面,李智卿等^[7]通过轮式和履带式切换适应不同地形。NEMOTO 等^[8]采用弓形结构杆件设计了一种兼具滚动与步行的滚动机器人。侯康等^[9]提出了一种可变形的球轮互换型移动机器人。刘超等^[10]提出了具有两种单自由度运动形式的变胞机构,并将其构造成轮腿式移动模块,进而设计了一种可变形轮腿式机器人。然而,通过运动结构的变形,一方面降低了机器人的稳定性^[11],另一方面对机器人的通过性能提升不明显。为进一步改善通过性能,又出现了躯干变形机器人。

躯干变形机器人是通过改变机器人躯干结构的一类变形移动机器人。LIU 等^[12]提出了一种可展开四面体移动机器人,可以实现以一系列三角形的运动轨迹向任何方向滚动任意距离。魏巍等^[13]结合并联机构、折纸机构和柔性铰链,提出了一种结构紧凑且灵活度高的模块化蛇形机器人单元。SHANG 等^[14]提出一种基于 Bricard 机构的可展移动机器人,通过对机构进行展开和折叠,以通过低矮的和狭窄的复杂路径。折纸机构^[15]通常具有折展比大、自由度少、结构简单等优点,将有助于提升移动机器人的通过性能。SUN 等^[16]折纸机构提出一种新型具有连续可变形细长体结构的移动机器人,通过线驱动,作爬行运动。WANG 等^[17]基于剪纸机构提出一种新型移动机器人,能够通过变换自身形态,在狭窄和低矮的环境中运动。ZE 等^[18]提出一种基于磁驱动 Kresling 折纸结构的爬行机器人,有望在生物医学领域发挥重要作用。这些躯干变形机器人的通过性

能明显提升,可以通过复杂环境,但是其刚性、负载能力、移动速率表现一般。

综上所述,现有变形机器人或在通过性上提升不明显,或移动效率和稳定性有所不足。若把大折展比的刚性折纸机构与高效的轮式结构相结合,将有望提升移动机器人的通过性和移动性。因此,本文基于刚性折纸机构提出一种新型可展展移动机器人结构,并对其折展原理进行分析,最后搭建物理样机,开展移动与折展性能的验证试验。

1 结构创新设计

可展移动机器人主要由折展主体模块、运动结构模块以及装置拓展平台模块组成。折展主体模块是机器人变形的主体,运动结构模块为机器人高效移动性服务,而装置拓展平台模块可为工业相机、激光雷达以及探测器提供安装平台。

1.1 折展主体设计

在刚性折纸单元机构^[19-21]中, Miura 折纸机构(图 1d)具有折痕少、自由度较少和对称性好等优点,且在折展过程中, $B_i (i=1,2,3,4,5,6)$ 始终处于同一平面,便于折展主体与运动结构模块连接。因此本文将以 Miura 折纸搭建机器人的折展主体,具体结构模型如图 1 所示。

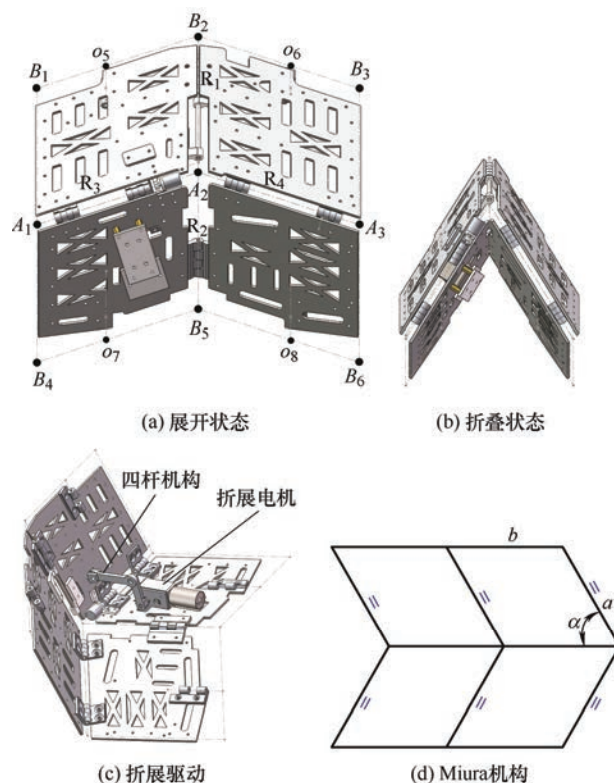


图 1 机构折展主体模型及 Miura 机构

折展主体结构由四个经过修改的平行四边形基板通过四个转动副 $R_i (i=1,2,3,4)$ 连接而成。这四个转动副的轴线交于 A_2 点, 形成球面四杆机构。 $B_i (i=1,2,3,4,5,6)$ 以及 $A_i (i=1,2,3)$ 在折展过程中分别始终处于不同的两个平面。为避免机构干涉, 采用平面四杆机构将电机位置偏离 R_3 转动副, 以间接在 R_3 处提供驱动实现机器人主体的折展。各基板亦可作为载物平台及电控装置载体, 以提高利用率。

1.2 运动结构设计

运动结构模块是实现机器人的移动能力的关键。机器人的运动结构模块由四个运动结构单元组成, 每一个运动结构单元由麦克纳姆轮、电机、铰链、连接板和导轨/滑块组成, 如图 2 所示。完整的运动结构如图 3 所示。

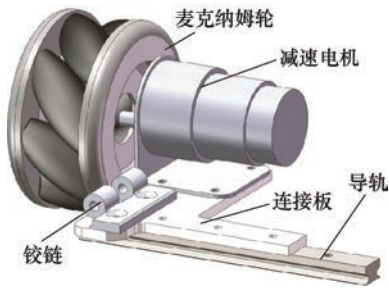


图 2 运动结构单元

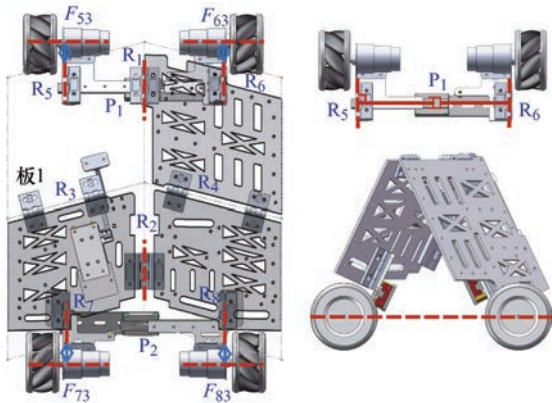


图 3 运动结构

折展主体在折展过程中, 四个基板分别绕不同的两个轴做空间运动, 以板 1 为例, 其绕着转动副 R_1 和 R_3 轴做空间运动。为保证轮端面始终与地面垂直, 轮子不能直接安装在基板上。

因此, 对轮-基板连接方式进行机构设计。为协调轮与基板在折展过程中的相对运动, 增加转动副 $R_i (i=5,6)$, 将轮和折展主体进行连接。转动副的轴线与 R_1 轴线保持平行。通过移动副 P_1 将两前轮连接以保证前轮始终与地面垂直, 移动副的运动方向与转动副轴线相互垂直。对两后轮通过移动副 P_2

连接, 并做类似处理。为使四个轮子的轴线始终位于同一平面内, 所有轮子的轴线到相应基板边的距离相等, 即 $F_{53} = F_{63} = F_{73} = F_{83}$ 。

1.3 装置拓展平台设计

为便于移动机器人拓展丰富的应用, 如搭载 3D 相机、激光雷达等导航装置或探测设备等, 需根据结构特点设计一个避免与各基板做空间运动的装置拓展平台, 如图 4 所示。

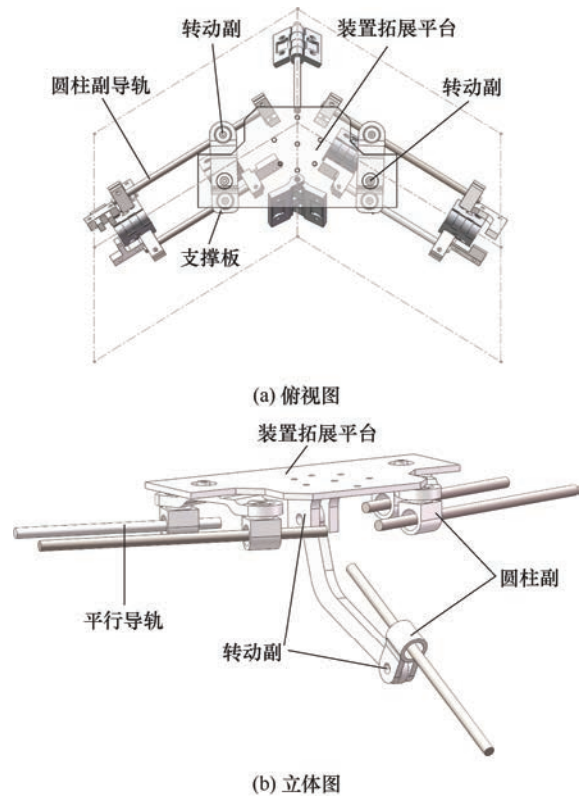


图 4 装置拓展平台

由 Miura 折纸的折叠特性可知, 转动副 R_3 和 R_4 所在的平面始终与地面平行, 这将为装置拓展平台的搭建提供便利。同时, 为了保持平台的稳定性, 在四块基板上用于形成球面四杆机构的边上分别架设一个与相应转动副平行的导轨。四个导轨呈对称分布且到相应转动副的距离相等。因此, 这四个导轨将始终与地面平行且可由 Miura 折纸机构驱动做确定运动, 同时, 相互平行的两个导轨之间的距离因 Miura 机构的空间折叠而实时变化。

为保证装置拓展平台构件在 Miura 折纸机构折叠过程中不发生转动, 装置拓展平台通过两个支撑板与四个导轨连接, 如图 4a 所示。其中, 支撑板分别通过两组“转动副+圆柱副”与相互平行的导轨连接, 并通过一个转动副与装置拓展平台连接。

为了让平台在折展过程中始终处于中间位置, 如图 4b 所示, 增加一个圆柱副及两个转动副将装置拓

展平台与平行于 R_1 的导轨连接。

经过折展主体、运动结构及装置拓展平台的设计,可折展移动机器人最终的模型如图5所示。

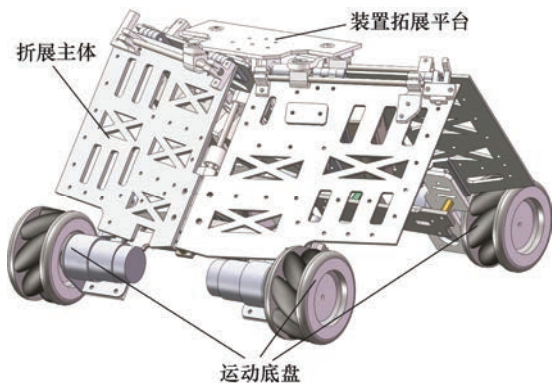


图5 实物模型

2 折展原理分析

机器人的三维尺寸将在折展过程中发生变化并影响通过性,故需要研究输入参数与三维尺寸之间的理论关系。同时,为便于驱动以提高折展性能,还需研究机构驱动力矩的大小,进而获得最佳的驱动力矩布置方案。最后需要对移动与折展协调运动算法研究实现高效的折展运动。故本节将从运动学、动力学及协调运动等方面对机器人的折展原理进行分析。

在折展过程中,装置拓展平台不会影响机器人的长和宽,对机器人高度的影响也较小,故本文只对折展主体和运动结构进行研究,机构简图如图6所示。构件1~4为折展主体的4块平行四边形基板。以构件1为例,为板 $A_1A_2B_1B_2$ 。构件5~8分别是一个运动结构单元,即“轮子+电机+连接板+导轨/滑块+铰链”,如图7所示。

为便于后文描述,现对机器人的坐标系及相关符号做出说明。取 A_2 在地面上的垂直投影为坐标原点, X 轴沿 B_3B_2 方向, Z 轴竖直向上,并按右手定则确定 Y 轴,建立全局坐标系 $O-XYZ$ 。因构件1~4和5~8分别具有相同的特征,故以构件1和构件5为例建立局部坐标系。取 A_2 为坐标原点, x_1 轴沿 A_2B_2 方向, z_1 轴垂直于 $A_1A_2B_1B_2$ 平面向上,并按右手定则确定 y_1 轴,建立构件1的局部坐标系 $o_1-x_1y_1z_1$ 。在 B_1B_2 上取一点 o_5 ($|o_5B_1|=c$) 为坐标原点, x_5 轴沿转动副 R_5 轴线方向, z_5 轴垂直于导轨平面向下,并按右手定则确定 y_5 轴,建立局部坐标系 $o_5-x_5y_5z_5$ 。其他构件的局部坐标系

$o_i-x_iy_iz_i$ ($i=2,3,4,6,7,8$) 如图6所示。

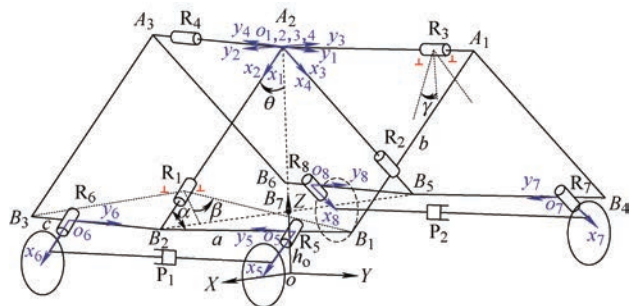


图6 机构简图

构件1~4的设计参数均为 a, b, c, α , 其中 $|A_1A_2|=|A_2A_3|=|B_1B_2|=|B_2B_3|=|B_4B_5|=|B_5B_6|=a$, $|A_1B_1|=|A_2B_2|=|A_3B_3|=|A_1B_4|=|A_2B_5|=|A_3B_6|=b$, $|o_5B_1|=|o_6B_3|=|o_7B_4|=|o_8B_6|=c$, α 为各个平行四边形的锐角。而构件5~8的设计参数为 $D_{i3}, L_{i3}, Y_{i3}, H_{i3}, F_{i3}$ ($i=5,6,7,8$)。其中 D_{i3} 为轮子的直径, L_{i3} 为轮子的宽度, Y_{i3} 为在 y_i 方向上轮子外侧面到 x_i 轴的距离, H_{i3} 为在 z_i 方向上轮子轴线到 x_i 轴的距离, F_{i3} 为在 x_i 方向上轮子轴线到 y_i 轴的距离。构件5的设计参数尺寸如图7所示。

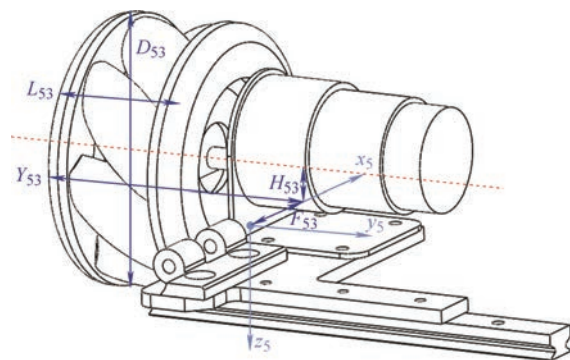


图7 构件5设计参数尺寸示意图

各个构件之间的运动变量为相互关联的 θ, β, γ , 其中 θ 是 A_2B_2 与 OA_2 之间的夹角。 β 为平面 $A_1A_2B_1B_2$ 与平面 $A_2A_3B_2B_3$ 之间夹角(二面角)的一半, γ 为平面 $A_1A_2B_1B_2$ 与平面 $A_1A_2B_4B_5$ 之间夹角(二面角)的一半。

2.1 运动学分析

在 Miura 机构中,转动副 R_1 和 R_2 上的转角及 R_3 和 R_4 上的转角在机构运动过程中分别保持相同。故只需以 β 或 γ 作为输入,并取整个机构的长度 L , 宽度 W , 高度 H 作为输出变量,研究机构的运动特性以便后续驱动优化。

2.1.1 以 β 为输入变量的运动学分析

根据图6的几何关系可知

$$\sin \theta = \frac{\cos \alpha}{\sqrt{1 - \sin^2 \beta \sin^2 \alpha}} \quad (1)$$

$$h_o = \cos(\theta + \arctan\left(\frac{H_{i3}}{F_{i3}}\right)) \times \sqrt{H_{i3}^2 + F_{i3}^2} + \frac{D_{i3}}{2}$$

式中, h_o 为 o 到 B_7 的距离, $i = 5, 6, 7, 8$ 。机构中各点坐标为

$$\begin{aligned} A_1 &= [-as \quad p \quad bc_i + h_o]^T, A_2 = [0 \quad 0 \quad bc_i + h_o]^T \\ A_3 &= [-as \quad -p \quad bc_i + h_o]^T \\ B_1 &= [bs_i - as \quad p \quad h_o]^T, B_2 = [bs_i \quad 0 \quad h_o]^T \\ B_3 &= [bs_i - as \quad -p \quad h_o]^T, B_4 = [-bs_i - as \quad p \quad h_o]^T \\ B_5 &= [-bs_i \quad 0 \quad h_o]^T, B_6 = [-bs_i - as \quad -p \quad h_o]^T \end{aligned} \quad (2)$$

$$bs_i = \frac{b \cos \alpha}{\sqrt{1 - \sin^2 \beta \sin^2 \alpha}}, \quad bc_i = \frac{b \sin \alpha \cos \beta}{\sqrt{1 - \sin^2 \beta \sin^2 \alpha}}$$

$$as = a \sqrt{1 - \sin^2 \beta \sin^2 \alpha}, \quad p = a \sin \beta \sin \alpha$$

根据相似原理, 可得

$$\begin{aligned} o_1 &= [b \sin \theta - g_2 \quad g_1 \quad h_o]^T \\ o_2 &= [b \sin \theta - g_2 \quad -g_1 \quad h_o]^T \\ o_3 &= [-b \sin \theta - g_2 \quad g_1 \quad h_o]^T \\ o_4 &= [-b \sin \theta - g_2 \quad -g_1 \quad h_o]^T \end{aligned} \quad (3)$$

$$g_1 = p \left(1 - \frac{c}{a}\right), \quad g_2 = \frac{(a - c) \cos \alpha}{\sin \theta}$$

由以上点的坐标可确定机器人的三维尺寸, 其中, 机构总长 L 是 L_m (折展主体在 X 方向的最大距离 B_2 和 B_4 的 X 方向距离) 和 L_w (运动结构在 X 方向的最大距离—前后轮最大距离) 的较大值

$$L = \max(L_m, L_w) \quad (4)$$

$$L_m = \frac{2b \cos \alpha}{\sqrt{1 - \sin^2 \beta \sin^2 \alpha}} + a \sqrt{1 - \sin^2 \beta \sin^2 \alpha}$$

$$L_w = \frac{2b \cos \alpha}{\sqrt{1 - \sin^2 \beta \sin^2 \alpha}} + 2 \cos(\theta + \arctan\left(\frac{H_{i3}}{F_{i3}}\right) - \frac{\pi}{2}) \times \sqrt{H_{i3}^2 + F_{i3}^2} + D_{i3}$$

同理, 机构总宽 W 是 W_m (折展主体在 Y 方向的最大距离 B_1 和 B_3 的 Y 方向距离) 和 W_w (运动结构在 Y 方向的最大距离—左右轮外侧距离) 两者的较大值, 即

$$W = \max(W_m, W_w) \quad (5)$$

$$W_m = 2a \sin \alpha \sin \beta$$

$$W_w = 2a \sin \alpha \sin \beta \left(1 - \frac{c}{a}\right) + 2Y_{i3}$$

折展主体顶点 A_2 的 Z 方向坐标即为机构的高度

$$H = \frac{b \sin \alpha \cos \beta}{\sqrt{1 - \sin^2 \beta \sin^2 \alpha}} + h_o \quad (6)$$

2.1.2 以 γ 为输入变量的运动学分析

为更简练地表达 γ 和输出变量之间的关系, 只需求解 γ 和 β 之间的关系, 将关系式代入式(4)、(5)、(6)即可得到输出变量和 γ 之间的关系。

根据几何关系得知

$$\cos \theta = \cos \gamma \sin \alpha \quad (7)$$

且据式(1)

$$\cos \theta = \frac{\sin \alpha \cos \beta}{\sqrt{1 - \sin^2 \beta \sin^2 \alpha}} \quad (8)$$

联立式(7)和式(8), 可得

$$\beta = \arctan\left(\frac{\tan \gamma}{\cos \alpha}\right), \quad \gamma = \arctan(\tan \beta \cos \alpha) \quad (9)$$

且根据式(7)可知

$$\sin \theta = \sqrt{1 - (\cos \gamma \sin \alpha)^2} \quad (10)$$

将式(7)、(9)和(10)代入式(4)、(5)、(6), 可得到输出变量和 γ 之间的关系。

2.2 动力学分析

为便于动力学建模, 对机器人进行简化并保留主要构造及设计参数, 简化后的模型如图 8 所示。其中, 构件 1~4 简化为长方形。以构件 1 为例, 长度和宽度由 a, b, α 计算得到, 高度为 H_{11} 。构件 5~8 均简化为由三个基础零部件组成, 如图 9 所示。

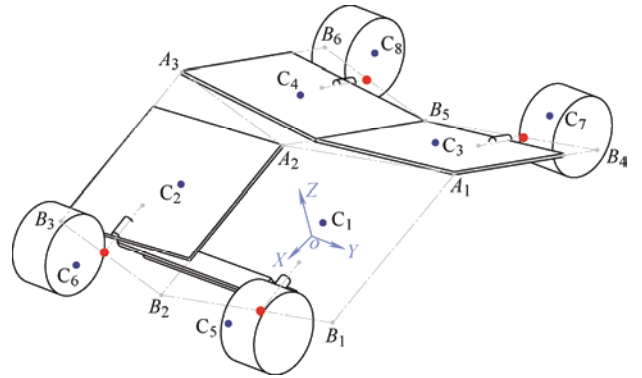


图 8 简化模型图

以构件 5 为例, 第一个基础零部件为导轨/滑块简化的长方形, 其长宽高尺寸为 L_{51}, W_{51}, H_{51} , 上表面与坐标系原点在 z_5 方向上的距离为 G_{51} ; 第二个基础零部件为铰链简化的圆柱, 其直径和长度尺寸

为 D_{52} 和 L_{51} ，且圆柱的端面距坐标系的原点在 x_5 方向上的距离为 F_{52} ；第三个基础零部件为轮子和电机简化而来，其尺寸为 D_{53} 、 L_{53} 、 Y_{53} 、 H_{53} 、 F_{53} ，含义与图 7 一致。上述变量的第一位下标表示构件号，第二位表示基础零部件号。

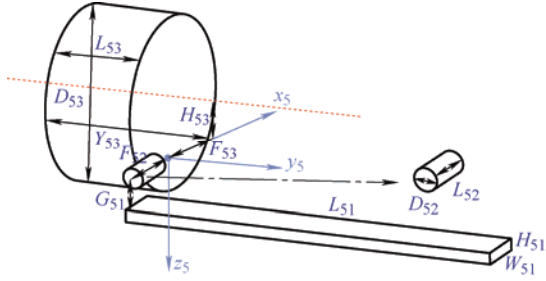


图 9 简化模型构件 5 尺寸示意图

2.2.1 各构件的质心及主惯性轴和主惯性矩

根据拉格朗日方程，需计算各构件的质心、主惯性轴和主惯性矩。设机构中各个构件在各自局部坐标系中质心坐标为 $E_i = [X_i \ Y_i \ Z_i]^T$ ，在全局坐标系中的质心坐标为 C_i ，质心速度为 \dot{C}_i ，各构件质心处的主惯性轴为 S_i ，主惯性矩为 I_i ，密度为 ρ_i ，质量为 m_i 。取 XOY 面为重力零势能面，重力加速度为 g ， $i=1,2,3,4,5,6,7,8$ 。

根据机构几何条件，可得构件 1~4 在各自局部坐标系的质心坐标为

$$E_i = \begin{bmatrix} \frac{b-a\cos\alpha}{2} & \frac{a\sin\alpha}{2} & 0 \end{bmatrix}^T, i=1,2 \quad (11)$$

$$E_i = \begin{bmatrix} \frac{b+a\cos\alpha}{2} & \frac{a\sin\alpha}{2} & 0 \end{bmatrix}^T, i=3,4 \quad (12)$$

主惯性轴为

$$S_i = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, i=1,2,3,4 \quad (13)$$

主惯性矩为

$$I_i = \begin{bmatrix} m_i \times \frac{H_{i1}^2 + a^2 \sin^2 \alpha}{12} \\ m_i \times \frac{H_{i1}^2 + (b-a\cos\alpha)^2}{12} \\ m_i \times \frac{a^2 \sin^2 \alpha + (b-a\cos\alpha)^2}{12} \end{bmatrix}, i=1,2,3,4 \quad (14)$$

质量为

$$m_i = a \sin \alpha (b - a \cos \alpha) H_{i1} \rho_i, i=1,2,3,4 \quad (15)$$

对于构件 5~8，3 个基础零部件在各自局部坐

标系的质心为 E_{i1}, E_{i2}, E_{i3} ，故根据组合图形的质心公式可得整个构件的质心为

$$E_i = \begin{bmatrix} \frac{m_{i1}E_{i1}(1) + m_{i2}E_{i2}(1) + m_{i3}E_{i3}(1)}{m_i} \\ \frac{m_{i1}E_{i1}(2) + m_{i2}E_{i2}(2) + m_{i3}E_{i3}(2)}{m_i} \\ \frac{m_{i1}E_{i1}(3) + m_{i2}E_{i2}(3) + m_{i3}E_{i3}(3)}{m_i} \end{bmatrix}, i=5,6,7,8 \quad (16)$$

式中， m_{i1}, m_{i2}, m_{i3} 为三个基础零部件的质量。

根据圆柱以及长方形的转动惯量公式，可得 3 个基础零部件的主惯性矩为

$$I_{i1} = \frac{m_{i1}}{12} \begin{bmatrix} L_{i1}^2 + H_{i1}^2 & W_{i1}^2 + H_{i1}^2 & W_{i1}^2 + L_{i1}^2 \end{bmatrix}^T \quad (17)$$

$$I_{i2} = \begin{bmatrix} k_2 & f_2 & f_2 \end{bmatrix}^T \quad I_{i3} = \begin{bmatrix} f_3 & k_3 & f_3 \end{bmatrix}^T$$

$$k_j = \frac{m_{ij}D_{ij}^2}{8} \quad f_j = \frac{m_{ij}(3D_{ij}^2 + 4L_{ij}^2)}{48}$$

$$i=5,6,7,8$$

整个构件的惯性张量为

$$\delta_i = \begin{bmatrix} \delta_{11} & \delta_{12} & \delta_{13} \\ \delta_{21} & \delta_{22} & \delta_{23} \\ \delta_{31} & \delta_{32} & \delta_{33} \end{bmatrix} \quad i=5,6,7,8 \quad (18)$$

式中 $\delta_{11} - \delta_{33}$ 为

$$\begin{aligned} \delta_{11} &= \sum_{j=1}^3 \left[I_{ij}(1) + m_{ij} \left((Z_i - E_{ij}(3))^2 + (Y_i - E_{ij}(2))^2 \right) \right] \\ \delta_{12} &= - \sum_{j=1}^3 m_{ij} (X_i - E_{ij}(1)) (Y_i - E_{ij}(2)) \\ \delta_{13} &= - \sum_{j=1}^3 m_{ij} (X_i - E_{ij}(1)) (Z_i - E_{ij}(3)) \\ \delta_{22} &= \sum_{j=1}^3 \left[I_{ij}(2) + m_{ij} \left((Z_i - E_{ij}(3))^2 + (X_i - E_{ij}(1))^2 \right) \right] \\ \delta_{23} &= - \sum_{j=1}^3 m_{ij} (Z_i - E_{ij}(3)) (Y_i - E_{ij}(2)) \\ \delta_{33} &= \sum_{j=1}^3 \left[I_{ij}(3) + m_{ij} \left((Y_i - E_{ij}(2))^2 + (X_i - E_{ij}(1))^2 \right) \right] \\ \delta_{21} &= \delta_{12} \quad \delta_{31} = \delta_{13} \quad \delta_{32} = \delta_{23} \end{aligned}$$

故整个构件的主惯性轴 S_i 及主惯性矩 I_i 为

$$[S_i, \lambda_i] = \text{eig}(\delta_i), \quad I_i = \text{diag}(\lambda_i), i=5,6,7,8 \quad (19)$$

式中， eig 是计算 δ_i 的特征值和特征矢量的函数， diag 是对 λ_i 对角元素的提取函数。

构件 5~8 的质量为

$$m_i = m_{i1} + m_{i2} + m_{i3} = W_{i1}H_{i1}L_{i1}\rho_{i1} + \frac{\pi D_{i2}^2 L_{i2} \rho_{i2}}{4} + \frac{\pi D_{i3}^2 L_{i3} \rho_{i3}}{4}, i=5,6,7,8 \quad (20)$$

式中, $\rho_{i1}, \rho_{i2}, \rho_{i3}$ 是三个基础零部件的密度。

质心在全局坐标系中的坐标可以通过变换矩阵得到

$$\begin{aligned} \mathbf{C}_i &= \mathbf{T}_i \mathbf{E}_i + \mathbf{A}_2, i=1,2,3,4 \\ \mathbf{C}_i &= \mathbf{T}_i \mathbf{E}_i + \mathbf{o}_i, i=5,6,7,8 \end{aligned} \quad (21)$$

式中, \mathbf{C}_i 为 \mathbf{C}_i 在全局坐标系中坐标矢量; \mathbf{A}_2 和 \mathbf{o}_i 为全局坐标系的位置矢量, 姿态变换矩阵为

$$\begin{aligned} \mathbf{T}_1 &= \mathbf{R}_Y \left(\frac{\pi}{2} - \theta \right) \mathbf{R}_{X'} \left(\beta - \frac{\pi}{2} \right) \\ \mathbf{T}_2 &= \mathbf{R}_Y \left(\frac{\pi}{2} - \theta \right) \mathbf{R}_{X'} \left(\frac{3\pi}{2} - \beta \right) \\ \mathbf{T}_3 &= \mathbf{R}_Y \left(\frac{\pi}{2} + \theta \right) \mathbf{R}_{X'} \left(\beta - \frac{\pi}{2} \right) \\ \mathbf{T}_4 &= \mathbf{R}_Y \left(\frac{\pi}{2} + \theta \right) \mathbf{R}_{X'} \left(\frac{3\pi}{2} - \beta \right) \end{aligned} \quad (22)$$

$$\begin{aligned} \mathbf{T}_5 &= \mathbf{R}_Y \left(\frac{\pi}{2} - \theta \right) \mathbf{R}_{X'} (\pi) & \mathbf{T}_6 &= \mathbf{R}_Y \left(\frac{\pi}{2} - \theta \right) \\ \mathbf{T}_7 &= \mathbf{R}_Y \left(\frac{\pi}{2} + \theta \right) \mathbf{R}_{X'} (\pi) & \mathbf{T}_8 &= \mathbf{R}_Y \left(\frac{\pi}{2} + \theta \right) \end{aligned}$$

2.2.2 以 β 为输入的动力学分析

一方面, 将质心坐标对时间进行求导, 可得到质心的速度如式(23)所示

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{C}}_1 &= \begin{bmatrix} X_1 \dot{s}_n + e_{11} + e_{21} \\ (Y_1 \cos \beta + z s_1) \dot{\beta} \\ n_{31} + e_{31} + e_{41} + \dot{h}_o \end{bmatrix} & \dot{\mathbf{C}}_2 &= \begin{bmatrix} X_2 \dot{s}_n - e_{12} + e_{22} \\ (z s_2 - Y_2 \cos \beta) \dot{\beta} \\ n_{32} + e_{32} - e_{42} + \dot{h}_o \end{bmatrix} \\ \dot{\mathbf{C}}_3 &= \begin{bmatrix} -X_3 \dot{s}_n + e_{13} + e_{23} \\ (z s_3 + Y_3 \cos \beta) \dot{\beta} \\ n_{33} - e_{33} - e_{43} + \dot{h}_o \end{bmatrix} & \dot{\mathbf{C}}_4 &= \begin{bmatrix} -X_4 \dot{s}_n - e_{12} + e_{22} \\ (z s_4 - Y_4 \cos \beta) \dot{\beta} \\ n_{34} - e_{34} + e_{44} + \dot{h}_o \end{bmatrix} \\ \dot{\mathbf{C}}_5 &= \begin{bmatrix} (X_5 + b + u_1) \dot{s}_n \\ -Z_5 \dot{c}_n \\ -u_2 \\ -X_5 \dot{c}_n - Z_5 \dot{s}_n + \dot{h}_o \end{bmatrix} & \dot{\mathbf{C}}_6 &= \begin{bmatrix} (X_6 + b + u_1) \dot{s}_n \\ +Z_6 \dot{c}_n \\ u_2 \\ -X_6 \dot{c}_n + Z_6 \dot{s}_n + \dot{h}_o \end{bmatrix} \\ \dot{\mathbf{C}}_7 &= \begin{bmatrix} (-X_7 - b + u_1) \dot{s}_n \\ -Z_7 \dot{c}_n \\ -u_2 \\ -X_7 \dot{c}_n + Z_7 \dot{s}_n + \dot{h}_o \end{bmatrix} & \dot{\mathbf{C}}_8 &= \begin{bmatrix} (-X_8 - b + u_1) \dot{s}_n \\ +Z_8 \dot{c}_n \\ u_2 \\ -X_8 \dot{c}_n - Z_8 \dot{s}_n + \dot{h}_o \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (23)$$

$$\begin{aligned} z s_i &= -Z_i \sin \beta & e_{1j} &= Z_j (\dot{c}_n \sin \beta + \dot{\beta} c_i \cos \beta) \\ e_{2j} &= Y_j (\dot{\beta} c_i \sin \beta - \dot{c}_n \cos \beta) & n_{3j} &= \dot{c}_n (b - X_j) \\ e_{3j} &= Y_j (\dot{\beta} s_i \sin \beta - \dot{s}_n \cos \beta) & u_1 &= (\cos \alpha (a - c)) / s_i^2 \\ e_{4j} &= Z_j (\dot{s}_n \sin \beta + \dot{\beta} s_i \cos \beta) & u_2 &= a \sin \alpha \cos \beta \left(\frac{c}{a} - 1 \right) \dot{\beta} \\ \dot{s}_n &= \frac{\cos \alpha \cos \beta \sin^2 \alpha \sin \beta \dot{\beta}}{(1 - \sin^2 \alpha \sin^2 \beta)^{3/2}} & \dot{c}_n &= \frac{-\cos^2 \alpha \sin \alpha \sin \beta \dot{\beta}}{(1 - \sin^2 \alpha \sin^2 \beta)^{3/2}} \\ s_i &= \frac{\cos \alpha}{\sqrt{1 - \sin^2 \alpha \sin^2 \beta}} & c_i &= \frac{\sin \alpha \cos \beta}{\sqrt{1 - \sin^2 \alpha \sin^2 \beta}} \\ \dot{h}_o &= -\cos(\theta + \arctan(H_{i3} / F_{i3}) - \pi / 2) \times \sqrt{H_{i3}^2 + F_{i3}^2} \times \dot{\theta} \\ \dot{\theta} &= \frac{\cos \beta \sin \beta \cos \alpha \sin^2 \alpha \dot{\beta}}{(1 - \sin^2 \beta \sin^2 \alpha)^{3/2} \times \sqrt{1 + \frac{\cos^2 \alpha}{\sin^2 \beta \sin^2 \alpha} - 1}} \end{aligned}$$

根据动能公式, 可得到机构的总平移动能为

$$T_{KE} = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^8 m_i \left((\dot{C}_i(1))^2 + (\dot{C}_i(2))^2 + (\dot{C}_i(3))^2 \right) \quad (24)$$

各个构件在全局坐标系中的角速度为

$$\begin{aligned} \omega_{1f} &= [\dot{\beta} \sin \theta \quad -\dot{\theta} \quad -\dot{\beta} \cos \theta]^T \\ \omega_{2f} &= [-\dot{\beta} \sin \theta \quad -\dot{\theta} \quad \dot{\beta} \cos \theta]^T \\ \omega_{3f} &= [-\dot{\beta} \sin \theta \quad \dot{\theta} \quad -\dot{\beta} \cos \theta]^T \\ \omega_{4f} &= [\dot{\beta} \sin \theta \quad \dot{\theta} \quad \dot{\beta} \cos \theta]^T \\ \omega_{5f} &= [0 \quad -\dot{\theta} \quad 0]^T & \omega_{6f} &= [0 \quad -\dot{\theta} \quad 0]^T \\ \omega_{7f} &= [0 \quad \dot{\theta} \quad 0]^T & \omega_{8f} &= [0 \quad \dot{\theta} \quad 0]^T \end{aligned} \quad (25)$$

根据姿态变换矩阵可得各个构件在局部坐标系中的角速度为

$$\omega_{iL} = \text{inv}(\mathbf{T}_i \mathbf{S}_i) \omega_{if}, i=1,2,3,4,5,6,7,8 \quad (26)$$

因此, 可得到机构的总角动能为

$$A_{KE} = \sum_{i=1}^8 \frac{1}{2} \left(I_i(1) \times (\omega_{iL}(1))^2 + I_i(2) \times (\omega_{iL}(2))^2 + I_i(3) \times (\omega_{iL}(3))^2 \right) \quad (27)$$

为此, 机构的总动能为

$$K_E = A_{KE} + T_{KE} \quad (28)$$

另一方面, 机构的总势能为

$$P_E = \sum_{i=1}^8 m_i g C_i(3) \quad (29)$$

根据拉格朗日方程

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial K_E}{\partial \dot{\beta}} \right) - \frac{\partial K_E}{\partial \beta} + \frac{\partial P_E}{\partial \beta} = F_i \quad (30)$$

式中, $\dot{\beta}$ 为 β 的角速度。对机构的总势能以及总动能进行求导, 可得到以 β 为输入的驱动力矩。

2.2.3 以 γ 为输入的动力学分析

据上述分析, 可得到各个构件的质心以及转动惯量。另当 γ 为输入时, 可得到质心的速度如式(31)所示

$$\begin{aligned} \dot{C}_1 &= \begin{bmatrix} X_1 \dot{s}_t + n_{11} - n_{21} \\ Z_1 \dot{c}_{\beta t} + Y_1 \dot{s}_{\beta t} \\ n_{31} - n_{41} + n_{51} + \dot{h}_o \end{bmatrix}, \dot{C}_2 = \begin{bmatrix} X_2 \dot{s}_t - n_{12} - n_{22} \\ Z_2 \dot{c}_{\beta t} - Y_2 \dot{s}_{\beta t} \\ n_{32} - n_{42} - n_{52} + \dot{h}_o \end{bmatrix} \\ \dot{C}_3 &= \begin{bmatrix} -X_3 \dot{s}_t + n_{13} - n_{23} \\ Z_3 \dot{c}_{\beta t} + Y_3 \dot{s}_{\beta t} \\ n_{33} + n_{43} - n_{53} + \dot{h}_o \end{bmatrix}, \dot{C}_4 = \begin{bmatrix} -X_4 \dot{s}_t - n_{14} - n_{24} \\ Z_4 \dot{c}_{\beta t} - Y_4 \dot{s}_{\beta t} \\ n_{34} + n_{44} + n_{54} + \dot{h}_o \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (31a)$$

$$\begin{aligned} \dot{C}_5 &= \begin{bmatrix} (X_5 + b + u_1) \dot{s}_t - Z_5 \dot{c}_t \\ -n_2 \\ -X_5 \dot{c}_t - Z_5 \dot{s}_t + \dot{h}_o \end{bmatrix}, \dot{C}_6 = \begin{bmatrix} (X_6 + b + u_2) \dot{s}_t + Z_6 \dot{c}_t \\ n_2 \\ -X_6 \dot{c}_t + Z_6 \dot{s}_t + \dot{h}_o \end{bmatrix} \\ \dot{C}_7 &= \begin{bmatrix} (-X_7 - b + u_1) \dot{s}_t \\ -Z_7 \dot{c}_t \\ -n_2 \\ -X_7 \dot{c}_t + Z_7 \dot{s}_t + \dot{h}_o \end{bmatrix}, \dot{C}_8 = \begin{bmatrix} (-X_8 - b + u_1) \dot{s}_t \\ +Z_8 \dot{c}_t \\ n_2 \\ -X_8 \dot{c}_t - Z_8 \dot{s}_t + \dot{h}_o \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (31b)$$

$$n_{1j} = Z_j (\dot{s}_{\beta t} c_t + \dot{c}_t \sin \beta) \quad n_{2j} = Y_j (\dot{c}_{\beta t} c_t + \dot{c}_t \cos \beta)$$

$$n_{4j} = Y_j (\dot{c}_{\beta t} s_t + \dot{s}_t \cos \beta) \quad n_{5j} = Z_j (\dot{s}_{\beta t} s_t + \dot{s}_t \sin \beta)$$

$$n_2 = a \sin \alpha \left(\frac{c}{a} - 1 \right) \dot{s}_{\beta t}$$

$$c_t = \cos \gamma \sin \alpha, \quad s_t = \sqrt{1 - (\cos \gamma \sin \alpha)^2}$$

$$\dot{h}_o = -\cos(\theta + \arctan(H_{i3}/F_{i3}) - \pi/2) \times \sqrt{H_{i3}^2 + F_{i3}^2} \times \dot{\theta}$$

$$\dot{\beta} = \frac{\dot{\gamma}(1 - \sin^2 \alpha \sin^2 \beta)^2}{\cos \alpha} \quad \dot{\theta} = \frac{\dot{\gamma} \sin \gamma \sin \alpha}{s_t}$$

$$\dot{c}_t = -\sin \gamma \sin \alpha \dot{\gamma} \quad \dot{s}_t = \frac{\cos \gamma \sin \gamma \sin^2 \alpha \dot{\gamma}}{s_t}$$

$$\dot{s}_{\beta t} = \frac{\dot{\gamma}(\tan^2 \gamma + 1)}{\cos \alpha \sqrt{1 + \frac{\tan^2 \gamma}{\cos^2 \alpha}}} - \frac{\dot{\gamma}(\tan^2 \gamma + 1) \tan^2 \gamma}{\cos^3 \alpha \left(1 + \frac{\tan^2 \gamma}{\cos^2 \alpha} \right)^{\frac{3}{2}}}$$

$$\dot{c}_{\beta t} = -\frac{\tan \gamma (\tan^2 \gamma + 1) \dot{\gamma}}{\cos^2 \alpha \left(1 + \frac{\tan^2 \gamma}{\cos^2 \alpha} \right)^{\frac{3}{2}}}$$

结合拉格朗日方程

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial K_E}{\partial \dot{\gamma}} \right) - \frac{\partial K_E}{\partial \gamma} + \frac{\partial P_E}{\partial \gamma} = F_i \quad (32)$$

可得到以 γ 为输入的驱动力矩, 式中 $\dot{\gamma}$ 为 γ 的角速度。

最后, 根据机器人实际数据以及结构设计要求, 简化模型的参数如表 1 所示, 并对机构在折叠过程中驱动力矩进行理论计算和仿真分析。在 ADAMS 中搭建的仿真环境如图 10 所示。考虑到机器人最大驱动力矩的影响以及机构干涉的限制, 折展主体的运动范围为 $\beta \in (87.5^\circ, 35^\circ)$, 相对应的 $\gamma \in (79.7696^\circ, 9.6144^\circ)$, 且 $\dot{\beta}$ 和 $\dot{\gamma}$ 均为 $-0.5^\circ/\text{s}$ 。将理论计算结果与仿真结果进行对比, 如图 11 和图 12 所示。且根据图可知, 以 β 为输入的驱动力矩要远大于以 γ 为输入的驱动力矩, 故选取 γ 为机器人折展主体的输入驱动变量。

表 1 可展移动机器人简化模型设计参数表

参数	数值	参数	数值	参数	数值
边长 a/mm	180	密度 $\rho_1/(\text{kg}/\text{m}^3)$	3 000	宽度 W_{i1}/mm	20
边长 b/mm	186	密度 $\rho_2/(\text{kg}/\text{m}^3)$	3 000	长度 L_{i1}/mm	180
长度 c/mm	76.79	密度 $\rho_3/(\text{kg}/\text{m}^3)$	6 000	高度 H_{i1}/mm	5
角度 $\alpha/^\circ$	76	密度 $\rho_4/(\text{kg}/\text{m}^3)$	6 000	直径 D_{i2}/mm	10
角速度 $\dot{\beta}/(^\circ/\text{s})$	-0.5	密度 $\rho_{i1}/(\text{kg}/\text{m}^3)$	4 000	长度 L_{i2}/mm	20
高度 H_{j1}/mm	3	密度 $\rho_{i2}/(\text{kg}/\text{m}^3)$	2 400	长度 F_{i2}/mm	40
角度 $\beta_{\max}/^\circ$	87.5	密度 $\rho_{i3}/(\text{kg}/\text{m}^3)$	2 400	直径 D_{i3}/mm	77
角度 $\gamma_{\max}/^\circ$	79.77	长度 G_{51}/mm	15	长度 L_{i3}/mm	42
长度 G_{71}/mm	10	长度 G_{61}/mm	10	长度 F_{i3}/mm	20
长度 G_{81}/mm	15	高度 H_{i3}/mm	14	长度 Y_{i3}/mm	54

其中 $i = 5, 6, 7, 8, j = 1, 2, 3, 4$ 。

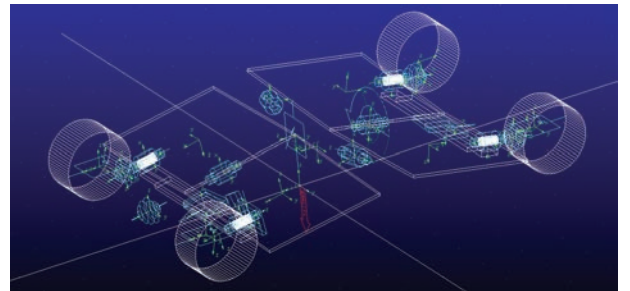


图 10 ADAMS 仿真环境

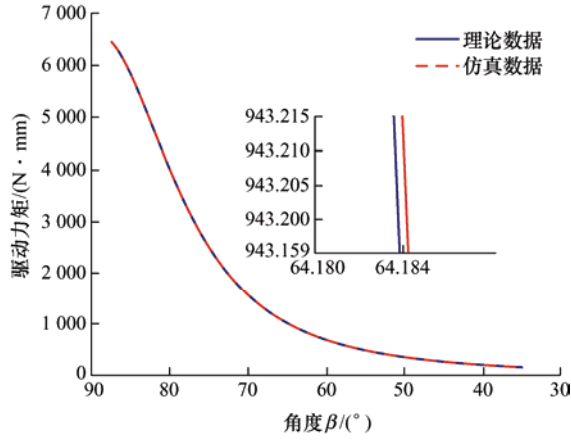


图 11 理论计算结果与仿真结果数据对比

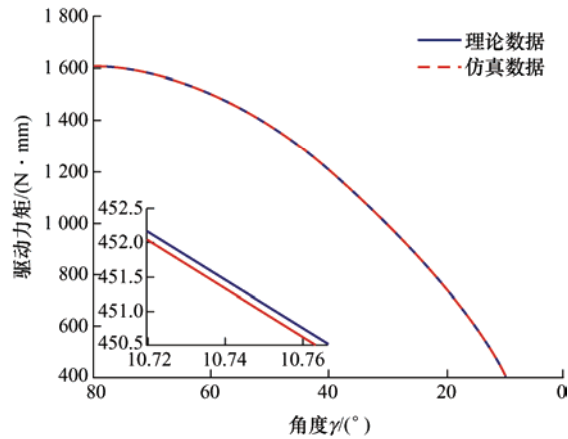


图 12 理论计算结果与仿真结果数据对比

2.3 移动与折展协调运动研究

2.3.1 移动及折展算法

可展机器人的任务是在一定形态下沿给定的路径或者自主导航进行运动，因此需要对其底盘移动以及机器人本体的形态进行控制。

首先分析底盘的全向运动，机器人可沿 X 方向和 Y 方向的移动以及绕中心垂直轴转动，能较好地适应狭小的工作环境。机器人的运动方式与驱动方式之间的关系如图 13 所示，其中 $\omega_i (i=1,2,3,4)$ 表示各个驱动轮的转速， F_a 表示和地面接触的小辊子轴向摩擦力。

具体的各个驱动轮的角速度如下式所示^[22]

$$\begin{aligned}\omega_1 &= \frac{2}{D_{i3}} \left[v_x - v_y - \omega \left(\frac{W_w + L_w}{2} \right) \right] \\ \omega_2 &= \frac{2}{D_{i3}} \left[v_x + v_y + \omega \left(\frac{W_w + L_w}{2} \right) \right] \\ \omega_3 &= \frac{2}{D_{i3}} \left[v_x + v_y - \omega \left(\frac{W_w + L_w}{2} \right) \right] \\ \omega_4 &= \frac{2}{D_{i3}} \left[v_x - v_y + \omega \left(\frac{W_w + L_w}{2} \right) \right]\end{aligned}\quad (33)$$

式中， ω 为机器人整体绕中心垂直轴旋转的角速度， v_x 和 v_y 分别表示机器人沿 X 方向和 Y 方向的速度。 W_w 和 L_w 分别表示左右轮中心距和前后轮中心距，可根据之前的运动学分析得到。

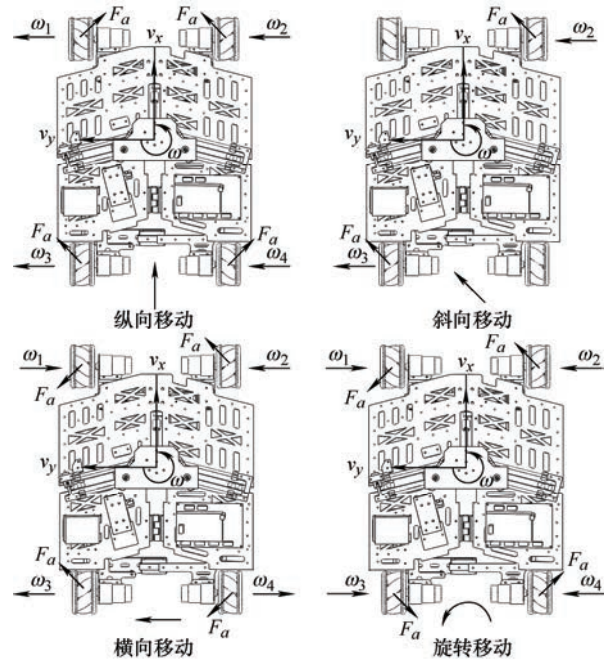
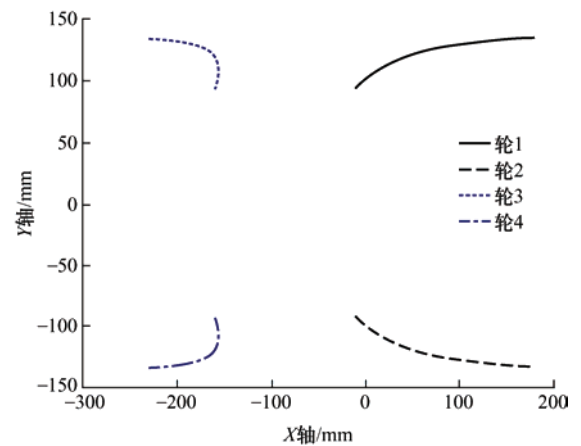


图 13 底盘运动方式和驱动方式的示意图

理论上，机器人的折展运动可由折展电机单自由度驱动实现。但在折展过程中，地面对轮子的摩擦力亦会影响驱动力矩。为便于主体折展，可利用四轮的协调运转来减小摩擦力的影响。根据运动学结果可以得到，在机器人坐标原点不变的前提下，折展过程中四轮随着角度 $\gamma \in (78^\circ, 9.5^\circ)$ 的运动轨迹，如图 14 所示。

图 14 四轮中心随着驱动角 γ 变化的运动轨迹图

显然，机器人在 X 方向的移动距离较大，故考虑让四个轮子沿 X 方向协调运动，在 Y 方向做较小的跟随滑动，来辅助机器人折展。为协调折展，轮子在 X 方向需要的移动线速度，可通过对 X 方向移

动的距离求导得到

$$\begin{aligned}\dot{w}_1 = \dot{w}_2 &= \frac{\cos \gamma \sin^2 \alpha \sin \gamma \cos \alpha (a-c) \dot{\gamma}}{(1 - \cos^2 \gamma \sin^2 \alpha)^{\frac{3}{2}}} + b \dot{s}_{tt} \\ &\quad - \frac{\dot{\gamma} \sin \left(\theta + \arctan \frac{H_{i3}}{F_{i3}} - \frac{\pi}{2} \right) \sin \alpha \sin \gamma \sqrt{F_{i3}^2 + H_{i3}^2}}{\sqrt{1 - \cos^2 \gamma \sin^2 \alpha}} \\ \dot{w}_3 = \dot{w}_4 &= \frac{\cos \gamma \sin^2 \alpha \sin \gamma \cos \alpha (a-c) \dot{\gamma}}{(1 - \cos^2 \gamma \sin^2 \alpha)^{\frac{3}{2}}} - b \dot{s}_{tt} + \\ &\quad - \frac{\dot{\gamma} \sin \left(\theta + \arctan \frac{H_{i3}}{F_{i3}} - \frac{\pi}{2} \right) \sin \alpha \sin \gamma \sqrt{F_{i3}^2 + H_{i3}^2}}{\sqrt{1 - \cos^2 \gamma \sin^2 \alpha}} \\ \dot{s}_{tt} &= \frac{\dot{\gamma} \cos \gamma \sin \gamma \sin^2 \alpha}{\sqrt{1 - \cos^2 \gamma \sin^2 \alpha}}\end{aligned}\quad (34)$$

进而可得各个电机用以协调折展的角速度

$$\omega_j = \frac{2\dot{w}_j}{D_{i3}}, j=1,2,3,4, i=5,6,7,8 \quad (35)$$

通过将四轮速度值以及折展电机速度值代入到运动控制程序中,即可协同折展运动。

2.3.2 移动与折展协调运动算法

进一步地,采用差速的原理,可实现机器人在移动中同时折展,既保持移动性能,也兼顾折展运动,将有效提高可折展移动机器人的效率。具体地,根据麦克纳姆轮的运动规律,考虑每种运动状态下的每个轮子的转向,通过对轮速进行叠加,可实现移动与折展协调运动,如图15所示。

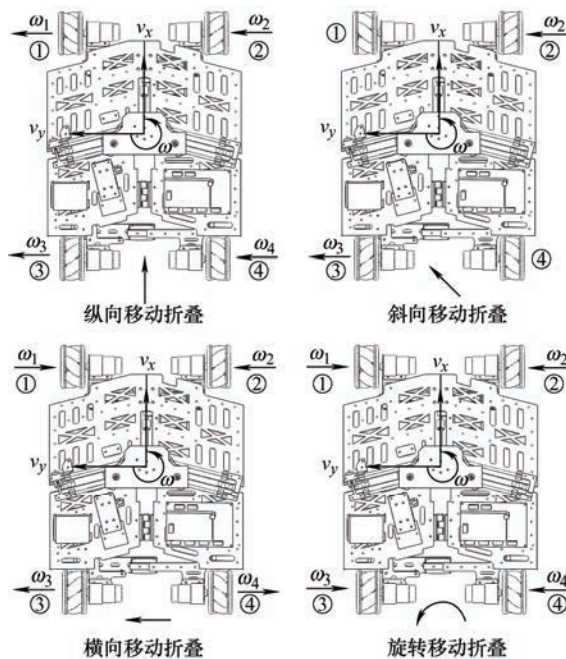


图15 移动与折展协调运动算法示意图

当在运动过程中需要折叠时,图15中黑色加粗标注的即是需要加速的轮子,例如在前进过程中需要折叠运动,对轮3以及轮4进行加速。类似地,在前进过程中需要展开运动,对轮1和轮2进行加速,其他运动方式以此类推。

3 样机制造及试验验证

3.1 样机制造

根据第一节的结构设计,选用碳纤维板作为机器人的主体,选用铝合金作为折展机构的杆件,搭建样机如图16和图17所示,设计参数见表2。在实物样机中,最大横向折展比为1.57,纵向折展比为1.95,高度折展比达到了2.38。当机器人处于折叠状态时,可通过一些较狭窄的路径,而当机器人处于展开状态时,可通过低矮的路径。

表2 可展移动机器人设计参数表

参数	数值	参数	数值	参数	数值
边长 a/mm	180	边长 b/mm	186	长度 c/mm	76.79
角度 $\alpha/^\circ$	76	高度 H_{i3}/mm	14	长度 Y_{i3}/mm	54
轮径 D_{i3}/mm	77	长度 F_{i3}/mm	20	角度 $\gamma_{\max}/^\circ$	78
角度 $\gamma_{\min}/^\circ$	9.5	长度 L_{i3}/mm	42		



图16 折展状态



图17 折展驱动结构

机器人控制系统由上位机软件、下位机 STM32、蜗轮蜗杆直流电机、圆柱直齿轮减速直流电机、电机光电编码器、角度传感器、限位开关、OLED 显示屏, ESP8266WIFI 模块以及机器人本体组成, 如图 18 所示。上位机通过 ESP8266 WIFI 模块和下位机进行通信, 还可通过 PS2 无线遥控和下位机进行通信。建立通信连接之后, 机器人接收包括折展状态、行进的方向和速度的任务信息。下位机对任务信息进行处理, 进而得到每一个电机的速度。通过电机驱动使各个电机转动, 并通过电机编码器和 PID 算法保证电机的转动精度。



图 18 实物图及控制系统

3.2 试验验证

3.2.1 复杂路径试验

为验证机器人通过复杂路径的能力, 首先开展复杂路径的试验, 搭建如图 19 所示试验环境, 整条路径串联一个狭窄通道和一个低矮通道, 试验数据如表 3 所示。可以看出机器人的初始状态为展开状态, 当遇到狭窄的通道时, 通过各个电机配合使其变成折叠状态, 当环境为低矮路径, 通过变形使其变成展开状态。该试验验证了机器人具有通过复杂环境的能力。

表 3 试验数据

狭窄路径宽度/mm	296	狭窄路径长度/mm	400	低矮路径高度/mm	125
初始 γ 角/($^{\circ}$)	65	γ_{\min} /($^{\circ}$)	15	γ_{\max} /($^{\circ}$)	78
折叠路径长度/m	1.1	用时/s	5	平均速度/(m/s)	0.22
展开路径长度/m	0.7	用时/s	3	平均速度(m/s)	0.233
路径总长度/m	3.35	用时/s	15	平均速度(m/s)	0.223

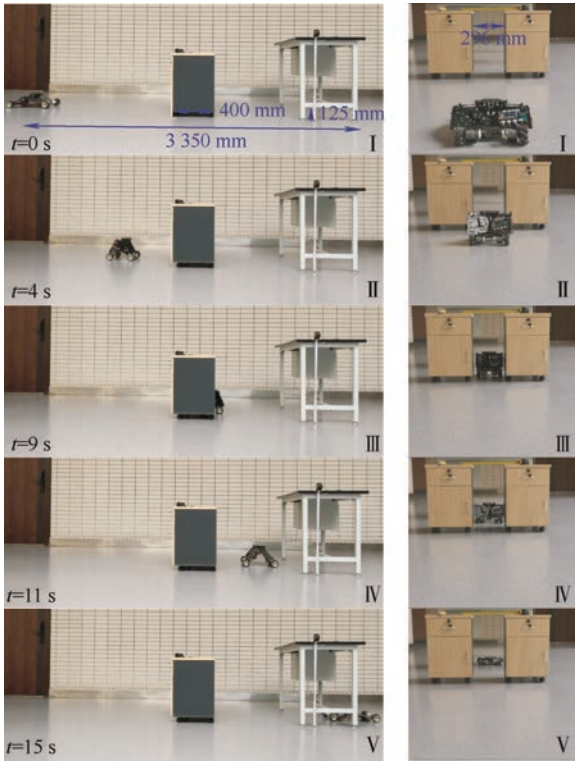


图 19 通过复杂路径示意图

3.2.2 移动与折展协调运动试验

为验证机器人移动与折展协调算法的正确性以及机器人连续折展运动的能力, 搭建如图 20 所示的六边形试验环境。机器人在 8 个子路径中连续运动并完成相应的姿态转换。

- 路径 I: 在直行过程中完成展开;
- 路径 II: 在斜向运动过程中完成折叠;
- 路径 III: 在横向运动过程中完成展开;
- 路径 IV: 原地旋转 180 $^{\circ}$;
- 路径 V: 在直行过程中完成折叠;
- 路径 VI: 在斜向运动过程中完成展开;
- 路径 VII: 在横向运动过程中完成折叠;
- 路径 VIII: 在原地旋转过程中完成展开。

试验结果如图 21 所示, 数据如表 4 所示。

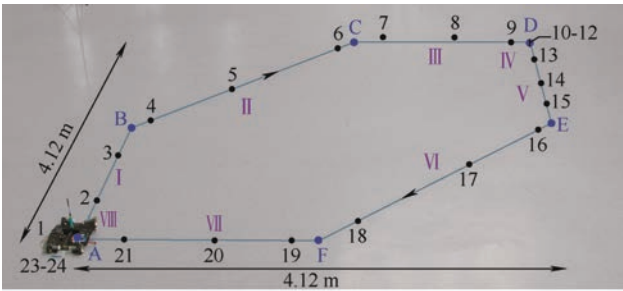


图 20 试验环境

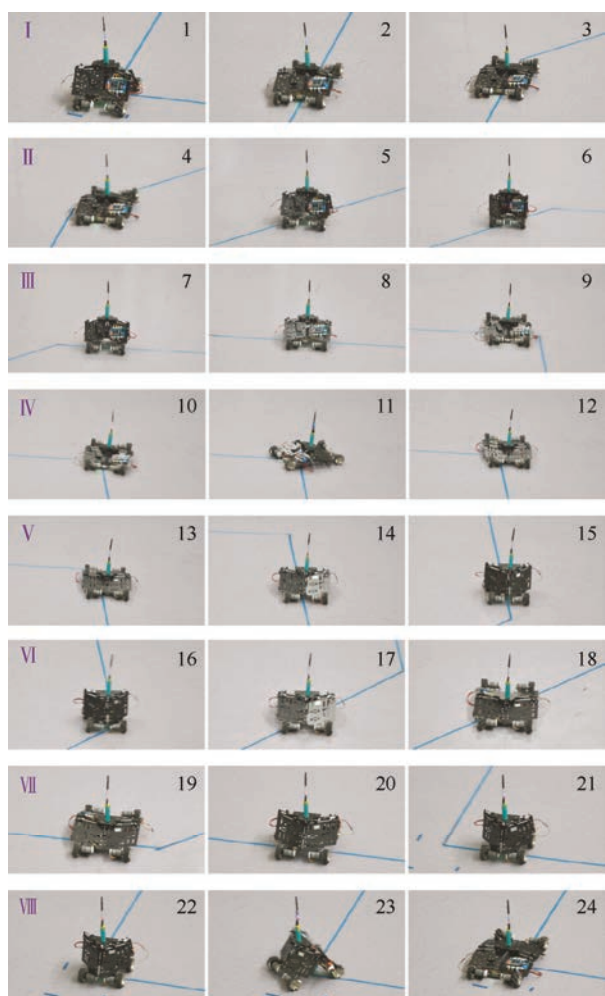


图 21 试验路径图

表 4 试验数据

路径	长度 /m	开始时间/s	平均速度/(m/s)	开始 $\gamma / (^{\circ})$	结束 $\gamma / (^{\circ})$	折展 用时/s
AB	2	0	0.22	34	78	5
BC	3	9	0.27	78	16	4
CD	2	20	0.2	16	78	5
D	0	30	$36^{\circ} / \text{s}$	78	78	0
DE	2	35	0.2	78	16	6
EF	3	45	0.3	16	78	4
FA	2	55	0.2	78	16	6
A	0	65	$36^{\circ} / \text{s}$	16	78	5

机器人顺利完成了直行与折展运动、斜向与折展运动、横向与折展运动、旋转与折展运动，并基本保证了路径的精确性。试验结果表明机器人具有高效的移动与折展协调运动能力。

4 结论

本文将刚性折纸机构引入轮式移动机器人，通过机构创新设计、折展原理分析、样机制造及试验

验证，得出如下结论。

(1) 通过结构创新设计，将自由度较少、折展比较大的刚性折纸机构引入高效的轮式机器人，提出并设计了一种新型单自由度可折展移动机器人机构。

(2) 通过对机器人折展原理进行研究，得到机器人三维尺寸和折展角度之间的关系，并找到最佳驱动位置，为提升机器人通过性奠定基础。对移动与折展控制算法进行研究，实现了机器人高效移动与主体折展协同运动。

(3) 通过搭建实物样机并开展验证试验，证明了该移动机器人具备移动与折展协调运动的能力，适用于包含低矮和狭窄的复杂环境。

(4) 该折展移动机器人主要应用场景为室内复杂环境，对于室外或室内非结构化地形，则需对其运动结构进行改进，并需要提高机器人的运动精度。故我们未来将在机构优化方面以及提高运动精度方面开展研究，并将开展更精准的实验测试，以适用更复杂的环境。

该可折展移动机器人在探测、检测以及救援等工程领域具有广泛的应用潜力，并为移动机器人提供一个新的设计思路。

参 考 文 献

- [1] RUBIO F, VALERO F, LLOPIS-ALBERT C. A review of mobile robots: Concepts, methods, theoretical framework, and applications[J]. International Journal of Advanced Robotic Systems, 2019, 16(2): 1729881419839596.
- [2] KIM Y S, JUNG G P, 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.
- [3] LEE D Y, KIM S R, KIM J S, et al. Origami wheel transformer: A variable-diameter wheel drive robot using an origami structure[J]. Soft Robot, 2017, 4(2): 163-180.
- [4] LEE J Y, KANG B B, LEE D Y, et al. Development of a multi-functional soft robot (SNUMAX) and performance in robosoft grand challenge[J]. Frontiers in Robotics and AI, 2016, 3: 63.
- [5] LEE D Y, KIM J K, SOHN C Y, et al. High-load capacity origami transformable wheel[J]. Science Robotics, 2021, 6(53): eabe0201.
- [6] BAI Yidong, SUN Lingyu, ZHANG Minglu. Design and analysis of multistage adaptive lateral deformation tracked robot[J]. Journal of Mechanical Science and Technology,

- 2022, 36(1): 371-383.
- [7] 李智卿, 马书根, 李斌, 等. 具有自适应能力轮—履复合变形移动机器人的开发[J]. 机械工程学报, 2011, 47(5): 1-10.
- LI Zhiqing, MA Shugen, LI Bin, et al. Development of a transformable wheel-track robot with self-adaptive ability[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2011, 47(5): 1-10.
- [8] NEMOTO T, ELARA MOHAN R, IWASE M. Rolling locomotion control of a biologically inspired quadruped robot based on energy compensation[J]. Journal of Robotics, 2015(1): 649819.
- [9] 侯康, 孙汉旭, 贾庆轩. 球—轮复合可变形机器人的结构设计与分析[J]. 机械工程学报, 2012, 48(15): 25-31.
- HOU Kang, SUN Hanxu, JIA Qingxuan. Structure design and analysis of a transformable spherical-wheel robot[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2012, 48(15): 25-31.
- [10] 刘超, 谭稀岑, 姚燕安, 等. 一种新型可变形轮腿式机器人的设计与分析[J]. 机械工程学报, 2022, 58(3): 65-74.
- LIU Chao, TAN Xicen, YAO Yanan, et al. Design and analysis of a novel deformable wheel-legged robot[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2022, 58(3): 65-74.
- [11] 官渐. 轮腿式移动机器人主/被动变形机构设计及研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2019.
- GUAN Jian. Design and research of passive/active transformable mechanism for wheel-legged mobile robot[D]. Chongqing: Chongqing University, 2019.
- [12] LIU Ran, YAO Yanan, LI Yezhuo. Design and analysis of a deployable tetrahedron-based mobile robot constructed by Sarrus linkages[J]. Mechanism and Machine Theory, 2020, 152: 103964.
- [13] 魏巍, 庄哲明, 唐昭, 等. 基于 3-RSR 并联机构的蛇形机器人本体构型设计与运动性能研究[J]. 机械工程学报, 2021, 57(23): 21-33.
- WEI Wei, ZHUANG Zheming, TANG Zhao, et al. Body configuration design and kinematic performance research of snake-like robot based on 3-RSR parallel mechanism[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2021, 57(23): 21-33.
- [14] SHANG Hao, WEI Dawei, KANG Rongjie, et al. Gait analysis and control of a deployable robot[J]. Mechanism and Machine Theory, 2018, 120: 107-119.
- [15] 张霄, 李明, 崔琦峰, 等. 基于正六边形折纸的单自由度可展结构[J]. 机械工程学报, 2021, 57(11): 153-164.
- ZHANG Xiao, LI Ming, CUI Qifeng, et al. Regularly hexagonal origami pattern inspired deployable structure with single degree of freedom[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2021, 57(11): 153-164.
- [16] SUN Yinan, JIANG Yuqi, YANG Hao, et al. Salamanderbot: A soft-rigid composite continuum mobile robot to traverse complex environments[C]// IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), 2020: 2953-2959.
- [17] WANG Cheng, LI Junlan, GARBA U H, et al. A Kirigami-inspired transformable robot[C]// 14th International Conference on Intelligent Robotics and Applications (ICIRA), 2021: 137-146.
- [18] ZE Qiji, WU Shuai, NISHIKAWA J, et al. Soft robotic origami crawler[J]. Science Advances, 2022, 8(13): eabm7834.
- [19] CHEN Yan, FENG Huijuan, MA Jiayao, et al. Symmetric waterbomb origami[J]. Proc. Math. Phys. Eng. Sci., 2016, 472(2190): 20150846.
- [20] ZIRBEL S A, LANG R J, THOMSON M W, et al. Accommodating thickness in origami-based deployable arrays[J]. Journal of Mechanical Design, 2013, 135(11): 111005.
- [21] MIURA K. Method of packaging and deployment of large membranes in space[J]. Institute of Space & Astronautical Science Report, 1985, 618: 1-9.
- [22] 张德昊. 麦克纳姆轮结构移动机器人的室内定位和路径规划[D]. 杭州: 浙江大学, 2021.
- ZHANG Dehao. Indoor localization and path planning of mecanum wheel mobile robot[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2021.

作者简介: 杨富富(通信作者), 男, 1985 年生, 副教授, 硕士研究生导师。主要研究方向为机构与机器人学、可展结构。

E-mail: yangfufu@fzu.edu.cn。

卢帅龙, 男, 1998 年生, 硕士研究生。主要研究方向为移动机器人。

E-mail: n190227087@fzu.edu.cn。

宋亚庆, 女, 1990 年生, 讲师。主要研究方向为机构与机器人学。

E-mail: yqsong@shnu.edu.cn

张俊, 男, 1981 年生, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为机构与机器人学。

E-mail: zhang_jun@fzu.edu.cn。

姚立纲, 男, 1964 年生, 博士, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为机器人机构及机械传动学、康复机器人、现代设计方法、复杂曲面建模及精确制造。

E-mail: ylgao@fzu.edu.cn