

含折展平台的多模式移动并联机构设计与运动特性分析

张春燕 平安

(上海工程技术大学机械与汽车工程学院, 上海 201620)

摘要: 为使移动机器人能更好地适应丘陵山地等农业环境,以具有较大折展特性的 8R 机构为平台,构造一种含折展平台的多模式移动并联机构,作为可用于农业环境作业的移动机器人搭载平台,通过分析平台折展过程中折展率变化规律,确定最优折展平台参数。对因折展产生的多种运动模式,通过螺旋理论和图论法绘制机构的旋量约束拓扑图,以此求出机构各运动模式自由度,分析机构模式切换机理。最后采用 ADAMS 进行仿真,设计样机验证机构在各运动模式的可行性,为后期在搭载平台上安装不同的末端执行器装置提供良好的研究基础。

关键词: 多模式移动并联机构; 折展平台; 模式切换; 运动特性

中图分类号: TH112 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2022)03-0449-10

OSID:



Design and Kinematic Analysis of New Multi-mode Hilly Orchard Mobile Parallel Mechanism with Folding Platform

ZHANG Chunyan PING An

(School of Mechanical and Automotive Engineering, Shanghai University of Engineering Science, Shanghai 201620, China)

Abstract: A novel multi-mode mobile parallel robot with folding and deploying platform was proposed to make mobile mechanism adapt in hilly and mountainous agricultural environment. The design and research of mobile robot mechanism has become a very important exploration direction of robot mechanism. The design of the multi-mode mobile parallel mechanism was composed of the spatial geometric relationship of the rotating pair and the principle of interference. The mechanism platform was constructed on the 8R structure, and the bending rate variation curve of the platform was obtained during the folding process and the optimized platform parameters were determined. The screw theory and graph theory was used to draw the topological diagram of the movement and folding modes. Topological constraint diagram was used to calculate the degree-of-freedom (DOF) of each mode. The mode switching principle was used to analyze of the robot. Movement process of the robot was proved by ADAMS. Finally, prototype was concluded that the movement process of the robot was stable and reliable, which can provide a good mobile mechanism carrier for the later installation of pesticide spraying, seed sowing, and patrol monitoring application modules. It was of great significance to further explore the use of multi-modal mobile robots in agriculture.

Key words: multi-mode mobile parallel mechanism; folding and deploying platform; mode switching; movement characteristics

0 引言

农业机器人备受学者的广泛关注,尤其是适用于特殊复杂地形作业的农业机器人^[1-3]。由于丘陵山地土层松软,具有陡坡、岩石等复杂地形环境,传统轮式、足式和履带式农业机器人很难适应这种环

境的作业任务^[4]。因此,对丘陵山地等农业环境的农业机器人提出了空间小型化与移动多样性的高要求。随着机器人技术的迅速发展,具有一定可变形^[5]、自重构^[6]、多操作模式^[7-8]的多模式移动机构逐渐成为机器人在农业领域应用的研究热点。张硕等^[9]提出一种形态重构,以适应农业复杂环境的

移动机器人。AZIMI 等^[10]研究用于温室环境的农业移动机器人。FOUNTAS 等^[11]研究针对田间作业的农业移动机器人。ZHANG 等^[12]提出具有滚动与自穿越特性的 3-RSR 自变形多模式移动并联机构。LIU 等^[13]基于单环运动链提出四杆移动机器人。上述这些移动机器人可通过自变形、可重构等方式在复杂环境实现自我重组从而实现越障与移动;但因机器人不具备较强折展能力,导致整体结构与普通移动机器人相比较为庞大^[14],不便于携带和无法适应丘陵山地的复杂地形环境。

而折展机构因具有占用体积小,折叠收纳能力强等优点被应用于工程、小范围作业等机器人领域^[15-20]。因此,本文运用“折展”理念将具有较大空间折展能力的 8R 结构^[21]应用到适应丘陵山地作业机构设计中。利用折展 8R 机构的分岔位置特性^[22-23]具有自由度可变的特点,实现机构在丘陵山地作业中折展与各运动模式间切换等功能,并根据螺旋理论^[24]与图论^[25]对机构在各运动模式下的自由度和切换机理进行分析,同时采用 ZMP^[26]原理分析机构移动模式的运动特性,在

ADAMS 软件中进行仿真,最后通过设计样机验证机构设计的可行性。

1 机构平台设计

1.1 折展平台结构设计

8R 具有运动分岔特点,可通过改变转动副轴线关系实现机构的运动位型转换^[21]。本文即借助这一原理设计移动并联机构的折展平台,如图 1a 所示,折展平台由 8 个 R 副和 8 根长度相同的杆件首尾相连组成。定义机构的分岔位型为折展平台的初始位形,如图 1b 所示,此时轴线旋量 $\$i (i = 1, 3, 5, 7)$ 相互平行,旋量 $\$i (i = 2, 4, 6, 8)$ 交于一点 Q ,折展平台处于完全展开位型;改变平台轴线位置如图 1 所示,当旋量 $\$i (i = 1, 3, 5, 7)$ 交于一点 P ,旋量 $\$i (i = 2, 4, 6, 8)$ 交于一点 Q 时平台处于另一分岔过渡位型,可以实现前后位型的过渡变换;继续改变轴线位型如图 1c 所示,旋量 $\$i (i = 1, 3, 5, 7)$ 交于一点 P ,旋量 $\$i (i = 2, 4, 6, 8)$ 交于一点 Q ,此时,两组旋量分别共线、正交形成的平面相互平行,且 P 投影与 Q 重合,平台此时处于完全折叠位型。

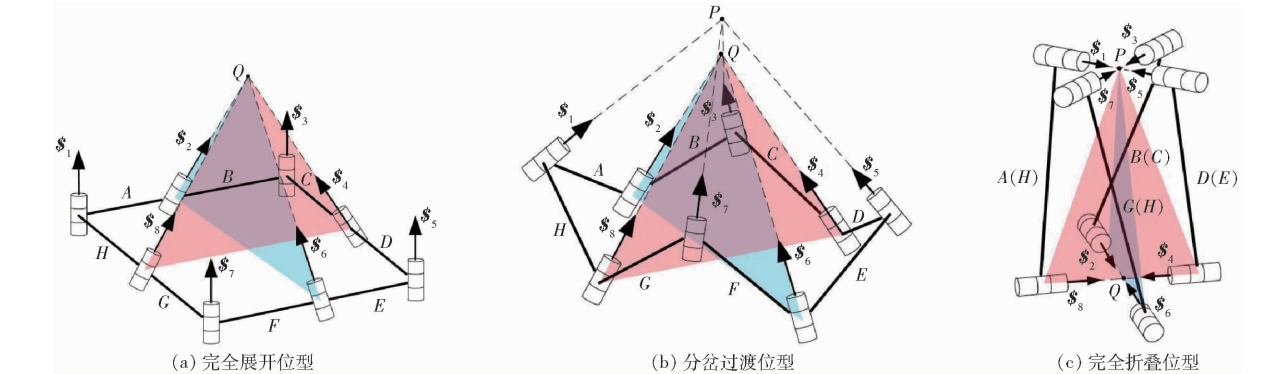


图 1 折展平台各轴线位置
Fig. 1 Position of each axis of folding platform

为实现图 1 所示折展平台的 3 种位型,连接 8 个 R 副的杆件应设计成如图 2a 所示的形状,杆长为 l ,杆的截面如图 2b 所示,转动副轴线半径为 r ,竖直的轴线与杆件截面围成一个边长为 a 的正方形;且为确保 8 根杆件可首尾相连,位于每根杆首尾位置的两个 R 副轴线空间呈角度 λ 。

依照相邻两转动副轴线方向相同的原则,将 8 根杆通过转动副 R 进行铰接,相邻连杆之间的夹角为 φ ,构成如图 3 所示的折展平台,分别对应图 1 所示的各轴线位型。

1.2 折展平台折展性

当平台由完全展开的初始位型向完全折叠状态切换时,如图 3c 所示,会发现由于杆截面形状的影响,相邻两根杆在完全折叠时出现干涉。以图 3 中杆 A 和 H 为例,在折叠时杆件会发生如图 4a 所示

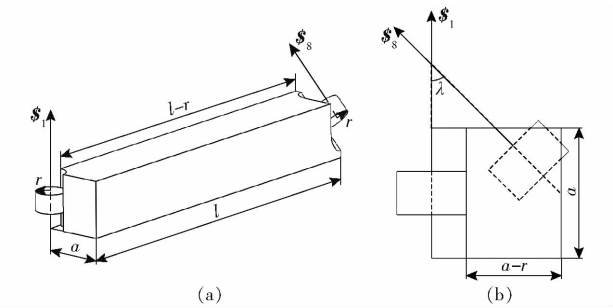


图 2 折展平台连杆设计图
Fig. 2 Platform linkage design

的重叠干涉,为消除这种干涉需对平台连杆截面进行截面优化(图 4b),从截面起始沿杆件方向切除 c ,切除后截面直角端与底面间的夹角为 λ' 。

在折展过程中,由于平台连杆截面切除量 c 与平台连杆长宽比参数不同,使机构折展率受到的影

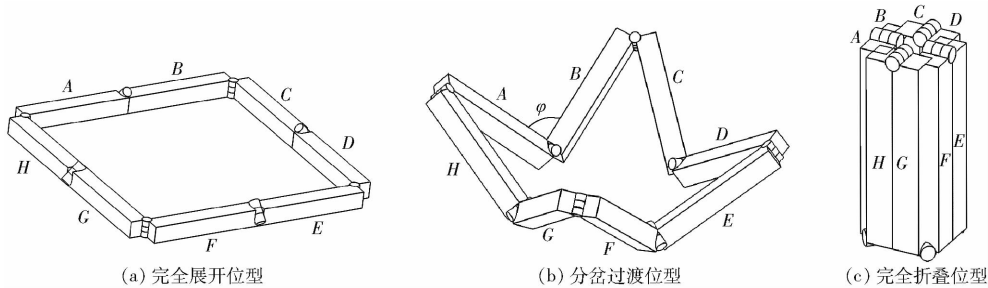


图 3 折展平台各位型
Fig. 3 Each type of folding platform

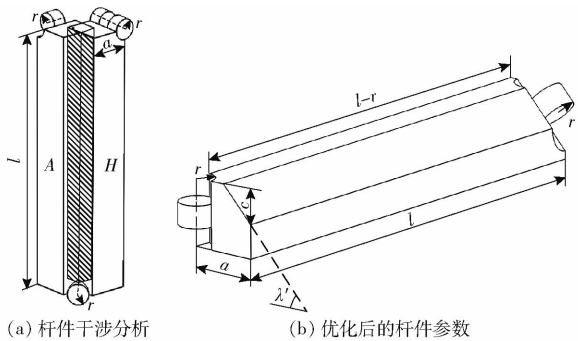


图 4 平台连杆干涉分析与优化
Fig. 4 Interference analysis and optimization of platform linkage

响不同,故对平台连杆截面的切除量 c 和平台连杆长宽比 $k(k=l/a)$ 进行分析。根据几何关系得折展位型下折展率 η 计算式为

$$\eta = \frac{s_D}{s_F} = \frac{[2(l+a)\sin\varphi]^2 - 4\left[a^2 - \frac{r(\pi - \sin\lambda')}{2}\right]}{4[a + (a-c)\tan\lambda']^2 - \frac{rs\sin\lambda'}{2}} \quad (1)$$

式中 s_D ——平台完全展开面积
 s_F ——平台完全折叠面积

通过图 3c 可得,为使平台可以完全折叠,截面对称切除,则 $\lambda' = 45^\circ$ 。由此根据式(1)可得机构折展率 η 随切除量 c 和长宽比 k 的变化图谱。由图 5 可看出,机构折展率随切除量 c 和长宽比 k 的增加而增大。当切除量 $c = 40\text{ mm}$ 、长宽比 $k = 6$ 时,平台折展率达到最大,此时 c 与 k 为平台最优参数。平台折展位型如图 6 所示,从图 6 可以看出,平台展开没有影响(图 6a),且完全折叠没有发生干涉(图 6b),平台杆件参数设计合理。

2 可折展移动并联机构多模式切换机理

2.1 多模式折展机构设计

以图 6 设计的平台为上下平台 T_1 、 T_2 ,用 4 条完全相同的 URRRU 支链(由构件 $I_i \sim N_i(i = 1, 2, 3, 4)$ 组成)对称连接,组成整体结构对称的并联机构如图 7 所示。其中 $U_{T_1}^i$ 、 $U_{T_2}^i$ 为支链 i 与折展平台 T_1 、

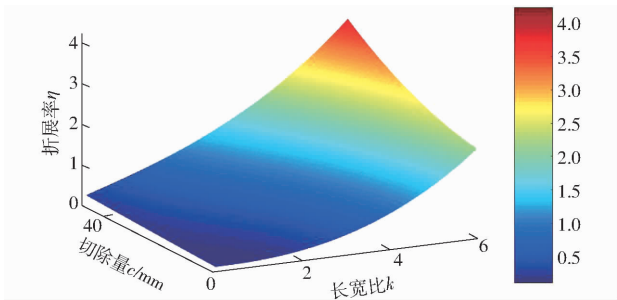


图 5 折展率变化曲面
Fig. 5 Variation curve of folding and deploying rate

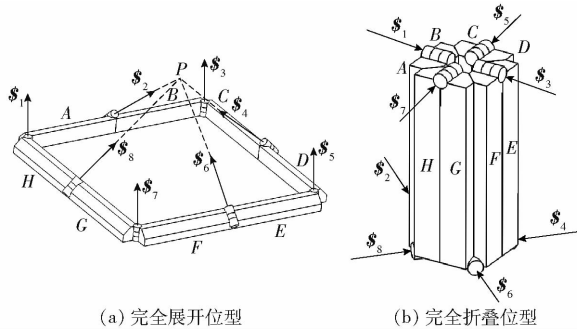


图 6 优化设计后折展平台
Fig. 6 Optimized design of folding platform

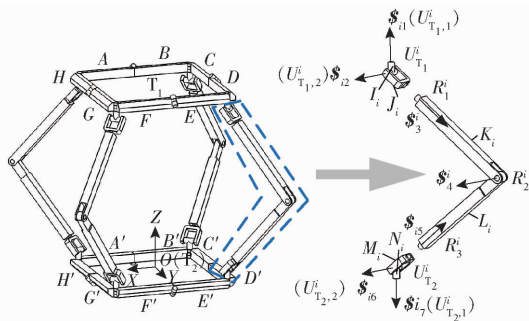


图 7 可折展多模式并联机构与支链示意图
Fig. 7 Schematic of foldable multi-mode parallel mechanism and branch chain

T_2 相连的 U 副($U_{T_1,1}^i$ 为与旋量 $\$i(i = 1, 3, 5, 7)$ 方向同向的转动副轴线, $U_{T_1,2}^i$ 为平行于 R_2^i 的转动副轴线), R_1^i 为 U_1^i 与支链相连的转动副, R_2^i 为支链连杆连接转动副, R_3^i 为 $U_{T_2}^i$ 与支链相连的转动副。支链旋量 $\$j(i = a \sim d, j = 1, 2, \dots, 7)$ 如图 7 所示,其中 $\$i_1$ 沿转动副轴线 $U_{T_1,1}^i$ 方向, $\$i_2$ 沿转动副轴线 $U_{T_2,1}^i$

方向, $\$_{i3}$ 过转动副 R_1^i 与支链杆件同向, $\$_{i4}$ 过支链
连杆连接转动副 R_2^i 沿 $U_{T_{1,2}}^i$ 方向, $\$_{i5}$ 过转动副 R_3^i 沿
支链杆件方向, $\$_{i6}$ 沿转动副轴线 $U_{T_{2,2}}^i$ 方向, $\$_{i7}$ 沿转
动副轴线 $U_{T_{2,1}}^i$ 方向。以平台 T_2 的几何中心为原点
建立图 7 所示的坐标系 $OXYZ$, X 轴指向连杆 H 、 G
连接处平行于平台平面方向, Y 轴指向连杆 E 、 F 连
接处平行于平台平面方向, Z 轴方向由右手定则
确定。

2.2 可折展并联机构多运动模式及自由度分析

2.2.1 可折展并联机构各运动模式分析

旋量的变化会使机构自由度发生改变,从而导
致机构模式的切换^[27]。因此当图 1 平台轴线的分
岔位形发生变化使可折展并联机构自由度发生改变
而具有多种模式。图 8a 为机构移动状态旋量图,此
时平台 T_1 旋量 $\$_2$ 、 $\$_4$ 、 $\$_6$ 、 $\$_8$ 存在交点 Q , 平台 T_2
旋量 $\$_{10}$ 、 $\$_{12}$ 、 $\$_{14}$ 、 $\$_{16}$ 存在交点 Q' , 此时平台 T_1 旋
量 $\$_1$ 、 $\$_3$ 、 $\$_5$ 、 $\$_7$ 和平台 T_2 旋量 $\$_9$ 、 $\$_{11}$ 、 $\$_{13}$ 、 $\$_{15}$
均不存在交点。而当平台转动副转动到图 8 所示机
构折展状态时, Q 、 Q' 点仍存在, 折展平台 T_1 旋量
 $\$'_1$ 、 $\$'_3$ 、 $\$'_5$ 、 $\$'_7$ 交于一点 P , 平台 T_2 旋量 $\$_9$ 、 $\$_{11}$ 、
 $\$_{13}$ 、 $\$_{15}$ 交于一点 P' , 机构自由度发生改变, 使机构

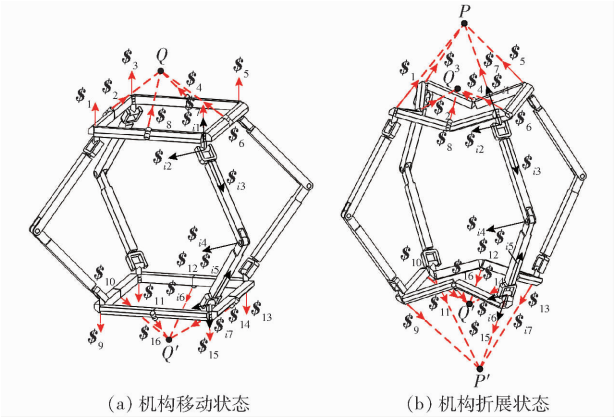


图 8 机构旋量图
Fig. 8 Screw diagrams of mechanism

从移动模式切换到折叠模式, 机构具体切换过程如
图 9 所示。

机构处于如图 9a 所示位型时, 通过驱动图 7 中
的支链转动副 $U_{T_{1,1}}^i$ 使轴线 $\$_{i2}$ 、 $\$_{i6}$ 与平台连杆平行,
可实现图 9b 所示六边形移动模式。而当驱动
图 7 转动副 $U_{T_{1,2}}^i$ 、 R_2^i 、 $U_{T_{2,2}}^i$, 轴线 $\$_{i2}$ 、 $\$_{i6}$ 、 $\$_{i4}$ 变化,
机构即实现图 9d 所示的六杆向四杆转换的过渡状
态。而当轴线 $\$_{i4}$ 与 $\$_{i2}$ 、 $\$_{i6}$ 共面时, 机构可实现机
构四边形移动模式。而当继续驱动转动副 $U_{T_{1,2}}^i$ 、
 R_2^i 、 $U_{T_{2,2}}^i$, 则机构回到过渡状态图 9d, 此时机构实现
移动模式的逆向切换。从这一状态通过驱动转动副
 $U_{T_{1,2}}^i$ 、 R_2^i 、 $U_{T_{2,2}}^i$, 利用机构奇异分岔位型^[12] 实现机构
向折叠模式的切换。

机构从移动状态变为折展状态, 此时位型为
图 9h 机构完全展开状态, 驱动图 7 平台旋量 $\$_i$
($i=1, 2, \dots, 8$) 所在转动副使机构折叠至如图 9g 所
示机构完全折叠状态, 而反向转动平台旋量 $\$_i$ ($i=$
 $1, 2, \dots, 8$) 所在转动副是机构处于机构折展过程如
图 9f 所示, 继续转动平台旋量 $\$_i$ ($i=1, 2, \dots, 8$) 所
在转动副使 P 点消失并让旋量 $\$_i$ ($i=1, 2, \dots, 8$) 逐
渐实现相互平行, 机构实现图 9h 的机构完全展开状
态, 驱动如图 7 中 R_2^i 使机构运动到如图 9e 机构折
展状态, 该状态改变平台旋量 $\$_i$ ($i=1, 2, \dots, 8$) 所
在转动副又可使机构由折展状态切换至移动状态。

2.2.2 可折展并联机构各运动模式下自由度

自由度是机构实现运动的依据, 文献[28-29]
中基于图论和螺旋理论对机构自由度进行计算和分
析, 可以对机构旋量组成进行描述, 具有结构表达清
晰、易于数学求解等优点。通过绘制机构不同状态
下的旋量约束拓扑图, 将旋量约束方程组转换为旋
量约束矩阵并计算出矩阵零空间维数, 矩阵零空间
维数等于矩阵列数减去秩数即为机构自由度。这种
计算自由度的方式比单纯用旋量理论从支链开始求

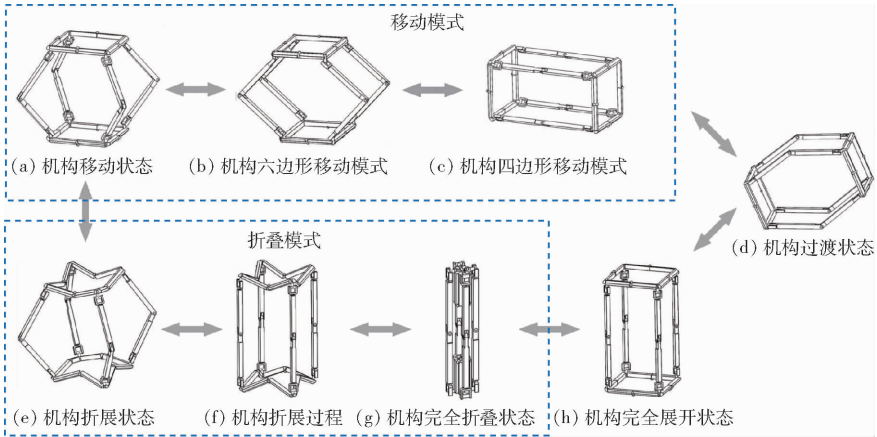


图 9 可折展机构的多种运动模式
Fig. 9 Multiple modes of mechanism

将式(2)写成矩阵的形式

$$MN = \mathbf{0} \quad (3)$$

其中

$$N = [\omega_1 \cdots \omega_{16} \quad \omega_{a1} \cdots \omega_{a7} \quad \omega_{b1} \cdots \omega_{b2} \quad \omega_{c1} \cdots \omega_{c7} \quad \omega_{d1} \cdots \omega_{d7}]^T \quad (4)$$

$$M = \begin{bmatrix} M_2 & M_5 & M_1 & M_1 & M_1 & M_1 & M_1 & M_1 & M_1 & M_1 & M_1 \\ M_1 & M_1 & M_8 & M_{11} & M_1 & M_1 & M_1 & M_1 & M_1 & M_1 & M_1 \\ M_3 & M_1 & M_9 & M_1 & M_{14} & M_{15} & M_{18} & M_{20} & M_1 & M_1 & M_1 \\ M_1 & M_7 & M_1 & M_{13} & M_1 & M_1 & M_1 & M_{22} & M_{24} & M_{25} & M_{26} \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$\left. \begin{aligned} M_1 &= [0 \quad 0 \quad 0 \quad 0] \\ M_2 &= [\$1 \quad -\$2 \quad -\$3 \quad -\$4] \\ M_3 &= [0 \quad \$2 \quad \$3 \quad 0] \\ M_4 &= [0 \quad 0 \quad 0 \quad \$4] \\ M_5 &= [-\$5 \quad -\$6 \quad -\$7 \quad \$8] \\ M_6 &= [\$5 \quad 0 \quad 0 \quad 0] \\ M_7 &= [0 \quad \$6 \quad \$7 \quad 0] \\ M_8 &= [\$9 \quad -\$10 \quad -\$11 \quad -\$12] \\ M_9 &= [0 \quad \$10 \quad \$11 \quad 0] \\ M_{10} &= [-\$9 \quad 0 \quad 0 \quad 0] \\ M_{11} &= [-\$13 \quad -\$14 \quad -\$15 \quad 0] \\ M_{12} &= [0 \quad 0 \quad 0 \quad -\$16] \\ M_{13} &= [0 \quad \$14 \quad \$15 \quad 0] \\ M_{14} &= [\$a_1 \quad -\$a_2 \quad -\$a_3 \quad -\$a_4] \\ M_{15} &= [-\$a_5 \quad -\$a_6 \quad -\$a_7 \quad \$b_1] \\ M_{16} &= [0 \quad 0 \quad 0 \quad -\$b_1] \\ M_{17} &= [\$b_2 \quad \$b_3 \quad \$b_4 \quad \$b_5] \\ M_{18} &= [-\$b_2 \quad -\$b_3 \quad -\$b_4 \quad -\$b_5] \\ M_{19} &= [\$b_6 \quad \$b_7 \quad 0 \quad 0] \\ M_{20} &= [-\$b_6 \quad -\$b_7 \quad -\$c_1 \quad -\$c_2] \\ M_{21} &= [0 \quad 0 \quad \$c_1 \quad \$c_2] \\ M_{22} &= [-\$c_3 \quad -\$c_4 \quad -\$c_5 \quad -\$c_6] \\ M_{23} &= [\$c_3 \quad \$c_4 \quad \$c_5 \quad \$c_6] \\ M_{24} &= [-\$c_7 \quad 0 \quad 0 \quad 0] \\ M_{25} &= [\$c_7 \quad \$d_1 \quad \$d_2 \quad \$d_3] \\ M_{26} &= [\$d_4 \quad \$d_5 \quad \$d_6 \quad -\$d_7] \end{aligned} \right\} (6)$$

旋量约束矩阵 $\mathbf{M}$ 为一个 30×44 维矩阵, 机构移动状态自由度对应于旋量约束矩阵的零空间维数, 通过计算可得

$$\text{rank}(\mathbf{M}) = 41 \quad (7)$$

旋量约束矩阵 M 的列数为 44, 其零空间的维

数为列数减去矩阵的秩数,可得机构移动状态所代表的移动模式自由度为3。

机构从图 9a 移动状态变化到图 9e 折展状态的旋量约束拓扑图如图 11 所示,其中平台 T_1 运动旋量 $\$1 \sim \8 与平台 T_2 运动旋量 $\$9 \sim \16 发生改变,旋量约束拓扑图中对应改变运动旋量的箭头变成虚线表示,旋量约束拓扑图改变使建立的约束方程组和矩阵也发生改变并影响自由度计算结果。

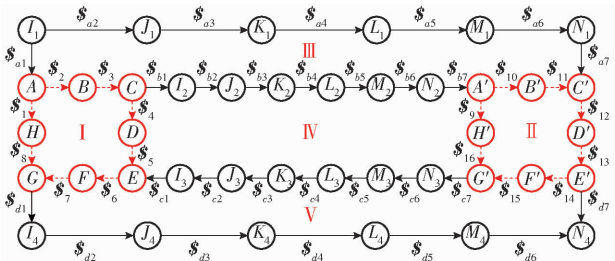


图 11 机构折展状态闭环旋量约束拓扑图

式(2)中的 $\$1 \sim \16 发生改变,点 $P、P'$ 满足形成条件矩阵 M 中 $M_2 \sim M_{13}$ 发生改变,改变后矩阵 M' 为一个 30×44 维矩阵,代入式(3)得

rank(M') = 42

(8)

机构折展状态自由度为旋量约束矩阵的零空间维数,旋量约束矩阵 M' 的列数为 44,零空间的维数为列数减去秩数,得到折展状态机构自由度为 2。

同理,将图 9b 六边形移动模式与图 9c 四边形移动模式下根据旋量约束拓扑图改变后的各旋量代入相应的矩阵中,可以分别得到机构在六边形移动模式下的自由度为 3,在四边形移动模式下的自由度为 1。

3 可折展机构各运动模式电机驱动实现

为实现可折展平台多种模式运动,每一个驱动关节沿转动轴线安装一个步进电机,分布如图 12 所示。平台 $T_1、T_2$ 上安装电机分别为 $M_1、M_2$ 和 $M_3、M_4$ 。支链上安装电机为 $M_{ij} (i = 1, 2, 3, 4; j = 1, 2, \dots, 7)$,其中 M_{i1} 安装在转动副轴线 $U_{T1,1}^i$, M_{i2} 安装在转动副轴线 $U_{T1,2}^i$, M_{i3} 安装在转动副 R_1^i , M_{i4} 安装在转动副 R_2^i , M_{i5} 安装在转动副 R_3^i , M_{i6} 安装在转动副轴线 $U_{T2,2}^i$, M_{i7} 安装在转动副轴线 $U_{T2,1}^i$ 。通过对驱动电机分时控制进而实现机构各运动间切换。

依据文献[13]将电机状态分为驱动(●)、锁定(○)、失效(⊗)3 种不同状态,通过改变电机状态使机构发生运动变形,改变平台点 $P(P')$ 存在条件,使机构自由度数改变切换不同运动模式。机构在实现不同运动模式时,机构所处运动状态、点 $P(P')$ 是

否存在、自由度、电机状态如表 1 所示。

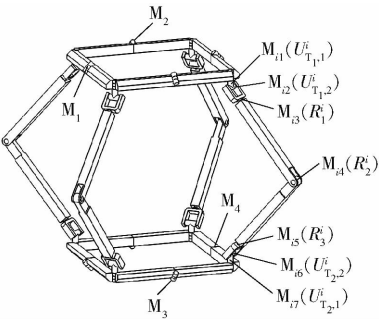


图 12 机构电机分布示意图

Fig. 12 Motor distribution of mechanism

表 1 机构不同模式下自由度与电机状态

Tab.1 Number of degrees of freedom and state of motor in different modes

运动模式	自由度	运动状态	电机状态	点 $P(P')$ 是否存在
折叠模式	2		M_1 M_2 M_3 M_4 M_{11} M_{12} M_{13} M_{14} M_{15} M_{16} M_{17} M_{21} M_{22} M_{23} M_{24} M_{25} M_{26} M_{27} M_{31} M_{32} M_{33} M_{34} M_{35} M_{36} M_{37} M_{41} M_{42} M_{43} M_{44} M_{45} M_{46} M_{47} 支支支支支支支支 链链链链链链链链 1 2 3 4	是
六边形移动模式	3		M_1 M_2 M_3 M_4 M_{11} M_{12} M_{13} M_{14} M_{15} M_{16} M_{17} M_{21} M_{22} M_{23} M_{24} M_{25} M_{26} M_{27} M_{31} M_{32} M_{33} M_{34} M_{35} M_{36} M_{37} M_{41} M_{42} M_{43} M_{44} M_{45} M_{46} M_{47} 支支支支支支支支 链链链链链链链链 1 2 3 4	否
四边形移动模式	1		M_1 M_2 M_3 M_4 M_{11} M_{12} M_{13} M_{14} M_{15} M_{16} M_{17} M_{21} M_{22} M_{23} M_{24} M_{25} M_{26} M_{27} M_{31} M_{32} M_{33} M_{34} M_{35} M_{36} M_{37} M_{41} M_{42} M_{43} M_{44} M_{45} M_{46} M_{47} 支支支支支支支支 链链链链链链链链 1 2 3 4	否

4 移动模式运动特性分析

本文所研究的可折叠多模式移动并联机构,主要工作状态是移动模式,机构实现移动运动时不仅要满足自由度与电机驱动条件,还要考虑移动过程中的稳定特性,分析计算机构在滚动过程中驱动角度对质心变化的影响,为 ADAMS 仿真提供运动参数。

4.1 六边形移动模式运动稳定性

机构在六边形移动模式下运动方式为六边形滚动,质心 ZMP 分析为机构能否实现稳定滚动与驱动输入提供判断与选择依据,如图 13 所示,六边形滚动时分别由 2 条支链与上下平台的连杆组成 2 个运动状态完全相同的 6R 闭环,因此计算重心的位置时相对应位置运动完全相同的连杆可以当成一个整体进行分析。根据以上运动学分析可得机构输入角 $\theta_1、\theta_2、\theta_3$ 与 ZMP 变化关系为

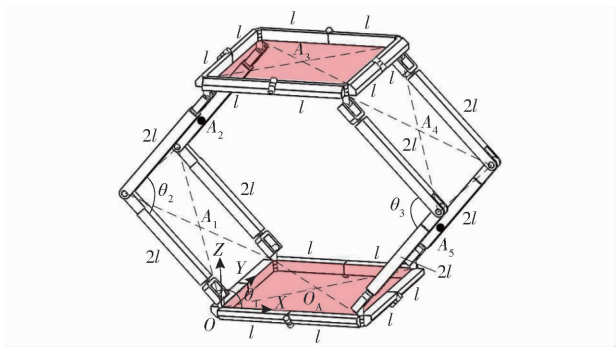


图 13 六边形移动模式坐标系
Fig. 13 Coordinate system diagram of hexagonal movement mode

$$X_{ZMP} = \frac{\sum_{i=1}^n m_i (\ddot{z}_i + g) x_i - \sum_{i=1}^n m_i \ddot{x}_i z_i - \left(\sum_{i=1}^n J_i \alpha_i \right)_y}{\sum_{i=1}^n m_i (\ddot{z}_i + g)} \quad (9)$$

$$Z_{ZMP} = \frac{\sum_{i=1}^n m_i (\ddot{x}_i + g) z_i - \sum_{i=1}^n m_i \ddot{z}_i x_i - \left(\sum_{i=1}^n J_i \alpha_i \right)_z}{\sum_{i=1}^n m_i (\ddot{x}_i + g)} \quad (10)$$

式中 m_i ——第 i 杆件质量
 J_i ——第 i 杆件转动惯量
 α_i ——第 i 杆件角加速度
 g ——重力加速度
 x_i, y_i, z_i ——第 i 杆件的质心坐标
 $\ddot{x}_i, \ddot{y}_i, \ddot{z}_i$ ——第 i 杆件在 X 轴、 Y 轴和 Z 轴方向上的加速度

各个连杆的质量均为 m , 此时由下平台与地面接触, 支撑区域中心位置坐标 $O_A(l, l, 0)$, 由几何关系可知各滚动平面质心 $A_1 \sim A_5$ 以及以上所求角度, 分别代入式 (9)、(10) 可以得到输入角 θ_1, θ_2 与 ZMP 的关系如图 14 所示。

由图 14 可知, $0 < \theta_1 < 2 \text{ rad}, 0 < \theta_2 < 3 \text{ rad}$ 时, $X_{ZMP} > 0, Z_{ZMP} > 0$ 时机构六边形移动模式滚动处于稳定状态。 $2 \text{ rad} < \theta_1 < 5 \text{ rad}, 3 \text{ rad} < \theta_2 < 5 \text{ rad}$ 时, $X_{ZMP} < 0, Z_{ZMP} > 0$ 时机构六边形移动模式滚动处于失稳状态, 即此时机构处于倾翻过程。

4.2 四边形移动模式运动稳定性

机构在四边形移动模式下运动方式为四边形滚动, 其坐标系及边长参数如图 15 所示, 假设机构中所有的杆件质量均匀分布且质心位于其几何中心处, 连杆质量为 m_1 , 支链质量为 m_2 , 此时上下平台的两条连杆及两条支链与地面接触。代入式 (9)、(10), 可得输入角 θ 与 ZMP 的关系如图 16 所示。

由图 16 可知, 当 θ 达 65° 时, ZMP 在 X 轴方向

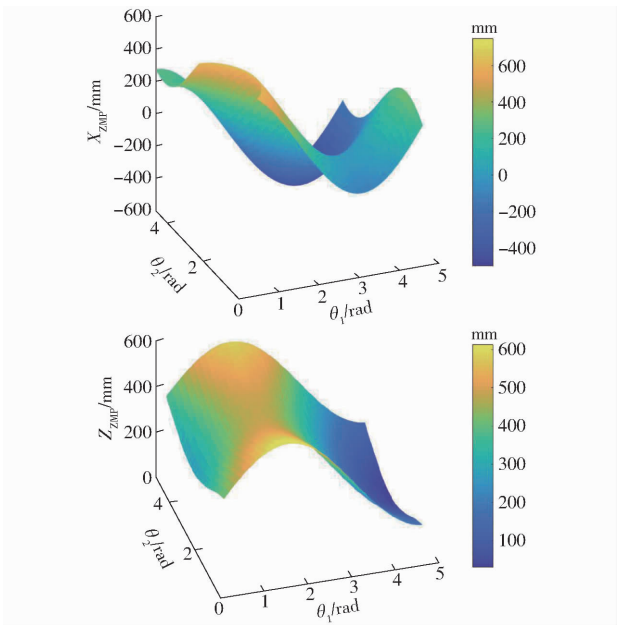


图 14 X_{ZMP}, Z_{ZMP} 随角度的变化曲面
Fig. 14 ZMP of X axis and Z axis change with angle graph

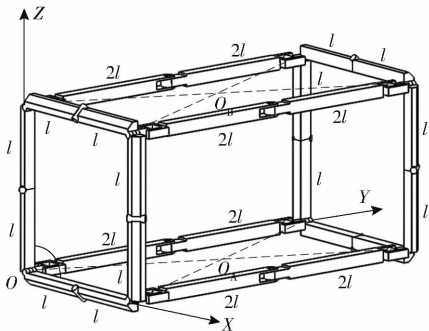


图 15 四边形移动模式坐标系
Fig. 15 Coordinate system diagram of quadrilateral movement mode

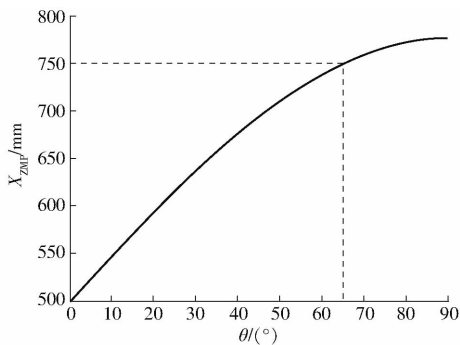


图 16 X_{ZMP} 随输入角 θ 的变化曲线
Fig. 16 ZMP of X axis change with angle graph

上达到机构稳定支撑的极限位置, $0^\circ < \theta < 65^\circ$ 时机构四边形移动模式滚动处于稳定状态, $65^\circ < \theta < 90^\circ$ 时机构四边形移动模式滚动处于失稳状态, 即此时机构处于倾翻过程。

5 机构各运动模式仿真

为验证折展平台设计在机构中的合理性, 建

立机构虚拟样机模型,其基本参数为:平台连杆长度 95 mm;支链连杆长度 190 mm;所有驱动转动副速度为 0.28 rad/s,对机构进行 ADAMS 仿真验证。

5.1 折叠模式

对机构折叠模式进行仿真,位置随时间改变如图 17 所示。折展平台电机 $M_1 \sim M_4$ 发生转动使机构处于图 17a 位置。支链电机 R_2^i 发生转动,使得机构处于图 17b 位置。通过平台电机 $M_1 \sim M_4$ 继续转动使平台折叠至完全折叠状态如图 17c 所示。

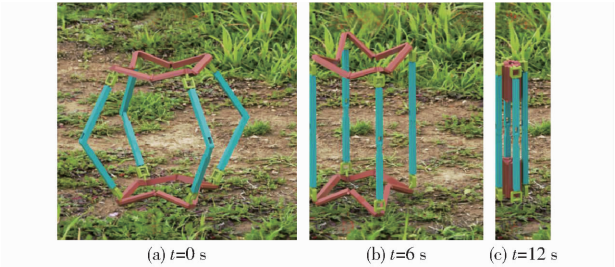


图 17 折叠模式仿真

Fig. 17 Folding mode simulation

5.2 六边形移动模式

对机构六边形移动模式进行仿真,一个运动周期内位置随时间改变如图 18 所示。支链上安装电机 M_{i1} 发生转动使得 4 条支链中同侧支链形成的平面平行于移动方向,如图 18a 所示;通过 4 条支链上电机 M_{i6} 转动,整个机构姿态发生变化运动到图 18b;电机 M_{i2} 、 M_{i6} 、 M_{i4} 协同转动使机构运动到图 18c;通过电机 M_{i2} 、 M_{i6} 转动使机构运动到图 18d。支链电机 M_{i4} 转动使机构运动到图 18e;通过电机 M_{i2} 、 M_{i6} 、 M_{i4} 协同转动使机构运动到初始位置,如图 18f。

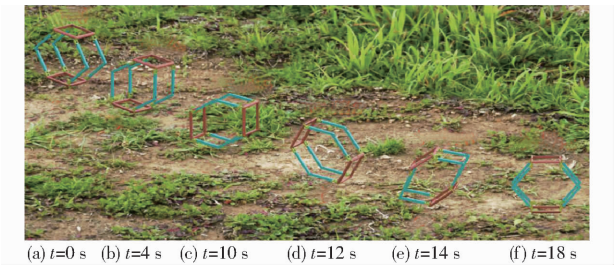


图 18 六边形移动模式仿真

Fig. 18 Hexagonal movement mode simulation

5.3 四边形移动模式

对机构四边形移动模式进行运动仿真,一个运动周期内位置随时间改变如图 19 所示。折展平台电机 $M_1 \sim M_4$ 与支链电机 R_2^i 发生锁止,使得机构处于图 19a 位置。通过电机 M_{i1} 、 M_{i7} 转动使得机构发生转动,机构发生倾倒如图 19b、19c 所示。电机 M_{i1} 、 M_{i7} 继续转动,机构恢复到初始位置如图 19d

所示。

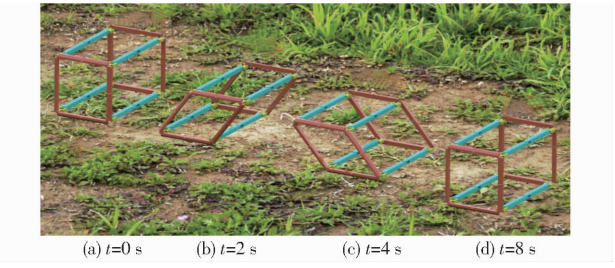


图 19 四边形移动模式仿真

Fig. 19 Quadrilateral movement mode simulation

6 样机试验

根据理论分析及仿真结果,为验证机构设计的合理性,对含折展平台的多模式移动并联机构进行工程设计并制作原理样机,如图 20 所示。样机参数为样机长 230 mm、宽 230 mm、高 430 mm、总质量 2.4 kg、平台材料为工程塑料、杆件材料为碳纤维、电机型号为 ToworPro MG996R、控制板为 STM2、工作电压为 7.2 V。

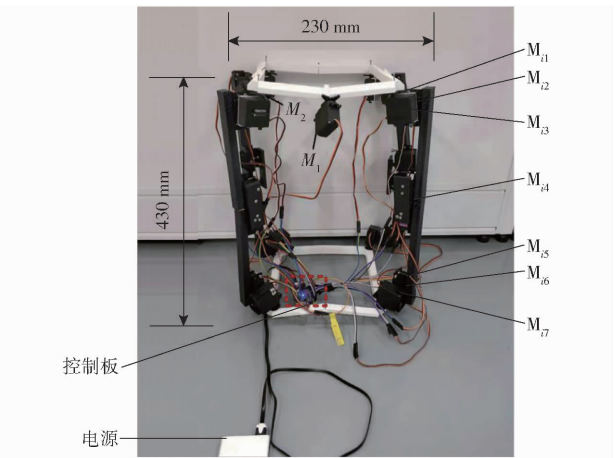


图 20 样机实物图

Fig. 20 Prototype mode

依照理论模型和参数搭建试验样机,并按照表 1 中的电机控制策略分别做机构折叠模式、六边形移动模式、四边形移动模式的样机验证。

图 21 ~ 23 为通过控制板锁止支链电机分别控制不同的关节转动让机构分别实现折叠、四边形移动和六边形移动。样机试验结果与理论仿真结果吻合。

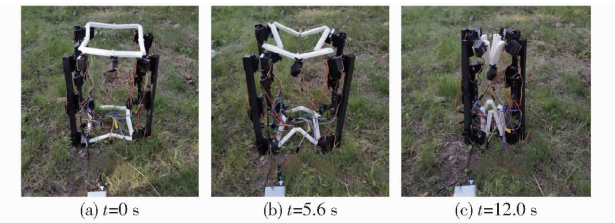


图 21 折叠模式试验

Fig. 21 Prototype folding mode test

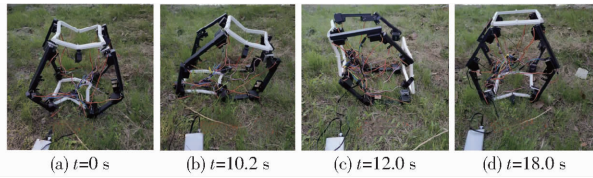


图22 六边形移动模式试验

Fig. 22 Hexagonal movement mode test

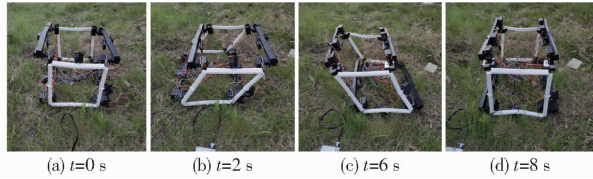


图23 四边形移动模式试验

Fig. 23 Quadrilateral movement mode test

7 结论

(1) 设计了含折展平台的多模式移动并联机

构,利用8R折展平台的运动分岔特性用于并联机器人的平台,设计分析了具有较强折展能力的8R折展平台,得到了折展平台杆件切除量 c 和长宽比 k 对折展率影响的变化曲线。

(2) 基于螺旋理论和图论,以机构移动状态与折展状态为例绘制旋量约束拓扑图,分析运动旋量与闭环方程求解矩阵的对应变化关系,得到各个运动模式的自由度。

(3) 对机构的六边形移动模式和四边形移动模式进行了运动稳定性分析,并运用Matlab软件计算得到角度参数变化对机构质心变化影响曲线,通过ADAMS虚拟样机仿真验证了其理论分析,最后设计实物样机验证各运动模式的可行性。

参 考 文 献

- [1] 刘平义,王春燕,李海涛,等.丘陵山区农用仿形行走动态调平底盘设计与试验[J].农业机械学报,2018,49(2):74-81. LIU Pingyi, WANG Chunyan, LI Haitao, et al. Terrain adaptive and dynamic leveling agricultural chassis for hilly area[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(2):74-81. (in Chinese)
- [2] 王亚,陈思忠,李海涛,等.高地面仿形性动力底盘的设计与试验[J].农业工程学报,2012,28(增刊):39-44. WANG Ya, CHEN Sizhong, LI Haitao, et al. Design and experiment of high performance profiling terrain chassis with powertrain[J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(Supp.):39-44. (in Chinese)
- [3] 牛润新,张向阳,王杰,等.基于激光雷达的农业机器人果园树干检测算法[J].农业机械学报,2020,51(11):21-27. NIU Runxin, ZHANG Xiangyang, WANG Jie, et al. Orchard trunk detection algorithm for agricultural robot based on laser radar[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(11):21-27. (in Chinese)
- [4] 郑永军,江世界,陈炳太,等.丘陵山区果园机械化技术与装备研究进展[J].农业机械学报,2020,51(11):1-20. ZHENG Yongjun, JIANG Shijie, CHEN Bingtai, et al. Review on technology and equipment of mechanization in hilly orchard[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(11):1-20. (in Chinese)
- [5] LIU C, CHAO X, YAO Y. Ground mobile bricard mechanism[J]. Journal of Mechanisms and Robotics, 2020, 12(4):1-21.
- [6] LI Duanling, JIA Pu, LI Jiazhou, et al. Constraint and mobility change analysis of rubik's cube-inspired reconfigurable joints and corresponding parallel mechanisms[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2020, 33(5):61-71.
- [7] 于靖军,刘凯,孔宪文.多模式机构研究进展[J].机械工程学报,2020,56(19):14-27. YU Jingjun, LIU Kai, KONG Xianwen. State of the art of multi-mode mechanisms[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2020, 56(19):14-27. (in Chinese)
- [8] KONG X. Reconfiguration analysis of a 3-DOF parallel mechanism using Euler parameter quaternions and algebraic geometry method[J]. Mechanism and Machine Theory, 2014, 74:188-201.
- [9] 张硕,姚建涛,许允斗,等.形态可重构移动机器人行走机构设计与分析[J].农业机械学报,2019,50(8):418-426. ZHANG Shuo, YAO Jiantao, XU Yundou, et al. Design and analysis of moving mechanism of shape reconfigurable mobile robot[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(8):418-426. (in Chinese)
- [10] AZIMI M, ZAINAL A, ZAHARUDDIN M, et al. Multi-objective path planner for an agricultural mobile robot in a virtual greenhouse environment[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2019, 157(2):488-499.
- [11] FOUNTAS S, MYLONAS N, MALOUNAS L, et al. Agricultural robotics for field operations[J]. Sensors, 2020, 20(9):78-89.
- [12] ZHANG C Y, WAN Y, ZHANG D. A new mathematical method to study the singularity of 3-RSR multimode mobile parallel mechanism[J]. Mathematical Problems in Engineering, 2019, 1(11):1-11.
- [13] LIU X Y, ZHANG C Y, NI C, et al. A reconfigurable multi-mode walking-rolling robot based on motor time-sharing control[J]. Industrial Robot: the International Journal of Robotics Research and Application, 2019, 47(2):293-311.
- [14] 刘金国,王越超,李斌.灾难救援机器人研究现状、关键性能及展望[J].机械工程学报,2006,42(12):1-12. LIU Jinguo, WANG Yuechao, LI Bin. Current research, key performances and future development of search and rescue robot[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2006, 42(12):1-12. (in Chinese)
- [15] 刘维惠,李晓辉,文闻,等.基于3RRS-Bricard复合空间捕获系统运动学分析[J].航空学报,2021,42(1):234-243. LIU Weihui, LI Xiaohui, WEN Wen, et al. Kinematics analysis of composite space capture systems based on 3RRS-Bricard

- [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2021, 42(1): 234–243. (in Chinese)
- [16] LYU S, ZLATANOV D, ZOPPI M, et al. Bundle folding type III Bricard linkages[J]. Mechanism and Machine Theory, 2020, 144: 103663.
- [17] YANG F, YOU Z, CHEN Y. Foldable Hexagonal structures based on three fold-symmetric bricard linkage[J]. Journal of Mechanisms and Robotics, 2020, 12(1): 011012.
- [18] 赵福群, 郭盛, 曲海波, 等. 空间多臂机构折展性及其结构配置设计[J]. 机械工程学报, 2020, 56(5): 133–140.
ZHAO Fuqun, GUO Sheng, QU HaiBo, et al. Design of deployable space multiple-arm mechanism and its structure configuration [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2020, 56(5): 133–140. (in Chinese)
- [19] WANG J, KONG X. Deployable polyhedron mechanisms constructed by connecting spatial single-loop linkages of different types and/or in different sizes using S joints[J]. Mechanism & Machine Theory, 2018, 124: 211–225.
- [20] 张春燕, 朱锦翊, 卢晨晖. 可折叠管道蠕动并联机构设计与运动仿真[J]. 农业机械学报, 2021, 52(3): 410–417.
ZHANG Chunyan, ZHU Jinyi, LU Chenhui. Design and motion simulation of wriggling parallel mechanism for collapsible pipeline[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(3): 410–417. (in Chinese)
- [21] 马艳, 张群, 李锐明, 等. 可折叠空间八转动副连杆捕获机构的设计[J]. 西安交通大学学报, 2020, 54(3): 179–187.
MA Yan, ZHANG Qun, LI Ruiming, et al. Design and analysis of foldable capture mechanism based on spatial 8-rotation linkages[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2020, 54(3): 179–187. (in Chinese)
- [22] LI Lei, LI Tengfei, DAI Jiansheng. A novel line-symmetric goldberg 6R linkage with bifurcation property[J]. Journal of Central South University, 2020, 27(12): 3754–3767.
- [23] 王冰, 方跃法. 一种运动分岔并联机构的结构约束与运动模式分析[J]. 西安交通大学学报, 2018, 52(6): 62–68.
WANG Bing, FANG Yuefa. Structural constraint and motion mode analysis on parallel mechanism with bifurcated motion[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2018, 52(6): 62–68. (in Chinese)
- [24] 黄真, 赵永生, 赵铁石. 高等空间机构学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2014: 86–256.
- [25] 卢开澄. 图论及其应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 1984: 41–219.
- [26] YAMAMOTO T, SUGIHARA T. Foot-guided control of a biped robot through ZMP manipulation[J]. Advanced Robotics, 2020, 34(2): 1–18.
- [27] KONG X, PFURNER M. Type synthesis and reconfiguration analysis of a class of variable-DOF single-loop mechanisms[J]. Mechanism and Machine Theory, 2015, 85: 116–128.
- [28] 韩博, 许允斗, 姚建涛, 等. 双层环形桁架可展天线机构运动特性与动力学分析[J]. 兵工学报, 2020, 41(4): 810–821.
HAN Bo, XU Yundou, YAO Jiantao, et al. Kinematic characteristics and dynamics analysis of a double-ring truss deployable antenna mechanism[J]. Acta Armamentarii, 2020, 41(4): 810–821. (in Chinese)
- [29] SONG X, GUO H, LIU R, et al. Mobility analysis of the threefold-symmetric bricard linkage and its network[J]. Journal of Mechanisms and Robotics, 2019, 12(1): 1–12.

(上接第 431 页)

- [30] COMAS D I, WAGNER J R, TOMAS M C. Creaming stability of oil in water (O/W) emulsions: influence of pH on soybean protein-lecithin interaction[J]. Food Hydrocolloids, 2006, 20(7): 990–996.
- [31] GUILMINEAU F, KULOZIK U. Impact of a thermal treatment on the emulsifying properties of egg yolk. Part 1: effect of the heating time[J]. Food Hydrocolloids, 2006, 20(8): 1105–1113.
- [32] GUILMINEAU F, KULOZIK U. Impact of a thermal treatment on the emulsifying properties of egg yolk. Part 2: effect of the environmental conditions[J]. Food Hydrocolloids, 2006, 20(8): 1114–1123.
- [33] ELIZALDE B, BARTHOLOMAI G, PILOSOFF A. The effect of pH on the relationship between hydrophilic/lipophilic characteristics and emulsification properties of soy proteins[J]. LWT—Food Science and Technology, 1996, 29(4): 334–339.
- [34] LIU Q, NIU H, ZHAO J, et al. Effect of the reactant ratio on the characteristics and antioxidant activities of Maillard reaction products in a porcine plasma protein hydrolysate-galactose model system[J]. International Journal of Food Properties, 2016, 19(1): 99–110.
- [35] HUANG X, TU Z, XIAO H, et al. Characteristics and antioxidant activities of ovalbumin glycosylated with different saccharides under heat moisture treatment[J]. Food Research International, 2012, 48(2): 866–872.
- [36] 臧艳妮. 物理预处理对小麦蛋白糖基化改性的影响[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2017.
ZANG Yanni. Effect of physical pretreatment on wheat protein glycosylation modification [D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2017. (in Chinese)
- [37] 卢庆铮. 不同枇杷花提取液抗氧化能力研究[J]. 石河子科技, 2020(5): 47–48, 46.
- [38] SHON M Y, KIM T H, SUNG N J. Antioxidants and free radical scavenging activity of *Phellinus baumii* (*Phellinus* of *Hymenochaetaceae*) extracts[J]. Food Chemistry, 2003, 82(4): 593–597.
- [39] BENJAKUL S, VISESSANGUAN W, PHONGKANPAI V, et al. Antioxidative activity of caramelisation products and their preventive effect on lipid oxidation in fish mince[J]. Food Chemistry, 2005, 90(1–2): 231–239.