doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2024.02.043

可重构仿生四足机器人倾覆后恢复机理与特性研究

张春燕[1]　刘玉航[1]　丁　兵[2]　杨　杰[1]

(1.上海工程技术大学机械与汽车工程学院,上海 201620;2.南京农业大学农学院,南京 210095)

摘要:农业环境起伏多变,边界模糊,大多呈非结构化分布。四足机器人在复杂农业环境中作业时,易出现因倾覆失去运动能力的情况,因此机器人需具备倾覆后自我恢复能力。传统四足机器人倾覆后恢复多数依靠腿部运动来实现,而可重构四足机器人,可通过躯干与腿部协调运动来实现倾覆后自我恢复。本文基于可重构躯干构型多变,得到了多种仿生形态的可重构四足机器人,规划了基于可重构理论的倾覆后恢复机理。对比倾覆后可重构机器人利用躯干拱起折叠和单侧翻转折叠两种恢复方式,分析 R1 型、R2 型可重构四足机器人恢复的运动特性。利用软件 ADAMS 进行仿真,对仿真数据进行分析,证明了可重构躯干比刚性躯干更有效地减少了恢复过程中的冲击。最后设计样机并进行实验,验证机理实施的可行性与稳定性,研究结果表明其可降低实现静态自我恢复的难度。

关键词:四足机器人;可重构;仿生;倾覆;恢复

中图分类号:TH112　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-1298(2024)02-0433-09　　**OSID**:

Recovery Mechanism and Characteristics of Reconfigurable Bionic Quadruped Robot after Overturning

ZHANG Chunyan[1]　LIU Yuhang[1]　DING Bing[2]　YANG Jie[1]

(1. *School of Mechanical and Automotive Engineering*, *Shanghai University of Engineering Science*, *Shanghai* 201620, *China*
2. *College of Agriculture*, *Nanjing Agricultural University*, *Nanjing* 210095, *China*)

Abstract: Agricultural environments have many ups and downs, fuzzy boundaries, and mostly unstructured distributions. Quadrupedal robots operating in complex agricultural environments are very susceptible to tipping over and thus losing locomotion, and therefore, quadrupedal robots need to have the ability to recover after tipping over. Traditional quadrupedal robots rely on leg movement to recover from tipping in most cases, while reconfigurable quadrupedal robots can realize self-recovery after tipping through the coordinated movement of the torso and legs. Based on the variable configuration of the reconfigurable torso, bionic forms of reconfigurable quadruped robots were obtained, and the recovery mechanism after tipping based on the reconfigurable theory was planned. Then comparing the two recovery modes of the reconfigurable robots after tipping by using the torso arching and folding and unilateral flipping and folding, the kinematic characteristics of the recovery of the R1-type and R2-type reconfigurable quadrupedal robots were analyzed and got. Then simulation was carried out by using the software ADAMS, and the simulation data were analyzed to prove that the reconfigurable torso was more effective than the rigid torso in reducing the impact during the recovery process. Finally, a prototype was designed and experiments were conducted to verify the feasibility and stability of the mechanism implementation, and the experimental results showed that the post-collapse recovery mechanism can reduce the difficulty of realizing static self-recovery.

Key words: quadruped robot; reconfigurable; bionic; overturning; self-recovery

0　引言

随着机器人技术的发展,农业机器人应用成为现代农业发展的重要趋势[1-2]。仿生机器人是仿生学与机器人领域应用需求的结合产物,也是各国研究的热点[3]。其中四足仿生机器人因足端散点着

收稿日期:2023-06-16　修回日期:2023-11-02

基金项目:国家自然科学基金项目(52005317)

作者简介:张春燕(1980—),女,副教授,博士,主要从事机器人机构学研究,E-mail:cyzhang@sues.edu.cn

陆,可适应多种地形移动,具有在复杂环境中探索、监控、巡检、看护等能力,有重要的研究价值和发展前景[4-7]。

在非结构化的农业环境中工作的四足机器人不可避免会发生倾覆,可能导致机器人结构损坏、控制系统失控等问题,若不能自动恢复姿态则会导致任务失败,故倾覆后可快速恢复姿态的研究很有必要。针对这一问题,许多学者进行大量研究,美国宇航局(NASA)的跳跃机器人具备在倾覆后使机体翻转90°的自我恢复能力[8]。HALE 等[9]设计带有形状为三棱柱的辅助机构实现姿态恢复的跳跃机器人。波士顿动力的 RHex 机器人通过对机器人动态性能的控制,依靠动态反馈实现自我恢复[10]。LI 等[11]受秋叶蝉启发,设计一种仿生昆虫翅膀来使机器人自我恢复。李保江等[12]提出一种用于弹跳机器人倾覆后的恢复机构的构想,理论上可使其实现 120°范围的翻转。陈殿生等[13]基于三角重心理论,提出一种机器人的翻转机构并验证机构的可行性。PENG 等[14]提出一种依靠足部的协调运动实现自我恢复的方法。

经过分析发现,上述机器人自我恢复的方法均为通过机器人结构中的附加机构翻转躯干,并依靠闭环控制使躯干靠惯性摆动等方式进行恢复,其躯干均为刚性且翻转过程中并未参与恢复运动。因此,在王圣捷等[15]设计的变胞四足机器人中,通过变胞躯干拱起参与倾覆后的恢复,具有一定的创新性,但恢复过程中对机器人的冲击仍较大。因此,本文受四足机器人可变躯干[16-20]和可重构多模式移动机器人的启发[21-24],设计一种基于可重构理论的仿生四足机器人,并提出一种机器人倾覆后的可重构恢复机理,与现有恢复机理对比,通过仿真分析其与现有机理的不同特性,以验证此可重构恢复机理的有效性。

1 可重构仿生四足机器人设计

1.1 可重构躯干设计

为了使机器人拥有更多的变形能力和更好的倾覆后恢复能力以适应复杂环境的变化,利用一个由8杆机构组成的"4R 源躯干"作为可重构仿生四足机器人躯干,如图1所示,"4R 源躯干"外形为结构对称的正方形。定义图1中点 A_i 和 B_i($i=1,2,3,4$)为各杆件转动副连接点,点 A_i 为各边中点,点 C_i($i=1,2,3,4$)为正方形顶点,点 A_i 处转动副轴线与点 B_i 处转动副轴线垂直,对称均布构成机器人躯干。通过躯干中点 B_i 处转动副的转动和锁止,改变点 A_i 处转动副间轴线关系,实现躯干多形态可重构变换。依据躯干的空间几何变形关系,多形态可重构躯干可分为平面可重构躯干和空间可重构躯干,各躯干形态变化如图1所示,标注有红色轴线处表示此刻该点转动副处于可活动状态,其余轴线处转动副均锁止。

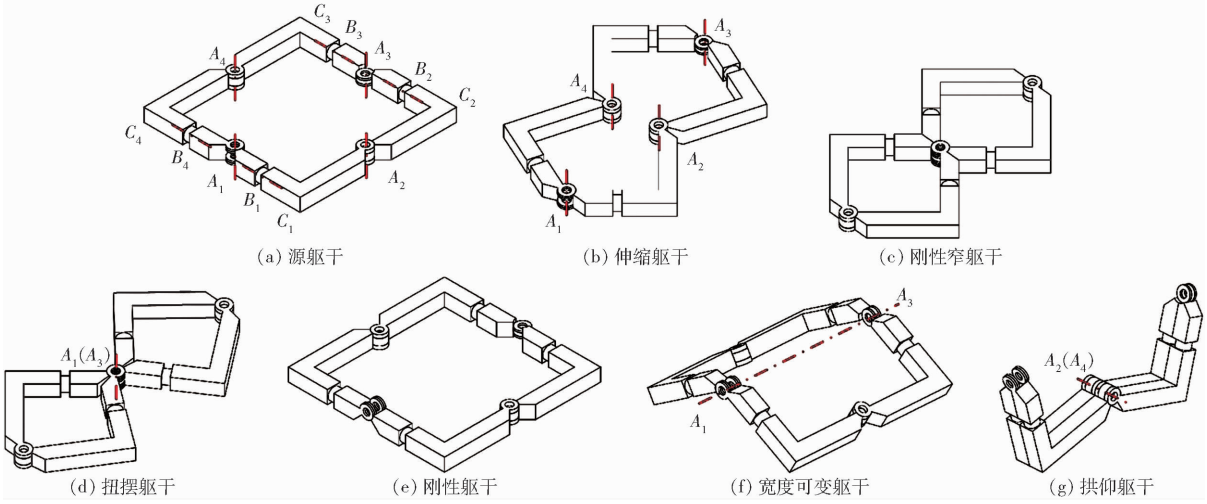
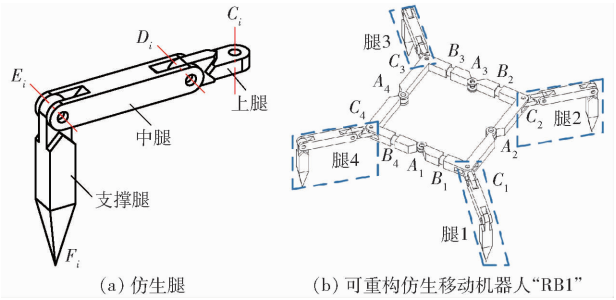


图1 可重构躯干形态综合

Fig. 1 Synthesis of reconfigurable trunk

1.2 仿生四足机器人设计

基于上述可重构躯干,在躯干顶点 C_i 处对称布置与 A_i 处轴线平行的转动副,该处转动副连接仿生腿(图2a)。仿生腿 L_i($i=1,2,3,4$)由上腿、中腿和支撑腿组成,关节 D_i 和 E_i 轴线平行且与 C_i 轴线垂直。添加仿生腿 L_i 后的四足机器人模型如图2b所示,命名为"RB1",依据仿生原理[25]和图1中躯干各形态变换,可实现多种动物的仿生姿态,如图3所示。其中,图3a为空间可重构躯干仿生四足机器人,犬类奔跑时,背部需要拱仰以提升速度,可将其仿生为可拱仰躯干的移动机器人,虎鼬在遇到危险时,会将身体变大摆出夸张的形态以吓退敌人,可将其仿生为宽度可调节躯干的移动机器人;图3b为平面可重构躯干仿生四足机器人,乌龟龟壳坚硬,可将



(a) 仿生腿　　(b) 可重构仿生移动机器人“RB1”

图 2　可重构仿生移动机器人及其仿生腿

Fig. 2　Reconfigurable bionic mobile robot and bionic leg

其仿生为具有刚性躯干的移动机器人，蟾蜍在跳跃时身体会伸缩，可将其仿生为一个自由伸缩躯干的移动机器人，蜥蜴行走时腰部需要扭动，可将其仿生为一个腰部可摆动行走的移动机器人。

2　四足机器人倾覆后恢复机理

当机器人从倾覆状态恢复到正常姿态，一般需其身体翻转 180°才能使其恢复，如图 3b 中仿生四足机器人中的仿生乌龟，其刚性躯干对机器人倾覆



(a) 空间可重构躯干仿生机器人

(b) 平面可重构躯干仿生机器人

图 3　可重构仿生移动机器人

Fig. 3　Reconfigurable bionic mobile robot

后自我恢复不利，但是拥有空间躯干可重构的动物却可通过躯干重构的方式实现倾覆后的自我恢复。因此本文利用可重构思想研究将刚性躯干重构为可变形躯干后再进行倾覆后自我恢复的机理。

2.1　刚性躯干机器人恢复机理

图 4 为刚性躯干机器人由“正常工作—倾覆—自我恢复”过程的理论模型，当机器人发生倾覆时，上腿 C_iD_i 与躯干重叠并将其等效为一刚性体，躯干与地面贴合。机器人若要恢复到正常状态，需将躯干在腿部的辅助下翻过如图 5 所示的临界点后，在自身重力下恢复正常状态。在这一过程中，机器人中腿 D_iE_i 和下腿 E_iF_i 需共同运动提供一个瞬时力矩打破临界平衡，使机器人依靠重力自由落下直至完全翻转，恢复到正常状态。这一倾覆后自我恢复过程中，机器人质心由 $G_1 \sim G_3$ 变化，显然，当躯干宽度一定时，刚性躯干机器人腿部长度（$l_{D_iE_i}$ 和 $l_{E_iF_i}$）对倾覆后机器人的自我恢复有显著影响。

由图 5 可知，为使机器人能从临界平衡状态翻到正常状态，支撑腿的足尖点 F 需至少延长至地面，即 $l_{EF} \geqslant l_{EH}$，但这样会增加各关节处驱动器的负载，对机器人自我恢复性能产生极大的影响。这也印证了乌龟倾覆后因为刚性躯干（龟壳）且腿短而不能恢复的原因。因此，刚性躯干机器人发生倾覆后，若仅依靠腿自由度来恢复运动，除了对机器人腿长有一定要求，还对关节驱动器负载也提出了要求。

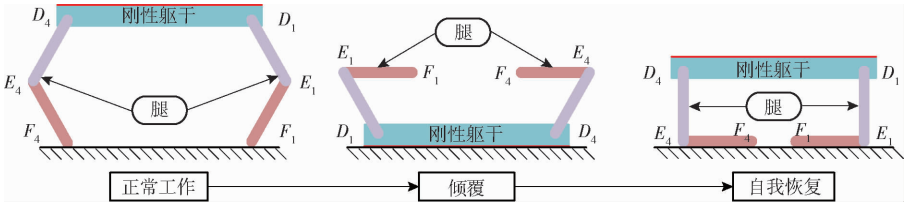


图 4　机器人倾覆后恢复的全过程

Fig. 4　Whole process of robot recovery after overturning

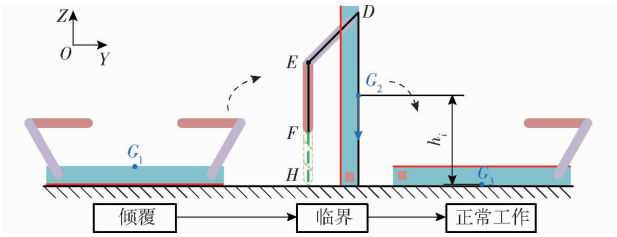


图 5 刚性躯干倾覆后的恢复过程

Fig. 5 Recovery process of rigid torso robot after overturning

刚性躯干机器人倾覆后自我恢复过程中一直依靠重力的作用使质心从临界平衡状态到正常状态,在恢复正常状态触地时,冲击力对机器人各机械结构和关键硬件造成损害。因此,计算恢复过程触地时刻的冲击力对关节驱动器参数及关节减震部件的设计提供理论依据。设机器人恢复过程中质心落差为 h_i,若将质心下降过程看作准静态过程,可得机器人下落触地瞬间速度 v_i 和质心高度差 h_i 的关系式为

$$\frac{1}{2}Mv_i^2 = Mgh_i \tag{1}$$

式中 M——机器人总质量

g——重力加速度

可得

$$v_i = \sqrt{2gh_i} \tag{2}$$

由动量定理可得

$$F_t t_i = Mv_i \tag{3}$$

式中 F_t——机器人落地时减速为零时所受冲击力

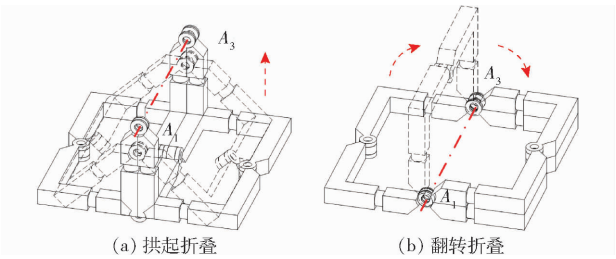
t_i——机器人落地时减速为零时所用时间

由上述计算可得刚性躯干恢复过程中落地冲击力 F_t,由于刚性躯干质心在恢复过程中始终位于躯干中心,利用可重构理论来改变恢复中质心在躯干中的位置,通过可重构躯干与腿的配合运动进行恢复,降低对腿部尺寸和关节驱动器的要求,减小或去除倾覆后恢复过程中的冲击。

2.2 可重构躯干机器人倾覆恢复机理

可重构躯干机器人倾覆恢复机理对于躯干质心变化不大或质心在同一平面内变化时,作用甚微。对于空间可重构躯干(图 1f、1g),重构时质心位置在空间 3 个方向均发生变化,发生倾覆时用可重构躯干机器人倾覆恢复机理进行恢复,效果显著。对于平面可重构躯干(图 1b ~ 1e),若仅在平面内调节机器人几何宽度,质心变化微小,故平面可重构躯干倾覆后仍需通过转换为源躯干,进而转换为空间可重构躯干实现恢复。因此本文主要研究空间可重构躯干的构型。本文提出的可重构机器人倾覆后恢复机理主要是基于 ZMP 原理。当可重构机器人发生倾覆后,依靠躯干与腿部的配合驱动舵机,使组成可重构躯干的杆组转动,与地面不断交替铺展支撑,躯干轴线变化使躯干几何变形从而使可重构机器人质心位置发生变化,可重构躯干机器人在这一机理作用下可实现自我恢复。

基于这一思路,在可重构机器人倾覆状态下,利用可重构躯干在平面构型向空间构型转换的运动来实现倾覆后恢复这一过程。空间可重构躯干自重构主要依靠 B_i 处转动副转动使轴线 A_1 与 A_3 共线来进行躯干可重构,由于共线轴线位置变化,躯干可沿两个方向折叠,分为躯干拱起折叠和单侧躯干翻转折叠,如图 6 所示。当可重构躯干拱起折叠恢复时,简称“R1”,其恢复过程如图 7 所示,机器人通过腿部的配合转动,将机器人躯干撑起并沿竖直方向拱起折叠到达状态 Ⅱ,随后继续折叠至躯干与地面垂直到达状态 Ⅲ,通过躯干和腿部的关节配合转动经由状态 Ⅳ 将躯干翻转到达状态 Ⅴ,最后恢复完成到达状态 Ⅵ。当可重构躯干单侧翻转折叠时,简称“R2”,其恢复过程如图 8 所示,机器人左侧腿部沿轴线 D_1D_2 向上翻转,腿 3 和腿 4 的下腿沿轴线 E_3E_4 转至地面到达状态 Ⅱ,机器人左半侧沿轴线 A_1A_3 翻转完全折叠到达状态 Ⅲ,随后各关节配合运动将躯干恢复至平面并与地面垂直到达状态 Ⅳ,随后通过腿部和腰部的关节配合将躯干翻转至状态 Ⅴ,最后恢复完成至状态 Ⅵ。



(a) 拱起折叠 (b) 翻转折叠

图 6 躯干折叠方式

Fig. 6 Torso folding methods

2.3 可重构躯干机器人恢复过程质心轨迹

机器人运动动态稳定性通常是由 ZMP 运动轨迹来判断,本文也对可重构躯干机器人倾覆后自我恢复过程中质心的轨迹进行研究,以此来判断可重构恢复机理的可行性和稳定性,由重力与惯性力的合力来表示 ZMP 的坐标计算公式,并用达朗贝尔原理进行推导。假定机器人各个连杆质量为 m_i,连杆质心坐标为 (x,y,z),重力和惯性力合力为

$$\boldsymbol{F} = \begin{bmatrix} F_x \\ F_y \\ F_z \end{bmatrix} = -\sum_{i=1}^{n} m_i \begin{bmatrix} \ddot{x}_i \\ \ddot{y}_i \\ \ddot{z}_i + g \end{bmatrix} \tag{4}$$

式中 $\ddot{x}_i$、$\ddot{y}_i$、$\ddot{z}_i$——第 i 个构件在 X 轴、Y 轴、Z 轴方向上的加速度

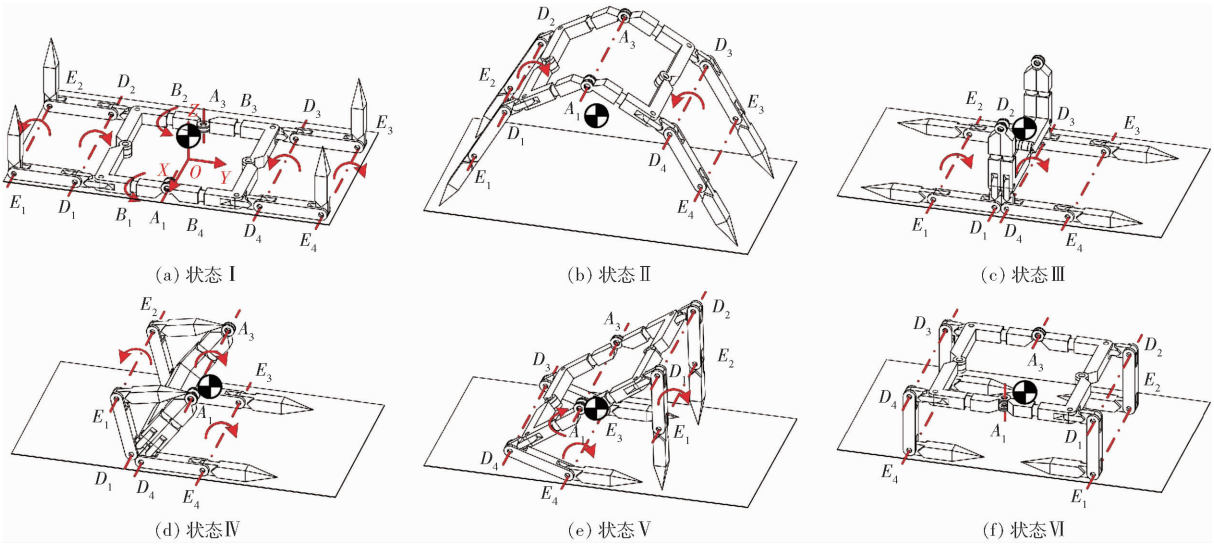


图 7　R1 型可重构恢复过程

Fig. 7　Reconfigurable recovery process of R1 type

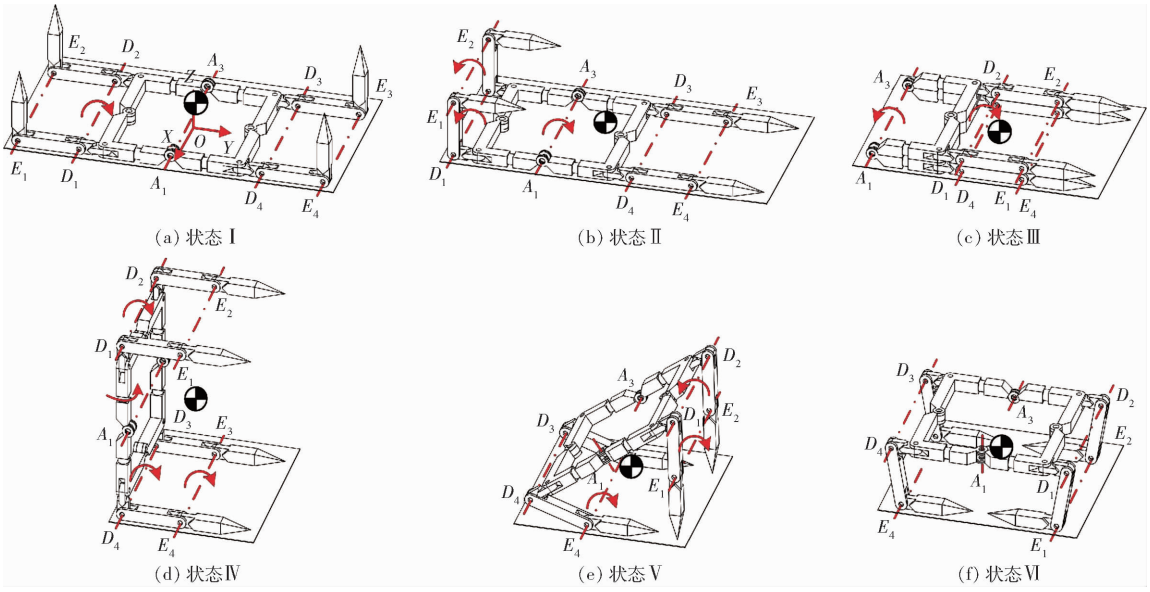


图 8　R2 型可重构恢复过程

Fig. 8　Reconfigurable recovery process of R2 type

该合力对各个坐标轴力矩为

$$\boldsymbol{M}=\begin{bmatrix}M_x\\M_y\\M_z\end{bmatrix}=-\sum_{i=1}^{n}m_i\begin{bmatrix}(\ddot{z}_i+g)y_i-\ddot{y}_iz_i\\\ddot{x}_iz_i-(\ddot{z}_i+g)x_i\\\ddot{y}_ix_i-\ddot{x}_iy_i\end{bmatrix}\tag{5}$$

式中　(x_i,y_i,z_i)——第 i 个构件重心坐标

可得 ZMP 点坐标位置为

$$\begin{cases}x_{\mathrm{ZMP}}=\dfrac{\sum\limits_{i=1}^{n}m_i(\ddot{z}_i+g)x_i-\sum\limits_{i=1}^{n}m_i\ddot{x}_iz_i}{\sum\limits_{i=1}^{n}m_i(\ddot{z}_i+g)}\\[2ex]y_{\mathrm{ZMP}}=\dfrac{\sum\limits_{i=1}^{n}m_i(\ddot{z}_i+g)y_i-\sum\limits_{i=1}^{n}m_i\ddot{x}_iz_i}{\sum\limits_{i=1}^{n}m_i(\ddot{z}_i+g)}\end{cases}\tag{6}$$

从能量角度看，机器人运动速度越快，其部件所受惯性力越大，驱动力矩除需克服重力力矩外还需克服惯性力矩。在机器人运行速度较慢时，惯性力相对于重力可忽略，此时零力矩点 ZMP 计算可简化为质心位置计算，而可重构躯干机器人倾覆后恢复可视为慢速过程，考虑到机器人结构及运动的对称性，质心可简化为仅在 YOZ 平面变化，只需保证质心在地面的投影在支撑范围内即可，即质心的 Y 轴坐标在支撑区间内，模型简图及投影如图 9 所示。

为描述质心变化过程及便于数学计算与描述，依据图 9 所示的模型简图，机器人各位置尺寸及质量定义为：躯干边长为 220 mm，$l_{C_iD_i}=40$ mm，$l_{D_iE_i}=110$ mm，$l_{E_iF_i}=120$ mm，单位长度质量为 m，

则投影面长度尺寸为：$l_{E'F'}=l_{E''F''}=120$ mm，$l_{D'E'}=l_{D''E''}=100$ mm，$l_{A'D'}=l_{A'D''}=150$ mm，以此来计算运动过程中质心位置，绘制出 R1 型和 R2 型恢复过程中 *YOZ* 平面的质心运动轨迹曲线，如图 10、11 所示。

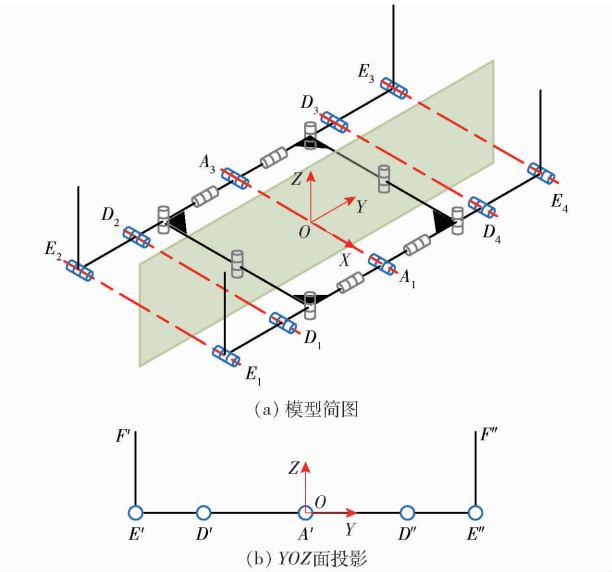


图 9 模型简图及投影

Fig. 9 Model sketch and projection

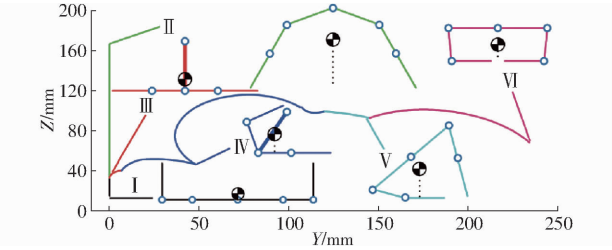


图 10 R1 型质心运动曲线

Fig. 10 Centroid motion curves of R1

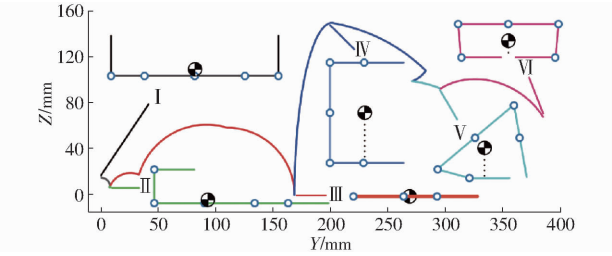


图 11 R2 型质心运动曲线

Fig. 11 Centroid motion curves of R2

评判上述质心轨迹在 *Y* 方向的投影是否在稳定区域内，以保证机器人稳定性，如图 12、13 所示，线框表示质心稳定区域，在过原点的 45°夹角上与线框同色同线型的圆点和直线表示运动过程中在此稳定区域内的质心变化，若机器人质心变化一直在区域内，说明可重构恢复机理有效。

与刚性躯干倾覆后恢复的方法相比，结合了可重构特性的倾覆后恢复方案，对机器人腿的尺寸不再有特殊要求，而是依靠可重构躯干与腿部的配合转动形成了一个杆件与地面不断交替铺展支撑实现翻转，在这一过程中，质心投影一直处于稳定区域内，从而可以保证恢复过程平稳进行，能减小甚至消除落下的冲击，降低了对机器人机械结构和硬件结构的损害作用。

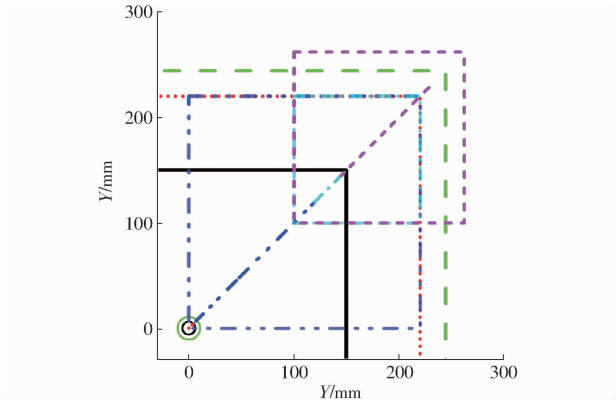


图 12 R1 型 *Y* 方向质心投影

Fig. 12 *Y*-direction centroid projection of R1

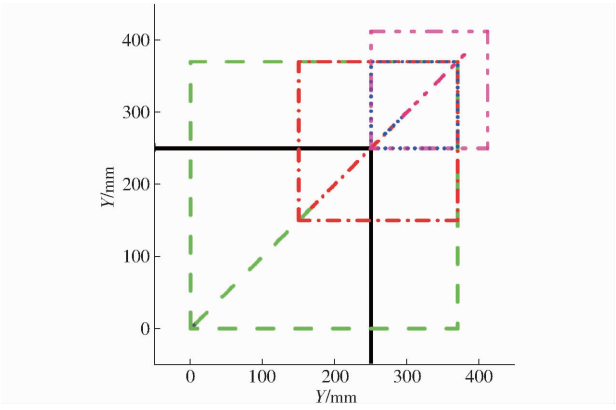


图 13 R2 型 *Y* 方向质心投影

Fig. 13 *Y*-direction centroid projection of R2

3 仿真

3.1 恢复过程仿真

依据上述尺寸建立可重构躯干四足机器人虚拟样机，将倾覆后初始状态导入 ADAMS 软件中进行动力学仿真，添加零件材料、转动副约束、驱动、重力和接触等参数，验证可重构恢复策略的可行性与合理性。

R1 型仿真过程如图 14 所示，可重构机器人处于图 14a 的倾覆状态，通过腿部 D_i 和 E_i 关节配合转动将机器人躯干经由图 14b 向上托起，图 14c 为机器人躯干通过 A_1 和 A_3 关节同步转动在空中被拱起，直至闭合落至地面（图 14d），机器人依靠左侧运动使机器人质心向右偏移（图 14e），机器人躯干便可依靠 A_1 和 A_3 关节继续转动，直到躯干恢复为平面状态（图 14f），再通过各关节配合转动经由图 14g、14h 完成自我恢复。图 15 为 R1 型可重构恢复过程中各驱动关节关节角随时间变化的曲线。

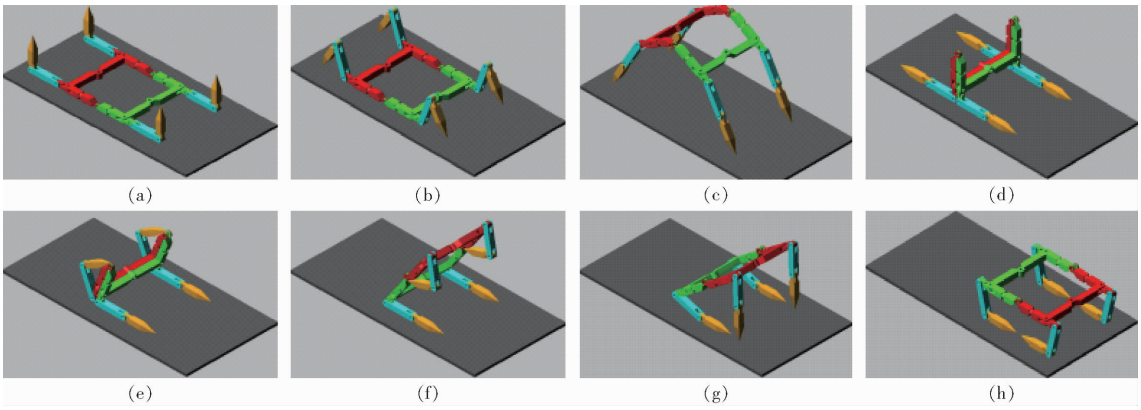


图 14　R1 型仿真过程

Fig. 14　Simulation process of R1

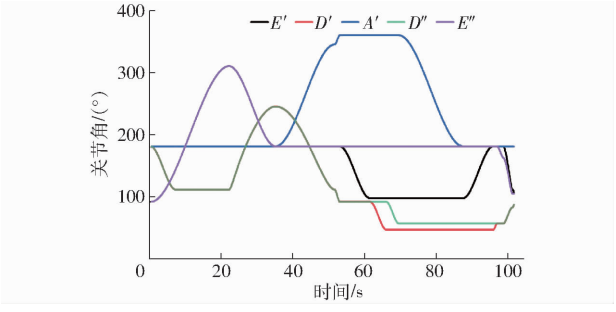


图 15　R1 型驱动关节输入角曲线

Fig. 15　Drive joint input angle－time curves of R1

R2 型仿真过程如图 16 所示，可重构机器人处于图 16a 的倾覆状态，通过腿部关节配合转动将机器人质心向右偏移（图 16b、16c），图 16d 为机器人左侧躯干通过 A_1 和 A_3 关节同步转动实现向右翻转，直至闭合折叠（图 16e），此时机器人依靠 A_1、A_3 与 D_i 关节的配合运动使机器人躯干竖起恢复为平面状态（图 16f），再通过各关节配合转动经由图 16g、16h 完成自我恢复。图 17 为 R2 型可重构恢复过程中各驱动关节关节角随时间变化的曲线。

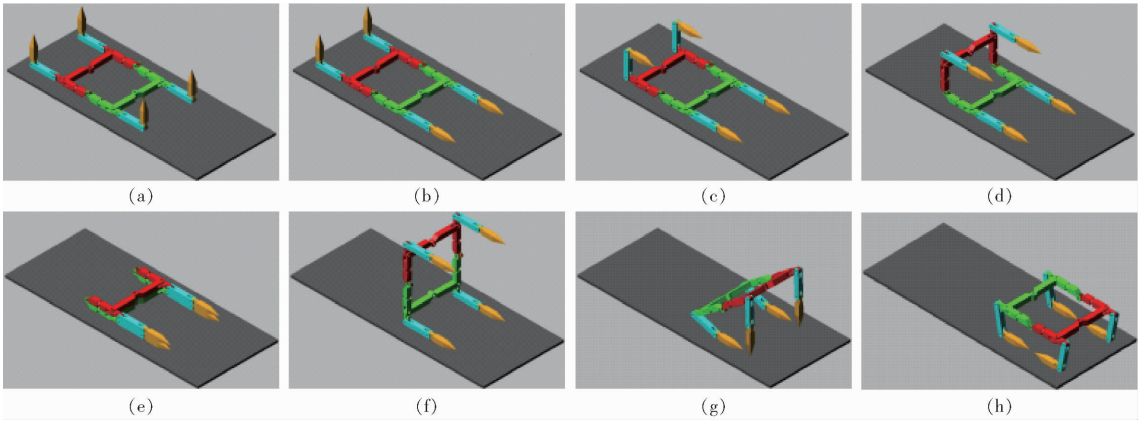


图 16　R2 型仿真过程

Fig. 16　Simulation process of R2

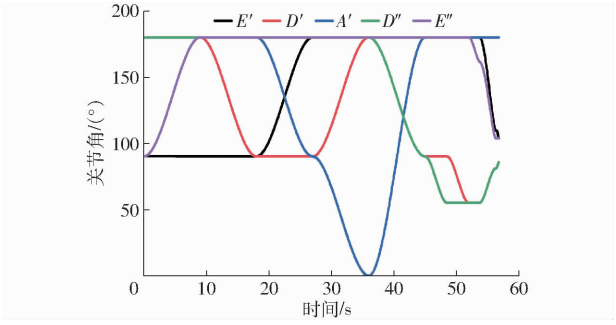


图 17　R2 型驱动关节输入角曲线

Fig. 17　Drive joint input angle－time curves of R2

3.2　运动特性分析

根据上述仿真得 R1 型与 R2 型仿真质心轨迹曲线如图 18 所示，因实际零件具有空间结构特征，相较于理论线型计算，其运动距离会产生偏差，但仿真质心轨迹与理论计算基本吻合，R1 型质心运动最远距离为 238.72 mm，最高为 170.86 mm，R2 型质心运动最远距离为 378.71 mm，最高为160.23 mm。

为验证躯干可重构恢复相较于刚性躯干对落地时冲击力的减震作用，在仿真中对其设计了对比实验来检验这一特性。假设刚性躯干可到达临界状态，由于其在临界状态之前处于上升状态，故其冲击来自于临界状态落到地面过程中，分别对比上述恢复方案的质心速度与加速度变化曲线。R1、R2 型

恢复质心速度与加速度曲线如图 19、20 所示，刚性躯干仿真及速度与加速度曲线如图 21 所示。综合以上数据，可见在相同质量下，可重构躯干恢复时的速度和加速度远小于刚性躯干速度和加速度，有效地减轻了恢复过程带来的冲击。

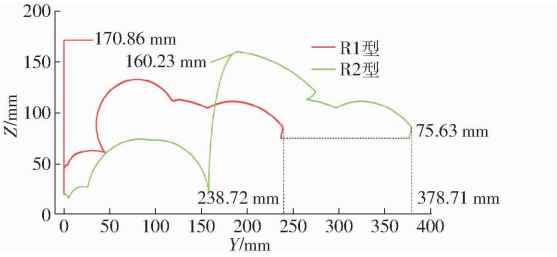


图 18 R1 与 R2 型仿真质心轨迹曲线

Fig. 18 Simulation centroid trajectory curves of R1 and R2

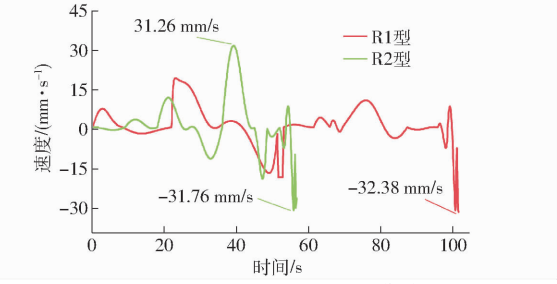


图 19 质心 Z 方向速度变化曲线

Fig. 19 Covering centroid velocity in Z direction

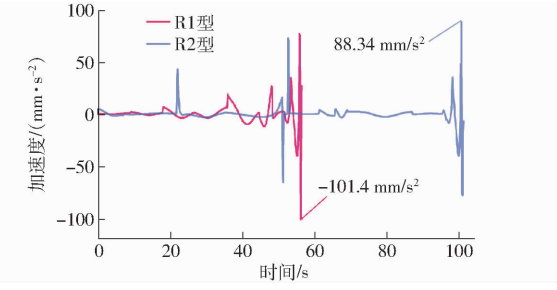


图 20 质心 Z 方向加速度变化曲线

Fig. 20 Covering centroid acceleration in Z direction

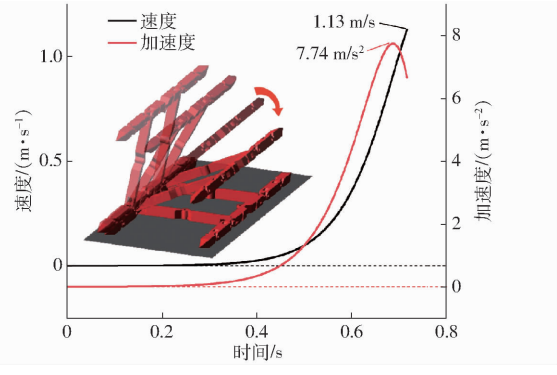


图 21 刚性躯干恢复仿真及运动特性

Fig. 21 Rigid trunk robot recovery simulation and motion characteristics

通过上述分析，R1 型、R2 型质心运动最高距离相差较小，但 R2 型质心运动最远距离大于 R1 型质心运动最远距离。因此，R1 型相比 R2 型更适用于较窄地形。实际情况中，如果恢复路径上存在障碍物，将使 R1 型中状态Ⅱ到状态Ⅲ过程的折叠闭合受阻，而 R2 型受障碍物影响相对较小，故 R2 型则更适应于地面不平整地形。R1、R2 型都丰富了四足机器人倾覆后的恢复方法。

4 样机实验

为验证机构设计的合理性及倾覆后恢复机理的可行性，对可重构仿生移动机器人进行工程设计并制作原理样机，如图 22 所示，实物包含可重构躯干、4 条腿、舵机及配件。选用 MG996R 和 TBD2701 两款舵机作为主要驱动器，为保证各零件流畅运动，需对各转动干涉部位及限位处进行优化设计，对机器人由于整体减重和中空让位处理，在额定负载下保证舵机稳定运行及电气布线预留位置。躯干及腿部使用 R4600 树脂材料，此材料能够打印对精度和韧性要求高的部件，模型尺寸稳定性好。

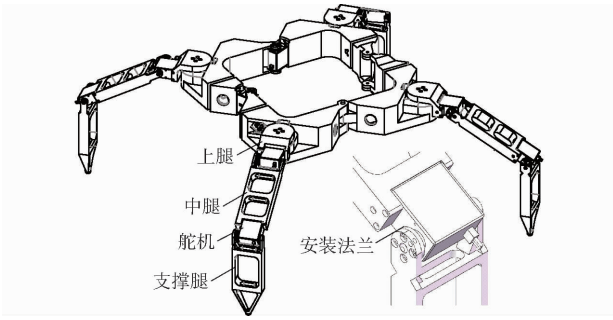


图 22 可重构仿生移动机器人主要零部件

Fig. 22 Main components of reconfigurable bionic mobile robots

可重构仿生移动机器人控制系统由电源模块、控制模块、通信模块、驱动舵机等模块组成，如图 23 所示。控制板选用 STM32F 系列，设计好硬件电路，其控制板及电源外接设置，暂不固定于可重构躯干上。

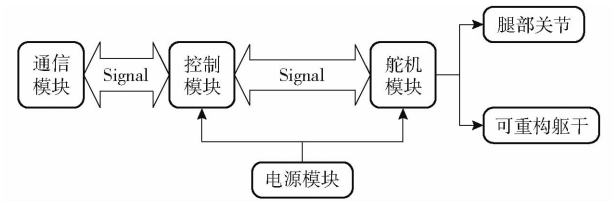


图 23 可重构仿生移动机器人控制系统

Fig. 23 Reconfigurable bionic mobile robot control system

如图 24、25 所示，机器人通过躯干由平面型向空间型的转变，实现了躯干可重构，机器人通过躯干与腿部运动配合运动，使躯干翻转，随后躯干再由连续型变回为平面型，完成机理的执行，机器人姿态成功恢复为正常姿态，重新具备了运动能力。

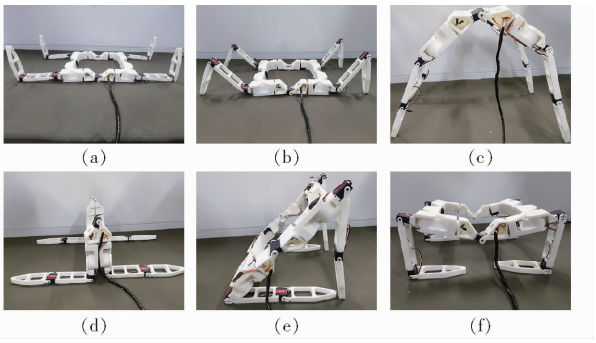


图 24　R1 型恢复过程

Fig. 24　R1 type recovery process

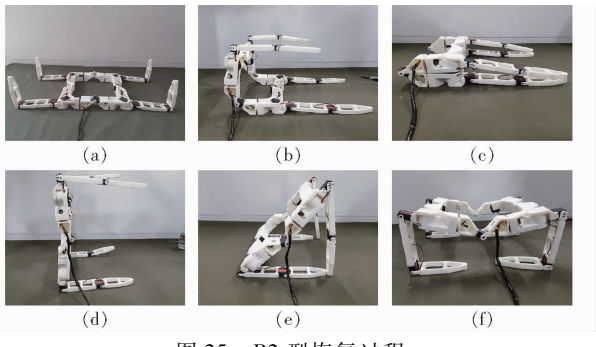


图 25　R2 型恢复过程

Fig. 25　R2 type recovery process

5　结论

(1)针对机器人可重构的特征,得到可重构仿生四足机器人“RB1”,多种可变形态使其具有较强的灵活性和环境适应能力。

(2)基于四足机器人在非结构化环境中发生倾覆后需要自我恢复能力的要求,分析刚性躯干机器人尺寸参数约束和可重构机器人的质心轨迹和冲击的原理。提出利用可重构原理完成自我恢复机理并设计其具体动作,丰富了四足机器人倾覆后的恢复方法。

(3)通过仿真验证了可重构恢复机理可行性。各机理仿真下质心轨迹与理论轨迹基本吻合,对比分析倾覆后恢复速度与加速度,验证了其倾覆后可重构恢复对冲击力的减小作用明显。利用可重构机器人样机进行了实物实验,验证了该策略的可行性。

参　考　文　献

[1] 王宁,韩雨晓,王雅萱,等.农业机器人全覆盖作业规划研究进展[J].农业机械学报,2022,53(增刊 1):1 – 19.
WANG Ning, HAN Yuxiao, WANG Yaxuan, et al. Progress of agricultural robot full coverage operation planning[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022,53(Supp. 1):1 – 19. (in Chinese)

[2] 刘成良,贡亮,苑进,等.农业机器人关键技术研究现状与发展趋势[J].农业机械学报,2022,53(7):1 – 22,55.
LIU Chengliang, GONG Liang, YUAN Jin, et al. Current status and development trends of agricultural robots[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022,53(7):1 – 22,55. (in Chinese)

[3] 王国彪,陈殿生,陈科位,等.仿生机器人研究现状与发展趋势[J].机械工程学报,2015,51(13):27 – 44.
WANG Guobiao, CHEN Diansheng, CHEN Kewei, et al. The current research status and development strategy on biomimetic robot[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2015,51(13):27 – 44. (in Chinese)

[4] 陈致远,涂群章,张详坡,等.足式爬行机器人研究进展与发展趋势[J].兵器装备工程学报,2020,41(9):1 – 12.
CHEN Zhiyuan, TU Qunzhang, ZHANG Xiangpo, et al. Review of multi-legged crawling robot[J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2020,41(9):1 – 12. (in Chinese)

[5] 孙俊凯,孙泽洲,辛鹏飞,等.深空着陆探测足式机器人发展综述[J].中国机械工程, 2021, 32(15):1765 – 1775.
SUN Junkai, SUN Zezhou, XIN Pengfei, et al. Review on development of legged robots for deep space landing exploration[J]. China Mechanical Engineering, 2021, 32(15): 1765 – 1775. (in Chinese)

[6] 张磊,王延杰,唐刚强,等.基于变胞机构的移动机器人构型设计研究综述[J].信息与控制,2022,51(1):12 – 22.
ZHANG Lei, WANG Yanjie, TANG Gangqiang, et al. Review of configurational design of mobile robot based on metamorphic mechanism[J]. Information and Control, 2022,51(1):12 – 22. (in Chinese)

[7] 陶永,刘海涛,王田苗,等.我国服务机器人技术研究进展与产业化发展趋势[J].机械工程学报,2022,58(18):56 – 74.
TAO Yong, LIU Haitao, WANG Tianmiao, et al. Research progress and industrialization development trend of Chinese service robot[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2022,58(18):56 – 74. (in Chinese)

[8] TUNSTEL E. Evolution of autonomous self-righting behaviors for articulated nanorovers[C]// Proceedings of International Symposium on Artificial Intelligence Robotics & Automation in Space, 2000.

[9] HALE E, SCHARA N, BURDICK J, et al. A minimally actuated hopping rover for exploration of celestial bodies[C]// Proceedings 2000 ICRA. Millennium Conference. IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2000: 420 – 427.

[10] SARANLI U, BUEHLER M, KODITSCHEK D E. RHex: a simple and highly mobile hexapod robot[J]. The International Journal of Robotics Research, 2001, 20(7): 616 – 631.

[11] LI C, KESSENS C C, YOUNG A, et al. Cockroach-inspired winged robot reveals principles of ground-based dynamic self-righting[C]//2016 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), 2016: 2128 – 2134.

[12] 李保江,胡玉生.可跳跃式移动机器人机构设计及实现[J].机器人,2007,29(1):51 – 55.
LI Baojiang, HU Yusheng. Mechanism design and realization of mobile robots with hopping ability[J]. Robot, 2007,29(1): 51 – 55. (in Chinese)

(下转第 458 页)

(in Chinese)
[17] PAN H, SUN W, GAO H, et al. Nonlinear tracking control based on extended state observer for vehicle active suspensions with performance constraints[J]. Mechatronics, 2015, 30:363 – 370.
[18] SARIYILDIZ E, OBOE R, OHNISHI K. Disturbance observer-based robust control and its applications: 35th anniversary overview[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2019, 67(3): 2042 – 2053.
[19] CHEN W H, YANG J, GUO L, et al. Disturbance-observer-based control and related methods—an overview[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2016,63(2):1083 – 1095.
[20] LAKOMY K, MADONSKI R, DAI B, et al. Active disturbance rejection control design with suppression of sensor noise effects in application to DC – DC buck power converter[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2021, 69(1): 816 – 824.
[21] PRASOV A A, KHALIL H K. A nonlinear high-gain observer for systems with measurement noise in a feedback control framework[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2012, 58(3):569 – 580.
[22] KHALIL H K, PRIESS S. Analysis of the use of low-pass filters with high-gain observers[J]. IFAC-PapersOnLine, 2016, 49(18):488 – 492.
[23] CHEN Sen, BAI Wenyan, HU Yu, et al. On the conceptualization of total disturbance and its profound implications[J]. Science China(Information Sciences), 2020, 63(2): 221 – 223.
[24] MADONSKI R, HERBST G, STANKOVIC M. ADRC in output and error form: connection, equivalence, performance[J]. Control Theory and Technology, 2023, 21(1): 56 – 71.

(上接第 441 页)

[13] 陈殿生,郑万军,黄宇,等. 弹跳机器人翻转机构的设计与优化[J]. 机械工程学报,2011,47(1):17 – 23.
CHEN Diansheng, ZHENG Wanjun, HUANG yu, et al. The design and optimization of a hopping robot's tipping mechanism [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2011, 47(1): 17 – 23. (in Chinese)
[14] PENG S J, DING X L, YANG F, et al. Motion planning and implementation for the self-recovery of an overturned multi-legged robot[J]. Robotica, 2017, 35(5): 1107 – 1120.
[15] 王圣捷,戴建生. 变胞四足机器人倾覆后的变胞恢复机理及其特性研究[J]. 中国机械工程,2021,32(11):1274 – 1282.
WANG Shengjie, DAI Jiansheng. Research on the mechanism and characteristics of metamorphic recovery of a quadruped robot after overturning[J]. China Mechanical Engineering,2021,32(11):1274 – 1282. (in Chinese)
[16] 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, 2020, 47(2): 293 – 311.
[17] 赵欣,康熙,戴建生. 四足变胞爬行机器人步态规划与运动特性[J]. 中南大学学报(自然科学版),2018,49(9):2168 – 2177.
ZHAO Xin, KANG Xi, DAI Jiansheng. Gait planning and motion characteristic analysis of a metamorphic quadruped walking robot[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2018,49(9):2168 – 2177. (in Chinese)
[18] 甄伟鲲,康熙,张新生,等. 一种新型四足变胞爬行机器人的步态规划研究[J]. 机械工程学报,2016,52(11):26 – 33.
ZHEN Weikun, KANG Xi, ZHANG Xinsheng, et al. Gait planning of a novel metamorphic quadruped robot[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2016,52(11):26 – 33. (in Chinese)
[19] ZHANG C S, DAI J S. Continuous static gait with twisting trunk of a metamorphic quadruped robot[J]. Mechanical Sciences, 2018, 9(1): 1 – 14.
[20] ZHANG C S, DAI J S. Trot gait with twisting trunk of a metamorphic quadruped robot[J]. Journal of Bionic Engineering, 2018, 15(6): 971 – 981.
[21] 史瑞东,张秀丽,姚燕安. 基于 CPG 的沙漠蜘蛛机器人多模式运动控制方法[J]. 机器人,2018,40(2):146 – 157.
SHI Ruidong, ZHANG Xiuli, YAO Yan'an. CPG-based multimodal motion control method for desert spider robots[J]. Robot, 2018,40(2):146 – 157. (in Chinese)
[22] 刘超,巢鑫迪,姚燕安. 多模式空间 6R 地面移动机构[J]. 机械工程学报,2019,55(23):38 – 47.
LIU Chao, CHAO Xindi, YAO Yan'an. Multi-modal space 6R ground mobility mechanism[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2019,55(23):38 – 47. (in Chinese)
[23] 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)
[24] 谢冬福,罗玉峰,石志新,等. 多移动机器人协同模式及其倾翻稳定性研究[J]. 中国机械工程,2020,31(20):2472 – 2485.
XIE Dongfu, LUO Yufeng, SHI Zhixin, et al. Research on cooperative modes and tipping stability of multiple mobile robots [J]. China Mechanical Engineering, 2020,31(20):2472 – 2485. (in Chinese)
[25] 门宝,范雪坤,陈永新. 仿生机器人的发展现状及趋势研究[J]. 机器人技术与应用,2019(5):15 – 19.
MEN Bao, FAN Xuekun, CHEN Yongxin. A study of the current status and trends in the development of bionic robots[J]. Robotics and Applications,2019(5):15 – 19. (in Chinese)