

doi: 10.11835/j.issn.1000-582X.2023.260

张拉整体机器人杆件后屈曲驱动行走数值仿真

张 幸, 蹇开林, 张 亮, 贺子刚

(重庆大学 航空航天学院, 重庆 400044)

摘要:球形张拉整体机器人与传统的轮式、足式机器人相比,具有高强度质量比、缓冲性能好、地形适应力强等优点,在深空探测中有着广阔的应用前景。球形张拉整体机器人常采用绳索驱动模式,但在驱动行走过程中,过多的驱动数目给球形张拉整体机器人的制造与控制带来了困难。提出了一种基于柔性杆件后屈曲变形的新型驱动模式,实现了球形张拉整体机器人行走过程的数值仿真,并对绳索驱动和杆件后屈曲驱动模式的效率进行了比较。通过椭圆积分法,求得单根杆件在后屈曲变形中的精确解。基于该理论在ADAMS中建立考虑杆件后屈曲变形、接触、摩擦的球形张拉整体机器人刚柔耦合动力学仿真模型。通过ADAMS与Simulink软件联合仿真,利用贪心搜索(greedy search)算法,确定了球形张拉整体机器人的基本步态。在Simulink软件中建立控制系统模型,实现了机器人在杆件后屈曲驱动模式下,向任意目标点的行走控制。对比传统绳索驱动,杆件后屈曲驱动模式下,机器人连续行走所需驱动器数目从18个减少到6个,行走速度提高了43.78%。研究结果为新型张拉整体机器人的设计与制造提供了理论指导。

关键词:球形张拉整体机器人;后屈曲驱动;贪心搜索;驱动效率;行走控制;Simulink

中图分类号:O39

文献标志码:A

文章编号:1000-582X(2024)08-090-13

Numerical simulation of walking for a tensegrity robot driven by the post-buckling of flexible rods

ZHANG Xing, JIAN Kailin, ZHANG Liang, HE Zigang

(College of Aerospace Engineering, Chongqing University, Chongqing 40044, P. R. China)

Abstract: Compared with traditional wheeled and footed robots, spherical tensegrity robots offer advantages such as a high strength-to-mass ratio, excellent cushioning performance, and superior terrain adaptability, making them highly promising for deep space exploration. While cable-driven modes are commonly used for tensegrity robots, the excessive number of actuators requires for walking complicates manufacturing and control. This study proposes a novel driving mode based on the post-buckling deformation of flexible rods. Numerical simulations of the walking process of a spherical tensegrity robot are conducted, and the efficiencies of cable-driven and rod-post-buckling-driven modes are compared. The exact solution for the post-buckling deformation of a single rod is obtained using the elliptic integral method. Based on this, a rigid-flexible coupling dynamics simulation model of the spherical tensegrity robot is established in ADAMS, with considering the post-buckling deformation of the

收稿日期:2023-03-06 网络出版日期:2023-08-01

基金项目:深空探测省部共建协同创新中心开放课题(SKTC202107)。

Supported by the Opening Foundation of the Deep Space Exploration Collaborative Innovation Center (SKTC202107).

作者简介:张幸(1998—),男,硕士研究生,主要从事张拉整体机器人研究。

通信作者:蹇开林(1964—),男,教授,主要从事结构动力学、多体系统动力学等方向的研究,(E-mail) cqjian@cqu.edu.cn。

rods, as well as contact and friction. The walking gait of the spherical tensegrity robot is determined through joint simulation using ADAMS and Simulink software, employing a greedy search algorithm. A control system model is established in Simulink to facilitate the robot's walking control to any target points under the rod-post-buckling-driven mode. Compared to the conventional cable-driven mode, the post-buckling-driven mode reduces the number of actuators required for continuous robot walking from 18 to 6 and increases the walking speed by 43.78%. The results provide theoretical guidance for the design and manufacture of new tensegrity robots.

Keywords: spherical tensegrity robot; post-buckling driven; greedy search; drive efficiency; walking control; Simulink

“Tensegrity”由“tensile”和“integrity”2个词组合而成,最早是在20世纪后期由Fuller提出。鉴于张拉整体高效的结构形式、形态可调整等特点,近年来在机器人领域得到了更多的关注。例如,Paul等^[1]最早提出了2种棱柱张拉整体机器人。之后张拉整体模块化的概念被提出^[2],被应用于管道勘探^[3-5]以及机械臂^[6-10]之中。为了进一步提高张拉整体机器人在不同环境中实现目标的能力,一系列多脊椎张拉整体被提出,以实现自由度更多的运动^[11-15]。

球形张拉整体机器人是由若干杆件通过绳索连接而成,因此,有各种形态的张拉整体机器人。Shibata和Hirai提出了可翻滚六杆张拉整体机器人的概念设想。图1为六杆机器人,是一种可翻滚的球形张拉整体,通过重力势能的变化来引起滚动,实现向某一方向的前进^[16]。六杆张拉整体机器人因具有出色的运动性能,引起了许多学者的关注。目前,六杆球形张拉整体机器人大多采用绳驱动模式,即机器人中的杆件可视作刚性杆,利用绳长变化来改变构型,从而引起重力势能变化。有多种方式实现绳长变化,部分学者将电机安装在杆件上,以收缩张拉整体的绳单元^[17-22];Chung等^[23]利用温度变化实现记忆合金绳单元长度变化;Wang等^[24]采用液晶弹性体-碳纳米管复合材料作为绳单元,并由激光照射实现长度变化;Lee等^[25]利用具有磁性功能的智能肌腱驱动张拉整体机器人;Koizumi等^[26]展示了由24个气动McKibben执行器驱动的张拉整体机器人,并实现了翻滚运动。绳驱动模式虽然有着多样化的设计,但驱动器过多导致了控制方案复杂和实物制造困难。

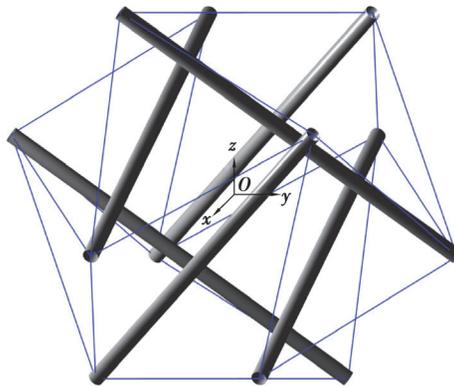


图1 球形张拉整体机器人几何构型

Fig. 1 Geometric model of spherical tensegrity robot

针对绳驱动模式驱动器过多的问题,笔者提出一种基于柔性杆件后屈曲驱动的球形张拉整体机器人新型驱动模式,即张拉整体机器人中绳长度不变,杆件为柔性杆,可产生屈曲变形,从而导致重力势能的变化。为了验证杆件后屈曲驱动模式下机器人向任意目标点行走的可靠性,考察后屈曲驱动模式相比绳驱动模式的优势,开展了以下研究工作。首先,在ADAMS中建立考虑杆件后屈曲变形、接触、摩擦的球形张拉整体机器人动力学仿真模型;其次,对于张拉整体机器人基本步态进行描述,并利用贪心搜索算法,寻找相应步态的驱动策略;最后,在Simulink中建立控制系统,通过ADAMS与Simulink软件实现联合仿真。通过数值仿真结果,验证杆件后屈曲驱动模式的可靠性,为新型张拉整体机器人的设计与制造提供理论指导。

1 球形张拉整体机器人联合仿真建模

1.1 绳驱动模式 ADAMS 模型

在 ADAMS 中建立了绳驱动(见图 2(a))和杆件后屈曲驱动(见图 3(a))2 种不同驱动模式的球形张拉整体机器人,它们的原型为由 6 根杆单元和 24 根绳单元组成的张拉整体机器人,几何形状上为二十面体。张拉整体机器人的每个杆端节点通过绳连接到 4 个相邻节点(除去平行杆),形成了具有 8 个等边三角形,以及 12 个等腰三角形的结构。由于每对平行杆端之间,不存在连接的绳,因此,等腰三角形本身也呈现为开放三角形,仅在三角形 2 个腰上有绳。相反,每个等边三角形都是一个封闭三角形,在所有 3 个边上都有绳。为实现 2 种不同驱动模式的对比,在 ADAMS 模型建立中,2 种驱动模式下的球形张拉整体机器人参数一致,如表 1 所示。

表 1 球形张拉整体机器人模型参数

Table 1 Parameters of a spherical tensegrity robot model

参数名称	取值	参数名称	取值
杆单元长度/mm	400.00	弹簧预拉力/N	9.50
杆单元质量/kg	0.55	弹簧刚度系数/(N·mm ⁻¹)	0.38
杆单元半径/mm	15.00	弹簧阻尼系数/(N·s·mm ⁻¹)	0.05
平行杆间距离/mm	200.00		

绳驱动球形张拉整体机器人可通过改变绳单元的长度,使整个结构外形发生变化,进而实现翻滚运动。在 ADAMS 中,由于建立绳单元模型会导致建模难度提高和计算效率下降,因此,将绳单元简化为由平移副组合起来的 2 根半径较小、质量忽略不计的圆柱杆,命名为伸缩杆。然后,在伸缩杆与杆单元的连接处添加球副(见图 2(b)),确保了机器人在运动过程中的完整性与物理实体的相似性。通过改变移动副的长度可使整个绳单元的长度变化,从而达到机器人变形的效果。图 2(c)为线性驱动器的实现形式,移动副的移动范围为 0~50 mm。

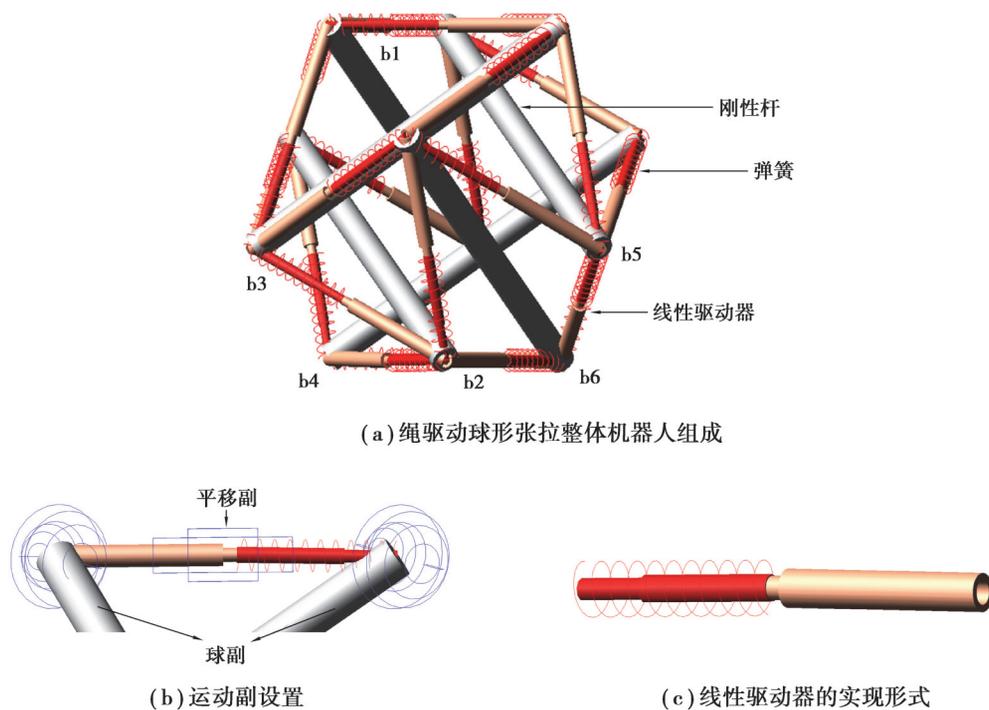


图 2 绳驱动球形张拉整体机器人在 ADAMS 中的总体设计

Fig. 2 Design of the cable-driven spherical tensegrity robot in ADAMS

1.2 杆件后驱动模式 ADAMS 模型

杆件后屈曲驱动的球形张拉整体机器人可通过柔性杆的后屈曲变形,使整个结构外形发生变化,进而实现翻滚运动。建模时,利用 ADAMS 中的离散柔性连杆来模拟柔性杆件后屈曲变形。离散柔性连杆由多个刚体组成,刚体之间由梁力单元 (beam force element) 连接,可以在保证变形准确性的情况下,提高计算效率。为提高后屈曲变形的可视性,将杆件半径设置为 7.5 mm,质量保持不变。如图 3(b) 所示,在每根杆的杆端设置 4 根质量忽略不计的圆柱杆组合 (包含 2 根短圆柱和 2 根长圆柱),短圆柱与柔性杆以固定副连接;短圆柱与长圆柱以球副连接;长圆柱与长圆柱以平移副连接。如图 3(c) 所示,通过改变平移副的长度,可以使柔性连杆发生后屈曲变形,从而达到球形张拉整体机器人变形的效果。移动副的移动范围为 0~65 mm。

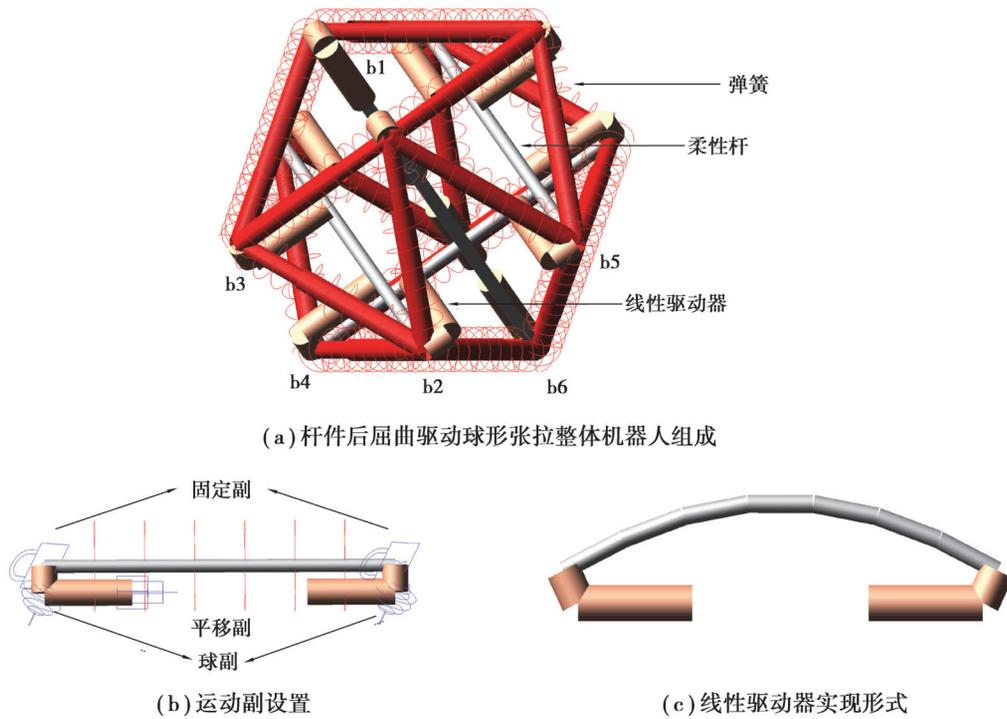


图 3 杆件后屈曲驱动球形张拉整体机器人在 ADAMS 中的总体设计
 Fig. 3 Design of the rod-post-buckling-driven spherical tensegrity robot in ADAMS

由于张拉整体机器人是通过杆件后屈曲变形引起机器人整体的质心移动,实现翻滚运动。因此,需确定移动副收缩距离与最大挠度 δ 之间的关系。利用细长杆件后屈曲变形问题中的椭圆积分法^[27],给出相应理论解。椭圆积分法基本原理是将含有挠曲线的精确微分方程进行积分和微分运算,化简成杆件长度与角度的第一类完全椭圆积分和支座间距与角度的第二类完全椭圆积分。

如图 4 所示,两端简支约束压杆未变形前的支座间距为 l ,材料的抗弯刚度为 EI ,在轴向载荷 F 的作用下,处于大挠度后屈曲平衡状态,起点转角为 α ,最大挠度为 δ ,变形后的支座间距为 l' 。

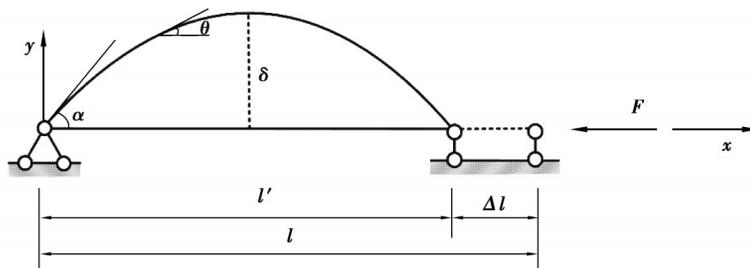


图 4 杆件后屈曲示意图
 Fig. 4 Post-buckling of the rod

构件全长为

$$l = \frac{2}{k} \int_0^{\frac{\pi}{2}} \frac{d\varphi}{\sqrt{1-p^2 \sin^2 \varphi}} = \frac{2}{k} K(p), \quad (1)$$

式中: $k^2 = P/EI$, $p = \sin(\alpha/2)$, $\sin(\theta/2) = p \sin \varphi$ 。式中的积分为第一类完全椭圆积分,用 $K(p)$ 来表示,积分 K 的值只与 p (起点转角 α) 有关,工程手册中对于不同的 p 值已经给出了数值表格,根据不同的 p 值,可以计算出大挠度下的屈曲载荷数值。

杆件最大挠度为

$$\delta = \frac{2p}{k} \int_0^{\frac{\pi}{2}} \sin \varphi d\varphi = \frac{2p}{k}。 \quad (2)$$

杆件两端距离为

$$l' = \frac{4}{k} \int_0^{\frac{\pi}{2}} \sqrt{1-p^2 \sin^2 \varphi} d\varphi - l = \frac{4}{k} E(p) - l。 \quad (3)$$

式中的积分为第二类完全椭圆积分,用 $E(p)$ 来表示。

将式(2)代入式(3)得

$$l' = \frac{2}{k} \int_0^{\frac{\pi}{2}} \sqrt{4 - k^2 \delta^2 \sin^2 \varphi} d\varphi - l。 \quad (4)$$

利用椭圆积分法确定了单根杆件在后屈曲变形中的起点转角 α 、轴向荷载 F 、杆件两端距离 l' 、最大挠度 δ 之间的关系。由此可知,杆件两端缩短距离与杆件最大挠度之间的关系,在杆件后屈曲驱动张拉整体机器人 ADAMS 建模时,用于确定移动副收缩距离与 δ 之间的关系。

1.3 结构自平衡分析

在完成2种驱动模式下张拉整体机器人的结构建模后,需建立机器人的运动平面,设置机器人与平面的接触和摩擦,对于机器人在无重力作用下的结构自平衡进行验证。2种驱动模式下的张拉整体机器人自平衡分析步骤相同,以杆件后屈曲驱动模式的张拉整体机器人自平衡分析为例,绳驱动模式不再赘述,具体步骤如下:

- 1) 建立一块刚性平板来模拟机器人的运动平面,并将平板与 ADAMS 中的地面以固定副连接;
 - 2) 采用冲击函数法 (impact function) 建立机器人与平板的接触,定义4个变量,刚度、力指数、阻尼和渗透深度;
 - 3) 设置库仑摩擦,静摩擦系数和动摩擦系数可以根据不同的接触材料,得到相应经验性的值;
- 具体参数取值如表2所示。

表2 接触参数设置

Table 2 Contact parameter setting

参数名称	取值	参数名称	取值
刚度/(N·mm ⁻¹)	1.00×10 ⁵	渗透深度/mm	0.10
力指数	2.20	静摩擦系数	0.70
阻尼/(N·s·mm ⁻¹)	100.00	动摩擦系数	0.57

接触设置完成后,将 ADAMS 仿真时间设置为 6 s,步数设置为 1 200 步,进行自平衡分析。机器人各弹簧力结果如图 5 所示。为了使结果展示更为清晰,只选取 0~0.5 s 内的结果。张拉整体机器人的弹簧预拉力最初为 9.5 N,在经过短暂且微小的波动后,恢复到 9.5 N 并保持不变,说明张拉整体机器人在 9.5 N 的条件下,达到了自平衡。

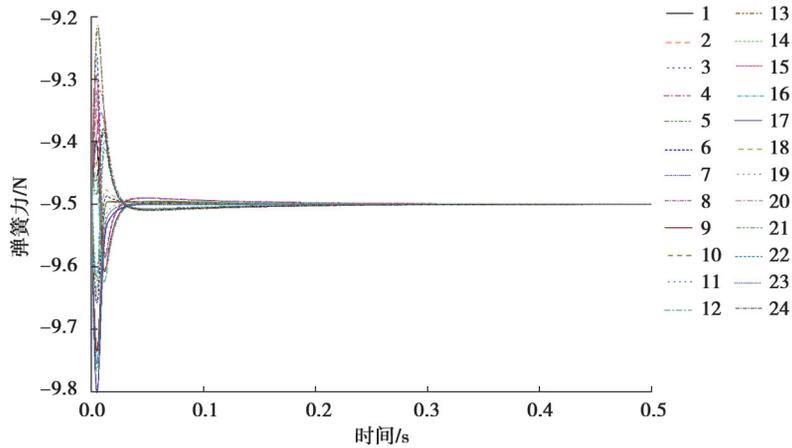


图 5 张拉整体机器人弹簧力

Fig. 5 Spring force of the tensegrity robot

1.4 Simulink 控制建模

利用 ADAMS 与 Simulink 仿真平台,完成了 2 种驱动模式下,球形张拉整体机器人向平面上任意目标点连续行走的自动控制,建立的仿真控制系统如图 6 所示。在仿真控制系统中,主要分为 2 个功能区:ADAMS 与 Simulink 数据交互区域(紫色区域),以及子函数区域(黄色区域)。对于杆件后屈曲驱动模式,紫色区域内定义了 6 个输入变量,即 6 个移动副上所添加的 1~6 号驱动,输出变量为质心投影点(命名为 GCOM)和各根杆件的杆端 x, y, z 坐标,共 39 个。与此相对应的,绳驱动有 24 个输入变量,即 24 根伸缩杆上的驱动,输出变量则与杆件后屈曲驱动相同。

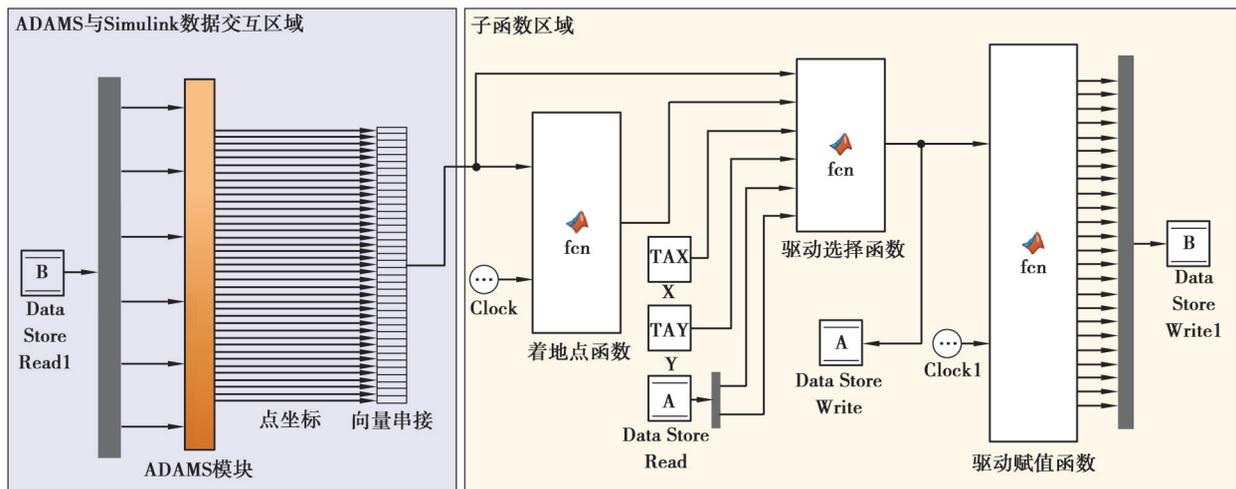


图 6 杆件后屈曲驱动张拉整体机器人滚动方向控制系统模型

Fig. 6 Model of rolling direction control system for a rod post-buckling-driven tensegrity robot

在子函数区域定义了 3 个子函数,着地点函数、驱动选择函数和驱动赋值函数。着地点函数将 ADAMS 输出的杆单元端点坐标作为输入,判断某一时刻张拉整体机器人与地面的接触点;驱动选择函数根据某一时刻接触点与平面内任意目标点(图 6 中定义为 TAX, TAY)的位置关系,从驱动策略中选择出合适的驱动编号,以实现下一个基本步态的自动判断;驱动赋值函数将所选择出的驱动编号,赋予具体驱动函数,作为输入传输到 ADAMS 中。

2 基于贪心搜索算法的基本步态研究

2.1 基本步态

六杆球形张拉整体机器人由6根杆单元和24根绳单元组成。每根杆端连接到4根绳单元,形成8个等边三角形和12个等腰三角形。以机器人与地面接触的不同三角形来命名步态,开放的等腰三角形用O(open)表示,闭合的等边三角形用C(closed)表示。为方便描述,将各点做编号处理:将质心投影点GCOM编号为1,各杆端节点依次编号为2~13。这样便可根据绳单元两端所连接的杆端端点,来进行绳的编号,如图7所示。此时,着地点为绳单元,分别为2-3、3-4、2-4,组成1个闭合三角形,即C面。在结构中,每个闭合三角形被3个开放三角形包围(开放边用虚线表示),而每个开放三角形被2个闭合三角形和1个开放三角形包围。因此,当机器人从1个封闭的等边三角形开始时,它只能翻滚到3个相邻的开放等腰三角形;另一方面,当机器人从1个开放三角形开始时,它可以翻滚到2个相邻的闭合三角形或1个开放三角形上。总结了3种不同类型的基本步态:

- 1) OC步态,机器人从1个开放的等腰三角形翻滚到1个相邻的闭合等边三角形;
- 2) CO步态,机器人从1个闭合的等边三角形翻滚到1个相邻的开放等腰三角形;
- 3) OO步态,机器人从1个开放的等腰三角形翻滚到1个相邻的开放等腰三角形。

2.2 贪心搜索算法

张拉整体机器人中单元发生形变时,整体结构都会产生相应的结构变形,但并非所有结构变形都能使机器人完成一个基本步态。必须选择合适的单元形变规则,才能使机器人成功实现翻滚。将这样的单元形变规律,称作张拉整体机器人的驱动策略。因此,需要找到张拉整体机器人变形的驱动策略,以实现其3种不同的基本步态。针对某一种基本步态而言,只需找出一组驱动策略,便可由对称性得出该步态对应的所有驱动策略。利用贪心搜索算法思路,通过ADAMS与Simulink软件联合仿真,完成了球形张拉整体机器人的杆件后屈曲驱动策略以及绳驱动策略的寻找。

贪心搜索算法是指在对问题求解时,总是做出在当前看来是最好的选择。也就是说,不从整体最优上加以考虑,而是某种意义上的局部最优解。也正是由于这样的思想,该方法可以更快速地找到驱动策略,适用于检查步态的可行性或获得驱动策略。对于杆件后屈曲驱动策略的贪心搜索算法流程,如图8所示。

贪心搜索算法流程具体实现包括以下步骤:

1) 搜索过程从机器人中性初始状态开始,没有任何变形。将着地三角形边缘之一定为旋转轴,将机器人的GCOM与旋转轴的距离定义为启发式函数 $H(n)$,当机器人的GCOM移动到着地三角形之外时,机器人将变得不稳定并实现翻滚。

2) 当GCOM在变形后位于基础多边形的内部(或外部),定义启发式函数为正(或负)。当GCOM正好在旋转轴上时,启发式函数变为零,机器人处于翻滚的临近状态,此时,可以判定为机器人即将实现一个滚动步态。

3) 确定算法的约束条件和迭代规律,为简化和加快搜索过程,2种驱动模式中线性驱动器只考虑二元状态,即驱动器移动范围取最小或最大值。从机器人初始状态开始,第一轮通过依次完全收缩 n 个驱动器中的每一个,并利用ADAMS动力学仿真得到 n 个启发式函数 $H(n)$, n 表示驱动器的总数。然后,确定第一轮中启发值最小的驱动编号,保持该驱动器的收缩状态,进入第二轮。第二轮完全收缩剩余 $n-1$ 个驱动器中的每一个,得到 $n-1$ 个启发式函数 $H(n)$,并确定启发值最小的驱动编号,保持前两轮所记录的驱动收缩状态,开始进行下一轮扩展。重复此过程,直到启发式值 $H(n)$ 小于或等于0,将最后处于收缩状态的驱动器作为该基本步态的驱动策略。规定驱动器收缩一次的时间为6 s。

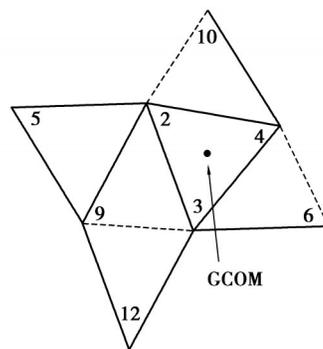


图7 张拉整体机器人基本步态拓扑图
Fig. 7 Topology diagram of basic gaits for a tensegrity robot

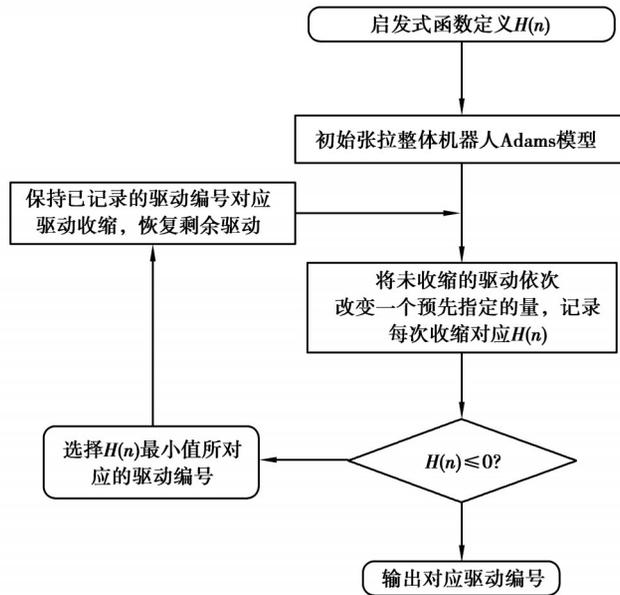


图 8 基于贪心搜索算法的杆件后屈曲驱动张拉整体机器人基本步态的寻找流程

Fig. 8 Finding process of basic gait of the rod-post-buckling-driven tensegrity robot based on greedy search algorithm

在贪心搜索过程中,如图 9 所示,此时有 3 根柔性杆件发生后屈曲变形,且 GCOM 已经偏移到底部三角形的一条边上,即 $H(n)=0$,张拉整体机器人实现翻滚,搜索停止,输出对应驱动编号。

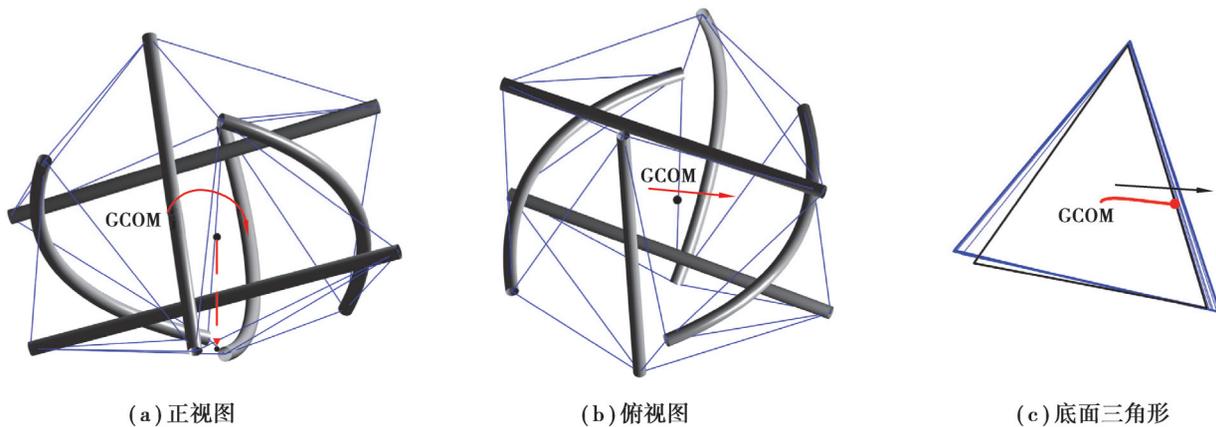


图 9 张拉整体机器人 $H(n)=0$ 示意图

Fig. 9 Schematic diagram of tensegrity robot when $H(n)=0$

3 仿真结果

对于杆件后屈曲驱动和绳驱动 2 种驱动模式,均成功得到了对应的基本步态库。在 CO、OC、OO 3 种基本步态中,由于发现 OO 步态实现难度较高,涉及驱动数目较多,因此在实际滚动过程中并不被采纳,此处便不再讨论。

如表 3 和表 4 所示,在机器人初始着地为 2-3-4 的情况下,通过相应 CO-OC 基本步态的驱动策略(以驱动器两端端点的编号表示),可以翻滚到不同的结束着地面。可以观察到,杆件后屈曲模式下,CO 步态需要 3 个驱动器,而 OC 步态只需要 1 个,这是由于开放三角形比封闭三角形的宽度更窄,对应启发式函数值也就更容易达到 0。

表3 绳驱动CO-OC步态

Table 3 CO-OC gaits driven by cable

CO 驱动策略	结束着地面	OC 驱动策略	结束着地面
2-4,3-6	(2, 3, 9)	2-5,3-9	(2, 5, 9)
3-4,2-9	(2, 4, 10)	4-13,5-10	(4, 10, 13)
4-10,2-3	(3, 4, 6)	6-13,3-12	(3, 6, 12)

表4 杆件后屈曲驱动CO-OC步态

Table 4 CO-OC gaits driven by rod-post-buckling

CO 驱动策略	结束着地面	OC 驱动策略	结束着地面
8-9,3-13,6-7	(3, 4, 6)	3-13	(3, 6, 12)
2-12,6-7,4-5	(2, 3, 9)	4-5	(2, 5, 9)
2-12,10-11,8-9	(2, 4, 10)	10-11	(4, 10, 13)

根据球形张拉整体机器人的对称性,从以上基本步态便可以得到在任意初始着地面状态下,机器人的驱动策略,限于篇幅,此处便不再列出。值得注意的是,如图10所示,机器人在处于任意一个初始着地面时(以2-3-4面为例),最少经过6个CO和OC步态,便可回到最初的着地面,将这样的步态称为一个周期性步态。也可以看到,虽然舍弃了实现难度更高的OO步态,但球形张拉整体机器人依旧可以通过这样的周期性步态,完成向平面上任意目标点行走的任务。

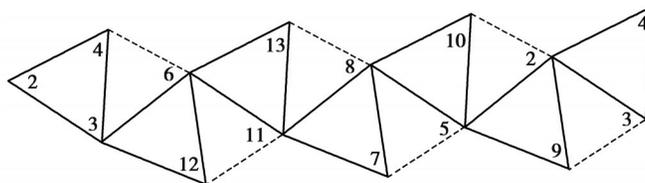


图10 周期性步态

Fig. 10 Periodic gaits

为统一对比绳驱动以及杆件后屈曲驱动的条件,采用一个周期性步态,这样每一个步态所对应的时间是相同的,均为72 s。在张拉整体机器人周期性步态中,所涉及的驱动器数目如图11所示。从图像的密集程度上,可以看到杆件后屈曲驱动模式所涉及的驱动器数目的密集程度低于绳驱动模式对应密集程度。具体数值来看,绳驱动模式下,张拉整体机器人周期性步态实现过程中,所涉及的驱动器数目为18,而杆件后屈曲驱动模式下,机器人所涉及的驱动器数目为6,驱动器数目减少了12个。

将球形张拉整体机器人的翻滚速度 v 定义为机器人翻滚过程中,质心点在平面内位移 x 与翻滚时间 t 的比值,即 $v = x/t$ 。分别在基本步态和周期性步态中,对比了球形张拉整体机器人在2种驱动模式下的翻滚速度。在基本步态的CO步态方面,选取了初始着地点为2-3-4到2-4-10的翻滚过程,如图12所示。图12中分别展示了机器人在杆件后屈曲驱动和绳驱动下,地面接触点的移动轨迹,以及GCOM的移动轨迹,黑色实线代表初始位置,绿色实线代表结束位置,虚线代表翻滚过程中接触点的移动轨迹。

可以观察到,杆件后屈曲驱动模式下,对于初始接触面三角形2-3-4的变形影响不大,而是通过柔性杆件的后屈曲变形,使得张拉整体机器人结构变形,GCOM偏离出2-4边,进而实现翻滚步态,如图12(b)所示。与之相对应的,由于绳单元变形对于张拉整体机器人整体结构变形不像前者那样明显,因此,在驱动策略中,常常选择底部三角形其中的一边,与其他驱动绳同时收缩,即缩小底面三角形面积,才能令启发式函数更快达到0。这样绳驱动模式才能在相对较少的驱动器数目下,实现张拉整体机器人的翻滚步态,如图12(a)所示。

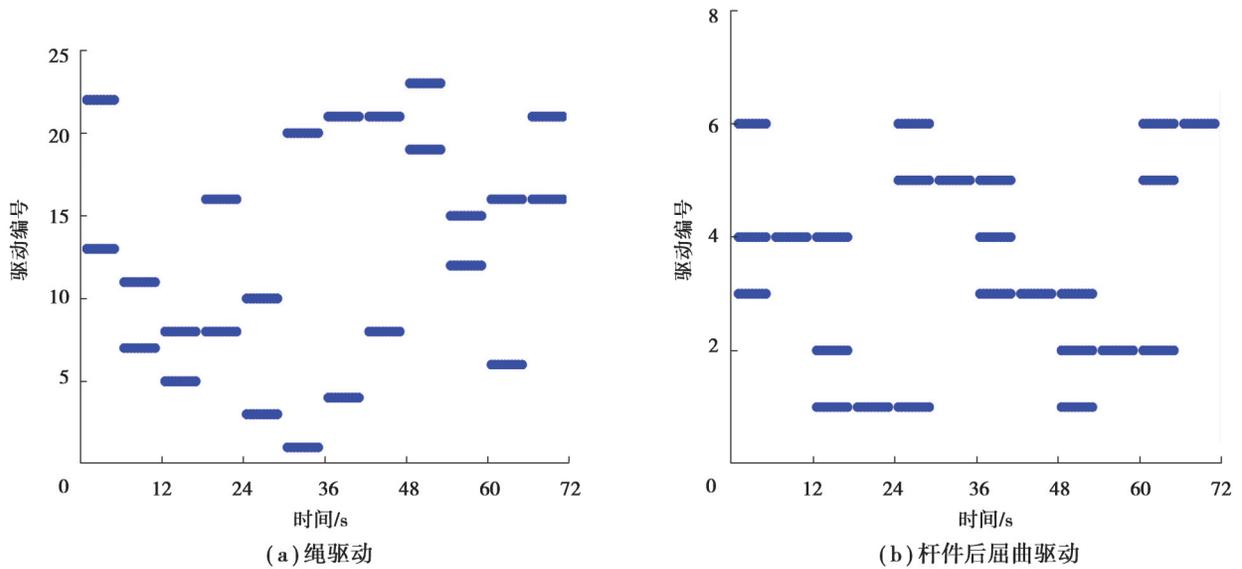


图 11 周期步态下驱动数对比
Fig. 11 Comparison of driving numbers for periodic gaits

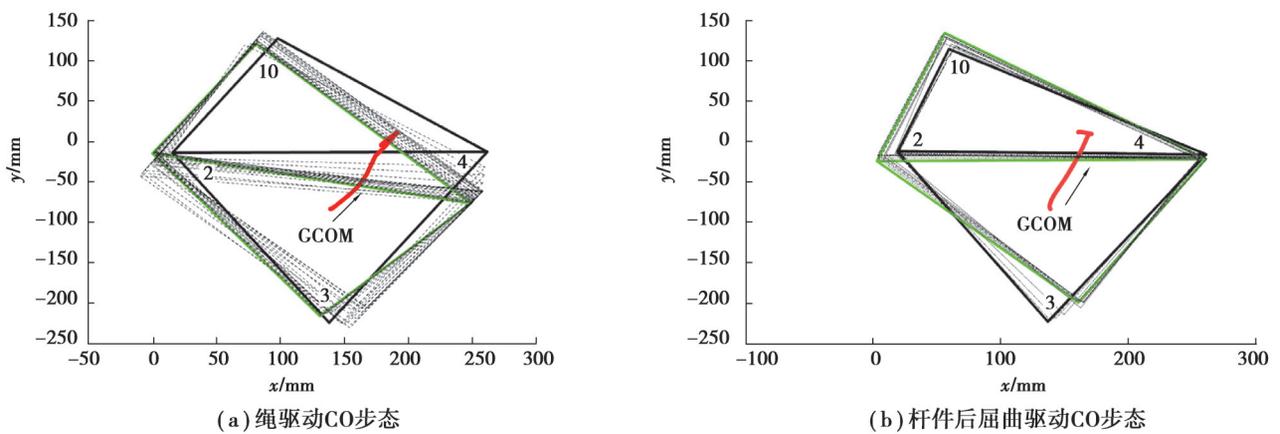


图 12 CO 步态对比
Fig. 12 Comparison of CO gaits

从数值上看,CO步态中,机器人在杆件后屈曲驱动模式下,GCOM移动距离为 97.52 mm,在绳驱动模式下移动距离为 88.38 mm。所用时间均为 6 s,因此,2种驱动模式下,机器人翻滚速度分别为 16.25 mm/s 和 14.73 mm/s。张拉整体机器人在杆件后屈曲驱动模式下,机器人的CO步态速度提高了 10.34%。

在张拉整体机器人OC步态中,杆件后屈曲驱动模式对于速度的提升则更为明显。如图 13 所示,OC步态中,机器人在杆件后屈曲驱动模式下,GCOM的移动距离大于绳驱动下 GCOM 的移动距离。其本质原因依然是在翻滚过程中,绳驱动对于底面三角形面积的缩小,导致在翻滚后 GCOM 移动距离减小。从数值上看,OC步态中,机器人在杆件后屈曲驱动模式下,GCOM 移动距离为 117.86 mm,速度为 19.64 mm/s;在绳驱动模式下 GCOM 移动距离为 44.72 mm,速度为 7.45 mm/s。张拉整体机器人在杆件后屈曲驱动模式下,机器人的OC步态速度提高了 163.56%。

在周期性步态中(见图 14),只展示出 GCOM 的移动曲线,不再关注地面接触点的移动轨迹。可以看到,相同初始位置点,杆件后屈曲驱动模式下,张拉整体机器人的移动距离为 1 083.63 mm,速度为 15.05 mm/s。绳驱动模式下,总移动距离为 753.67 mm,速度为 10.48 mm/s。张拉整体机器人在杆件后屈曲驱动模式下,机器人的周期性步态速度提高了 43.78%。

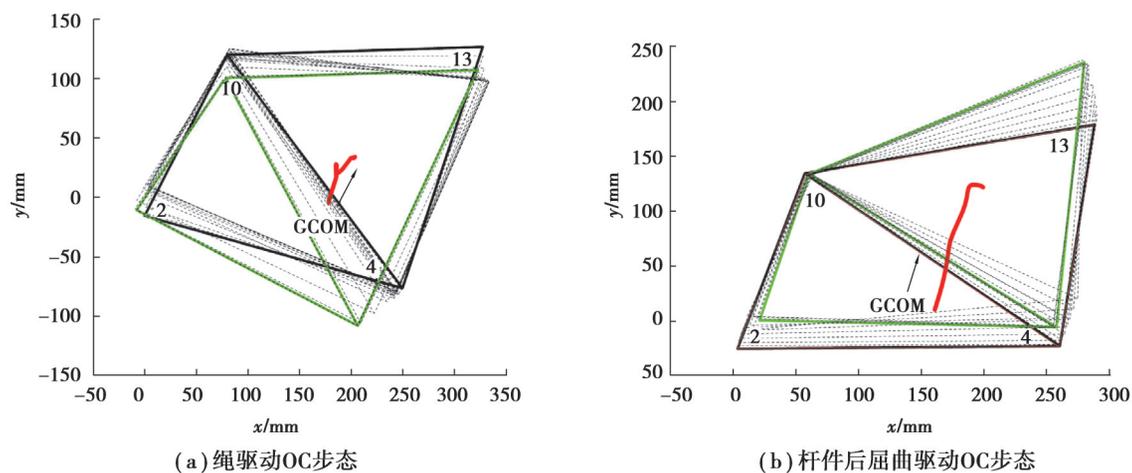


图 13 OC 步态对比

Fig. 13 Comparison of OC gaits

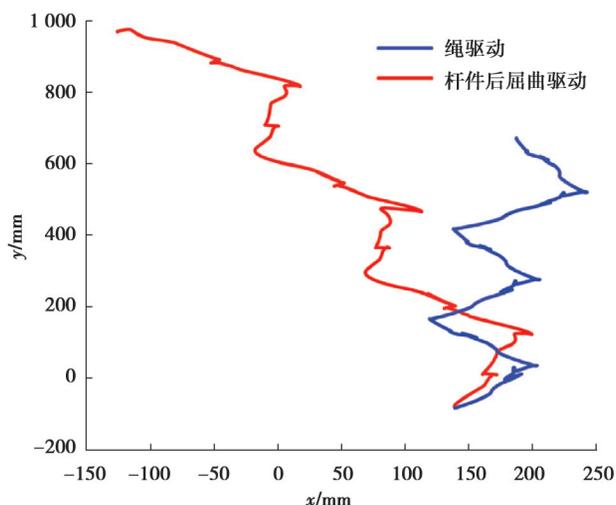


图 14 周期性步态 GCOM 轨迹

Fig. 14 The trajectory of GCOM in periodic gait

在连续行走方面,为证明在杆件后屈曲驱动模式下,球形张拉整体机器人可以实现向任意目标点的行走功能,在 4 个象限平面内,分别取出 4 个随机点 A、B、C、D,以确保目标点的任意性。由表 5 可以看到,球形张拉整体机器人在杆件后屈曲驱动模式下,可实现向目标点运动的任务。对应质心点轨迹如图 15 所示,证明了杆件后屈曲驱动模式下,机器人向平面内任意目标点行走的可靠性。在初始位置相同,且到达相同目标点过程中,绳驱动模式下张拉整体机器人所耗时间均多于杆件后屈曲驱动模式,再次证明了杆件后屈曲驱动对于张拉整体机器人行走速度上的提升。

表 5 2 种驱动模式的效率比较

Table 5 Efficiency of the two drive types

目标点	到目标点所需时间/s	
	绳驱动	杆件后屈曲驱动
A (1 460, 38.81)	234	108
B (-1 389, 95.05)	216	198
C (-895.51, -550)	108	84
D (839.9, -1 158)	156	126

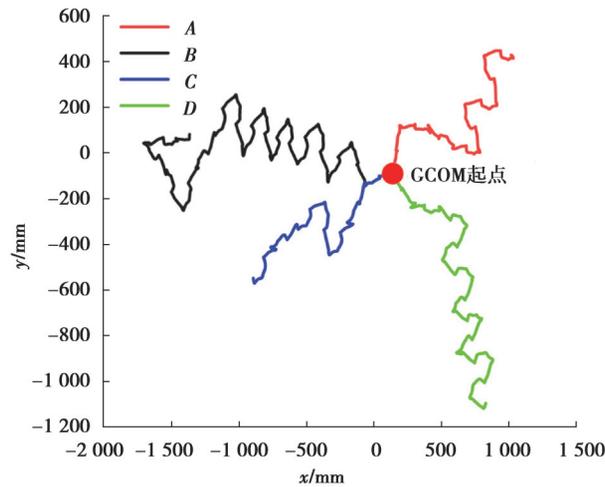


图 15 向 4 个目标点行走的 GCOM 轨迹

Fig. 15 GCOM trajectories walking towards 4 target points

4 结 论

针对球形张拉整体机器人,提出了一种基于柔性杆件后屈曲变形的新型驱动模式,通过 ADAMS 与 Simulink 软件联合仿真,实现了该驱动模式下,球形张拉整体机器人的连续行走仿真模拟。对传统绳索驱动与杆件后屈曲驱动 2 种模式进行了对比研究,具体结论如下:

1) 根据单根杆件后屈曲变形中的椭圆积分法相关公式,从理论上确定了移动副收缩距离与 δ 之间的关系,完成了杆件后屈曲驱动张拉整体机器人 ADAMS 模型建立;

2) 根据球形张拉整体机器人拓扑图,确定了基本步态类型,利用贪心搜索 (greedy search) 算法,成功找到了杆件后屈曲驱动下的驱动策略;

3) 对比传统绳索驱动,球形张拉整体机器人杆件后屈曲变形驱动模式使得驱动器数目从 18 个减少到 6 个,CO、OC 步态速度分别提高了 10.34% 和 163.56%,周期性步态行走速度提高了 43.78%;

4) 搭建 Simulink 控制系统,验证了在杆件后屈曲变形驱动模式下,球形张拉整体机器人向平面内任意目标点行走的可靠性。

研究结果为新型张拉整体机器人的设计与制造提供了理论指导。在之后的工作中,将进行机器人的实物制造,并对杆件后屈曲变形的具体实现方式展开研究。

参考文献

- [1] Paul C, Valero-Cuevas F J, Lipson H. Design and control of tensegrity robots for locomotion[J]. IEEE Transactions on Robotics, 2006, 22(5): 944-957.
- [2] Zhang L Y, Zheng Y, Yin X, et al. A tensegrity-based morphing module for assembling various deployable structures[J]. Mechanism and Machine Theory, 2022, 173: 104870.
- [3] Friesen J, Pogue A, Bewley T, et al. DuCTT: a tensegrity robot for exploring duct systems[C]//2014 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), May 31-June 7, 2014, Hong Kong, China. IEEE, 2014: 4222-4228.
- [4] Friesen J M, Glick P, Fanton M, et al. The second generation prototype of a Duct Climbing Tensegrity robot, DuCTTv2[C]//2016 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), May 16-21, 2016, Stockholm, Sweden. IEEE, 2016: 2123-2128.
- [5] 王力. 张拉整体形变机器人构型设计及管道爬行控制[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2018.
Wang L. Configuration design and duct climbing control of tensegrity deformable robot[D]. Xi'an: Xidian University, 2018. (in Chinese)
- [6] Zhang J, Kan Z Y, Li Y, et al. Novel design of a cable-driven continuum robot with multiple motion patterns[J]. IEEE Robotics and Automation Letters, 2022, 7(3): 6163-6170.

- [7] Begey J, Vedrines M, Renaud P. Design of tensegrity-based manipulators: comparison of two approaches to respect a remote center of motion constraint[J]. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 2020, 5(2): 1788-1795.
- [8] Zhao W D, Pashkevich A, Chablat D. Stiffness modeling of compliant serial manipulators based on tensegrity mechanism under external loading[C]//*Proceedings of the 18th International Conference on Informatics in Control, Automation and Robotics*, July 6-8, 2021, Paris, France. ICINCO, 2021: 254-262.
- [9] Bezawada H, Woods C, Vikas V. Shape reconstruction of soft manipulators using vision and IMU feedback[J]. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 2022, 7(4): 9589-9596.
- [10] 李冰玉, 阚子云, 彭海军, 等. 基于张拉整体结构的连续型弯曲机械臂设计与研究[J]. *机器人*, 2020, 42(6): 686-696.
Li B Y, Kan Z Y, Peng H J, et al. Design and research on a continuum manipulator based on tensegrity structure[J]. *Robot*, 2020, 42(6): 686-696.(in Chinese)
- [11] Mirlletz B T, Bhandal P, Adams R D, et al. Goal-directed CPG-based control for tensegrity spines with many degrees of freedom traversing irregular terrain[J]. *Soft Robotics*, 2015, 2(4): 165-176.
- [12] Tietz B R, Carnahan R W, Bachmann R J, et al. Tetraspine: robust terrain handling on a tensegrity robot using central pattern generators[C]//*2013 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics*, July 9-12, 2013, Wollongong, NSW, Australia. IEEE, 2013: 261-267.
- [13] Chen B X, Jiang H Z. Swimming performance of a tensegrity robotic fish[J]. *Soft Robotics*, 2019, 6(4): 520-531.
- [14] Sun J W, Song G S, Chu J K, et al. An adaptive bioinspired foot mechanism based on tensegrity structures[J]. *Soft Robotics*, 2019, 6(6): 778-789.
- [15] Lessard S, Castro D, Asper W, et al. A bio-inspired tensegrity manipulator with multi-DOF, structurally compliant joints[C]//*2016 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, October 9-14, 2016, Daejeon, Korea (South). IEEE, 2016: 5515-5520.
- [16] Shibata M, Hirai S. Rolling locomotion of deformable tensegrity structure[C]//*Mobile Robotics*, Istanbul, Turkey. World Scientific, 2009: 479-486.
- [17] Caluwaerts K, Despraz J, İşçen A, et al. Design and control of compliant tensegrity robots through simulation and hardware validation[J]. *Journal of the Royal Society Interface*, 2014, 11(98): 20140520.
- [18] Kim K, Agogino A K, Agogino A M. Rolling locomotion of cable-driven soft spherical tensegrity robots[J]. *Soft Robotics*, 2020, 7(3): 346-361.
- [19] Bruce J, Caluwaerts K, Iscen A, et al. Design and evolution of a modular tensegrity robot platform[C]//*2014 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, May 31-June 7, 2014, Hong Kong, China. IEEE, 2014: 3483-3489.
- [20] Vespignani M, Ercolani C, Friesen J M, et al. Steerable locomotion controller for six-strut icosahedral tensegrity robots[C]//*2018 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, October 1-5, 2018, Madrid, Spain. IEEE, 2019: 2886-2892.
- [21] Chen L H, Kim K, Tang E, et al. Soft spherical tensegrity robot design using rod-centered actuation and control[J]. *Journal of Mechanisms and Robotics*, 2017, 9(2): 025001.
- [22] Zhao K K, Chang J A, Li B, et al. Rolling direction prediction of tensegrity robot on the slope based on FEM and GA[J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, 2020, 234(19): 3846-3858.
- [23] Chung Y S, Lee J H, Jang J H, et al. Jumping tensegrity robot based on torsionally prestrained SMA springs[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2019, 11(43): 40793-40799.
- [24] Wang Z J, Li K, He Q G, et al. A light-powered ultralight tensegrity robot with high deformability and load capacity[J]. *Advanced Materials*, 2019, 31(7): e1806849.
- [25] Lee H J, Jang Y, Choe J K, et al. 3D-printed programmable tensegrity for soft robotics[J]. *Science Robotics*, 2020, 5(45): eaay9024.
- [26] Koizumi Y, Shibata M, Hirai S. Rolling tensegrity driven by pneumatic soft actuators[C]//*2012 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, May 14-18, 2012, Saint Paul, MN, USA. IEEE, 2012: 1988-1993.
- [27] 铁摩辛柯 S P, 盖莱 J M. 弹性稳定理论[M]. 张福范, 译. 2版. 北京: 科学出版社, 1965.
Timoshenko S P, Gere J M. *Theory of elastic stability*[M]. Zhang F F, tans. 2nd ed. Beijing: Science Press, 1965. (in Chinese)