



结构仿生六杆张拉整体机器人折叠控制的形态智能方法

石家旭 陶子辰 桂昀 刘珂 刘华平 方浩 杨庆凯

A Morphological-intelligence Approach to Folding Control of a Structurally Bioinspired Six-bar Tensegrity Robot

SHI Jia-Xu, TAO Zi-Chen, GUI Yun, LIU Ke, LIU Hua-Ping, FANG Hao, YANG Qing-Kai

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16383/j.aas.c250529>

您可能感兴趣的其他文章

基于形态的具身智能研究: 历史回顾与前沿进展

Morphology-based Embodied Intelligence: Historical Retrospect and Research Progress

自动化学报. 2023, 49(6): 1131-1154 <https://doi.org/10.16383/j.aas.c220564>

基于高仿生形态布局的仿鸽扑翼飞行机器人系统设计

System Design of Dove-like Flapping-wing Flying Robot Based on Highly Bionic Morphological Layout

自动化学报. 2024, 50(2): 308-319 <https://doi.org/10.16383/j.aas.c220836>

基于分层控制策略的六轮滑移机器人横向稳定性控制

Lateral Stability Control of Six-wheeled Skid-steering Robot Based on Hierarchical Control Strategy

自动化学报. 2023, 49(7): 1421-1432 <https://doi.org/10.16383/j.aas.c220326>

机器人感知与控制关键技术及其智能制造应用

Key Technologies of Robot Perception and Control and Its Intelligent Manufacturing Applications

自动化学报. 2023, 49(3): 494-513 <https://doi.org/10.16383/j.aas.c220995>

面向智能生化实验室的机器人感知、规划与控制技术

Robot Perception, Planning, and Control Technologies for Intelligent Biochemical Laboratories

自动化学报. 2025, 51(9): 1899-1921 <https://doi.org/10.16383/j.aas.c240714>

面向离散地形的欠驱动双足机器人平衡控制方法

Balance Control of Underactuated Biped Robot for Discrete Terrain

自动化学报. 2022, 48(9): 2164-2174 <https://doi.org/10.16383/j.aas.c211008>

结构仿生六杆张拉整体机器人折叠控制的形态智能方法

石家旭^{1,2} 陶子辰^{1,2} 桂昀^{1,2} 刘珂³ 刘华平⁴ 方浩^{1,2} 杨庆凯^{1,2}

摘要 形态智能通常指机器人利用“身体”的物理特性、几何结构以及动力学特征等简化复杂的计算(如控制器设计),具备良好环境适应性的特点,是实现具身智能的核心机制.本文针对六杆张拉整体完全折叠问题,提出一种利用形态智能机理简化控制方法,实现部分绳驱下机器人整体的等效折叠.首先基于“端点聚拢”形态构造折叠目标,通过结构对称性分析得到四种折叠模式及对应的绳长变化量.再通过图论回路空间分析,识别由几何构型产生的冗余绳长变化量,基于此确定折叠过程中的被控绳.然后在静力学框架下建立电机输入与绳长变化映射关系并给出可达性判据,以此得到每种模式下简化控制策略.最后通过 MATLAB 准静态仿真及实物实验,验证所提方法的有效性.四种折叠模式下的简化控制策略均能实现机器人完全折叠,驱动绳的数量可由传统方法的 24 降低至 9,展现了形态智能在简化机器人控制器设计方面的潜力.

关键词 张拉整体机器人; 折叠控制; 平衡流形; 形态智能

引用格式 石家旭, 陶子辰, 桂昀, 刘珂, 刘华平, 方浩, 杨庆凯. 结构仿生六杆张拉整体机器人折叠控制的形态智能方法. 自动化学报, 2026, 52(5): 1-11

DOI 10.16383/j.aas.c250529 **CSTR** 32138.14.j.aas.c250529

A Morphological-intelligence Approach to Folding Control of a Structurally Bioinspired Six-bar Tensegrity Robot

SHI Jia-Xu^{1,2} TAO Zi-Chen^{1,2} GUI Yun^{1,2} LIU Ke³ LIU Hua-Ping⁴ FANG Hao^{1,2} YANG Qing-Kai^{1,2}

Abstract Morphological intelligence refers to leveraging a robot's physical body—its physical properties, geometric structure, and dynamic characteristics—to offload computation (e.g., controller design) and enhance environmental adaptability; It is a core mechanism of embodied intelligence. This paper targets complete folding of a six-bar tensegrity robot and develops a morphology-driven simplified control method that achieves whole-body equivalent folding under partial cable actuation. A folding objective based on endpoint aggregation is first formulated; symmetry analysis then enumerates four folding patterns together with their associated cable-length variations. A graph-theoretic cycle-space analysis is employed to identify redundancy in length changes induced by geometric coupling, from which the actuated-cable set during folding is determined. Within a static framework, the mapping from motor inputs to cable-length variations is established and a reachability criterion is provided, yielding a simplified control strategy for each pattern. Quasi-static MATLAB simulations and hardware experiments validate the approach: Across all four patterns, complete folding is achieved while the number of actively actuated cables is reduced from 24 to 9. The results highlight the potential of morphological intelligence to simplify controller design for tensegrity robots.

Keywords tensegrity robot; folding control; equilibrium manifold; morphological intelligence

Citation Shi Jia-Xu, Tao Zi-Chen, Gui Yun, Liu Ke, Liu Hua-Ping, Fang Hao, Yang Qing-Kai. A morphological-intelligence approach to folding control of a structurally bioinspired six-bar tensegrity robot. *Acta Automatica Sinica*, 2026, 52(5): 1-11

收稿日期 2025-10-10 录用日期 2026-01-04
Manuscript received October 10, 2025; accepted January 4, 2026

国家重点研发项目(2022YFB4702000), 国家自然科学基金项目(62373048, U1913602, 62025304, 62088101) 资助

Supported by National Key Research and Development Program of China (2022YFB4702000) and National Natural Science Foundation of China (62373048, U1913602, 62025304, 62088101)

本文责任编辑 刘志杰

Recommended by Associate Editor LIU Zhi-Jie

1. 北京理工大学自动化学院 北京 100081 2. 自主智能无人系统全国重点实验室 北京 100081 3. 北京大学先进制造与机器人系 北京 100091 4. 清华大学计算机科学与技术系 北京 100084

1. School of Automation, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081 2. State Key Laboratory of Autonomous Intelligent Unmanned Systems, Beijing 100081 3. School of Ad-

vanced Manufacturing and Robotics, Peking University, Beijing 100091 4. Department of Computer Science and Technology, Tsinghua University, Beijing 100084

在生物系统中,从细胞骨架到哺乳动物脊椎,均存在丰富的张拉整体结构.例如,细胞骨架中的微丝与微管通过张力平衡维持细胞的形态与机械稳定^[1-2];哺乳动物生理系统中由筋膜构成的张力网络与骨骼组成张拉整体结构维持脊椎的稳定^[3].这种力学机制不仅支持结构与外部环境相互作用,还赋予其执行迁移、收缩等多样化运动的能力.这种由张力元件和压缩元件组成的张拉整体结构拥有高灵

Manuscript received October 10, 2025; accepted January 4, 2026

活性^[4-5]、构型可变^[6]的优越性能,可以实现柔性和刚性之间的协调平衡,具有构建高性能机器人的巨大潜力^[7].

受生物张拉整体结构启发所设计出的六杆张拉整体机器人具有可变形的优越能力^[3, 8],能够执行滚动^[9-10]、跳跃^[11-13]、飞行^[14-15]、抓取^[16]等多种复杂运动,在太空探索^[9]、灾害救援等领域显示出巨大的应用潜力.

然而,六杆张拉整体机器人在展开态下体积庞大,这会严重降低运输效率或限制投放平台的适配性,阻碍其在太空探索、灾害救援等实际场景中的快速部署与应用.此外,与传统刚体平台相比,六杆张拉整体在形态智能层面具备先天的环境适应性:杆-绳耦合与预应力网络允许结构在碰撞或地形激励下进行可控的形态变换,以适应当前环境.如在狭缝、管道或障碍密集区域,结构可先收拢为细长形态以通过窄口,再于任务区展开以恢复抗冲击能力,如图1所示^[17].综上所述,若能在保持结构完整的同时,实现机器人高效折叠与再展开,将显著提升系统的便携性与部署灵活性,为实际的工程应用开辟更广阔的空间.



图1 基于张拉整体结构的管道爬机器人
Fig.1 The tensegrity structures-based in-pipe crawling robot

现有针对六杆张拉整体机器人折叠部署的研究相对有限. Calangi^[18]提出基于模型的绳索长度闭环控制方法,以六杆张拉整体几何结构为基础,建立机器人动力学模型,设定目标绳长或目标几何形态,在准静态平衡假设下通过仿真实现三角形与六边形两种折叠模式.三角形折叠仿真效果如图2所示^[19],该方法有明确的模型依据与约束处理,但在考虑弹簧长度、驱动器限幅等非理想因素时,三角形折叠难以直接迁移到实物上.六边形折叠虽更易在实物机器人上实现^[8],如图3所示,但折叠态体积收缩有限,难以满足高效运输与紧凑收纳的工程需求. Sultan 等^[20]从受约束的非线性动力学模型出发,以绳索长度作为连续控制输入,提出平衡流形

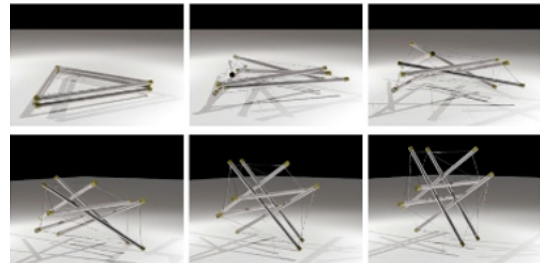


图2 六杆张拉整体机器人三角形折叠

Fig.2 Triangular folding of six-bar tensegrity robot



图3 六杆张拉整体机器人六边形折叠

Fig.3 Hexagonal folding of six-bar tensegrity robot

思想:在不同输入下的静力平衡解组成平衡流形,在其上进行连续追踪与轨迹规划,并进一步叠加时间或能量最优等优化准则,实现时间或能量最优的一维构型折叠.如图4所示,该方法已在实物实验中展示了接近一维构型的折叠效果,实现体积减少95%^[21],所称“一维构型”是指六根杆件在空间中收拢成近似线状的细长束状构型.但该方法通常依赖24根绳索的独立驱动与精细协调,控制策略复杂,难以满足低功耗、低复杂度的应用需求.因此,如何驱动少数绳索实现机器人整体等效折叠,从而简化控制策略,成为机器人高效部署的关键挑战.



图4 六杆张拉整体机器人一维构型折叠

Fig.4 One-dimensional configuration folding of six-bar tensegrity robot

形态智能的核心是形态计算,即利用身体的形状、材质以及动态特性等改进计算效率,并进一步实现对身体行为的控制^[22].以往研究表明,通过恰当的形态设计可以让机器人仅需简单的控制甚至无需控制即可完成复杂行为,典型案例包括被动行走机器人^[23]、自适应环境的软体机器人^[24]等.六杆张

拉整体机器人在这一背景下具备显著的形态智能潜力, 其绳-节点-杆的几何拓扑与预应力决定了仅需驱动少数绳索即可通过力学耦合影响全局位形, 这些结构特征天然提供了以少数驱动绳控制系统整体行为的可能. 基于此, 本文提出一种利用六杆张拉整体机器人形态智能机理实现完全折叠的简化控制方法.

本文的结构安排如下: 第 1 节描述六杆张拉整体折叠问题; 第 2 节阐述形态智能机理, 并构造折叠目标, 通过对称性分析将折叠归纳为四种模式, 进而得到每种模式的绳长变化量, 再结合图论回路分析, 减少驱动绳数量; 第 3 节在静力学框架下建立系统势能模型与平衡条件, 在平衡构型处线性化得到输入-绳长变化的映射矩阵, 并给出可达性判据以检验降维输入的可实施性; 第 4 节进行 MATLAB 仿真与实物实验, 验证所提方法在四类折叠模式下的有效性; 第 5 节给出总结并讨论后续的研究方向.

1 问题描述

六杆张拉整体机器人由 6 根刚性杆、24 根绳索与 24 个电机构成, 如图 5 所示. 6 根刚性杆平均分为三组, 在空间位置上任意两组刚性杆互相垂直, 每一组内的 2 根刚性杆相互平行. 每根刚性杆的两个端点分别引出 4 根绳索, 与距离该端点最近的四个端点相连接. 每个杆端连接绳索处各嵌入 2 个电机, 分布在不相邻的两个连接点. 每根绳索一端连接在电机上, 另一端位于其他杆端未放置电机的连接点. 驱动电机转动可收缩绳索, 改变所连接绳索的长度, 本文中电机输入视为对电机所连接绳索长度的改变, 未被直接驱动的绳索在预应力与结构

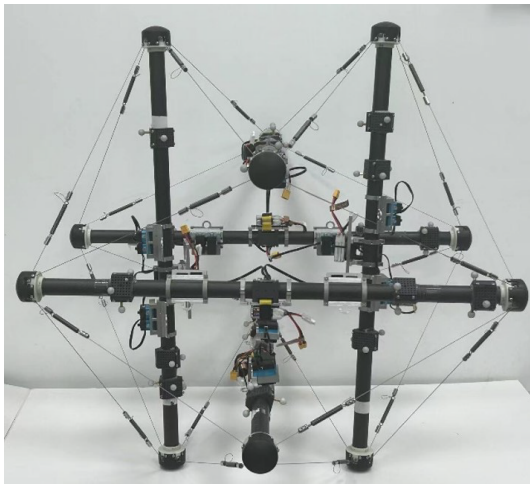


图 5 六杆张拉整体球形机器人

Fig.5 Six-bar spherical tensegrity robot

耦合作用下被动伸长或恢复原长. 该机器人具有显著对称性, 三组平行杆互相等价, 绳索与电机在空间上对称分布, 这使得在弹力网络中电机输入的传播具有规则性. 机器人的预应力使得少数输入即可改变全局形状, 这些几何与力学特征使机器人具备利用形态智能简化控制的潜力.

六杆张拉整体拓扑结构如图 6 所示. 将 12 个杆端视为 12 个节点, 记第 i 个节点在空间中的位置为 $x_i \in \mathbf{R}^{3 \times 1}$, 则节点矩阵为 $X = [x_1, x_2, \dots, x_{12}]$. 定义机器人系统的广义坐标为 $q^T = [x_1^T, \dots, x_{12}^T]$. 令 $C_b \in \mathbf{R}^{6 \times 12}$ 与 $C_s \in \mathbf{R}^{24 \times 12}$ 分别为杆-节点与绳索-节点的连通矩阵, 杆矩阵定义为 $B = XC_b^T$, 绳索矩阵定义为 $S = XC_s^T$. 若第 h 个构件连接节点为 i 与 j ($i < j$), 则连通矩阵的第 h 行第 w 列定位为

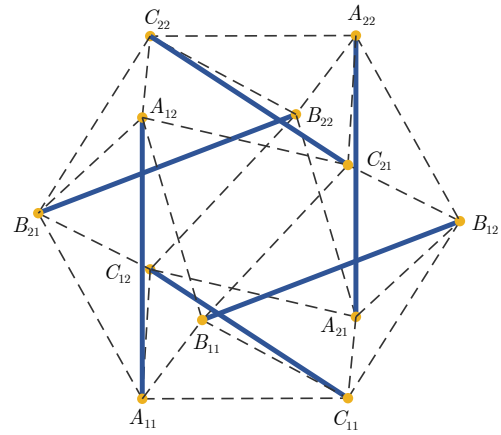


图 6 六杆张拉整体拓扑结构

Fig.6 Six-bar tensegrity topology

$$C_{(h,w)} \begin{cases} 1, & w = i \\ -1, & w = j \\ 0, & \text{其他} \end{cases}$$

绳索矩阵第 k 列 $S_k(q)$ 为第 k 根绳的节点差向量, 则绳长可由 $l_k(q) = \|S_k(q)\|$ 得出. 杆被视为不可伸长的刚性构件, 把所有杆的约束叠加得到约束向量

$$R(q) = \begin{bmatrix} \|x_{j_1} - x_{i_1}\| - L_1 \\ \vdots \\ \|x_{j_6} - x_{i_6}\| - L_6 \end{bmatrix} \quad (1)$$

其中 L_1, \dots, L_6 为杆的长度, 则杆长约束可写为 $R(q) = 0$.

将三组平行杆记为 A 、 B 、 C 组, 记 A 组两根杆为 A_1 和 A_2 , 其端点分别记为 A_{11} 、 A_{12} 和 A_{21} 、 A_{22} ; B 、 C 组同理. 连接两个端点的绳索编号如表 1 所示.

对于六杆张拉整体结构而言,其折叠行为可视为端点的聚拢:当折叠为一维构型时,端点将汇聚到少数几个局部邻域,从而形成若干端点簇,记为 C_α .为了定量描述“聚拢程度”,定义簇内方差之和:

$$\Phi(q) = \sum_{\alpha \in \{L, M, R\}} \sum_{i \in C_\alpha} \|x_i - \mu_\alpha(q)\|^2$$

其中 $\mu_\alpha(q)$ 为每个簇的几何中心.给定阈值 $\tau > 0$,当 $\Phi(q) \leq \tau$ 时则认为实现折叠.

针对折叠目标,本文研究的核心问题在于:如何利用形态智能机理,在显著减少驱动绳数量的前提下实现机器人整体等效折叠,从而简化控制策略.

表 1 绳索编号
Table 1 Cable number

绳索	编号	绳索	编号	绳索	编号
$A_{11}B_{11}$	1	$A_{21}B_{12}$	9	$B_{11}C_{11}$	17
$A_{11}B_{21}$	2	$A_{21}B_{22}$	10	$B_{11}C_{21}$	18
$A_{11}C_{11}$	3	$A_{21}C_{11}$	11	$B_{12}C_{11}$	19
$A_{11}C_{12}$	4	$A_{21}C_{12}$	12	$B_{12}C_{21}$	20
$A_{12}B_{11}$	5	$A_{22}B_{12}$	13	$B_{21}C_{12}$	21
$A_{12}B_{21}$	6	$A_{22}B_{22}$	14	$B_{21}C_{22}$	22
$A_{12}C_{21}$	7	$A_{22}C_{21}$	15	$B_{22}C_{12}$	23
$A_{12}C_{22}$	8	$A_{22}C_{22}$	16	$B_{22}C_{22}$	24

2 六杆张拉整体机器人简化控制的形态智能机理

本节首先阐明六杆张拉整体形态智能机理,说明仅需少数驱动绳即可实现系统期望构型变化.在此基础上,本节给出折叠目标的定义,通过对称性分析得到四种折叠模式及每种折叠模式下的绳长变化量,并据此确定需电机驱动的绳索集合.随后从图论视角分析集合中的冗余绳索,以进一步减少驱动绳数量.

2.1 形态智能的概念与简化控制典型案例

通过形态智能,可以将部分需要“脑”完成的计算工作移交给“身体”完成,从而利用“身体”与环境交互的作用来产生行为^[21].换言之,合理的形状设计与物理耦合能够使简单的输入经过结构的被动力学传播,实现复杂的全局控制或产生特定的行为.过去的研究在机器人被动行走、软体机器人自适应环境等领域已经多次展示了形态智能的优势:通过设计有效的物理形态,系统能够以更少的感知或控制实现期望的运动或任务,从而减少能耗,提高效率.

六杆张拉整体结构天然具备形态智能的物理条件.首先,承受压力的刚性杆与承受拉力的柔性绳索互相连接,构成张力网络,形成了明确的几何约束.任何一处节点位置改变或绳长变化都会通过张力网络传递至结构全身,改变整体构型,重新分配张力.其次,张拉整体结构适当的预应力可以使系统在平衡态具有良好的刚度与灵敏度,从而保证仅需驱动少数绳索即可实现期望方向形变.最后,结构具有高度对称性,其三组平行杆置换对称,若干绳索在力学响应上表现出近似等价的性质,从而具备驱动少数绳索实现特定目标的潜能.综上所述,六杆张拉整体的几何拓扑、预应力分布与张力网络的力传递机制共同构成了其形态智能的物理基础.

为使上述机制更加直观,下文以六杆张拉整体机器人滚动控制作为典型的启发性案例.当以特定方式驱动 24 根绳索时,可以引起节点发生期望位移,改变当前构型,进而使机器人整体重心在基底面上的投影发生偏移.当重心投影越过基底面边界时,重力会促使机器人发生翻滚.值得注意的是,机器人翻滚其实并不需要对全部绳索进行精细驱动.已有研究表明,得益于结构的几何与力学耦合特性,仅通过驱动一根绳索便足以改变机器人的重心位置并触发翻滚^[25].该案例直观地说明了通过结构耦合,仅驱动少数绳索实现全局功能的基本思想:身体的形态把复杂的力学映射事先“编码”进系统,从而简化了控制需求.类似的现象在诸如抓取、伸缩^[16]等其他运动或变形任务中亦能观察到:一些看似复杂的整体位形改变,在合适的结构设计下实际上是少量局部动作的自然结果.

由此可看出,形态智能把复杂度前置到材料选择和结构设计上,从而使运行时的控制或决策变得更简单.此外,利用形态智能简化控制依赖于合理的预应力设计、准确的输入选择.受上述案例启发,本文将形态智能作为实现六杆张拉整体完全折叠简化控制核心理念:传统六杆张拉整体机器人以弹簧和刚性绳作为绳索,当绳索需伸长时必须由电机反转驱动以避免结构损坏;本文则以弹力绳作为绳索,当机器人构型改变时,其可以被动伸长而无需电机主动反转控制,即通过几何结构和预应力设计使机器人驱动少数绳索产生期望响应.在此基础上,本文分析使其完全折叠所需控制的绳索,实现六杆张拉整体机器人完全折叠的简化控制.

2.2 折叠目标定义

为区分一维构型折叠的不同模式,根据折叠态下每组平行杆位置标记该组方向.具体而言,当折叠为一维构型时, A 组中端点 A_{11} 和 A_{21} 在同一簇

时, A 组方向记为正; 反之, 若端点 A_{11} 和 A_{21} 在不同簇时, 方向记为反. 由于三组平行杆本质上等价, 在上述标记约定下, 六杆张拉整体的端点归属可用四类模式描述, 即三组方向均为正、两组为正一组为反、一组为正两组为反、三组方向均为反, 记为 O_1 、 O_2 、 O_3 、 O_4 , 也就是说六杆张拉整体共有四种折叠模式.

当给定模式 O_r 时, 每个簇所包含的端点也随之确定, 簇划分为 C_L 和 C_R . 特别地, 折叠模式 O_4 簇划分虽得到 $C_L(O_4) = \{A_{11}, A_{22}, B_{11}, B_{22}, C_{11}, C_{22}\}$, 但其中的 A_{11}, B_{11}, C_{11} 和 A_{22}, B_{22}, C_{22} 分别构成独立回路, 则在该模式下实则形成三个簇, 记第三个簇为 C_M . 四种折叠模式端点归属如表 2 所示.

表 2 四种折叠模式簇划分

Table 2 Cluster partitioning under four folding patterns

模式	C_L	C_R	C_M
O_1	$A_{11}, A_{21}, B_{11}, B_{21}, C_{11}, C_{21}$	$A_{12}, A_{22}, B_{12}, B_{22}, C_{12}, C_{22}$	—
O_2	$A_{11}, A_{21}, B_{11}, B_{21}, C_{11}, C_{22}$	$A_{12}, A_{22}, B_{12}, B_{22}, C_{12}, C_{21}$	—
O_3	$A_{11}, A_{21}, B_{11}, B_{22}, C_{11}, C_{22}$	$A_{12}, A_{22}, B_{12}, B_{21}, C_{12}, C_{21}$	—
O_4	A_{11}, B_{11}, C_{11}	A_{22}, B_{22}, C_{22}	$A_{12}, A_{21}, B_{12}, B_{21}, C_{12}, C_{21}$

对于给定模式 O_r , 定义各簇的几何中心

$$\mu_\alpha(q) = \frac{1}{|C_\alpha|} \sum_{i \in C_\alpha(O_r)} x_i \quad (2)$$

以簇内方差之和表示折叠程度, 对 O_1, O_2, O_3 和 O_4 取

$$\Phi_r(q) = \sum_{\alpha \in \{L, M, R\}} \sum_{i \in C_\alpha(O_r)} \|x_i - \mu_\alpha\|^2 \quad (3)$$

六杆张拉整体机器人共有 12 个杆端, 记 $n_{tot} = 12$, 并记杆端的截面特征尺寸为 d , 则给定阈值 $\tau = n_{tot} \kappa^2 d^2$. 定义折叠目标集合为

$$Q_{fold}(O_r; \tau) = \{q | \Phi_r(q) \leq \tau, R(q) = 0\}$$

其中, $r = 1, 2, 3, 4$; 考虑实际杆件厚度对杆端聚拢的影响, κ 可取 2.5.

在 Q_{fold} 中取平衡构型 q_{goal} 作为折叠目标, 则得到绳长目标

$$(\ell_{goal})_k = \|x_{j(k)}^{goal} - x_{i(k)}^{goal}\| \quad (4)$$

其中, $k = 1, \dots, 24$. 若第 k 根绳的目标长度小于初始长度, 则折叠过程需驱动电机收短该绳; 反之, 则在折叠过程中可使其在其他输入作用下被动伸长, 无需电机主动驱动, 从而减少驱动绳数量.

记每种模式下需收短的绳索集合为 S_0 , 基于此得到四种折叠模式各自的 S_0 :

$$O_1: [1, 2, 3, 8, 11, 13, 14, 16, 17, 18, 23, 24]$$

$$O_2: [1, 2, 3, 7, 11, 13, 14, 15, 17, 20, 22, 23]$$

$$O_3: [1, 3, 6, 7, 10, 11, 13, 15, 17, 20, 21, 24]$$

$$O_4: [1, 3, 6, 7, 9, 12, 14, 16, 17, 20, 21, 24]$$

则每种模式的 $|S_0| = 12$.

2.3 基于图论分析的简化机理

将绳-节点结构视为无向图 $G = (V, E)$, 其中节点 V 对应杆端点, 边 E 对应绳索. 在该抽象中, 每个节点代表张拉整体中的一个杆端, 每条边代表一根绳索. 杆被视为刚性构件, 其长度在折叠过程中不发生主动变化, 因此不作为图的边参与回路计数. 对于任一折叠模式下的 $S_0 \subseteq E$, 记其诱导子图为 $G_{S_0} = (V_{S_0}, E_{S_0})$, 定义子图的回路空间维数

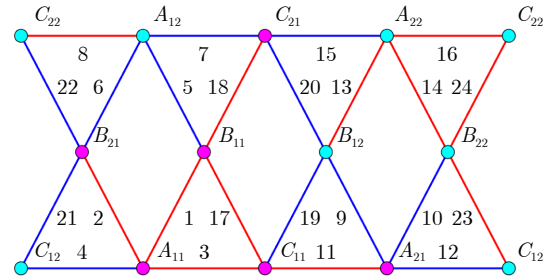
$$\beta(G_{S_0}) = |E_{S_0}| - |V_{S_0}| + c(G_{S_0}) \quad (5)$$

其中 $c(G_{S_0})$ 为连通分支数. 对于绳-节点网络而言, 每一条独立闭合回路对应一组首尾相接的绳索, 其端点在几何上形成一个闭合环. 若独立闭合回路由 k 根绳构成, 则收紧回路中任意 $k-1$ 根, 剩余一根绳索的长度便可通过几何约束和静力平衡由前者唯一确定, 无需电机单独施加输入. 换言之, 每存在一条独立回路, 则存在一条回路内可减少的驱动绳, 记此时应驱动的绳索集合为 S_u , 则驱动数目可减小为

$$|S_u| = |E_{S_0}| - \beta(G_{S_0}) \quad (6)$$

以折叠模式 O_1 为例, 其弹力网络展开图如图 7 所示, 由 $\beta(G_{S_0, O_1}) = 2$ 可知存在两根冗余绳索. 具体而言, 绳索 1, 3, 17 和 14, 16, 24 分别构成独立回路, 则可减少回路中任意一根驱动绳索; 其余绳索在折叠过程中需由电机驱动收短至 ℓ_{goal} , 需由电机驱动收短的绳索构成集合 S_u .

本文后续实验中, 四种折叠模式的 S_u 选取如下:

图 7 折叠模式 O_1 的弹力网络Fig. 7 Elastic network of folding mode O_1

$O_1 : [2, 3, 8, 11, 13, 14, 16, 17, 18, 23]$

$O_2 : [2, 3, 7, 11, 14, 15, 17, 20, 22, 23]$

$O_3 : [3, 6, 7, 10, 11, 15, 17, 20, 21, 24]$

$O_4 : [3, 6, 9, 12, 14, 16, 17, 20, 21]$

则需电机驱动的绳索的数量为 $|S_{u, O_{1,2,3}}| = 10$, $|S_{u, O_4}| = 9$, 即实现驱动绳数量从 24 降低到 10 (O_1, O_2, O_3)、9 (O_4)。

3 静力平衡条件下的形态智能实现

本节首先建立系统势能模型, 然后通过静力平衡条件对系统进行一阶线性化, 得到输入到绳长变化的映射矩阵. 在此基础上, 通过可达性判据得到在给定驱动绳索集合下, 使系统实现折叠目标的输入序列.

3.1 系统势能建立

系统总势能 U 可以分为重力势能 U_g 和绳索的弹性势能 U_s 之和, 即

$$U(q, u) = U_g(q) + U_s(q, u)$$

其中 $u \in \mathbf{R}^m$ 为电机输入量.

折叠过程中, 系统可视为不涉及惯性项的准静态过程. 为便于静力学分析, 采用节点集中质量的重力建模, 系统重力势能按照节点质量分布给出. 若第 i 个节点的等效质量为 m_i , 重力加速度取 $g = [0.0, 0.0, -9.8]$, 则

$$U_g(q) = \sum_{i=1}^{n_{tot}} m_i g^T x_i \quad (7)$$

系统的绳索在工作区间内可近似为线性弹性元件, 以每根绳的弹性势能累加得到总势能. 在本研究中, 为便于在同一平台上验证四种折叠模式, 参照典型六杆张拉整体机器人的系统结构设计了小型化实验样机. 在每根绳索的一端布置微型减速电机, 并将电机嵌入杆端内部, 绳索另一端连接相应杆端. 每处杆端放置 2 个电机, 每根杆上共装有 4 个电机, 系统共计配置 24 个电机, 从硬件上实现对 24 根绳索的独立驱动. 电机通过通电转动卷绳改变绳索的长度. 对于绳索 k , 其势能 U_s^k 取决于其刚度系数以及与其原始长度相比的增量. 因此系统的弹性势能可以表示为

$$U_s(q, u) = \sum_{k=1}^m \frac{1}{2} K_{lk} (\ell_k(q) - \ell_{0k} + u_k)^2 \quad (8)$$

其中 K_{lk} 为第 k 根绳的刚度系数; ℓ_{0k} 为预设的原始长度; u_k 表示电机引起的长度变化, 且在本文中, 折叠过程下电机仅驱动绳索收短, 即仅为非负输入.

3.2 静力平衡方程一阶线性化

对六杆张拉整体而言, 杆的刚性与绳索预应力共同塑造了位形的约束子空间, 并决定了输入如何沿结构传播的规则, 使驱动少量绳索经由网络耦合在全局产生定向形变. 基于这一认识, 本文在平衡构型处对静力平衡作线性化分析, 得到输入到绳长变化的映射关系, 刻画“形态带来的输入影响放大效应”.

定义系统内力为 $f_{int} = \frac{\partial U}{\partial q}$, 杆长约束雅可比矩阵记为 $J_R(q)$. 在不考虑系统受其他外力的情况下, 静力平衡方程由下列方程给出

$$\begin{cases} f_{int}(q, u) + J_R^T(q)\lambda = 0 \\ R(q) = 0 \end{cases} \quad (9)$$

其中, λ 为对应于杆长约束 $R(q) = 0$ 的拉格朗日乘子.

在平衡点 (q_0, u_0) 处对平衡方程作一阶变分, 得到

$$\begin{cases} K\delta q + J_u\delta u + J_R^T(q_0)\delta\lambda = 0 \\ J_R(q_0)\delta q = 0 \end{cases} \quad (10)$$

其中

$$K = \left. \frac{\partial f_{int}}{\partial q} \right|_{(q_0, u_0)}, \quad J_u = \left. \frac{\partial f_{int}}{\partial u} \right|_{(q_0, u_0)}$$

构造 $J_R(q_0)$ 的零空间基矩阵 N , 并令 $\delta q = N\xi$. 左乘 N^T 得

$$N^T K N \xi + N^T J_u \delta u = 0 \quad (11)$$

若 $N^T K N$ 可逆, 则

$$\delta q = -N(N^T K N)^{-1} N^T J_u \delta u \quad (12)$$

上式给出在满足杆长约束的受约束切空间内, 输入 δu 到位置 δq 的一阶线性映射. 前文给出第 k 根绳长度为 $\ell_k = \|x_{j_k} - x_{i_k}\|$, 则其长度的一阶变化满足

$$\delta \ell = D(q_0)\delta q \quad (13)$$

其中 $D(q_0) \in \mathbf{R}^{m \times 3n_{tot}}$ 为长度雅可比矩阵. 令 $n_k = S_k(q_0)/\|S_k(q_0)\|$ 为平衡点 q_0 处绳索的单位方向向量, 则 $D(q_0)$ 第 k 行在节点 $i(k)$ 与 $j(k)$ 的值为 $-n_k^T$ 、 $+n_k^T$. 结合式 (12) 可得

$$\begin{cases} \delta \ell = P\delta u \\ P = D(q_0)M \\ M = -N(N^T K N)^{-1} N^T J_u \end{cases} \quad (14)$$

式 (14) 中矩阵 P 的第 k 列表示当第 k 根绳索长度变化一个单位长度时, 在一阶近似下对所有绳

长的影响。

由上述结果可以看出, 在平衡邻域内, 少数被控绳长度的变化不会单独地起效, 而是经由拓扑与预应力网络被动传播与分配, 从而改变全局构型以实现折叠. 在此过程中, 原本需要在控制端显式求解的高维运算, 被预先嵌入到几何结构与预应力之中. 换言之, 机器人只需驱动少数绳索即可实现整体构型的改变, 这正是形态智能强调的“用身体替代计算”在六杆张拉整体机器人中的具体体现.

3.3 平衡流形上的可达性分析

记给定折叠模式下需驱动的绳索集合为 S_u , 在平衡点 (q_0, u_0) 处, 对应的绳长目标为 $\delta\ell_{goal} \in \mathbf{R}^m$. 记除重力外的其他外力为 f_{ext} , 由式 (9) ~ (10) 可知, 在固定重力场和边界条件下, 满足

$$\begin{cases} f_{int}(q, u) + f_{ext}(q) + J_R^T(q)\lambda = 0 \\ R(q) = 0 \end{cases} \quad (15)$$

的所有 (q, u, λ) 在状态-输入空间中构成一条低维流形, 本文称其为六杆张拉整体的平衡流形. 在该流形的邻域内, 小的输入扰动 δu 会使系统沿着平衡流形产生一阶几何形变. 在本文考虑的折叠问题中, 忽略接触摩擦等外力项, 故有 $f_{ext} = 0$. 由式 (14), 在仅驱动 S_u 的约束下, 有

$$\delta\ell = P_{S_u}\delta u_{S_u} \quad (16)$$

若存在 $\delta u_{S_u} \geq 0$, 使 $P_{S_u}\delta u_{S_u} = \delta\ell_{goal}$, 则称折叠目标在 (q_0, u_0) 处对集合 S_u 局部可达.

命题 1. 设 $\delta u_{S_u}^* \geq 0$ 满足 $P_{S_u}\delta u_{S_u}^* = \delta\ell_{goal}$. 若在 (q_0, u_0) 处

$$K_d = N^T K N$$

可逆, 且沿 $u(t) = u_0 + t\delta u_{S_u}^*$ 的驱动绳索保持不变, 则存在 $t^* > 0$ 与连续曲线 $(q(t), \lambda(t))$, $t \in [0, t^*]$ 满足

$$f_{int}(q(t), u(t)) + f_{ext}(q(t)) + J_R^T(q(t))\lambda(t) = 0$$

同时满足约束 $R(q(t)) = 0$, 并且有

$$\left. \frac{d}{dt} \right|_{t=0} \ell(q(t)) = P_{S_u}\delta u_{S_u}^* = \delta\ell_{goal}$$

由上述方程得到的输入序列 $\delta u_{S_u}^*$ 可在由所有平衡点构成的平衡流形上将当前构型推进至折叠目标. 将上述序列逆向排列作为输入, 可实现从折叠态推进至展开态.

4 仿真与实物实验

4.1 基于 MATLAB 的静力学仿真

为检验降维后的输入在静力学框架下的有效

性, 在 MATLAB 环境下设置了六杆张拉整体准静态仿真. 具体参数如下: 杆长 $L = 0.193$ m, 连接关系、编号与前文一致; 绳索预拉伸为原长的 10%, 近似为线性弹性元件; 刚度系数统一取 $K_l = 50$ N/m; 每个节点设置质量为 0.01 kg; 杆长作为刚性约束, 在每个时间步通过投影到约束子空间保持恒定.

电机仅沿 S_u 中的绳索方向施加拉力 F_{motor} , 驱动方式为缩短当前绳索长度, 其余绳索不施加主动动力. 在数值实现上, 采用黏性阻尼的动态松弛法近似准静态折叠过程. 时间步长设置为 1.0×10^{-4} s, 远小于由节点质量与绳索刚度估算得到的特征时间尺度, 保证显示积分的数值稳定性. 阻尼系数为 5.0 N·s/m, 处于过阻尼区间, 可以有效抑制振荡, 使系统沿势能下降方向缓慢演化到新的平衡构型. 在合理区间内微调阻尼系数只会略微改变收敛速度, 对最终折叠构型并无影响. 仿真迭代以所有节点的线速度小于 1.0×10^{-4} m/s 作为收敛判据, 最大步数为 3×10^4 , 仅用作数值计算的安全上限, 四种模式的折叠过程均在远小于该步数时由收敛判据提前终止.

仿真过程按 S_u 持续施加 F_{motor} , 系统沿平衡流形逐步演化至新的静力平衡态. 图 8 展示了四种模式从展开态到折叠态的关键帧序列. 其中, 粗绳索表示该折叠模式下的主动驱动绳索, 由电机驱动收短; 细绳索表示被动绳索, 在折叠过程中不进行驱动. 结果表明, 在准静态推进下, 四种折叠模式均收敛为一维构型, 仅驱动 10 根 (O_1, O_2, O_3)、9 根 (O_4) 绳索即可实现六杆张拉整体机器人完全折叠.

4.2 实物实验

为验证降维控制在物理系统上的有效性, 设计并搭建了六杆张拉整体机器人, 如图 9 所示, 其连接关系及编号与前文保持一致. 机器人由 6 根刚性杆、24 根弹性绳、24 个电机组成, 电机嵌入杆端节点处, 通过弹性绳连接到另一个杆端无电机的节点处.

机器人选用直径 6 mm 的空心杯行星减速电机, 输出端堵转电流约 200 mA, 最大力矩约 0.054 N·m. 卷线轮等效半径约 3 mm, 传动与绕线综合效率以 0.8 估计, 则等效最大静态拉力 F_{max} 约为 22.5 N. 本实验采用恒定电压驱动电机, 由于未配置绳长编码器及张力传感器, 系统实施基于时间-位移线性映射的开环控制策略. 经实验测试, 电机在额定电压及给定负载范围内转速近似恒定, 故通过建立驱动时间与绳长变化的线性关系, 将静力平衡分析得出的各阶段目标绳长离散化, 转化为相应的电机通

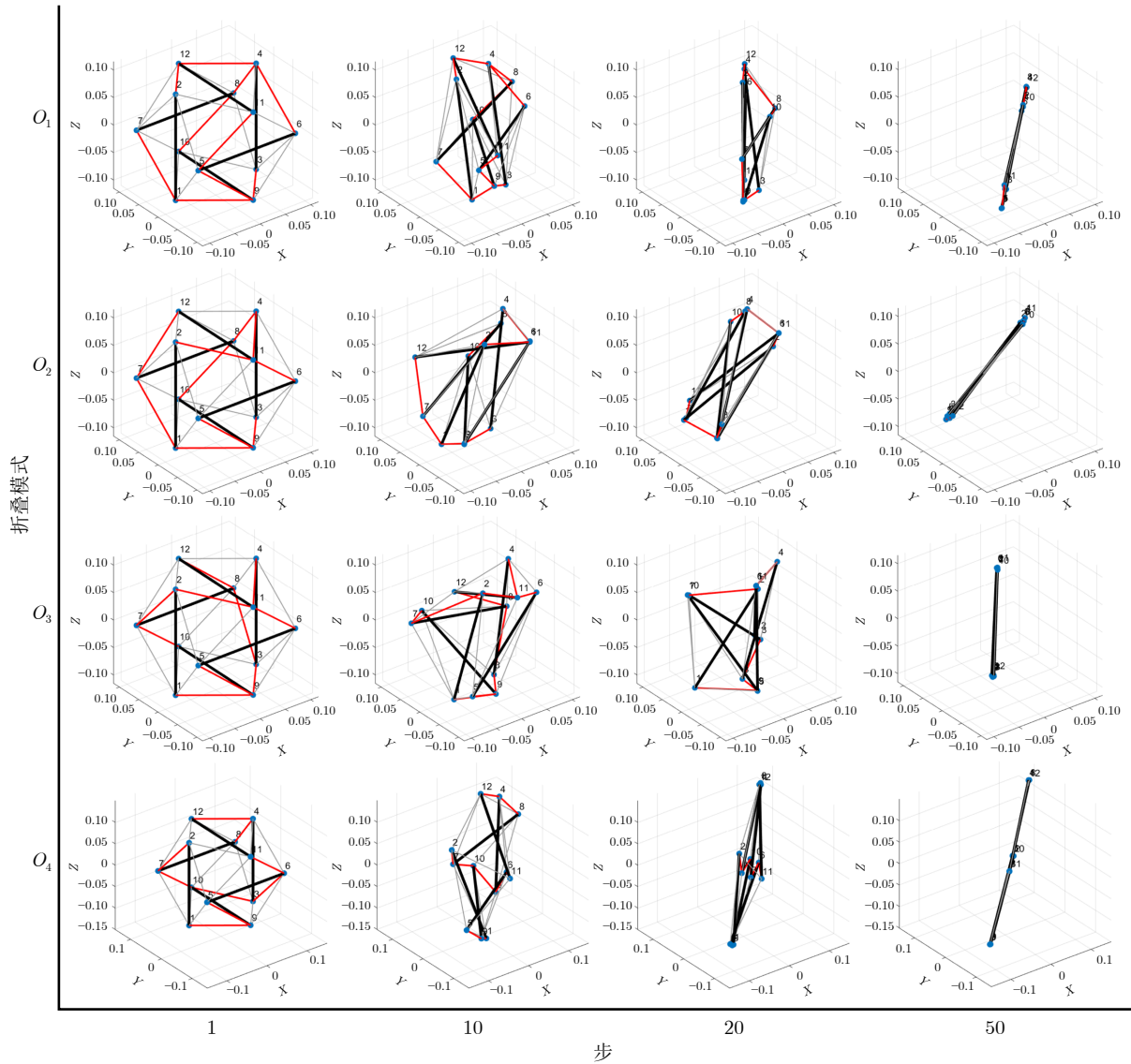


图8 六杆张拉整体折叠过程仿真

Fig.8 Folding process simulation of six-bar tensegrity

电序列, 以此实现四种折叠模式及其展开过程的控制. 对于张拉整体结构, 在驱动顺序与对象正确的前提下, 该方法足以实现稳定的动作复现. 因此, 本研究主要定位为系统可行性验证, 后续工作将通过引入闭环反馈机制, 进一步提升控制精度与重复性.

每根杆中部嵌入一块窄条形控制板, 尺寸约为 $100.0 \text{ mm} \times 14.5 \text{ mm}$. 板载集成主控微处理器、双向电机驱动模块、蓝牙通信模块和电池充电模块, 可与上位机通过蓝牙连接, 接收指令控制杆上的电机. 机器人的刚性杆尺寸设计为 $193 \text{ mm} \times 15 \text{ mm} \times 15 \text{ mm}$, 两端留有电机与法兰腔体, 杆中间留有控制板安装腔体. 实验中各电机采用缓慢、连续的卷绳速度执行, 整体过程可视为准静态推进.

为匹配非驱动绳可被动伸长的降维策略, 本文选用低模量天然硅胶绳作为机器人绳索, 其应力-应变曲线在工作区间内近似线性. 在展开构型下, 将所有绳相对原始长度伸长 10% 作为标准构型下的长度. 实验前对所有电机执行零位复位, 保证各绳索预应力一致, 系统处于标准构型.

对于四种折叠模式, 按照前文给出的 S_u 选择对应的电机进行控制, 系统沿平衡流形逐步演化至新的静力平衡构型. 本文硬件平台的主要目的在于验证折叠模式与主动驱动绳索集合的可行性, 故未对折叠过程的姿态偏差做深入的统计处理. 图 10 所示为各折叠模式的一次典型实验过程. 当判定达到折叠态时, 停止电机驱动, 系统折叠为一维构型. 将输入序列逆向排序, 系统构型从完全折叠演化至

完全展开. 实验表明: 利用形态智能的机理, 仅需特定的 10 根 (O_1, O_2, O_3)、9 根 (O_4) 驱动绳, 即可实

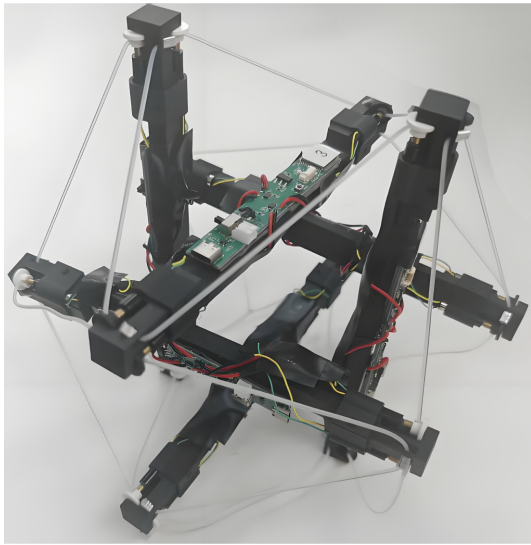


图 9 六杆张拉整体机器人
Fig.9 Six-bar tensegrity robot

现六杆张拉整体机器人完全折叠与展开, 为后续在机器人系统设计上简化驱动机构、减少电机数量提供了定量依据.

5 结束语

本文针对六杆张拉整体机器人折叠问题, 提出一种利用形态智能机理实现简化控制的方法. 通过结构对称性分析得到四种折叠模式及绳长变化量, 结合回路空间的分析确定折叠过程中的被控绳. 建立折叠过程静力学模型得到输入到绳长变化的映射关系, 并通过可达性判据得到简化控制策略, 将传统方法的 24 根绳索独立驱动降低到仅驱动 9 根绳索即可实现机器人完全折叠. 本文利用六杆张拉整体机器人的形态对称性和独特的预应力平衡网络, 通过减少驱动绳数量简化了控制策略, 体现了形态智能简化机器人控制的独特意义. 未来可以以本文得到的主动驱动绳索集合为基础, 利用形态智能机理继续探索以更少的驱动绳数量实现张拉整体机器人自由形态控制.

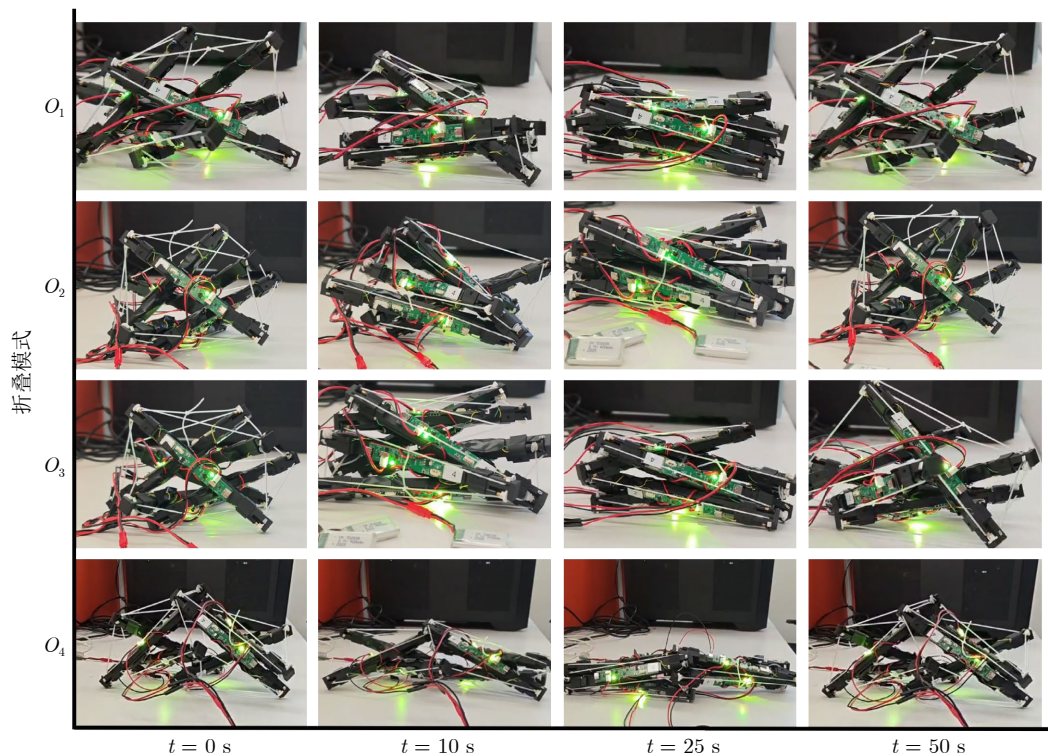


图 10 六杆张拉整体机器人折叠与展开过程

Fig.10 Folding and deployment process of six-bar tensegrity robot

参考文献

- 1 Ingber D E, Tensegrity I. Cell structure and hierarchical systems biology. *Journal of Cell Science*, 2003, **116**(7): 1157-1173
- 2 Wang N, Naruse K, Stamenović D, Fredberg J J, Mijailovich S

M, Tolić-Nørrelykke I M, et al. Mechanical behavior in living cells consistent with the tensegrity model. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2001, **98**(14): 7765-7770

- 3 Bruce J, Sabelhaus A P, Chen Y X, Liu D Z, Morse K, Milan

- S, et al. SUPERball: Exploring tensegrities for planetary probes. In: Proceedings of the 12th International Symposium on Artificial Intelligence, Robotics and Automation in Space (i-SAIRAS). Montreal, Canada: Canadian Space Agency, 2014.
- 4 Paul C, Valero-Cuevas F J, Lipson H. Design and control of tensegrity robots for locomotion. *IEEE Transactions on Robotics*, 2006, **22**(5): 944–957
- 5 Tibert G. Deployable Tensegrity Structures for Space Applications [Ph.D. dissertation], KTH Royal Institute of Technology, Sweden, 2002.
- 6 Chen B X, He Z Y, Ye F, Yang Y, Chen W H, Ding F H, et al. Untethered miniature tensegrity robot with tunable stiffness for high-speed and adaptive locomotion. *Soft Robotics*, 2025, **12**(5): 676–686
- 7 Caluwaerts K, Despraz J, İçsen A, Sabelhaus A P, Bruce J, Schrauwen B, et al. Design and control of compliant tensegrity robots through simulation and hardware validation. *Journal of the Royal Society Interface*, 2014, **11**(98): Article No. 20140520
- 8 Bruce J, Caluwaerts K, Iscen A, Sabelhaus A P, SunSpiral V. Design and evolution of a modular tensegrity robot platform. In: Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA). Hong Kong, China: IEEE, 2014. 3483–3489
- 9 Kim K, Agogino A K, Agogino A M. Rolling locomotion of cable-driven soft spherical tensegrity robots. *Soft Robotics*, 2020, **7**(3): 346–361
- 10 Liu Q, Li P, Yin Y H, Yang Q K, Zhao X Y, Fang H. Rolling strategy and motion controller design for an aerial vehicle surrounded by a six-bar tensegrity structure. In: Proceedings of the 42nd Chinese Control Conference (CCC). Tianjin, China: IEEE, 2023. 4131–4136
- 11 Mo J X, Fang H, Yang Q K. Design and locomotion characteristic analysis of two kinds of tensegrity hopping robots. *iScience*, 2024, **27**(3): Article No. 109226
- 12 Liu S Y, Jing Z, Hao S Y, Lyu J S, Tao Z C, Gui Y, et al. Joint terrestrial-aerial path planning for tensegrone robot. *Unmanned Systems*, DOI: [10.1142/S2301385026500287](https://doi.org/10.1142/S2301385026500287)
- 13 Lyu J S, Yang Q K, Liu S Y, Yin Y H, Fang H. Joint terrestrial-aerial geometric path planning for tensegrity-aerial robot. In: Proceedings of the 43rd Chinese Control Conference (CCC). Kunming, China: IEEE, 2024. 4658–4662
- 14 Yang Q K, Hao S Y, Liu Q, Liu S Y, Fang H. Dynamic modeling and control for a collision-resilient tensegrity aerial vehicle. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2025, **30**(6): 7184–7195
- 15 Tao Zi-Chen, Liu Song-Yuan, Gui Yun, Hao Si-Yuan, Fang Hao, Yang Qing-Kai. Design and control of tensegrity based cross-domain robot. *Robot*, 2025, **47**(3): 338–347 (陶子辰, 刘松源, 桂昀, 郝思源, 方浩, 杨庆凯. 张拉整体跨域机器人的设计与控制. *机器人*, 2025, **47**(3): 338–347)
- 16 Kobayashi R, Nabae H, Suzumori K. Large torsion thin artificial muscles tensegrity structure for twist manipulation. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 2023, **8**(3): 1207–1214
- 17 Liu Y X, Bi Q, Dai X L, Song R, Zang X Z, Li Y B. An in-pipe crawling robot based on tensegrity structures. In: Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS). Kyoto, Japan: IEEE, 2022. 13248–13253
- 18 Calangi J J. Model-based Control System for Packing a 6-bar Tensegrity Structure, Fung Technical Report No. 2014. 05. 02, University of California, USA, 2014.
- 19 SunSpiral V, Gorospe G, Bruce J, Iscen A, Korbelt G, Milam S, et al. Tensegrity based probes for planetary exploration: Entry, descent and landing (EDL) and surface mobility analysis. *International Journal of Planetary Probes*, 2013, **7**: Article No. 13
- 20 Sultan C, Skelton R. Deployment of tensegrity structures. *International Journal of Solids and Structures*, 2003, **40**(18): 4637–4657
- 21 Vespignani M, Friesen J M, SunSpiral V, Bruce J. Design of SUPERball v2, a compliant tensegrity robot for absorbing large impacts. In: Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS). Madrid, Spain: IEEE, 2018. 2865–2871
- 22 Liu Hua-Ping, Guo Di, Sun Fu-Chun, Zhang Xin-Yu. Morphology-based embodied intelligence: Historical retrospect and research progress. *Acta Automatica Sinica*, 2023, **49**(6): 1131–1154 (刘华平, 郭迪, 孙富春, 张新钰. 基于形态的具身智能研究: 历史回顾与前沿进展. *自动化学报*, 2023, **49**(6): 1131–1154)
- 23 Collins S, Ruina A, Tedrake R, Wisse M. Efficient bipedal robots based on passive-dynamic walkers. *Science*, 2005, **307**(5712): 1082–1085
- 24 Mertan A, Cheney N. No-brainer: Morphological computation driven adaptive behavior in soft robots. In: Proceedings of the 17th International Conference on Simulation of Adaptive Behavior (SAB 2024). Irvin, USA: Springer, 2024. 81–92
- 25 Wang Z J, Li K, He Q G, Cai S Q. A light-powered ultralight tensegrity robot with high deformability and load capacity. *Advanced Materials*, 2019, **31**(7): Article No. 1806849

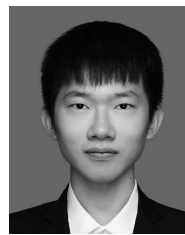


石家旭 北京理工大学硕士研究生。2024 年获得河北工业大学人工智能学院自动化专业学士学位。主要研究方向为张拉整体机械结构设计与形态智能控制。

E-mail: sjasiu@foxmail.com

(SHI Jia-Xu Master student at

Beijing Institute of Technology. He received his bachelor degree in automation from the School of Artificial Intelligence, Hebei University of Technology in 2024. His research interests include the design of tensegrity mechanical structures and morphological intelligent control.)



陶子辰 北京理工大学博士研究生。2024 年获得北京交通大学自动化学院轨道交通信号与控制专业学士学位。主要研究方向为张拉整体跨域机器人的仿真与运动控制。

E-mail: zichentao@outlook.com

(TAO Zi-Chen Ph.D. candidate at

Beijing Institute of Technology. He received his bachelor degree in rail transit signal and control from the School of Automation, Beijing Jiaotong University in 2024. His research interests include motion control and simulation of tensegrity-based cross-domain robot.)



桂昀 北京理工大学博士研究生。2024 年获得北京理工大学电气工程与自动化专业学士学位。主要研究方向为基于扩散模型的张拉整体构型生成与优化。

E-mail: 3220245213@bit.edu.cn

(GUI Yun Ph.D. candidate at

Beijing Institute of Technology. He received his bachelor degree in electrical engineering and automation from Beijing Institute of Technology in 2024. His research interests include tensegrity morphology generation and optimization by diffusion model.)



刘珂 北京大学先进制造与机器人学院研究员. 2019 年博士毕业于美国佐治亚理工学院. 主要研究方向为柔性结构与软体机器人的设计、分析与应用.

E-mail: liuke@pku.edu.cn

(LIU Ke Research fellow at the School of Advanced Manufacturing and Robotics, Peking University. He received his Ph.D. degree from Georgia Institute of Technology, USA, in 2019. His research interests include design, analysis and application of flexible structures and soft machines.)



刘华平 清华大学计算机科学与技术系教授. 2004 年获得清华大学博士学位. 主要研究方向为具身感知与学习.

E-mail: hpliu@tsinghua.edu.cn

(LIU Hua-Ping Professor in the Department of Computer Science and Technology, Tsinghua University. He received his Ph.D. degree from Tsinghua University in 2004. His main research interest is embodied perception and learning.)



方浩 北京理工大学自动化学院教授. 2002 年获得西安交通大学博士学位. 主要研究方向为全地形移动机器人, 机器人控制与多智能体系统.

E-mail: fangh@bit.edu.cn

(FANG Hao Professor at the School of Automation, Beijing Institute of Technology. He received his Ph.D. degree from Xi'an Jiaotong University in 2002. His research interests include all-terrain mobile robots, robotic control, and multi-agent systems.)



杨庆凯 北京理工大学自动化学院教授. 2018 年获得北京理工大学控制科学与工程专业博士学位, 荷兰格罗宁根大学系统控制专业博士学位. 主要研究方向为形态智能机器人设计与控制, 多机器人智能协同运动控制. 本文通信作者.

E-mail: qingkai.yang@bit.edu.cn

(YANG Qing-Kai Professor at the School of Automation, Beijing Institute of Technology. He received his Ph.D. degree in control science and engineering from Beijing Institute of Technology, China, and Ph.D. degree in system control from the University of Groningen, The Netherlands, both in 2018. His research interests include the design and control of morphological intelligent robots and intelligent cooperative locomotion control of multiple robots. Corresponding author of this paper.)