

Vol. 5 No. 2 Apr. 2024 DOI: 10.12180/j.issn.2096-7721.2024.02.003

张拉整体机器人构型与运动控制研究现状及进展

综述・Review

曹心言¹,李润源²,陈嘉郡²,李傢楷³,易江⁴,孙中波⁵,段晓琴⁴ (1. 吉林大学汽车工程学院 吉林 长春 130021; 2. 吉林大学护理学院 吉林 长春 130021; 3. 吉林大学机械与航空航天工程学院 吉林 长春 130021; 4. 吉林大学第二医院康复医学科 吉林 长春 130041; 5. 长春工业大学控制工程系 吉林 长春 130021)

摘 要 研究发现张拉整体结构存在于细胞骨架、肌肉-骨骼系统等生物体,并将其原理广泛应用于建筑、雕塑、 空间探测等工程结构中。张拉整体结构具有形态可调性、受力可控性、绳索抗拉性和结构轻质、结构自稳定等优势, 因此在机器人领域极具应用前景。而软体机器人作为一种新型、仿生、能与人安全交互的机器人,近年来成为力学、 材料学、医学、生物学等多学科交叉领域的研究热点之一。但是,要想实现灵活准确的运动、高效地承受外载、迅速 地适应环境等复杂特性和功能,张拉整体机器人在其构型、运动步态及控制研究等方面依旧面临着巨大挑战。本研究 选取张拉整体机器人的三大典型类别(棱柱形张拉整体机器人、球形张拉整体机器人及构型较复杂的张拉整体机器人), 对其构型、运动步态及控制的国内外相关研究现状和发展趋势进行综述,旨在为机器人的仿生学研究提供科学依据。

关键词 张拉整体机器人;结构形态;运动控制
中图分类号 TP24 文献标识码 A 文章编号 2096-7721(2024)02-0130-08

Current status and development of configuration and motion control of tensegrity robots

CAO Xinyan¹, LI Runyuan², CHEN Jiajun², LI Jiakai³, YI Jiang⁴, SUN Zhongbo⁵, DUAN Xiaoqin⁴

(1. College of Automotive Engineering, Jilin University, Jilin 130021, China; 2.College of Nursing, Jilin University, Jilin 130021, China; 3.College of Mechanical and Aerospace Engineering, Jilin University, Jilin 130021, China; 4.Department of Rehabilitation, the Second Hospital of Jilin University, Jilin 130041, China; 5.College of Control Engineering, Changchun University of Technology, Jilin 130021, China)

Abstract Studies has found that tensegrity structures exist in organisms like cytoskeleton and musculoskeletal system, which could be applied to engineering structure like architecture, sculpture and space exploration. Tensegrity structures have advantages of flexibility, controllability, tensile resistance, light in weight and autostability, which could be widely used in robots. Being a new, bionic and man-machine interactive system, soft robot has become one of the research hotspots in the

收稿日期: 2022-06-14 录用日期: 2023-08-10

Received Date: 2022-06-14 Accepted Date: 2023-08-10

基金项目:国家自然科学基金项目(61873304,62173048);吉林省科技发展计划项目(20200201291JC);长春市科技发展 计划项目(21ZY41)

Foundation Item: National Natural Science Foundation of China (61873304, 62173048); Science and Technology Development Plan Project of Jilin Province (20200201291JC); Science and Technology Development Plan Project of Changchun City (21ZY41) 通讯作者: 段晓琴, Email: 15204309769@163.com

Corresponding Author: DUAN Xiaoqin, Email: 15204309769@163.com

引用格式:曹心言,李润源,陈嘉郡,等.张拉整体机器人构型与运动控制研究现状及进展[J].机器人外科学杂志(中英文), 2024,5(2):130-137.

Citation: CAO X Y, LI R Y, CHEN J J, et al. Current status and development of configuration and motion control of tensegrity robots [J]. Chinese Journal of Robotic Surgery, 2024, 5(2): 130–137.

interdisciplinary field that bridges mechanics, materials science, medicine and biology. However, it faces great challenges in accurate motion, high load and rapid adaption to environment. The configuration, motion gait and motion control of three typical tensegrity structures (prismatic tensegrity robots, spherical tensegrity robots and complex ones) were selected and discussed in this study, aiming to provide scientific bases for the bionics research of robots.

Key words Tensegrity Robot; Configuration; Motion Control

"张拉整体结构"的概念最早可追溯到 1921年,主要应用于城市雕塑等艺术造型方面。 对张拉整体结构的早期研究工作大多由Emmerich D G^[1]完成,他将自应力结构定义为由杆件和索 段组成的结构。直到目前,人们对张拉整体结 构还没有一个统一、明确的定义。基于张拉整 体结构的可展性、预应力成形特性、自适应性、 恒定应力性、结构的非线性及非保守性等特性, 越来越多的学者开始了张拉整体机器人的相关 研究。

因张拉整体结构由杆和绳组成,其中杆长 或绳长可变,各自相互运动从而使结构形态发 生变化,若能够控制其按照一定规律变化,就 可实现机器人的某种特定形态改变或运动。因 此,有学者将张拉整体结构运用到机器人设计 上,从而使机器人产生运动。Pinaud J P 等人^[2] 及 Skelton R E 等人^[3] 在 2003 年首先提出了张拉 整体机器人的设计理念。张拉整体结构主要能 达成两种运动步态:翻滚步态和爬行步态。由 于张拉整体机器人易于变形,可以实现多种构 型及运动姿态,且质量轻、抗冲击性强,已被 应用于航天、探测、救灾等关键领域。但是如 何控制复杂杆件的运动是一个棘手问题,而如 何降低控制的复杂度是研究的关键点。此外, 由于在实际应用中面对多变的地形或其他外力 环境,加上结构较软、易变形,如何使张拉结 构对运动的影响降到最小也是研究难点之一。 现有的张拉整体机器人根据外形主要分为棱柱 形张拉整体机器人、球形张拉整体机器人以及 构型较复杂的张拉整体机器人3大类。本研究 针对上述3类张拉整体机器人,从构型、运动 步态及控制方面对国内外相关研究的现状和发 展趋势进行综述。

1 张拉整体机器人构型

1.1 棱柱形张拉整体机器人构型 以四杆为例, 四杆张拉整体结构由4根杆和12根索组成,在自 稳定状态下同类构件长度相同,内力相同(如图1)。

四杆张拉整体结构的三维模型可参考 田云峰等人^[4]的三维建模,该模型是根据四杆张 拉整体结构变形、翻滚加驱动而形成的(如图2)。

棱柱形结构的一种特殊化是平面张拉整体 结构, Begey J 等人^[5]将2根刚性杆通过转动关 节形成"X"形的可用于医疗机器人的柔性剪刀 结构(如图3)。

三杆及四杆张拉整体构型是大部分张拉整体结构的基础,将该构型进行叠加可以实现丰富的功能,从而达到机器人在实际应用中的运动和工作要求。

1.2 球形张拉整体机器人构型 球形张拉整体 机器人可由两个最基本的三杆九索张拉整体单元 拼接而成。此类机器人运动灵活,具有广泛的研 究意义。球形张拉整体机器人基本构型如图4所 示,结构中包括6根刚性杆和24根柔性索,构 成对称的二十面体,整个结构的节点均匀地分布 在同一个球面上,从而形成一个整体的球形构型。



图 1 四杆张拉整体结构 Figure1 Four-rod tensegrity structure



图 2 四杆张拉整体机器人三维模型 Figure 2 3D model of four-rod tensegrity structure 注: 1. 水平索; 2. 电机座; 3. 负载; 4. 弹簧; 5. 杆; 6. 电 机; 7. 固定载荷的索; 8. 对角索



图 4 球形张拉整体机器人构型 Figure 4 Configuration of spherical tensegrity robot

具体的球形张拉整体机器人实例很多,以 Chen L H 等人^[6]设计的带有线性驱动器的球形 张拉整体机器人为例(如图 5)。

1.3 较复杂张拉整体机器人构型 为提高机器 人运动时适应复杂地形的能力,减小单个单元故 障对结构整体的影响,随着结构控制水平的提高, 逐渐衍生出了由单个棱柱形结构组合而成的张拉 整体机器人。以 DuCTT 机器人为例,它由四面 体框架和索连接而成,其四面体框架包括由节点 ABCD 和节点 IJKL 构成的两端四面体框架以及 由节点 EFGH 构成的中间四面体框架(如图 6)。

这类机器人的构型还可以通过适当增加中 间四面体的个数进行扩展,可以使机器人的形 变能力大幅提升,从而满足实际应用中大形变 的需求。2019年,Fraldi M 等人^[7]利用蛇形张



图 3 类剪刀结构 Figure 3 Scissor-like structure



图 5 带有线性驱动器的张拉整体机器人 Figure 5 Tensegrity robot with linear actuators

拉整体构型来模拟肌动蛋白细丝(如图 7),而 Li W Y 等人^[8]通过组合多个张拉整体结构建立 了一个模拟人手的张拉整体机器人(如图 8)。 这些研究为在生物启发材料和软机器人设计中 更广泛地使用工程模型铺平了道路。而且,该 构型与人的脊柱、一些动物运动模型相似,因 此在仿生领域有很大应用前景。

2 张拉整体机器人运动控制

张拉整体机器人和传统张拉整体结构的区 别在于,其在工作环境下结构状态发生改变, 外在表现为构型的改变,内在表现为结构构件 相互作用力的改变。这种改变可以通过张拉整 体结构的主动控制过程实现,而对张拉整体结 构的运动控制具体体现在基于所建立的模型采

曹心言等:张拉整体机器人构型与运动控制研究现状及进展



图 6 DuCTT 机器人构型示意图 Figure 6 Configuration of DuCTT robot



图 7 基于张拉整体构型搭建的肌动蛋白细丝模型 Figure 7 Actin filament model based on tensegrity structure





Figure 8 Hand configuration from tensegrity structures

用特定算法对机器人的运动轨迹进行规划,同 时辅以伺服控制系统,包括传感器或驱动器的 优化布置。其中一些典型的算法如贪心算法(即 从微观的"局部"考虑当前能做出的最好决策, 此算法可以保证在选择最好方案的同时提高效 率)、遗传算法(即模拟达尔文生物进化论中 自然选择和遗传学机理的生物进化过程搜索最 优解)、基于动力松弛法的路径跟踪算法(即 将非线性结构的结构体系进行离散后对机器人 运动轨迹进行跟踪)等。

以下就不同构型张拉整体机器人的运动控 制进行分类讨论。

2.1 棱柱形张拉整体机器人运动控制 三杆及 四杆张拉整体结构的杆数较少,整体构件数也 较少,结构相对简单,实现该结构运动控制的 复杂性低,有利于进行张拉整体机器人运动控 制的初步研究。

对棱柱形张拉整体机器人的早期试验主要 通过遗传算法进行爬行步态的运动控制。结果 表明, 张拉整体结构可以为轻量级、强容错机 器人提供基础、并具有多种运动步态的潜力。 虽然不同位置的驱动器可以使结构获得相同的 变形,但也出现了相同驱动方式获得不同移动 步态导致运动失去控制的情况。在现今人 - 机 -环境交互的背景下, Yagi S 等人¹⁹ 基于三杆张拉 整体结构研究出了能够根据不同环境进行自适 应变形的机制。Zappetti D 等人^[10]提出了一种可 变刚度张拉结构的新设计方法,实现了压缩时 前所未有的刚度变化。Boehler Q 等人^[11]基于平 面索驱动张拉整体结构,分别利用张力和速度 分布算法开发了两种适应的控制策略,以实现 机构的变刚度能力,未来有望推展到空间机构。 田云峰等人^[4]在 2019 年进行了四杆张拉整体机 器人单步驱动方式的研究,并且探讨了机器人 向预定目标运动的方法。

总体来说, 棱柱形张拉整体机器人运动控制的研究起步较早, 驱动方式较简单, 但其开 启了在调整驱动方式以及优化驱动器材料、改

◆综述・Review ◆

进算法、人 – 机 – 环境交互、结构刚度强度调整等研究领域的先河,为后续更复杂的结构控制的研究奠定了基础。

2.2 球形张拉整体机器人运动控制 从结构和 运动形式来看,球形张拉整体结构较其他张拉 整体结构更适宜发展成机器人,因此近年来不 断有学者对其展开研究并取得了显著的成果。

针对近几年球形张拉整体机器人的控制算 法研究及相应驱动方式和结构的改进,其大致 情况见表1。

以上研究主要通过改变杆索驱动方式、调整驱动构件数从而调整控制难度,并对人工肌 肉、形状记忆合金、仿生材料进行了探索,同 时利用各种机器学习算法、神经网络策略来提 高球形张拉整体机器人克服复杂地形的能力、 提升其运动稳定性和避障能力、提高其运动速 度,改善了球形张拉整体机器人的经济性和能 源利用率。

2.3 较复杂构型张拉整体机器人运动控制 相 比同体积常规机器人,张拉整体机器人质量更 轻,工作能耗更小,尤其是由较多三杆或四杆 等单元组合而成的张拉整体机器人,它能产生 更复杂的形变且具有更强的越障能力,在管道 爬行、仿生、制作医疗器械等方面更具优势, 目前吸引了较多学者进行研究。其在仿生及医 疗方面的重要研究见表 2。

3 难点与未来研究工作

目前对于张拉整体机器人的研究尚处于初 步阶段,难点主要集中在张拉整体机器人的构 型、运动步态、运动控制等,且存在一些仍可 探索的领域。

3.1 结构运动步态的多样性有待探索 由于棱 柱形张拉整体机器人的着地点较少,驱动原理 为摩擦驱动,因此大多用它来实现爬行运动; 而六杆张拉整体机器人由于形状接近球形,受 重力影响,易于实现滚动运动。但是棱柱形结 构也有实现滚动运动的可能,如四杆张拉整体 结构已经能够实现滚动运动。虽然三杆张拉整 体结构转化为滚动机器人难度较大,但仍值得 思考,因为这可能为降低滚动张拉整体机器人 运动控制难度和能耗做出贡献。

爬行运动虽然精确、灵活,但速度较慢, 滚动运动可以实现快速翻滚但很难定位精确位 置,两种步态的权衡和互补是研究关键。

3.2 机器人运动稳定性仍需加强 球形张拉 整体机器人驱动器的数目较多,进行翻滚实验 时要进行的实验次数多、难度大。同时,由于 球形张拉整体机器人索构件的非线性相互作 用,每个细微的变化都会影响机器人的整体结 构和运动步态,其控制难度很大。例如,张拉 整体机器人在与环境进行物理交互时,会发生 非线性变形,受外力影响往往会激发机器人的 振动行为,尤其是构型较复杂的如蛇形张拉整 体机器人等横向吸收振动的能力相对较弱,容 易受环境影响产生微小变形。这些问题使得规 划算法的研究局限于局部步态和准静态路径的 生成。对于目前所研究的张拉整体机器人,完 成一个特定变形和指定的翻滚动作仍然具有 难度。

3.3 面向实际应用的性能优化尚需深入 张 拉整体机器人面对复杂运动轨迹的能力依然不 足,需要进一步从机器人的构型、形变姿态运 动规划以及控制方面研究张拉整体机器人如 何能在实际应用中(如L型、T型管道等环境 中)实现更好性能。此外,在医学方面,张拉 整体结构适用于上下肢康复机器人等符合人体 工学的辅助医疗器械,如何进一步与人体构 造结合并用于患者治疗与康复尚需进一步的 研究。

4 结论

本研究主要探讨张拉整体机器人的构型、 运动步态以及运动控制,分析了棱柱形张拉整体 机器人、球形张拉整体机器人和较复杂构型张拉 整体机器人针对不同步态的运动控制的研究历史

表 1 球形张拉整体机器人研究情况

Table 1 Research situations on spherical tensegrity robots

研究 领域	具体内容
新型 材料	WANG Z J 等人 ^[12] 采用液晶弹性体—碳纳米管复合材料作为人工肌肉,研制出了全光驱动、多方向运动的球形张拉整体机器人。该机器人使用记忆合金材料代替传统绳索,并通过调整记忆合金材料的长度使机器人改变自身构型达成翻滚步态运动 Chung Y S 等人 ^[13] 将改进后的形状记忆合金弹簧作为驱动器用于张拉整体机器人上,能够实现快速的
算法	 本初运动以及垂直机水平构挑跌, 使进了案驱动变形和运动的发展 Chen L H 等人¹⁰¹ 将张拉整体结构通过冗余实现了高鲁棒性、多自由度的运动和灵活的设计, 并降低了 设计和控制难度, 研究出了一种轻型、低成本、模块化、快速原型化的球形张拉整体机器人。同时,利用 贪婪搜索算法找到了一种用于机器人步态生成的开环控制策略, 使机器人的地面投影质心与支撑机器人旋 转的多边形边缘之间的距离减小并归零 张拉整体机器人由于其非线性动力学和振荡特性, 难以控制。Luo J L 等人¹¹⁴¹ 利用 MDGPS 使张拉整 体机器人能够有效地学习端到端运动策略, 同时将学习的神经网络策略与各种测试环境中的其他运动控制策 略进行了比较, 结果表明神经网络策略的表现始终优于其他策略, 此成果在不连续的崎岖地形上得到了初步 验证 Kim K 等人¹¹⁶¹ 设计了一个 10 kg 的球形张拉整体探测器, 通过电缆驱动滚动和推进器的跳跃, 可以在 月球上 1 km 的距离内快速而精确地发送 1 kg 的有放载荷, 同时克服了节能以及在复杂地形上运动的问题。 他还引入动态松弛法对张拉整体机器人进行调整,并利用多群蒙特卡罗方法和贪心算法来寻找理想的变形 和驱动策略 Rieffel J 等人¹¹⁶¹ 利用仿生材料和机器学习算法实现了高速运动步态, 且在面对物理损坏时表现出结构 和行为弹性。这一结果进一步证实了利用复杂材料动力学的相互作用来产生丰富的动态行为的可行性 Surovik D 等人¹¹⁷¹ 提出了一种新的基于 GPS (Guided Policy Search)的强化学习策略,实现了二十面 体张拉整体机器人的轴向无约束滚动、崎岖地形穿越和崎岖斜坡上升,还提出首先结合标准搜索方法实现 长期运动规划,对于更复杂的环境,各种运动基元相应起对¹¹⁸⁰ Cera B 等人¹¹⁹¹ 使用模型预测控制 (Model Predictive Control, MPC)生成用于动态滚动的最佳多电缆 驱动轨迹, 由此产生的多电缆状态 - 动作轨迹在速度上成功优于基准单电缆策略性能,证明了在生成最佳 MPC 轨迹上使用监督深度学习训练的策略可以用作实时定向滚动运动的滤到端反微策略 "超级球"是 ANAS 文姆斯研究电论的智能机器人架动现了1¹⁸⁰ Ciera B 等人¹⁹¹ 使用模型预测研研究 4 体运动意流力机器人中的运用,被引载人,控制 推度大。为要好地理解张拉整体结构在生物系统中的作用及其在机器人中的运用, Vespignani M 等人¹⁰¹ 2018 年对 "超级球"进行了全面改进,并制造出了 SUPEPhali v2。 达紧张系统复杂, 控制 推度方、为更好地理解张拉整体结构在生物系统中的作用及其在机器人中的运用, Vespignani M 等人¹⁰¹ 2018 年对 "据组取求" 进行了全面改进,并制造出了 SUPEPhali v2。达维机具有全驱动的六杆设计(24 个 执行器)、柔顺的尼龙电缆(可拉伸 15%)、扭矩控制电机以及一个能够承受 8 m/s 以上冲击速度的强大 的机械装置。该设计别无态过度的现象,它可以显示直线轨迹,而且可以绕过障碍物进行导航。 这种方法面示面,他立刻在如数点,它可以最大量说和控制方法。运转现及之有变动动行运动的点面。 4 地方式运动动力 H ²¹¹ 还 2 和 计量数量 4 使用于 3 如 5 和参方式 2 小 5 法理理如为关键系统 5 乘时和 5 3 小 5 和 5 和 5 和 5 和 5 和 5 和 5 和 5 和 5 和 5
结构 以驱 优化	Böhm V 等人 ^[23] 基于简单张拉整体球形结构,将两个刚性分离的弯曲构件连接到一个由 8 个具有弹性 的预应力张紧杆件组成的连续网络。在两个内部质量的运动诱导下,纯滚动单轴运动和平面运动可以通过 较小的控制力来实现。此外,该研究还讨论了滚动运动行为对结构和驱动参数的依赖性 Liu H P 等人 ^[24] 设计了一种能够在倾斜表面上运动的新型可遥控球形张拉整体机器人。通过单或多电缆 同时驱动控制,机器人能够在坚固的倾斜表面上运动,并且速度达到新高 Baines R L 等人 ^[25] 提出了一种滚动膜驱动张拉整体机器人,膜驱动器是平面的,以可拓展的方式组装, 并适用于任意几何形状。通过改变放置在其表面的单向板层的堆积顺序和方向来调整其变形轨迹。通过调 整表面的多边形的分布和类型,膜驱动张拉整体能够以独特的轨迹滚动和绕过障碍物 Kaufhold T 等人 ^[26] 对一种无绳滚动张拉整体机器人进行了理论和实验研究

表 2 较复杂构型张拉整体机器人研究情况

Table 2 Research situations on complex tensegrity robots

研究 领域	具体内容
	WANG Z J 等人 ^[12] 构建了一个由硬质和软质材料组成的混合张拉整体机器人,用以模仿动物的肌肉骨
	骼系统。它采用液晶弹性体—碳纳米管复合材料作为人造肌肉,使机器人具有极强的变形能力。该机器人
	十分轻质,且高度可扩展、负载能力强。此外,该机器人还具有出色的弹性、可部署性和缓冲能力
新型	Li W Y 等人 ¹⁸¹ 提出了一种特殊的张拉整体结构的拓扑构型用于柔性机械手,其运动通过人造肌肉驱动
材料	Zappetti D 等人 ^[27] 提出了一种新颖的可变刚度张拉整体脊柱,它使用主动机制在椎骨之间添加或删除
以及	球形关节约束,允许在不同的刚度模式之间切换:软模式,整体刚度模式和定向刚度模式
仿生	Jung E 等人 ^[28] 开发了可用于模拟人腿内肌肉骨骼连接的张拉整体机器人系统,结合开闭环控制和一系
	列传感器融合算法实现了刚性柔性相合的模拟人腿机构
	Melnyk A 等人 ^[29] 提出了一种采用神经元结构控制的张拉整体模拟脊柱,采用比例导数(Proportional
	Derivative,PD)控制实现振动耦合,以达到平滑控制
	Realpe J R J 等人 ^[30] 提出了一个允许异步控制重构、刚度可调的基于双平行四边形系统的2自由度空
医学	间远程运动中心张拉整体机构,可用于经皮穿刺置针,可在瞄准静态肿瘤的同时避免器官撕裂
临床	Lessard S 等人 ^[31] 基于张拉整体结构设计了 CRUX(Compliant Robotic Upper-extremity eXosuit),
应用	即柔性机器人上肢外服,比传统的可穿戴设备更像一件衣服。它通过采用动捕设备捕捉上肢损伤用户的上
	肢运动轨迹

和现状,包括构型优化、新型材料、驱动方式、 仿生设计、规划算法、鲁棒性、优化控制策略等, 对其现存的不足和可发展点进行了探讨。

基于服务于人、立志创新以及节能减排的 出发点,张拉整体机器人需要更全面的优化以 在实际应用中发挥更大的功用。在运动层面, 需要丰富运动控制形式、提高各层次功能强度; 在应用层面,应深入仿生学领域,在工学、医 学等方面有更多建树。

利益冲突声明:本文不存在任何利益冲突。 作者贡献声明:①曹心言负责设计论文框 架,起草论文,文献阅读,研究过程的实施, 数据收集和分析,绘制图表;②李润源、陈嘉郡、 李傢楷、易江、孙中波、段晓琴负责论文修改; ③易江、孙中波、段晓琴负责拟定写作思路, 指导文章撰写并最后定稿。

参考文献

- Emmerich D G. Self-tensioning spherical structures: singles and double layer spheroids [J]. Int J Space Structure, 1990, 3(4): 353-374.
- [2] Pinaud J P, Masic M, Skelton R E. Path planning for the deployment of tensegrity structures [C] // Smart

Structures and Materials. California: International Society for Optics and Photonics, 2003: 436–447.

- [3] Pinaud J P, Solari S, Skelton R E. Deployment of a class 2 tensegrity boom [C] // Smart structures and materials. California: International Society for Optics and Photonics, 2004: 155–162.
- [4] 田云峰,罗阿妮,刘贺平.4杆张拉整体机器人单步 驱动方式分析[J].制造业自动化,2019,41(7):93–97.
- [5] 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.
- [6] Chen L H, Kim K, Tang E, et al. Soft Spherical tensegrity robot design using rod-centered actuation and control [J]. Mech Robot, 2017. DOI: 10.1115/1.4036014.
- [7] Fraldi M, Palumbo S, Carotenuto A R, et al. Buckling soft tensegrities: fickle elasticity and configurational switching in living cells [J]. Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 2019, 12(4): 299–324.
- [8] Li W Y, Nabae H, Endo G, et al. New soft robot hand configuration with combined biotensegrity and thin artificial muscle [J]. IEEE Robotics and Automation Letters, 2020, 5(3): 4345–4351.
- [9] Yagi S, Kang S, Yu S, et al. Evaluation of shapechanging tensegrity structure robot for physical humanrobot interaction [C] // Proceedings of the IEEE International Conference on Advanced Robotics and

曹心言等:张拉整体机器人构型与运动控制研究现状及进展

its Social Impacts. Beijing, China: IEEE, 2019, 35(47): 20–24.

- Zappetti D, Jeong S H, Shintake J, et al. Phase Changing materials-based variable-stiffness tensegrity structures [J]. Soft Robotics, 2020, 7(3): 362–369.
- Boehler Q, Abdelaziz S, Vedrines M, et al. From modeling to control of a variable stiffness device based on a cable-driven tensegrity mechanism[J]. Mechanism and Machine Theory, 2017. DOI: 10.1016/ j.mechmachtheory.2016.09.015.
- [12] WANG Z J, LI K, HE Q G, et al. A light-powered ultralight tensegrity robot with high deformability and load capacity [J]. Adv Mater, 2019, 31(7): 1–8.
- [13] Chung Y S, Lee J H, Jang J H, et al. Jumping tensegrity robot based on torsionally prestrained SMA Springs [J]. ACS Appl Mater Interfaces, 2019, 11(43): 40793– 40799.
- [14] Luo J L, Edmunds R, Rice F, et al. Tensegrity robot locomotion under limited sensory inputs via deep reinforcement learning [C] // Proceedings- IEEE International Conference on Robotics and Automation. Brisbane, Australia: IEEE, 2018: 6260-6267.
- [15] Kim K, Agogino A K, Agogino A M. Rolling locomotion of cable-driven soft spherical tensegrity robots [J]. Soft Robot, 2020, 7(3): 346–361.
- [16] Rieffel J, Mouret J B. Adaptive and resilient soft tensegrity robots [J]. Soft Robot, 2018, 5(3): 318-329.
- [17] Surovik D, Wang K, Vespignani M, et al. Adaptive tensegrity locomotion: controlling a compliant icosahedron with symmetry-reduced reinforcement learning [J]. SAGE Journals, 2019, 40(1): 375-396.
- [18] Littlefield Z, Surovik D, Vespignani M, et al. Kinodynamic planning for spherical tensegrity locomotion with effective gait primitives [J]. International Journal of Robotics Research, 2019, 38(12-13): 1442-1462.
- [19] Cera B, Agogino A M. Multi-cable rolling locomotion with spherical tensegrities using model predictive control and deep learning [C] // IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems. Madrid, Spain: IEEE, 2018: 6595–6600.
- [20] Vespignani M, Friesen J M, Sunspiral V, et al. Design of SUPERball v2, a compliant tensegrity robot for absorbing large impacts [C] // Proceedings of the IEEE/ RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS). Madrid, Spain: IEEE, 2018: 2865– 2871.
- [21] Vespignani M, Ercolani C, Friesen J M, et al. Steerable Locomotion Controller for Six-strut Icosahedral

Tensegrity Robots [C] // Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS). Madrid, Spain: IEEE, 2018: 2886– 2892.

- [22] Zhang M, Geng X Y, Bruce K J, et al. Deep reinforcement learning for tensegrity robot locomotion [C] // Proceedings of the International Conference on Robotics and Automation (ICRA). Singapore: IEEE, 2017: 634– 641.
- [23] Böhm V, Kaufhold T, Zeidis I, et al. Dynamic analysis of a spherical mobile robot based on a tensegrity structure with two curved compressed members [J]. Archive of Applied Mechanics, 2017, 87(5): 853-864.
- [24] Liu H P, Zhang J Y, Ohsaki M. New 3-bar prismatic tensegrity units [J]. Composite Structures, 2018. DOI: 10.1016/j.compstruct.2017.09.063.
- [25] Baines R L, Booth J W, Kramer-Bottiglio R. Rolling soft membrane-driven tensegrity robots [J]. IEEE Robot Autom Lett, 2020. DOI: 10.1109/LRA.2020.3015185.
- [26] Kaufhold T, Schale F, Böhm V, et al. Indoor Locomotion Experiments of a Spherical Mobile Robot Based on a Tensegrity Structure with Curved Compressed Members [C] // IEEE / ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics, AIM. Munich, Germany: IEEE, 2017: 523–528.
- [27] Zappetti D, Arandes R, Ajanic E, et al. Variablestiffness tensegrity spine [J]. Smart Materials and Structures, 2020, 29(7): 10.
- [28] Jung E, Ty L V, Cheney C, et al. Design, construction and validation of a proof of concept flexible-rigid mechanism emulating human leg behavior[J]. APPLIED SCIENCES-BASEL, 2021. DOI: 10.3390/ app11199351.
- [29] Melnyk A, Pitti A. Synergistic control of a multisegments vertebral column robot based on tensegrity for postural balance[J]. Advanced Robotics, 2018, 32(15): 850–864.
- [30] Realpe J R J, Aiche G, Abdelaziz S, et al. Asynchronous and decoupled control of the position and the stiffness of a spatial RCM tensegrity mechanism for needle manipulation [C]//2020 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA). 2020. DOI: 10.1109/ICRA40945.2020.9197507.
- [31] Lessard S, Pansodtee P, Robbins A, et al. A soft exosuit for flexible upper-extremity rehabilitation[J]. IEEE Transactions on Neural Systems And Rehabilitation Engineering, 2018, 26(8): 1604–1617.