

# 绳牵引并联机构的技术研究现状与应用进展

韦慧玲<sup>1</sup>, 罗陆锋<sup>1</sup>, 卢清华<sup>1\*</sup>, 陈为林<sup>1</sup>, 王金海<sup>2</sup>

1. 佛山科学技术学院 机电工程与自动化学院, 佛山 528225

2. 佛山科学技术学院 电子信息工程学院, 佛山 528225

**摘要** 绳牵引并联机构是一类以柔性绳索代替刚性连杆为驱动元件的并联机器人, 具有运动速度快、承载能力大、运动链惯性小、工作空间大及环境适应性好等优点, 为工程问题的解决提供了新的思路 and 手段, 近年来一直是国际并联机构领域的研究热点。介绍了绳牵引并联机构的特点, 从物料搬运、天文观测、风洞试验、高速摄像、运动模拟、肢体康复、外科手术、三维打印等领域总结了绳牵引并联机构的技术研究现状和工程应用进展, 探讨了绳牵引并联机构的发展趋势。

**关键词** 绳牵引并联机构; 工程应用; 研究现状; 发展趋势

绳牵引并联机构是一类以绳索为驱动单元的并联结构形式的机器人, 由末端执行器、基座、绳索、滑轮、驱动器以及点状铰链等组成<sup>[1]</sup>。相对于传统的刚性连杆并联机器人, 绳牵引并联机构具有结构简单、可拆装重组、灵巧操作、运动速度快、承载能力大、运动链惯性小、工作空间大、环境适应性好等优点<sup>[2]</sup>, 因而是国际并联机构学术界和工业界关注的热点。正因为绳牵引并联机构的这些优点, 近些年不少研究人员对其进行了应用研发, 使其成为

机器人领域中最前沿的课题之一。由于轻质绳索的引入, 使得该机构具有更好的重构性、柔顺性和灵巧性, 因此该类型机构在未来应用前景广阔。

## 1 绳牵引并联机构

绳牵引并联机构是将驱动单元的运动和力通过绳索传递给末端执行器的一类特殊并联机构<sup>[3]</sup>。根据绳索的根数  $m$  和末端执行器自由度的数目  $n$ ,

收稿日期: 2022-03-08; 修回日期: 2022-05-10

基金项目: 国家自然科学基金青年项目(52205254); 广东省基础与应用基础研究基金项目(2020A1515111056, 2020B1515120050, 2020B1515120070); 国家自然科学基金项目(32171909); 广东省普通高校科研项目(2019KTSCX197, 2018KZDXM074, 2020KCXTD015); 佛山科学技术学院高层次人才科研启动项目(099/CGG07219)

作者简介: 韦慧玲, 博士, 研究方向为绳牵引并联机器人、采摘机器人、智能控制等, 电子信箱: weihuilin2007@126.com; 卢清华(通信作者), 教授, 研究方向为先进机器人技术与应用、视觉检测, 电子信箱: qhlu@fosu.edu.cn

引用格式: 韦慧玲, 罗陆锋, 卢清华, 等. 绳牵引并联机构的技术研究现状与应用进展[J]. 科技导报, 2023, 41(6): 89-107; doi: 10.3981/j.issn.1000-7857.2023.06.010

绳牵引并联机构可分为欠约束定位机构、完全约束定位机构和冗余约束定位机构等构型,如图1所示。在绳牵引并联机构中,绳索只能承受拉力不能承受压力,因此机构时刻要保证绳索处于张紧状态。由于绳索的冗余分布和预拉力的存在,绳牵引并联机构在一定方向上的刚度是可变的。鉴于此,研发人员将绳牵引并联机构引入机器人设计中,充分利用绳索的柔弹性特点,通过改变绳索长度使机器人产生特定运动,具有极强的重构性,能够较好地适应复杂的工作环境。与传统的刚性并联机器人相比,绳牵引并联机器人具有刚性结构没有的柔弹性,同时解决了柔性机器人速度低和负载能力弱的问题,可实现高速、大范围工作,得到了越来越多研发人员的青睐。绳牵引并联机构与其他类型机构的性能比较如表1所示。

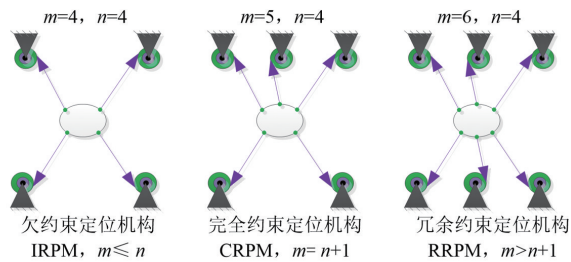


图1 绳牵引并联机构不同的构型分类

表1 绳牵引并联机构与其他机构的性能对比

| 特性     | 串联机构 | 刚性并联机构 | 绳牵引并联机构 |
|--------|------|--------|---------|
| 自由度    | 少    | 较多     | 多       |
| 承载能力   | 低    | 高      | 较高      |
| 灵活性    | 低    | 低      | 高       |
| 环境相容性  | 低    | 无      | 较好      |
| 工作空间   | 大    | 小      | 大       |
| 重复定位精度 | 低    | 高      | 高       |
| 稳定性    | 低    | 高      | 较高      |
| 运动速度   | 低    | 低      | 高       |
| 误差累积   | 大    | 小      | 小       |
| 运动惯量   | 大    | 较小     | 小       |

根据绳牵引并联机器人的结构特点及表1可知,绳牵引并联机构具有以下优势。

1) 工作空间大:绳牵引并联机构的工作尺寸从几米到几百米甚至上千米等;由于绳索收放自

由及点状铰链转角范围大,可以实现较大的可操作工作空间。

2) 载荷比重高:绳索的轻质性决定了绳牵引并联机构的单位质量具有更高的承载能力。

3) 运动速度大:由于运动传动机构惯性力小,末端执行器可获得较大的速度。

4) 冗余性好:机构功能可根据具体场景由不同构型或绳索数量进行设计,结构冗余性好。同时,不同的驱动形式可使机构产生相同的运动,驱动冗余性好。

5) 刚度可变:可通过改变绳索的预紧力实现机构刚度调整。

6) 可重构:由于绳索具有易拆装、可重组和模块化的特点,绳牵引并联机构可根据具体需要和作业环境构建不同的构型。

7) 环境适应性好:绳牵引并联机构可折展,运输便利;能够在狭小空间进行作业,环境适应性好。

但同时绳牵引并联机构也存在以下的缺点。

1) 刚度小:绳索的柔弹性使得绳牵引并联机构的刚度比较小。

2) 动力学精确建模难:由于绳牵引并联机构具有非线性、强耦合性和时变性的特点,要建立精确的动力学模型比较困难。

3) 传动效率低:由于绳索是通过滑轮组进行传动,绳索与滑轮之间的摩擦使得传动效率有一定的损失。绳索路径越复杂,传动效率越低。

4) 维护难度高:绳牵引并联机构是强耦合机构,维护时需要将机构拆装。

5) 绳索疲劳断裂:长时间工作使得绳索产生疲劳失效问题,特别是动载、重载应用场合,绳索疲劳问题更凸显。

绳索的单向受力性是绳牵引并联机构与传统杆支撑并联机构的最大区别。由于绳索只能受拉而不能受压,绳索上的张力必须时刻为正,否则将会出现虚牵。又因为绳索具有一定的柔弹性,刚度比较小,在大跨度重载场合绳索会发生变形和非线性振动。因此,对绳牵引并联机构而言,绳索张力的优化解算、可达工作空间、静刚度分析、振动控制、力控制等关键技术的研究非常重要。以下针对

绳牵引并联机构在不同应用领域的研究进展进行深入阐述。

## 2 绳牵引并联机构的技术研究现状与应用

绳牵引并联机构刚提出的时候,研究人员只是针对结构设计、索力解算、运动学正逆解、动力学建模及运动控制等基本理论进行研究。随着绳牵引并联机构优势的凸显,研发人员开始对其进行了应用研究,开发了不同环境不同任务的样机,并且还有部分在实际工程应用中得到了推广,解决了实际的工程问题。

成功的工程应用包括应用于大型构件装配起重工作的 RoboCrane<sup>[4-5]</sup>、应用于令世界瞩目的 500 m 口径球面射电望远镜 (FAST) 馈源柔索支撑系统<sup>[6-15]</sup>、运用于体育赛事转播的绳牵引并联摄像机机器人 Skycam<sup>[16]</sup>、应用在 2015 年米兰世博会德国馆的柔索牵引移动显示屏<sup>[17]</sup>,以及应用在 2019 年国庆 70 周年大阅兵中央广播电视总台研发拥有自主知识产权的索道摄像机“天鹰座”等。绳牵引并联机构的工程应用范例引起国内外研究人员的广泛关注,成为近年来研究的前沿和热点,促使研发人员从不同的工程应用领域探讨绳牵引并联机构的关键技术。

### 2.1 物料搬运吊装领域

20 世纪 80 年代,美国国家标准技术协会 (NIST) 就开始从事绳牵引并联机构 RoboCrane 项目的研究。从最早的货物起吊装置 RobotCrane<sup>[4]</sup>,到目前为止,美国国家标准技术协会已研制出多种应用在物料搬运领域的 RoboCrane 机器人<sup>[4-5,18-19]</sup>。日本的 Yamamoto 等<sup>[20]</sup>提出了一种用于搬运重物的起重机式三绳并联机构,该机构不仅可以进行三维定位,还可以对物体进行定向。德国的罗斯托克大学研制出一种名为“Cable V”的三索牵引门式起重机器人<sup>[21]</sup>。法国国家计算机科学与控制研究所的 Merlet 等<sup>[22]</sup>研制了一种无约束机构的绳牵引并联起重机,分析了其运动学。但该运动学分析方法不具有通用性。Scalera 等<sup>[23]</sup>提出了一种基于可变半径

卷筒的绳牵引新型桥式起重机机器人 CBRC (cable-based robotic crane),进行了运动学和几何综合方法研究。O'Neill 等<sup>[24]</sup>提出了一种应用在大件设备翻滚操作的双绳索牵引起重机的,通过控制滑轮组进行运动协调,实现不打滑或悬空的安全翻滚。通常多无人机吊挂系统使用固定的绳索长度和移动无人机,而不是绞盘,在确保翻滚过程中的稳定控制时,会带来额外的复杂性。在不增加硬件的情况下,该翻滚技术可扩展应用于多无人机绳索吊挂系统执行更高级的操作任务。典型物料搬运吊装领域的绳牵引并联机构见图 2。



(a) RoboCrane<sup>[19]</sup> (b) Cable V<sup>[21]</sup> (c) CBRC<sup>[23]</sup>

图2 物料搬运吊装领域的绳牵引并联机构

中国耿永锋<sup>[25]</sup>提出了一种应用在集装箱吊运的绳牵引并联起重机构,对其结构设计、静力学分析、工作空间进行了深入研究。文献[26-28]提出了一种应用在大型造船门式起重机上的绳牵引并联机器人,对其动力学建模分析、运动学逆解、轨迹跟踪控制等进行了探讨。黄佳怡等<sup>[29]</sup>设计了一种应用在太空舱外进行平面搬运的三自由度绳牵引并联机器人,建立运动学模型并进行轨迹规划。其提出的基于正交补的工作空间分析方法具有良好的通用性。訾斌等<sup>[30-31]</sup>提出一种多台起重机协同吊运系统,完成单台起重机难以胜任的大型起吊任务,针对吊装任务开展了动力学建模与分析、路径规划、协调控制等研究。但该研究对构型进行了适当简化,没有建立机液耦合数学模型;同时未解决动态未知吊装轨迹规划及避障问题。

综上所述:在物料搬运吊装领域,与传统桥式起重机相比,绳牵引并联机构的特点是重量更轻,载荷比更高,可重新配置且模块化;但绳索的柔性以及摆锤现象可能会在负载移动过程中引入负面影响。

## 2.2 天文观测领域

Ramy<sup>[32]</sup>研究了阿雷西博射电望远镜(图3(a))动力学建模问题,采用集中质量法建立绳索模型,将绳索离散为多个单元进行性能评估和敏感性分析,并建立耦合非线性运动微分方程。该研究为应用在天文观测领域的绳牵引并联机器人的建模提供了新方法。Taghirad等<sup>[33]</sup>针对大型自适应反射镜(图3(b))的运动学展开研究,对运动学的正逆问题进行了分析,结果表明该结构的运动学反解存在唯一闭式解。Meunier等<sup>[34]</sup>提出一种基于级联控制架构的控制策略,整个控制策略分为2个不同的控制回路。内环处理绳索张力,外环处理平台姿态。此外,控制器使用增益调度模块,根据绳索长度调整增益。该方法使得绳驱动宏微并联机器人的运动控制更精确。

中国研究人员针对500 m口径球面射电望远镜(图3(c))展开研究,取得了丰硕的成果。



(a) 阿雷西博射电望远镜<sup>[32]</sup> (b) 大型自适应反射镜<sup>[32]</sup> (c) 500 m口径球面射电望远镜<sup>[41]</sup>

图3 天文观测领域的绳索馈源支撑系统

国家天文台的李辉等<sup>[35-36]</sup>对进舱绳索连接机构进行设计并基于索力优化开展静力学分析,研究结果表明最大索力对塔高较为敏感,该研究为后续工程方案的优化提供了决策依据。Yin等<sup>[37]</sup>针对FAST适用传统迭代方法难以实现实时控制的问题,提出了一种近似解析解法,通过提取必要的几何和物理系数,可以解析求解静态或准静态方程。该研究有望解决FAST实时、高精度的控制,以实现更高效的观测任务。

清华大学的唐晓强团队通过搭建40 m模型FAST馈源绳索支撑系统(图4(a))展开机构设计<sup>[38]</sup>、尺寸优化<sup>[39]</sup>、索力特性分析<sup>[40]</sup>、缩尺模型相似性证明<sup>[41]</sup>、绳索振动特性<sup>[42]</sup>、轨迹跟踪控制<sup>[43]</sup>、精度

保证<sup>[44]</sup>等方面的研究,解决了绳索建模、索力解算、振动分析、运动控制等问题,为工程实施提供了一定的理论依据。

西安电子科技大学的段宝岩团队<sup>[45]</sup>从20世纪90年代就开始对FAST项目进行深入预研,搭建了FAST馈源绳索支撑系统室外50 m缩尺模型(图4(b))和室内5 m缩尺模型(图4(c)),取得了一系列成果。仇原鹰等<sup>[46]</sup>研究了绳索悬挂馈源系统的非线性力学问题及相关试验研究,为系统在随机风荷作用下的风振响应研究奠定基础。王文利等<sup>[47]</sup>提出了绳索式馈源支撑系统动态检测的算法,实现馈源系统的闭环控制。苏玉鑫等主要研究了馈源支撑系统的轨迹跟踪控制问题,为了抑制动力学耦合的干扰,设计了模糊学习控制方法,实现高精度的鲁棒跟踪<sup>[48]</sup>;为了解决系统时变大滞后问题,提出了一种自适应模糊预测控制策略<sup>[49]</sup>。孙欣等<sup>[50]</sup>针对绳索的虚牵问题提出了判定准则及索力优化原则,为后续索力控制奠定基础。訾斌等<sup>[51]</sup>采用牛顿欧拉法建立了柔索馈源支撑系统简化动力学模型,并提出了双模糊自适应控制器实现轨迹跟踪。

2020年底,美国阿雷西博望远镜由于绳索断裂导致整个望远镜塌了。这个事例表明,在天文观测领域,大跨度绳牵引并联机构的安全性还面临着巨大挑战。因此,绳索疲劳实时监测十分必要。



(a) 室外40 m缩尺模型<sup>[43]</sup> (b) 室外50 m缩尺模型<sup>[45]</sup> (c) 室内5 m缩尺模型

图4 FAST柔索馈源支撑系统的缩尺试验模型

## 2.3 风洞试验领域

美国国家航空航天局兰利中心最早提出一种双绳索悬挂系统,用于开展飞行器的气动弹性实验,通过参数辨识技术获得动静导数<sup>[52]</sup>。近年来,美国乔治亚理工大学设计了一种八索牵引的风洞支撑系统(图5(a)),用于研究模型运动与流场动

力学耦合的机制<sup>[53]</sup>。法国国家航空局开展的客户自动化支持操作系统 SACS0 项目是最早提出将绳牵引并联机器人技术用于风洞试验的研究,研发了 7 根绳索牵引和 9 根绳索牵引的立体式风洞实验模型<sup>[54-55]</sup>,见图 5(b)。该研究实现了传统风洞试验中无法进行的复杂飞行性能实验研究。德国杜伊斯堡-埃森大学设计了一种八索牵引的船体模型风洞试验支撑系统,通过滑轨系统进行姿态调整<sup>[56]</sup>。

华侨大学的郑亚青<sup>[57]</sup>作为国内最早运用绳牵引并联支撑系统进行风洞试验研究的学者,针对低速风洞试验中的绳牵引并联机构进行了尺寸设计、动力学建模及姿态控制,提出一种逐次逼近算法对系统的运动学进行标定,提高了动平台的位姿精度<sup>[58]</sup>。同时对风洞试验中风场和索系流固耦合响应的动力学、静力学特性进行了分析,研究表明风场对索系影响显著,需要解决振动抑制问题和流动控制问题<sup>[59]</sup>。厦门大学的林麒团队针对应用在风洞试验中的绳牵引并联系统(图 5(c))展开了振荡运动的动力学分析<sup>[60]</sup>、气动参数的测量及计算<sup>[61]</sup>、动平台位姿精度分析及控制<sup>[62]</sup>、模型与绳索耦合振动分析<sup>[63]</sup>、绳索迟滞效应<sup>[64]</sup>等研究,为绳牵引支撑系统在风洞试验的工程应用提供了指导意义。南京航空航天大学吴洪涛团队通过几何方法对用于风洞的六自由度绳牵引并联机构进行了构型设计,并通过正交补的方法给出了工作空间的判别条件<sup>[65]</sup>。同时,该团队还提出一种新的五索牵引三自由度转动的风洞测力装置,推导出力雅可比矩阵,为风洞测力试验提供技术支持<sup>[66]</sup>。



图 5 应用于风洞试验领域的绳牵引并联机构

与传统的风洞支撑技术相比,绳牵引并联机构具有更大的灵活性,可以实现飞行器多姿态角的耦

合运动和大变位试验。但由于风洞试验的流动性,绳索振动问题突出,需要研究其动态特性和设计相应的控制策略,否则将会严重影响飞行器模拟试验的精度。

## 2.4 高速摄像领域

绳牵引并联摄像机器人是一种能够进行空中全景拍摄的高速绳索驱动并联机构<sup>[67]</sup>,其已经成功应用在 2008 年北京奥运会<sup>[68]</sup>、2009 年中央电视台春节晚会、2010 年南非世界足球赛、2010 年广州亚运会等活动等重大活动。应用在高速摄像领域的典型绳牵引并联机构如图 6 所示。



图 6 应用在高速摄像领域的绳牵引并联机构

目前国际上有影响力的绳牵引摄像机器人有 August Design 公司研制的摄像机器人 SkyCam<sup>[68]</sup>和德国研制的 Spidercam<sup>[69]</sup>。理论研究上绳牵引并联摄像机器人也取得了一定成果。Gordievsky<sup>[70]</sup>设计了一种应用于工业环境中的绳牵引摄像机器人,采用带 PI(比例积分)控制器的速度闭环反馈实现摄像机平台在规划轨迹上误差最小。于亮亮等<sup>[71]</sup>通过最小二范数法对应用在高速摄像上的绳牵引并联机器人的动力工作空间进行研究,确定了摄像机器人的可达工作范围。苏宇等<sup>[72]</sup>对比了几种驱动索力优化求解方法,分析了实时性与连续性,为索力优化提高了建议。Liu 等<sup>[73]</sup>提出了一种基于位置性能因子和索力性能因子的力位混合静力稳定性求解方法。从工作空间的定义出发,提出了完全约束以及冗余约束绳牵引并联摄像机器人的稳定工作空间的定义,研究了其稳定工作空间的存在条件及其求解方法。Wei 等<sup>[74]</sup>针对绳牵引并联机器人缺乏一种量化的稳定性评价指标问题,提出了一种基于索力/刚度的静力稳定性评价指标。该方法通过

数学加权方法建立起融合了索力因子和刚度因子的混合稳定性评价指标。文献[75]针对绳牵引并联机器人启停变向过渡阶段可能出现的轨迹不光滑或解算不连续的问题,提出了一种高阶多项式插值运动规划方法,在此基础上,设计带有干扰观测器的PD(比例微分)修正前馈控制策略,保证了末端执行器的高速稳定运行,并应用李雅普诺夫第二定理证明了控制策略的稳定性。同时,针对绳牵引并联机器人高速运动时绳索虚牵导致轨迹跟踪不准确问题,提出了一种基于索力优化的力位混合控制策略,解决了绳索虚牵导致的控制系统不稳定的问题<sup>[76]</sup>。

在高速摄像领域,绳牵引并联机构的机动性非常高,高速运动带来的惯性力冲击使得摄像机平台的稳定性问题突出,影响拍摄质量。尽管目前的研究取得了一定的成果,但系统稳定性和控制实时性仍然面临着巨大挑战。

## 2.5 运动模拟领域

应用在运动模拟领域的绳牵引并联机构如图7所示。Morizono等<sup>[77]</sup>开发了一种使用绳索驱动的虚拟网球运动训练力显示系统,推导出动力学模型并基于反馈方法设计高速运动控制律。研究表明,与其他力显示系统相比,所提出的控制律实现了更高的加速度和更低的反作用力。日本神户大学的Tadokoro等<sup>[78]</sup>研制了一种8根绳索驱动具有6个自由度应用于模拟加速度运动基的绳牵引冗余驱动并联系统。美国国家航空航天局<sup>[79]</sup>提出一种应用在太空虚拟现实运动模拟训练的六自由度绳索牵引并联系统,对宇航员进行太空环境下的运动模拟。Miermeister等<sup>[80]</sup>开发了一种全新的名为CableRobot的绳索驱动运动模拟器,与传统的刚性模拟器相比,这种机构可以减少驱动质量,扩大工作空间,并为系统配置之间切换提供很大的灵活性。该模拟器将用于人类感知研究和虚拟现实应用领域的研究。

张立勋等<sup>[81]</sup>提出一种绳索驱动的航天员机能训练模拟机构,通过进行动力学分析设计索力闭环的控制策略。该团队基于模块化、可重构思想研制了多模式绳索驱动航天员训练机器人,通过机器人



图7 应用在运动模拟领域的绳牵引并联机构

模拟微重力加载特征,实现航天员在失重环境下的卧推、深蹲和跑步训练<sup>[82]</sup>。Cui等<sup>[83]</sup>针对应用于模拟航天器着陆的索驱动并联机器人的恒刚度问题,提出了一种新的索驱动并联机器人恒刚度空间概念,通过刚度相对贡献系数直接反映可控刚度对系统刚度的影响,指导驱动索的选择和索力极限值的设定,该方法可以根据目标刚度有效地获得机器人的恒刚度空间。

经分析可知,使用绳驱动并联机器人技术来构建运动模拟系统带来了许多关于安全和性能标准的挑战性问题。未来的工作需要开发更复杂的非线性和模型预测控制算法,以减少仿真场景中绳索激励产生的不必要干扰。

## 2.6 肢体康复领域

国外开发的绳牵引康复机器人如图8所示。意大利卡西诺大学的Castelli等<sup>[84]</sup>提出了一种可重构的并联机械手作为运动辅助和引导装置,以帮助运动障碍者完成移动上下肢或整个身体。美国哥伦比亚大学的Ying等<sup>[85]</sup>研制了一种名为CAREX的多级绳牵引可穿戴上下肢轻型外骨骼并联机构,该机构用于患者康复训练。通过一种基于二次规划的新型索张力规划器用于生成连续的索张力轨迹以实现平滑运动。为了提高可穿戴设备的性能,麻

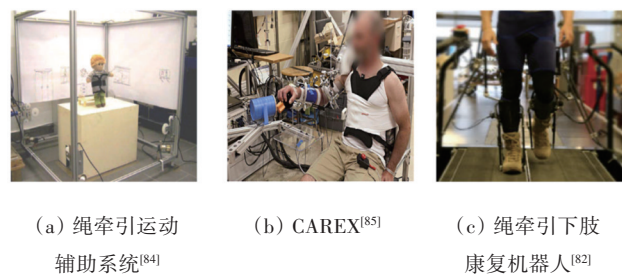


图8 国外开发的绳牵引康复机器人

省理工学院的Kuan等<sup>[86]</sup>提出了一种新型的高性能绳驱动踝关节外骨骼系统,通过内部绳索有效地将运动和机械功率从输入传到输出。西班牙的Huang等<sup>[87]</sup>提出了一种多功能绳驱动机器人,用于研究髌、膝和踝的单关节神经力学。与现有系统相比,它可以实现行走或站立时的自然姿势,且不会对关节施加运动学约束。法国的Hamida等<sup>[88]</sup>开发了一种用于上肢康复的绳驱动并联机器人,通过类型和尺寸优化的组合方法处理多目标遗传算法中的一组确定性和非确定性参数,实现康复机器人4种不同的拓扑解决方案。

中国开发的绳牵引康复系统如图9所示。哈尔滨工程大学的王克义等<sup>[89]</sup>从2000年就开始进行绳牵引并联骨盆康复机器人的研究,取得了一定成果。通过ADMMS和MATLAB联合仿真分析了动力学特性,证明了绳索弹性对系统控制精度的影响。通过计算力矩法设计了绳牵引并联机器人的位置控制策略,并以刚度控制为目标,分析了系统刚度的影响因素<sup>[90]</sup>。近年来,该团队通过研制样机对绳牵引下肢康复机器人进行稳定性和安全性研究。基于位置性能因子、姿态性能因子和索力性能因子加权平均法,提出了基于力-位-姿态混合方法的动力稳定性评价指标和方法<sup>[91]</sup>。通过力学分析确定安全性能系数,综合考虑安全性能因素和速度影响函数,给出结构安全评价指标和使用安全评价指标<sup>[92]</sup>。研究结果为进一步研究柔顺控制策略和人机交互实验提供了依据。

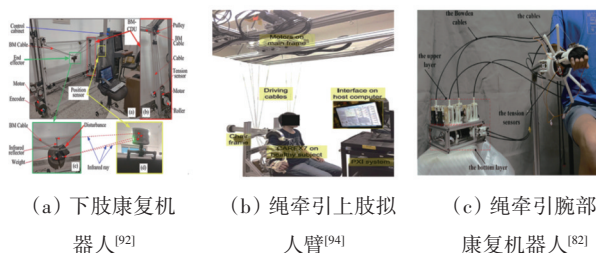


图9 国内开发的绳牵引康复系统

随着康复训练的紧迫需求,更多的研究人员开展了相关研究。合肥工业大学的Zi等<sup>[93]</sup>研制了混合驱动腰部康复机器人,对其机构设计优化、运动学分析进行了研究。北京航空航天大学Chen

等<sup>[94]</sup>设计了一款由8根绳索穿过外骨骼袖带以驱动整个手臂运动的七自由度绳驱动手臂外骨骼,基于“按需辅助”模式实现其灵巧操作。紧接着该团队通过考虑人体手臂骨骼运动学的不精确性和外骨骼的附着误差,进一步建立了外骨骼的运动学模型<sup>[95]</sup>,采用参数辨识方法提高了运动学模型的精度。针对中风患者的康复治疗,中山大学的Li等<sup>[96]</sup>提出了一种包括阻力模式、辅助模式和限制模式3种工作模式的绳牵引上肢康复机器人。研究表明,控制器可以根据患者的运动表现调整工作模式。东南大学的Shi等<sup>[97]</sup>开发了一种分布式主动半主动系统驱动的绳牵引腕部康复外骨骼机器人。通过增加旋转补偿机构和优化绳索附着点的分布,增加了机器人的工作空间;提出了一种快速解绑策略,以确保异常情况下的安全;实施被动训练算法和按需辅助算法来控制外骨骼。研究结果表明,该系统能够满足康复训练对工作空间和力反馈的需求,提供高效的主动和被动训练。

由于独特的反向驱动能力,绳牵引并联机构在肢体康复领域的应用有响应速度快的优势。绳索的柔弹性使得机构具有一定的柔顺性,可保证人机交互的安全性。但是,由于绳索绕卷复杂,其传动效率受到一定影响。同时,由于机构的强耦合特性,其维护难度比较大。

## 2.7 外科手术领域

由于绳驱动并联机器人的灵巧性,近年来在外科手术中得到了广泛的应用。研究人员有从预研的角度对其进行性能分析,也有从临床应用的角度对其进行了应用效果评估。外科手术领域的绳驱动并联机构如图10所示。

Wang等<sup>[98]</sup>开发了一款绳索驱动的软件手术机器人系统,通过在猪身上进行活体外科手术评估了软件机器人系统的灵活性、可控性和可达性,并考虑软材料的黏性和法向应变,基于Cosserat杆理论和Kelvin模型提出了一种新的绳驱动软件机器人动力学模型,提高了运动精度<sup>[99]</sup>。

Xue等<sup>[100]</sup>建立了绳驱动腹腔镜手术机器人中绳索-滑轮系统的张力和位移传输模型。该工作的亮点是所提出的绳索滑轮系统建模考虑了绳索

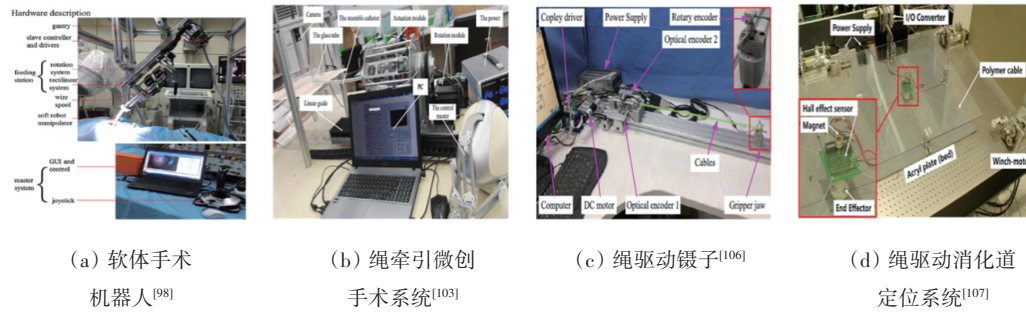


图10 外科手术领域的绳驱动并联机构

的弯曲刚度和由滑轮的空间位置引起的张力损失。此外,还考虑了由于滑轮分布不同造成的摩擦和载荷倾斜角的影响,并提出了一种实时在线补偿控制算法。

Qi等<sup>[101]</sup>研究了应用在微创手术中的绳驱动连续机器人,建立了基于灵巧立体角的机器人灵巧度评价指标,分析了连续机器人变形与绳索驱动力之间的关系,为绳索驱动连续机器人的设计提供了参考,并基于虚功原理考虑非线性摩擦和耦合效应,建立了机器人的静态模型<sup>[102]</sup>。2019年,其基于分段常曲率假设,分析了驱动空间、关节空间和任务空间之间的映射关系以及解耦算法<sup>[103]</sup>,同时提出一种基于血管约束的介入导航方法,利用该原型对模拟玻璃血管进行了介入仿真和实验,验证了所提出模型和导航方法的可行性和可操作性,所建立的运动模型和导航方法可作为运动控制和导航的参考。

Wang等<sup>[104]</sup>基于单索驱动关节的动力学模型设计关节角度估计器和利用干扰观测器设计一种外力估计器,解决了绳索驱动微操作器的力反馈问题。2018年,该团队针对握力感知问题提出了一种基于索力变化的绳索驱动手术机器人微操作器二维接触夹紧力间接检测方法,解决了微创手术中的力觉感知问题,提高了夹紧力估算的精度<sup>[105]</sup>。2020年,该团队又提出了一种基于无迹卡尔曼滤波的方法来实现机器人辅助手术系统中电缆驱动镊子的高精度运动估计。该方法实现了不需要在末端安装传感器的绳驱动镊子<sup>[106]</sup>。

Kim等<sup>[107]</sup>提出了一种基于平面绳索驱动并联

机器人运动学和霍尔效应传感器阵列准静态磁场测量的机器人定位传感方法,解决了消化系统诊断和治疗的主动式机车胶囊内镜的精确反馈控制和肠内可疑定位。

综上所述,结构简单紧凑和柔顺性使得绳驱动手术机器人具有良好的应用前景,但其对感知和控制要求非常高。力觉传感在微创手术中起着不可替代的作用,有效的力感应可防止对操作对象的二次损坏,从而使操作更加成功。因此,绳牵引并联机构的力反馈在外科领域还具有很大的挑战性。

## 2.8 三维打印领域

Eric等<sup>[108]</sup>开发了一种由六自由度绳索悬挂机器人进行定位的大型3D打印机。与传统用于3D打印的龙门式定位系统相比,更便宜、更轻、更可运输并且更容易重新配置。Izard等<sup>[109]</sup>开发了一款用于增材制造相关的建筑行业的绳驱动3D打印并联机器人,该机器人的优势在于可避免绳索与建筑物碰撞的风险。Zi等<sup>[110]</sup>设计了一款采用3个平移自由度的绳驱动模块和带弹簧的随动张紧模块进行定位的绳驱动并联3D打印机,同时提出了一种基于绳索长度残差的运动学标定方法<sup>[111]</sup>。Tho等<sup>[112]</sup>设计了一款3D打印的绳驱动并联机器人,采用对偶单纯形算法,通过优化最小索张力来分析索张力组合,采用Trust-Region-Dogleg算法用于根据逆动力学结果实现绳索下垂问题和索张力的优化计算。该系统解决了短施工时间和复杂结构的建筑物体的建造问题,而传统方法无法实现这些建筑。三维打印领域的绳驱动并联系统如图11所示。

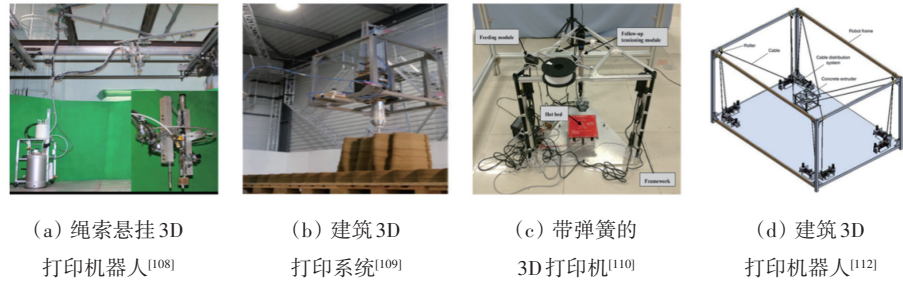


图11 三维打印领域的绳驱动并联系统

与传统的刚性机构相比,绳驱动3D打印机具有更大的工作空间、更高的有效载荷重量比、更容易模块化和可重构性等优点。但在外界干扰下,其移动平台的误差比较明显。未来,为了适应不同的对象和特定的工作空间,构建优化绳牵引并联机构的配置算法将是一个研究的方向。

## 2.9 农业采摘领域

Abel等<sup>[113]</sup>设计了一款用于农业自动化采摘搬运的绳索驱动推车-轨道机器人,有效解决了传统齿轮齿条只能进行1个自由度运动的局限性。Ya等<sup>[114]</sup>设计了一种新型的由传感、拾取、传输、存储4个功能部件组成的绳索驱动夹具,具有自主收获草

莓的感知能力。与现有系统相比,该夹具通过采摘视觉算法可以更准确更快的采摘草莓,但对于密集分布草莓簇的采摘是否有效,还需要进一步研究。Nguyen等<sup>[115]</sup>研究农业生产应用中绳索机器人的索长测量问题,提出一种基于索长传感器的测量系统,有效解决了当前大跨度绳索驱动系统索长难以测量的问题。Vasileios等<sup>[116]</sup>提出了一种名为Cablebot的太阳能绳索机器人,配备有光谱摄像头和其他传感器阵列,可以像露天作物中的无人机一样收集数据,解决了无人机不能在温室内自由移动及温室内光谱技术的使用存在滞后问题。农业领域的绳牵引并联机器人如图12所示。

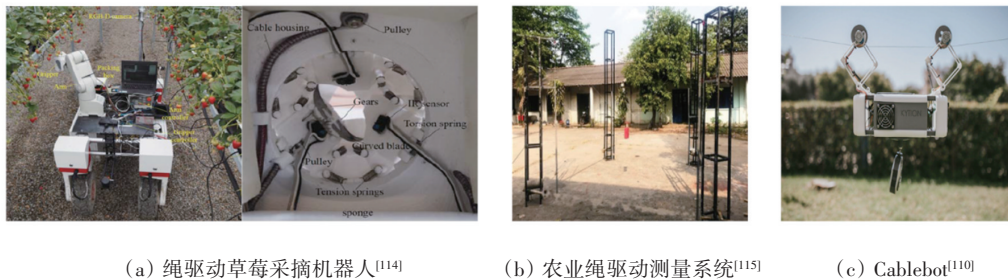


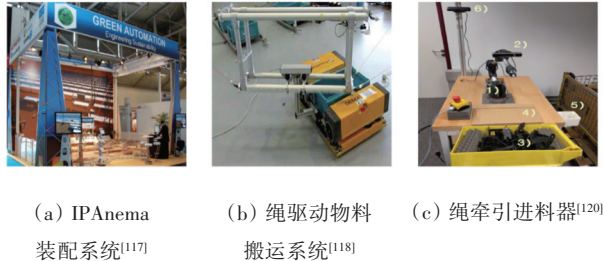
图12 农业领域的绳牵引并联机器人

## 2.10 自动化生产线领域

Pott等<sup>[117]</sup>提出了一种绳索驱动的并联机器人系统,可以在太阳能发电厂的现场自动完成组装,其在工作空间和有效载荷方面的性能优于工业机器人一个数量级以上,这种大规模装配过程可以推广到大型建筑物的建造和维护等。Miermeister等<sup>[118]</sup>提出一种绳驱动并联机器人,可实现全自动、可调和高效经济的搬运解决方案。对于希望快速扩展其产品和业务线或需要临时配送中心的多渠

道企业而言,这可能是成功的关键因素。Mattern等<sup>[119]</sup>提出了一种基于仿真模拟的方法来分析绳索驱动机器人用于自动施工建造,主要研究用于计算无碰撞路径的离散事件模拟与提供路径有效性反馈的连续模拟之间的交互。该方法为绳索机器人应用场景的扩展有很大促进意义。Koo等<sup>[120]</sup>提出了一个易于重新配置新零件变体且对工人是安全的零件供给系统。为确保系统对人体安全,使用了绳驱动的轻型机械手,该机械手可以高速移动而不

会对附近的工人造成安全问题。自动生产加工领域的绳牵引并联机器人如图 13 所示。

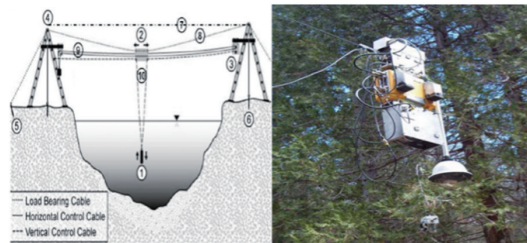


(a) IPAnema 装配系统<sup>[117]</sup> (b) 绳驱动物料搬运系统<sup>[118]</sup> (c) 绳牵引进料器<sup>[120]</sup>

图 13 自动生产加工领域的绳牵引并联机器人

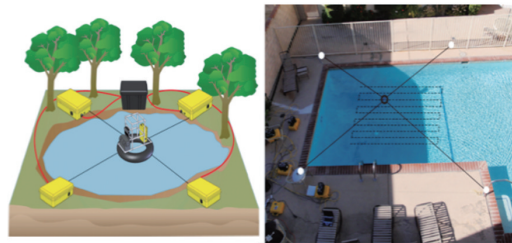
## 2.11 环境采样领域

Jordan 等<sup>[121]</sup>开发了一款用于环境监测的可快



(a) 快速部署绳牵引系统: NIMS RD<sup>[121]</sup>

速部署的绳索机器人系统。与以前的系统相比,减少了总系统体积和质量,提高了操作性能和可靠性。该系统对 2 条河流的汇合区绘制水生现象的变化图具有重要意义。Borgstrom 等<sup>[122]</sup>设计了一种能够在三维水环境中进行传感的四索牵引机器人系统,可在水面上对浮力末端执行器进行平面驱动,具有高效的现场校准技术。通过校准和漂移检测实验证明了系统长期自主运行的能力,并量化了系统漂移的速率,同时,该团队使用非线性轨迹来降低能量需求<sup>[123]</sup>。该系统的研发提高了对动态场进行高保真感测的能力,对自然资源 and 生物现象的警惕监测具有重要意义。环境采样领域的绳牵引并联机器人如图 14 所示。



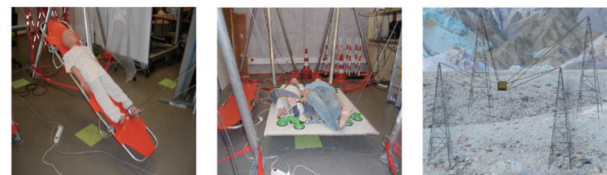
(b) 水环境检测的绳牵引系统<sup>[122]</sup>

图 14 环境采样领域的绳牵引并联机器人

## 2.12 搜救作业领域

Bosscher 等<sup>[124]</sup>提出了一种绳驱动搜索救援机器人系统的新概念,该系统可以大大增加移动机器人的范围,同时提供灾难现场的俯视图,使救援人员能够尽快到达幸存者身边,将对救援人员造成的危险降至最低。但是该系统不适用于所有搜索和救援场景。绳索驱动机器人需要在灾难现场上方有足够的空间移动。由于这些障碍物与绳索之间的干扰,高大障碍物的存在将减少末端执行器的工作空间。此外,这种类型的系统可能不适用于搜索基本上完好无损的建筑物,而是在结构大部分或完全倒塌的情况下最有效。Merlet 等<sup>[125]</sup>设计了一种用于救援行动的全尺寸、便携式、模块化、完全自主的绳驱动起重机系统。该系统通过热成像定位受害者并在受害者仍在向安全区域移动时传输有关受害者的生理数据。Nurahmi 等<sup>[126]</sup>研究了用于搜

救作业的绳索驱动并联机器人的开发和尺寸综合,提出一种 8 根绳索悬挂的绳牵引并联机器人移动平台,从力旋量工作空间和扭转工作空间的角度对平台进行尺寸优化。灾难救援领域的绳牵引并联系统如图 15 所示。



(a) 绳牵引单人转运系统<sup>[125]</sup> (b) 绳牵引多人转运系统<sup>[125]</sup> (c) 灾后救援系统<sup>[126]</sup>

图 15 灾难救援领域的绳牵引并联系统

## 2.13 外墙清洁领域

江晓玲<sup>[127]</sup>开展外墙清洗绳驱动并联工作平台

的机构设计与控制研究,对工作平台的索力优化算法、机构尺寸优化、静刚度等进行了深入分析。但该研究把铰链的结构理想化为点状,产生了原理性误差。张永德等<sup>[128]</sup>设计了一种由2根绳索驱动的玻璃幕墙清洗机器人,对机器人的工作空间、绳索收放控制以及受力等进行了分析计算,通过试验证明了样机模型的实用性。Shao等<sup>[129]</sup>为了实现高层建筑外墙的自动高效清洗,设计了一种四索驱动的平面并联机构,基于运动学和静力学模型,分析了索力对工作空间的影响,明确最大索力与工作空间成正比。外墙清洗领域的绳牵引并联系统如图16所示。

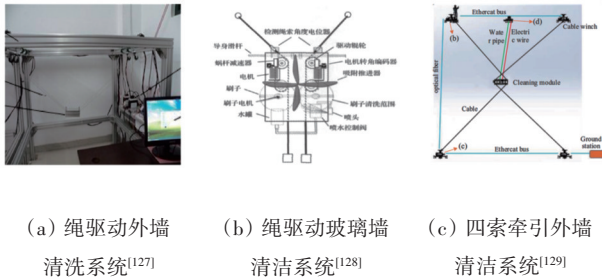


图16 外墙清洗领域的绳牵引并联系统

### 2.14 水下航行模拟领域

Wang等<sup>[130]</sup>提出了一种用于水下作业的具有流体动力浮力调节系统的水下绳驱动机械手,分析了索拉力、节点间力、浮力和水阻力之间的耦合关系,并采用数值方法得到了用于评估水下机械手浮力驱动工作模式的索力值。该研究对于在流体环境中工作的机械手,如海洋中的水下机械手、血管中的微机械手等,具有一定的参考价值。Rodriguez-Barroso等<sup>[131]</sup>提出了一种绳驱动可穿戴末端执行器的机器人,用于水下环境训练模拟。Qiu等<sup>[132]</sup>开发了一种用于水下环境感知和视觉测量的绳驱动云台相机系统。通过集成可变云台摄像机和校准算法,水下环境感知和视觉测量的性能大幅提高。该视觉系统为水下机器人的精确感知和交互任务提供了依据。但是要想获得更好的通用性,还需要将驱动绳索的接口进一步优化。水下航行模拟领域的绳牵引并联系统如图17所示。



图17 水下航行模拟领域的绳牵引并联系统

### 2.15 建筑施工领域

Boscher等<sup>[134]</sup>提出一种由平移式绳索机器人驱动的轮廓施工系统新概念。系统允许在线重新配置绳索机器人的致动绳索支架,以消除运动干涉问题,同时保持末端执行器的完全约束。与现有的轮廓施工机器人相比,该系统具有更好的可移植性、更低的成本以及构建更大结构的可能性。Hu等<sup>[135]</sup>提出了一种经济评估框架,以一个绳驱动的幕墙安装机器人为例验证了该方法。结果表明,该方法适应性强、重现性好。与传统建筑技术相比,研究人员、工程师、投资者和决策者可以轻松地遵循和定制该方法,以评估任何单任务施工机器人系统的经济优势。Bruckmann等<sup>[136]</sup>开发了一种用于施工中绳索驱动机器人仿真、优化和分析的框架。根据基于样条曲线的轨迹建模、物理模型及成本函数建立优化方程,生成自动化砌体施工的最佳轨迹。该框架生成的数据既可用于技术决策,也可用于研究经济可行性。未来,该研究要需要考虑到致动器的电气建模和齿轮损耗以进一步完善物理模型。同时,还需要开发合适的接口,生成的轨迹可以直接传输到绳索机器人的控制系统。此外,已安装的砌体是否在模拟预测的时间内完成,是否符合要求的国家标准,这是使用绳索机器人进行自动化砌体未来需要验证的工作。建筑施工领域的绳牵引并联系统如图18所示。

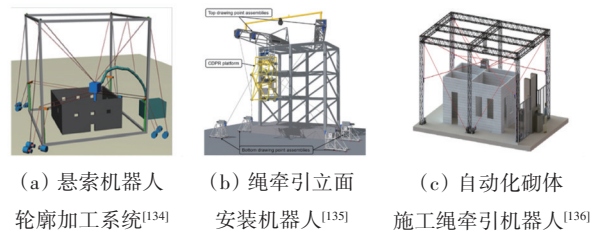


图18 建筑施工领域的绳牵引并联系统

### 2.16 立体仓库存储领域

自动化存储/检索系统在提高自动化制造系统、仓库和配送中心的性能方面具有重要作用。Bruckmann 等<sup>[137]</sup>提出了一种基于绳牵引机器人技术的新型自动化存储和检索系统,该系统重量轻,与传统系统相比能够节省大量能源。2019年,该团队详细讨论了基于绳索驱动机器人技术的机架式给料机的多种节能策略,并对硬件设计和要遵循的轨迹进行了优化<sup>[138]</sup>。Rasheed 等<sup>[139]</sup>研究了一种可重构绳驱动并联机器人,能够自动导航到任务位置。研究表明,可重构绳驱动并联机器人的工作空间不仅取决于张力极限,还取决于静态平衡约束。Salah 等<sup>[140]</sup>设计了一种绳驱动堆垛机,在随机和基于类的存储策略下,建立了绳驱动堆垛机的单命令周期时间和双命令周期时间方程,并建立控制体系结构。研究结果表明,该机构设计和控制体系结构在行程循环时间方面比传统方法更具竞争力,更适合高度增长的建筑物。自动存储与检索领域的绳牵引并联系统如图 19 所示。



(a) 绳驱动存储检索系统<sup>[137]</sup> (b) 绳驱动机架式给料机<sup>[138]</sup> (c) 绳牵引码垛机<sup>[140]</sup>

图 19 自动存储与检索领域的绳牵引并联系统

### 2.17 追踪飞行昆虫领域

Sane 等<sup>[141]</sup>提出了一种近距离跟踪飞行昆虫的绳驱动并联机器人,该实验系统为研究自由飞行的昆虫提供了一种有用的方法。该方法的关键优势是这种飞行架可以携带大量的记录设备和摄像机,对昆虫没有侵入性打扰。该系统可用于记录多个飞行昆虫的肌电图,同时记录昆虫追踪气味源或视觉物体时的精细动作。它还可以在飞行昆虫周围创造动态变化的局部微环境。Rémi 等<sup>[142]</sup>开发了一款用于跟踪自由飞行昆虫并与其互动的绳索驱动并联机器人实验系统,在绳索上安装摄像机跟随昆

虫运动。该实验系统解决了以前研究昆虫飞行仅限于在密闭的实验室室内进行系留飞行、悬停飞行或限制飞行的问题。追踪飞行昆虫的绳牵引并联系统如图 20 所示。

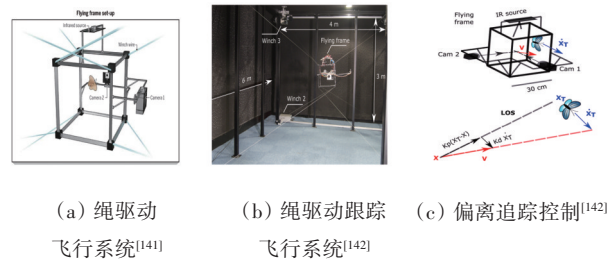


图 20 追踪飞行昆虫的绳牵引并联系统

绳牵引并联机构除了以上的应用以外,还在海上作业波浪补偿起重装备<sup>[143]</sup>、管道扫描检测与维修<sup>[144]</sup>、移动电子显示屏<sup>[17]</sup>、电力系统高压线路检测<sup>[145]</sup>、太空探测<sup>[146]</sup>、大型设备检修<sup>[147]</sup>、人机交互<sup>[148]</sup>等领域。绳牵引并联机构的显著优势,使其具有越来越多的应用领域。

## 3 结论

对绳牵引并联机构的技术研究现状与应用进行了综述,从不同领域分析了相关技术研究现状与关键问题。由于绳牵引并联机构具有重量轻、工作空间大、可重构、环境适用性好等特点,在物料搬运、天文观测、高速摄像等实际工程应用领域发挥了很好的作用,其技术优势可扩展到其他应用领域,具有较大的发展潜能。但是绳索的疲劳监测和非线性振动仍然面临着巨大挑战,绳牵引并联机构的安全性问题亟需解决。

尽管绳牵引并联机构在不同应用领域的技术研究取得了一定的成果。但是由于绳索数量不同,其构型多样化,在不同的应用领域需要重点解决的关键技术也不一样。一种理论模型或控制方法可能只适用在某个特定的领域,模型兼容性比较差。因此,绳牵引并联机构的技术研究还需要兼容性和通用性更强的理论模型与控制方法,才能具有更好的技术移植性,并推广到更多的应用领域。同时,

从外科手术、农业采摘等应用领域可知,感知能力与视觉技术融合的绳牵引并联机构具有更好的应用前景。因此,绳牵引并联机构的技术发展具有以下趋势。

1) 针对绳索疲劳监测和非线性振动问题,视觉技术和智能传感器的融合应该是未来一个可行的解决手段。视觉技术可以实时监测绳索的运行状态,智能传感器能够实时获得绳索的技术参数,两者结合可以对绳索的工作寿命做出预判。

2) 绳牵引与新兴复合材料结合形成刚柔结合的机构,提高绳牵引并联机构的刚度和承载能力,是解决安全性问题的一个方向。因此,绳牵引刚柔结合机构设计是未来一个发展趋势。

3) 为了使绳牵引并联机构具有更好的移植性能,未来应该运用模块化设计理念,提高绳牵引并联机构的可重构性,获得更好的环境适应性、灵活性、性价比。即根据刚度要求、可达工作空间大小等条件,以绳索拉力始终张紧、避免几何结构干涉等约束,以系统最小能耗或最大经济效益为目标,进行绳牵引并联机构的优化设计,最终满足不同的应用场景要求。

4) 为了缩短绳牵引并联机构的开发周期,设计一种通用的仿真系统,根据用户设置的参数自动设计新的构型并进行性能分析,也是未来应该考虑的方向。

### 参考文献(References)

- [1] 刘雄伟, 郑亚青, 林麒. 应用于飞行器风洞试验的绳牵引并联机构技术综述[J]. 航空学报, 2004, 25(4): 393-400.
- [2] Tang X Q. An overview of the development for cable-driven parallel manipulator[J]. Advances in Mechanical Engineering, 2014, doi: 10.1155/2014/823028.
- [3] Qian S, Zi B, Shang W W, et al. A review on cable-driven parallel robots[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2018, 31(66): 1-12.
- [4] Albus J, Bostelman R, Dagalakis N. The NIST RoboCrane [J]. Journal of Robotic System, 1993, 10(5): 709-724.
- [5] Lytle A M, Saidi K S, Bostelman R V, et al. Adapting a teleoperated device for autonomous control using three-dimensional positioning sensors: Experiences with the NIST RoboCrane[J]. Automation in Construction, 2004, 13(1): 101-118.
- [6] Duan B Y. A new design project of the line feed structure for large spherical radio telescope and its nonlinear dynamic analysis[J]. Mechatronics, 1999, 9(1): 53-64.
- [7] Qiu Y Y, Duan B Y, Wei Q, et al. Optimal distribution of the cable tensions and structural vibration control of the cable-cabin flexible structure[J]. Structural Engineering and Mechanics, 2002, 14(1): 39-56.
- [8] 仇原鹰. 大射电望远镜馈源支撑与指向跟踪系统的力学模型分析及实验研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2002.
- [9] Zhu W B, Nan R D, Ren G X. Modeling of a feed support system for FAST[J]. Experimental Astronomy, 2004, 17(1-3): 177-184.
- [10] Kozak K, Zhou Q, Wang J S. Static analysis of cable-driven manipulators with non-negligible cable mass [J]. IEEE Transactions on Robotics, 2006, 22(3): 425-433.
- [11] Shao Z F, Tang X Q, Wang L P, et al. Dynamic modeling and wind vibration control of the feed support system in FAST[J]. Nonlinear Dynamics, 2012, 67(2): 965-985.
- [12] Du J L, Bao H, Cui C Z, et al. Nonlinear PD control of a long-span cable-supporting manipulator in quasi-static motion[J]. Journal of Dynamic Systems Measurement and Control-Transactions of the ASME, 2012, 134(1): 11022-11030.
- [13] Li H, Yao R. Optimal orientation planning and control deviation estimation on FAST cable-driven parallel robot [J]. Advances in Mechanical Engineering, 2014(716097): 1-7.
- [14] Tang X Q, Chai X M, Tang L W, et al. Accuracy synthesis of a multi-level hybrid positioning mechanism for the feed support system in FAST[J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2014, 30(5): 565-575.
- [15] 李辉, 潘高峰. 驱动链高速轴断裂所致FAST索牵引并联机器人的冲击振动仿真分析[J]. 振动与冲击, 2017, 36(12): 75-82.
- [16] Cone L L. Skycam: An aerial robotic camera system[J]. Byte, 1985, 10(10): 122-132.
- [17] Tempel P, Schnelle F, Pott A, et al. Design and programming for cable-driven parallel robots in the German pavilion at the EXPO[J]. Machines, 2015, 3(3): 223-241.

- [18] Goodwin K. RoboCrane construction of bridges[J]. Transportation Research Record Journal of the Transportation Research Board, 1997, 1575(1): 42-46.
- [19] Lytle A M, Saidi K S. NIST research in autonomous construction[J]. Autonomous Robots, 2007, 22(3): 211-221.
- [20] Yamamoto M, Yanai N, Mohri A. Inverse dynamics and control of crane-type manipulator[C]//IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Piscataway: IEEE, 1999: 1228-1233.
- [21] Heyden T, Woernle C. Dynamics and flatness-based control of a kinematically undetermined cable suspension manipulator[J]. Multibody System Dynamics, 2006, 16(2): 155-177.
- [22] Merlet J P, Daney D. Kinematic analysis of a spatial four-wire driven parallel crane without constraining mechanism[C]//Computational Kinematics. Berlin: Springer, 2009: 1-8.
- [23] Scalera L, Gallina P, Seriani S, et al. Cable-based robotic crane (CBRC): Design and implementation of overhead traveling cranes based on variable radius drums[J]. IEEE Transactions on Robotics, 2018, 34(2): 474-485.
- [24] O'Neill C, Asada H H. Safe tumbling of heavy objects using a two-cable crane[J]. IEEE Robotics and Automation Letters, 2021, 6(2): 1082-1089.
- [25] 耿永锋. 用于集装箱吊装的绳牵引并联起重设备的研究[D]. 上海: 上海海事大学, 2007.
- [26] 郑亚青. 吊装绳牵引并联起重机器人的建模分析[J]. 华侨大学学报(自然科学版), 2009, 30(5): 496-501.
- [27] 于兰, 郑亚青. 3种构型的6自由度绳牵引门式起重机器人的运动学位置逆解分析[J]. 华侨大学学报(自然科学版), 2012, 33(2): 125-128.
- [28] 郑飞杰. 基于模糊PID的2自由度门式起重机器人轨迹跟踪控制研究[D]. 泉州: 华侨大学, 2013.
- [29] 黄佳怡, 陈柏, 胡忠文, 等. 一种柔索驱动太空舱外搬运机器人研究[J]. 机械科学与技术, 2012, 31(11): 1748-1753.
- [30] Zi B, Lin J, Qian S. Localization, obstacle avoidance planning and control of a cooperative cable parallel robot for multiple mobile cranes[J]. Robotics and Computer Integrated Manufacturing, 2015, 34: 105-123.
- [31] 瞿斌, 周斌, 钱森. 双台汽车起重机柔索并联装备变幅运动下的动力学建模与分析[J]. 机械工程学报, 2017, 53(7): 55-61.
- [32] Ramy R. Dynamics of the arecibo radio telescope[D]. Montreal: McGill University, 2005.
- [33] Taghirad H D, Nahon M A. Forward kinematics of a macro-micro parallel manipulator[C]//IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics. Piscataway: IEEE, 2007: 1-6.
- [34] Meunier G, Boulet B, Nahon M. Control of an overactuated cable-driven parallel mechanism for a radio telescope application[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2009, 17(5): 1043-1054.
- [35] 李辉, 朱文白, 潘高峰. 500 m口径球面射电望远镜进舱缆线连接机构的设计及其静力学分析[J]. 机械工程学报, 2010, 46(7): 7-15.
- [36] 李辉, 朱文白, 潘高峰. 基于索力优化的FAST柔索牵引并联机构的静力学分析[J]. 工程力学, 2011, 28(4): 185-193.
- [37] Yin J N, Jiang P, Yao R. An approximately analytical solution method for the cable-driven parallel robot in FAST[J]. Research in Astronomy and Astrophysics, 2021, 21(2): 1-11.
- [38] 姚蕊, 唐晓强, 李铁民, 等. 大型射电望远镜馈源定位3T索牵引并联机构分析与设计[J]. 机械工程学报, 2007, 43(11): 105-109.
- [39] Yao R, Tang X Q, Wang J S, et al. Dimensional optimization design of the four-cable-driven parallel manipulator in FAST[J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2010, 15(6): 932-941.
- [40] Shao Z F, Tang X Q, Chen X, et al. Driving force analysis for the secondary adjustable system in FAST[J]. Robotica, 2011, 29: 903-915.
- [41] Tang X Q, Zhu W B, Sun C H, et al. Similarity model of feed support system for FAST[J]. Experimental Astronomy, 2011, 29(3): 177-187.
- [42] Liu Z H, Tang X Q, Shao Z F, et al. Research on longitudinal vibration characteristic of the six-cable-driven parallel manipulator in FAST[J]. Advances in Mechanical Engineering, 2013: 547416-547416.
- [43] Tang X Q, Shao Z F. Trajectory generation and tracking control of a multi-level hybrid support manipulator in FAST[J]. Mechatronics, 2013, 23(8): 1113-1122.
- [44] 刘志远, 陈炼, 邵珠峰, 等. FAST馈源支撑系统的终端精度保证研究[J]. 机械工程学报, 2017, 53(17): 50-59.
- [45] 段宝岩, 仇原鹰, 张福顺, 等. 提高超大型天线索支撑结构刚度的方法及其对电性能的影响[J]. 机械工程学报, 2009, 45(3): 138-143.
- [46] 仇原鹰, 陈杰, 段宝岩, 等. 大型射电望远镜悬挂馈源结构的非线性力学分析[J]. 西安电子科技大学学报(自

- 然科学版), 2000, 27(4): 452-455.
- [47] 王文利, 段宝岩. 悬索式球面射电望远镜FAST 馈源舱的动态检测[J]. 西安电子科技大学学报(自然科学版), 2000, 27(5): 563-566.
- [48] 苏玉鑫, 段宝岩, 彭勃, 等. 大射电望远镜轨迹跟踪模糊学习控制[J]. 自动化学报, 2002, 28(6): 1039-1042.
- [49] 苏玉鑫, 段宝岩, 彭勃, 等. 大射电望远镜馈源轨迹跟踪的模糊预测控制[J]. 控制与决策, 2002, 17(1): 85-88.
- [50] 孙欣, 段宝岩. 巨型柔性Stewart平台解空间、工作空间的研究及悬索张力的优化分析[J]. 机械工程学报, 2002, 38(2): 16-21.
- [51] 瞿斌, 段宝岩, 杜敬利. 超大型天线馈源舱柔索支撑结构动力学分析与跟踪控制[J]. 控制理论与应用, 2007, 24(6): 938-942.
- [52] Abbott F, Reed W. A new 'free-flight' mount system for high-speed wind-tunnel flutter models[C]//Proceedings of Symposium on Aeroelastic and Dynamic Modeling Technology. 1963: 169-206.
- [53] Thomas L, Bojan V, Ari G. A six degrees of freedom dynamic wire-driven traverse[J]. Aerospace, 2016, 3(2): 1-16.
- [54] Lafourcade P, Llibre M, Reboulet C. Design of a parallel wire-driven manipulator for wind tunnels[C]//Proceedings of the WORKSHOP on Fundamental Issues and Future Research Directions for Parallel Mechanisms and Manipulators. Quebec City: Laval University, 2002: 187-194.
- [55] Lafourcade P. Study of parallel manipulators with cables, design of an active suspension for wind tunnel[D]. Paris: Paris Graduate School of Economics, Statistics and Finance, 2004: 22-29.
- [56] Bruckmann T, Hiller M, Schramm D. An active suspension system for simulation of ship maneuvers in wind tunnels[M]. Amsterdam: Springer, 2010: 537-544.
- [57] 郑亚青, 林麒, 刘雄伟. 低速风洞绳牵引并联支撑系统的机构与模型姿态控制方案设计[J]. 航空学报, 2005, 26(6): 774-778.
- [58] 郑亚青, 林麒, 刘雄伟. 低速风洞绳牵引并联支撑系统的运动学参数标定[J]. 中国机械工程, 2006, 17(6): 551-558.
- [59] 郑亚青, 焦少妮, 杨永柏. 低速风洞层流风场中WDPSS-8机器人系统索系流固耦合效应的动静力特性分析[J]. 中国机械工程, 2013, 24(13): 1765-1772.
- [60] 黄琴, 郑亚青, 林麒. 6自由度绳牵引并联机构飞行器模型单自由度振荡运动的动力学分析[J]. 工程力学, 2010, 27(10): 230-234.
- [61] Xiao Y W, L Qi, Zheng Y Q, et al. Model aerodynamic tests with a wire-driven parallel suspension system in low-speed wind tunnel[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2010, 23(4): 393-400.
- [62] 王晓光, 马少宇, 彭苗娇, 等. 绳牵引并联机器人弹性变形对动平台位姿精度的影响[J]. 计算力学学报, 2016, 33(3): 306-312.
- [63] 彭苗娇, 王晓光, 林麒. 风洞试验WDPR支撑牵引绳与模型耦合振动研究[J]. 振动工程学报, 2017, 30(1): 140-148.
- [64] 冀洋锋, 林麒, 彭苗娇, 等. 绳系并联支撑机构的绳迟滞效应及影响实验研究[J]. 工程力学, 2019, 36(11): 212-221.
- [65] 刘树青, 吴洪涛. 一种用于风洞的新型柔索驱动并联机构设计[J]. 南京理工大学学报, 2004, 28(6): 601-605.
- [66] 姚裕, 吴洪涛. 3-DOF转动柔索驱动风洞机构的力雅可比矩阵[J]. 南京航空航天大学学报, 2011, 43(1): 75-78.
- [67] Vincent T L. Stabilization for film and broadcast cameras [J]. IEEE Control Systems Magazine, 2008, 28(1): 20-25.
- [68] 钱小韵. 北京奥运会上的特种摄垂直像机[J]. 现代电视技术, 2009(6): 127-129.
- [69] Spidercam GmbH [EB/OL]. [2022-05-01]. <http://www.spidercam.tv/>.
- [70] Gordievsky V. Design and control of a robotic cable-suspended camera system for operation in 3-D industrial environment[D]. Cambridge: Massachusetts Institute of Technology, 2008.
- [71] 于亮亮, 仇原鹰, 苏宇. 高速柔索牵引摄像机器人动力工作空间研究[J]. 工程力学, 2013, 30(11): 245-250.
- [72] 苏宇, 仇原鹰, 王龙, 等. 高速柔索牵引并联摄像机器人冗余驱动力优化求解[J]. 西安电子科技大学学报, 2014, 41(2): 90-96.
- [73] Liu P, Qiu Y Y, Su Y. A new hybrid force-position measure approach on the stability for a camera robot[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science, 2016, 230(14): 2508-2516.
- [74] Wei H L, Qiu Y Y, Yang J. An approach to evaluate stability for cable-based parallel camera robots with hybrid tension-stiffness properties[J]. International Journal of Advanced Robotic Systems, 2015, 12: 185.
- [75] 韦慧玲, 仇原鹰, 盛英. 一种柔索牵引摄像机器人的运动控制策略与稳定性研究[J]. 振动与冲击, 2017, 36(9):

- 93-100.
- [76] Wei H L, Qiu Y Y, Sheng Y. On the cable pseudo-drag problem of cable-driven parallel camera robots at high speeds[J]. *Robotica*, 2019, 37(10): 1695-1709.
- [77] Morizono T, Kurahashi K, Kawamura S. Analysis and control of a force display system driven by parallel wire mechanism[J]. *Robotica*, 1998, 16: 551-563.
- [78] Tadokoro S, Murao Y, Hiller M, et al. A motion base with 6-DOF by parallel cable drive architecture[J]. *IEEE-ASME Transactions on Mechatronics*, 2002, 7(2): 115-123.
- [79] Mroz G. Design and prototype of a parallel, wire-actuated robot[D]. Ontario: Dissertation of Queen's University, 2003.
- [80] Miermeister P, Lachele M, Boss R, et al. The CableRobot simulator large scale motion platform based on cable robot technology[C]//IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots & Systems. Piscataway: IEEE, 2016: 3024-3029.
- [81] 张立勋, 刘攀, 王克义. 基于绳索牵引的航天员机能训练机器人虚拟重力控制[J]. *机器人*, 2010, 32(4): 454-458.
- [82] 邹宇鹏, 张立勋, 李来禄. 多模式柔索驱动航天员训练机器人力控制[J]. *宇航学报*, 2015, 36(5): 566-573.
- [83] Cui Z W, Tang X Q, Hou S H, et al. Calculation and analysis of constant stiffness space for redundant cable-driven parallel robots[J]. *IEEE Access*, 2019, 7: 75407-75419.
- [84] Castelli G, Ottaviano E. Modelling, simulation and testing of a reconfigurable cable-based parallel manipulator as motion aiding system[J]. *Applied Bionics and Biomechanics*, 2015, 7(4): 253-268.
- [85] Ying M, Xin J, Geetanjali G D, et al. Human movement training with a cable driven ARm EXoskeleton (CAREX) [J]. *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*, 2015, 23(1): 84-92.
- [86] Kuan J Y, Pasch K A, Herr H M, et al. A high-performance cable-drive module for the development of wearable devices[J]. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2018, 23(3): 1238-1248.
- [87] Huang H Y, Farkhatdinov I, Arami A, et al. Cable-driven robotic interface for lower limb neuromechanics identification[J]. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, 2019, 68(2): 461-469.
- [88] Hamida I B, Laribi M A, Mlika A, et al. Multi-objective optimal design of a cable driven parallel robot for rehabilitation tasks[J]. *Mechanism and Machine Theory*, 2021 (156): 104141.
- [89] 王克义, 张立勋, 孟浩. 1R2T绳索牵引并联康复机器人绳索弹性研究[J]. *南京理工大学学报*, 2010, 34(5): 602-607.
- [90] 刘攀, 张立勋, 王克义, 等. 绳索牵引康复机器人的动力学建模与控制[J]. *哈尔滨工程大学学报*, 2009, 28(7): 811-815.
- [91] Wang Y L, Wang K Y, Wang W L, et al. Appraise and analysis of dynamical stability of cable-driven lower limb rehabilitation training robot[J]. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 2019, 33(11): 5461-5472.
- [92] Wang Y L, Wang K Y, Wang K C, et al. Safety evaluation and experimental study of a new bionic muscle cable-driven lower limb rehabilitation robot[J]. *Sensors*, 2020, 20(24): 1-20.
- [93] Zi B, Yin G G, Zhang D. Design and optimization of a hybrid-driven waist rehabilitation robot[J]. *Sensors*, 2016, 16(12): 1-15.
- [94] Cui X, Chen W H, Jin X, et al. Design of a 7-DOF cable-driven arm exoskeleton (CAREX-7) and a controller for dexterous motion training or assistance[J]. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2017, 22(1): 161-172.
- [95] Chen W H, Li Z Y, Cui X, et al. Mechanical design and kinematic modeling of a cable-driven arm exoskeleton incorporating inaccurate human limb anthropomorphic parameters[J]. *Sensors*, 2019, 19(20): 1-13.
- [96] Li X M, Yang Q, Song R. Performance-based hybrid control of a cable-driven upper-limb rehabilitation robot [J]. *IEEE Transactions on Bio-Medical Engineering*, 2020, 68(4): 1351-1359.
- [97] Shi K, Song A G, Li Y, et al. A cable-driven three-dof wrist rehabilitation exoskeleton with improved performance[J]. *Frontiers in Neurorobotics*, 2021, 15: 664062.
- [98] Wang H S, Zhang R X, Chen W D, et al. A cable-driven soft robot surgical system for cardiothoracic endoscopic surgery: Preclinical tests in animals[J]. *Surgical Endoscopy*, 2017, 37: 3152-3158.
- [99] Wang H S, Wang C, Chen W D, et al. Three-dimensional dynamics for cable-driven soft manipulator[J]. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2017, 22(1): 18-28.
- [100] Xue R F, Ren B Y, Yan Z Y, et al. A cable-pulley system modeling based position compensation control for a laparoscope surgical robot[J]. *Mechanism and Ma-*

- chine Theory, 2017, 118: 283–299.
- [101] Qi F, Ju F, Bai D M, et al. Kinematics optimization and static analysis of a modular continuum robot used for minimally invasive surgery[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part H Journal of Engineering in Medicine, 2018, 232(2): 135–148.
- [102] Qi F, Ju F, Bai D M, et al. Motion modelling and error compensation of a cable-driven continuum robot for applications to minimally invasive surgery[J]. The International Journal of Medical Robotics and Computer Assisted Surgery, 2018, 14(6): e1932.
- [103] Qi F, Ju F, Bai D M, et al. Kinematic analysis and navigation method of a cable-driven continuum robot used for minimally invasive surgery[J]. International Journal of Medical Robotics and Computer Assisted Surgery, 2019, 15(4): e2007.
- [104] Wang W J, Yu L T, Yang J. Toward force detection of a cable-driven micromanipulator for a surgical robot based on disturbance observer[J]. Mechanical Sciences, 2017, 8(2): 323–335.
- [105] Yu L T, Wang W J, Zhang F F. External force sensing based on cable tension changes in minimally invasive surgical micromanipulators[J]. IEEE Access, 2018, 6: 5362–5373.
- [106] Yan Y S, Yu L T, Li C S, et al. UKF-based motion estimation of cable-driven forceps for robot-assisted surgical system[J]. IEEE Access, 2020, 8: 94912–94922.
- [107] Kim M C, Kim E S, Park J O, et al. Robotic localization based on planar cable robot and hall sensor array applied to magnetic capsule endoscope[J]. Sensors, 2020, 20(20): 1–18.
- [108] Eric B, Clement G. Large-scale 3D printing with a cable-suspended robot[J]. Additive Manufacturing, 2015, 7: 27–44.
- [109] Izard J B, Dubor A, Herve P E, et al. Large-scale 3D printing with cable-driven parallel robots[J]. Construction Robotics, 2017, 1(1): 69–76.
- [110] Qian S, Bao K L, Zi B, et al. Kinematic calibration of a cable-driven parallel robot for 3D printing[J]. Sensors, 2018, 18(9): 1–22.
- [111] Zi B, Wang N, Qian S, et al. Design, stiffness analysis and experimental study of a cable-driven parallel 3D printer[J]. Mechanism and Machine Theory, 2019, 132: 207–222.
- [112] Tho T P, Think N T. Using a cable-driven parallel robot with applications in 3D concrete printing[J]. Applied Sciences, 2021, 11(2): 1–23.
- [113] Abel V D, Harish T M, Rao R B. Design and modeling of a cable driven cart-rail robot for farm automation[C]//International Conference on Intelligent Computing, Instrumentation and Control Technologies. Piscataway: IEEE, 2017: 1248–1253.
- [114] Ya X, Pal J F, Volkan I. Design and evaluation of a novel cable-driven gripper with perception capabilities for strawberry picking robots[C]//IEEE International Conference on Robotics and Automation. Piscataway: IEEE, 2018: 7384–7391.
- [115] Nguyen D T, Nguyen T T. Design of cable measuring system of a robot spraying pesticides in agricultural farm[C]//2019 International Conference on System Science and Engineering. Piscataway: IEEE, 2019: 577–580.
- [116] Vasileios T, Dionysios B, Kyriakos-Nikos P, et al. Development of an integrated IoT-based greenhouse control three-device robotic system[J]. Agronomy, 2021, 11(2): 1–16.
- [117] Pott A, Mutherich H, Kraus W, et al. Cable-driven parallel robots for industrial applications: The IPANema system family[C]//2013 44th International Symposium on Robotics. Piscataway: IEEE, 2013: 1–6.
- [118] Miermeister P, Kraus W, Winkler B, et al. Cable-driven robots for the rapid deployment of fully automated material handling solutions[C]//International Symposium on Robotics. Piscataway: IEEE, 2014: 1–6.
- [119] Mattern H, Bruckmann T, Spengler A, et al. Simulation of automated construction using wire robots[C]//Winter Simulation Conference. Piscataway: IEEE, 2016: 3302–3313.
- [120] Koo S, Ficht G, García G M, et al. Robolink feeder: Reconfigurable bin-picking and feeding with a lightweight cable-driven manipulator[C]//13th IEEE International Conference on Automation Science and Engineering (CASE). Piscataway: IEEE, 2017: 41–48.
- [121] Jordan B L, Batalin M A, Kaiser W J. NIMS RD: A rapidly deployable cable based robot[C]//IEEE International Conference on Robotics & Automation. Piscataway: IEEE, 2007: 144–150.
- [122] Borgstrom P H, Jordan B L, Batalin M A, et al. Field-tests of a redundantly actuated cable-driven robot for environmental sampling applications[C]//IEEE International Conference on Automation Science & Engineering. Piscataway: IEEE, 2009: 615–620.

- [123] Borgstrom P H. Novel cable-driven robotic platforms and algorithms for environmental sensing applications [D]. Berkeley: University of California, 2009.
- [124] Bosscher P, Williams R L, Tummino M. A concept for rapidly-deployable cable robot search and rescue systems[C]//ASME International Design Engineering Technical Conferences & Computers and Information in Engineering Conference. New York: ASME, 2005: 1-10.
- [125] Merlet J P, Daney D. A portable, modular parallel wire crane for rescue operations[C]//IEEE International Conference on Robotics and Automation. Piscataway: IEEE, 2010: 2834-2839.
- [126] Nurahmi L, Pramujati B, Caro S, et al. Dimension synthesis of suspended eight cables-driven parallel robot for search-and-rescue operation[C]//2017 International Conference on Advanced Mechatronics, Intelligent Manufacture, and Industrial Automation. Piscataway: IEEE, 2017: 237-241.
- [127] 江晓玲. 外墙清洗绳牵引并联工作平台的机构设计与控制[D]. 泉州: 华侨大学, 2012.
- [128] 张永德, 姜金刚, 张舒, 等. 柔索驱动的玻璃幕墙清洗机器人研制及实验研究[J]. 仪器仪表学报, 2013, 34(3): 494-501.
- [129] Shao Z F, Xie G Q, Zhang Z K, et al. Design and analysis of the cable-driven parallel robot for cleaning exterior wall of buildings[J]. International Journal of Advanced Robotic Systems, 2021, 18(1): 1-11.
- [130] Wang T, You Z H, Song W, et al. Dynamic analysis of an underwater cable-driven manipulator with a fluid-power buoyancy regulation system[J]. Micromachines, 2020, 11(12): 1-14.
- [131] Rodriguez-Barroso A, Saltaren R. Passive reconfigurable end effector for underwater simulation on humanoid[J]. Mechanism and Machine Theory, 2021, 163(1): 104387.
- [132] Qiu C L, Wu Z X, Kong S H, et al. An underwater micro cable-driven pan-tilt binocular vision system with spherical refraction calibration[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2021, 70: 5010813.
- [133] Ueland E, Sauder T, Skjetne R. Optimal actuator placement for real-time hybrid model testing using cable-driven parallel robots[J]. Journal of Marine Science and Engineering, 2021, 9(2): 1-23.
- [134] Bosscher P, Williams R L, Bryson L S, et al. Cable-suspended robotic contour crafting system[J]. Automation in Construction, 2007, 17(1): 45-55.
- [135] Hu R B, Iturralde K, Linner T, et al. A simple framework for the cost-benefit analysis of single-task construction robots based on a case study of a cable-driven facade installation robot[J]. Buildings, 2021, 11(1): 1-17.
- [136] Bruckmann T, Boumann R. Simulation and optimization of automated masonry construction using cable robots[J]. Advanced Engineering Informatics, 2021, 50: 101388.
- [137] Bruckmann T, Sturm C, Fehlberg L, et al. An energy-efficient wire-based storage and retrieval system[C]//2013 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics. Piscataway: IEEE, 2013: 631-636.
- [138] Bruckmann T, Reichert C, Ji H. Energy consumption reduction of a cable-driven storage and retrieval system [C]//Springer Proceedings in Advanced Robotics. Berlin: Springer, 2018: 383-391.
- [139] Rasheed T, Long P, Marquez-Gamez D, et al. Available wrench set for planar mobile cable-driven parallel robots[C]//2018 IEEE International Conference on Robotics and Automation. Piscataway: IEEE, 2018: 962-967.
- [140] Salah B, Janeh O, Noche B, et al. Design and simulation based validation of the control architecture of a stacker crane based on an innovative wire-driven robot [J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2017, 44: 117-128.
- [141] Sane S P. Enhancing insect flight research with a lab-on-cables[J]. Science Robotics, 2020, 5(45): eabb7941.
- [142] Rémi P, Mélanie J, Mohamed B, et al. Automatic tracking of free-flying insects using a cable-driven robot[J]. Science Robotics, 2020, 5(43): eabb2890.
- [143] Lv W, Tao L M, Ji Z N. Sliding mode control of cable-driven redundancy parallel robot with 6 DOF based on cable-length sensor feedback[J]. Mathematical Problems in Engineering, 2017, 2017(1): 1-21.
- [144] Edoardo I, Daniele M, Marco C. A deployable cable-driven parallel robot with large rotational capabilities for laser-scanning applications[J]. IEEE Robotics and Automation Letters, 2020, 5(3): 4140-4147.
- [145] Tao G, Liu Z, Ye C. A novel unit mechanism for serial head-tail alternatively supported robot[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science, 2020, 235(20):

- 5132–5145.
- [146] Seriani S, Gallina P, Wedler A. A modular cable robot for inspection and light manipulation on celestial bodies [J]. *Acta Astronautica*, 2016, 123: 145–153.
- [147] Wang M, Dong X, Ba W, et al. Design, modelling and validation of a novel extra slender continuum robot for in-situ inspection and repair in aeroengine[J]. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 2021, 67: 102054.
- [148] Huang Y, Chen Y, Zhang X, et al. A novel cable-driven 7-DOF anthropomorphic manipulator[J]. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2021, 26(4): 2174–2185.

## Technical research status and application progress of cable-driven parallel mechanism

WEI Huiling<sup>1</sup>, LUO Lufeng<sup>1</sup>, LU Qinghua<sup>1\*</sup>, CHEN Weilin<sup>1</sup>, WANG Jinhai<sup>2</sup>

1. School of Mechatronics Engineering and Automation, Foshan University, Foshan 528225, China

2. School of Electronic Information Engineering, Foshan University, Foshan 528225, China

**Abstract** The cable-driven parallel mechanism is a type of parallel robot that uses flexible cables instead of rigid links as the driving element. It has the advantages of fast movement speed, large carrying capacity, small chain inertia, large workspace and good environmental adaptability. It provides new ideas and means for solving engineering problems. Therefore, it has gradually become a research hotspot in the field of international parallel mechanisms in recent years. This article introduces the characteristics of the cable-driven parallel mechanism, and summarizes the technical research status and engineering application progress of the cable-driven parallel mechanism from the fields of material handling, astronomical observation, wind tunnel test, high-speed camera, motion simulation, limb rehabilitation, surgery, three-dimensional printing, etc. Then the development trends of cable-driven parallel mechanism are discussed.

**Keywords** cable-driven parallel mechanism; engineering application; research status; development trend ●



(责任编辑 刘志远)