DOI: 10.12398/j.issn.2096-7217.2024.04.007

绳驱柔性机械手研究进展及其在农业机器人中的应用

韦慧玲[1]，梁成斌[1]，王金海[2]，陈明猷[1]，罗陆锋[1*]

(1. 佛山大学机电工程与自动化学院，广东佛山，528000；
2. 佛山大学计算机与人工智能学院，广东佛山，528000)

摘要：绳牵引并联机器人具有结构简单、运动惯性小、可重构、响应速度快等特点，成为近年来机器人领域研究的热点。而绳驱柔性机械手由于其驱动绳索的柔弹性为任务操作提供了一定的适应性和柔顺性，能够实现作业对象与机械手良好的动态交互，提高防破损耦合的能力，引起了农业机器人领域科研人员的广泛关注。由于农业采摘机器人的作业环境具有非结构化、不确定的特点，而大多数的果实外表皮脆弱易损，因此对直接与果实接触的采摘机械手要求更严格，既要满足稳定抓持又不能损伤果实。为实现采摘机器人高效精准作业，与生物友好交互的轻量化柔性末端执行机构是急需重点突破的关键理论技术之一。首先，阐述了具有商业应用前景的绳驱柔性机械手的特点及发展概况；然后，详细综述了国内外研究人员对绳驱柔性机械手的设计、建模和控制等理论的研究进展，进一步概述了绳驱柔性机械手在肢体康复和灵巧操作领域的应用开发，详细分析绳驱柔性机械手在农业采摘领域应用的意义，并对绳驱柔性机械手在番茄、苹果、草莓和黑莓采摘的研究现状进行分析；最后，针对现阶段绳驱柔性机械手在农业采摘存在的采摘准确度不高、通用性差和成本高、造成损伤、采摘效率低下等问题，指出今后绳驱柔性机械手商业化应用亟须在农机农艺协同、模块化与可重构设计、提高交互安全性、多传感器融合、采摘序列规划与强鲁棒控制等方面开拓创新，为果蔬机械化无损采摘机构的设计提供新的思路和方法。

关键词：绳驱柔性机械手；农业机器人；采摘；番茄；苹果；草莓；黑莓

中图分类号：S24 **文献标识码：**A **文章编号：**2096-7217(2024)04-0095-12

韦慧玲，梁成斌，王金海，陈明猷，罗陆锋. 绳驱柔性机械手研究进展及其在农业机器人中的应用[J]. 智能化农业装备学报(中英文)，2024，5(4)：95－106

WEI Huiling，LIANG Chengbin，WANG Jinhai，CHEN Mingyou，LUO Lufeng. Research progress of cable-driven flexible manipulator and its application in agricultural robots [J]. Journal of Intelligent Agricultural Mechanization，2024，5(4)：95－106

0 引言

尽管目前机械手的设计得到了很大的进步，但是跟生物抓手相比，在自适应和柔顺性方面仍然存在比较大的差距，尤其是在农业机器人领域[1]。由于农业机器人的作业环境是非结构化，不同农作物的尺寸、形状、质量、表面材料特性等都不同，特别是果实对损害的敏感性不同，因此获得恰当的抓取力是具有挑战性的问题。当抓取簇状作物时，比如葡萄，由于密集成簇产生流窜变形，抓取变得更加复杂，此时对末端执行机械手的要求更高。

相比传统刚性机械手，绳驱柔性机械手具有结构简单、制造方便、控制容易、无气密性要求、能够产生比较大的输出力和输出效率、实现狭小空间长距离传动、具有一定的适应性和柔顺性等优势[2-5]，近年来得到了越来越多的关注，成为研究的热点。

从绳驱柔性机械手的理论研究来看，TAN等人[4]基于分段常曲率和弹性力学建立了绳驱机械手的运动学模型，其中将柔性绳的扭转角包含在完整的运动学中，该研究为绳驱机械手的运动学建模提供了更全面的思路。DONG等人[6]建立了一个通用的绳驱机械手抓取力分析模型，用于量化评估滚动约束下的抓取稳

收稿日期：2024-02-27 修回日期：2024-04-22
基金项目：国家自然科学基金资助项目(52205254、32171909、32301704)；广东省基础与应用基础研究基金(2020B1515120070)
第一作者：韦慧玲，女，1986年生，广西贵港人，博士，副教授；研究方向为绳牵引机器人、采摘机器人。E-mail：weihuiling2007@126.com
*通信作者：罗陆锋，男，1982年生，湖南娄底人，博士，教授；研究方向为采摘机器人、机器视觉等。E-mail：luolufeng617@163.com

定性,为绳驱柔性机械手的指尖设计方法提供了理论证据。CAMARILLO 等人[7]建立了绳驱连续机械手的力学模型,并优化了索力分布,为机械手的鲁棒控制提供了基础。

从绳驱柔性机械手的应用来看,PU 等人[8]开发了一款绳驱外骨骼机械手,深入探讨了在非负载条件下绳索张力的变化规律,该研究建立的拉格朗日模型可以准确估计绳驱外骨骼机械手在不同接合角度下掌指和近端指间关节的绳索张力,该研究为绳驱机构在肢体康复领域的应用提供了理论基础。MIN 等人[9]研制了一种绳驱拟人机械手,该机械手通过单个电机和平行绳索实现关节的对抗驱动,通过拉伸弹簧在近端指和远端指关节之间进行顺应性欠驱动,实现机械手自适应灵巧抓取,为绳驱柔性机构在灵巧操作领域的应用提供了技术支撑。

尽管国内外学者对绳驱柔性机械手的理论和应用都进行了大量研究,取得了一定的研究成果,但是在农业采摘领域至今尚未出现能够商品化应用的绳驱柔性采摘机械手,其中机构仿生优化设计、准确理论建模、鲁棒运动控制等技术需进一步突破,以适应农业领域非结构化环境的技术要求。

为了深入研究绳驱柔性机械手在农业采摘领域的应用,本研究首先对目前绳驱柔性机械手的理论研究和应用工作现状进行阐述,详细介绍绳驱柔性机械手在农业采摘领域应用的意义及研究现状,总结其在农业采摘领域应用涉及的关键技术,指出目前绳驱采摘机械手存在的问题和不足,并对其未来的研究方向提出展望。

1 绳驱柔性机械手的理论研究

绳驱柔性机械手利用绳索的柔弹性解决了传统刚性机械手柔顺性不足的问题[10],同时又解决了纯软体机械手抓取力不足的问题[11],故其在肢体康复、灵巧抓取、农业采摘等任务中具有广阔的应用前景。近年来,国内外研究人员对绳驱柔性机械手的设计、建模及控制理论等进行了深入研究,并取得了一定的成果。

1.1 绳驱柔性机械手的设计

随着 20 世纪末嵌入式系统的发展,绳驱机械手向着高度集成化和丰富感知的方向发展,进入了一个快速发展的阶段。美国国家航空宇航局设计了一种用于空间操作的拟人化机械手 Robonaut Hand,如图 1(a)所示[12]。该机械手由前臂、腕部和 12 个自由度的 5 指组成,基础关节通过丝杆组件与绳索进行动力传递,使得结构更紧凑。美国爱荷华大学的 POTRATZ 等人[13]设计了一种弹簧与绳索混合驱动的机械手,实现了高自由度和轻质柔顺性,如图 1(b)所示。其每个关节接头由一个弯曲机构组成,该机构通过绳索和导管系统在轴向和横向上对压缩弹簧进行加载,实现手指弯曲。但该研究由于自身结构原因抓取力太小,难以实现负重抓取任务,同时尚未考虑变形过程中绳索与导管的摩擦以及与物体的接触力。德克萨斯大学达拉斯分校的 WU 等人[14]设计了一种基于扭曲和卷曲聚合物人工肌肉结合腱绳驱动的仿生人手,如图 1(c)所示。该研究实现了动力直接传动,无须中间机械结构,使得结构更紧凑。但是该机械手的局限性也比较明显,效率和抓取频率较低。

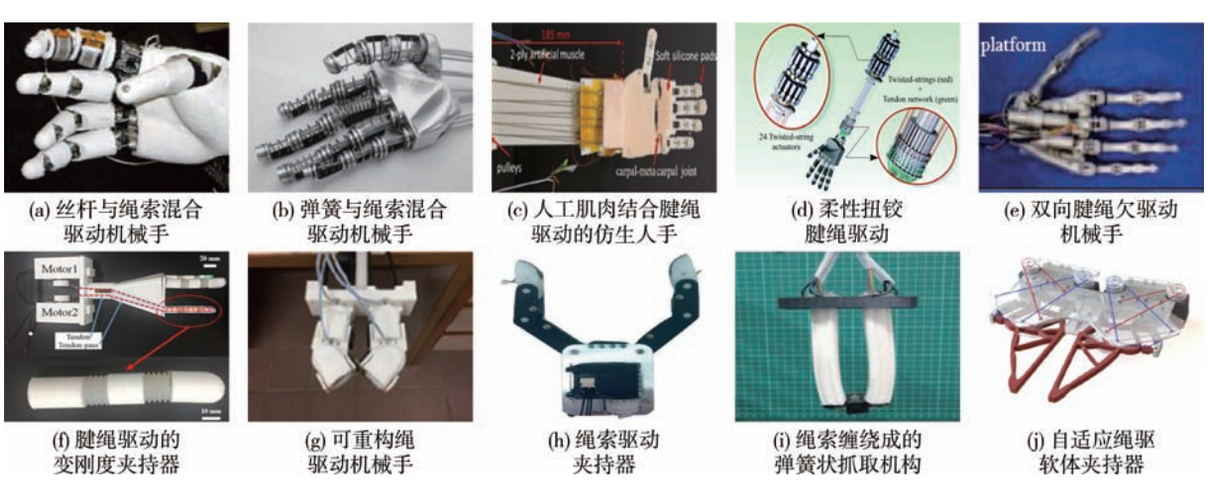


图 1 绳驱柔性机械手设计样机

Figure 1 Design prototype of cable-driven flexible manipulator

意大利博洛尼亚大学的 PALLI 等人[15]提出一种柔性扭铰腱绳驱动系统,该系统的马达和腱绳直接连接,省去了齿轮箱、滑轮或滚珠丝杠等中间机构,实现从旋转运动到线性运动的直接转换,极大减少了摩擦,如图 1(d)所示。但该研究还未对该系统的传动效率进行评估。2016 年,该研究团队讨论了扭绞腱绳与滑动

面接触的模型，通过试验分析了输入输出系统响应特征，但尚未对系统行为进行表征[16]。该研究的腱绳不能与任何障碍物接触，一旦接触将改变沿着腱绳的扭转角度，并最终完全停止腱绳的扭转。意大利比萨大学的WISTE等人[17]设计了一种双向腱绳欠驱动5指机械手，如图1(e)所示。该机械手增加单刚体结构减少了零件数，通过串联弹性致动实现低抓握阻抗。

韩国鲜文大学的HAM等人[18]设计了一种腱绳驱动的变刚度夹持器，如图1(f)所示。通过改变腱绳长度实现夹持器的变刚度。但是该研究无法测量夹持器的力，为了改进可变刚度夹持器，可在夹持器的末端嵌入压力传感器，以测量夹持力进而实现主动控制和优化夹持力。

新加坡国立大学的LI等人[19]提出了一种模块化、可重构的绳索驱动机械手，用于在非结构化环境中抓取各种未知物体，如图1(g)所示。该机械手的创新在于采用类似乐高的模块化设计功能和可重新配置的柔性关节。机械手的长度可以通过添加或移除由磁铁连接的类似乐高的手指模块来任意改变，而无需重新布线。机器人抓取器的形状和自由度可以通过使用嵌入式离合器改变关节的状态来调整。

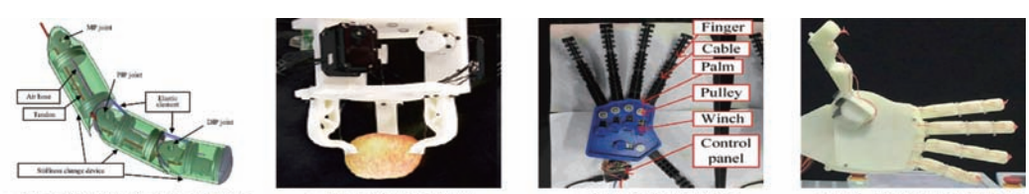
中国的DONG等人[20]提出了一种基于遗传算法的夹持器尺寸和绳索路径设计优化方法，以实现稳定的抓取性能，如图1(h)所示。哈尔滨工业大学的TANG等人[21]利用钓鱼线或缝纫线卷绕成弹簧状结构，该结构具有各向异性，加热后会解开产生扭矩，恢复的扭矩转化为拉伸变形，如图1(i)所示。这是一种集驱动与传动于一体的新型机构。该机构的最大握持重量取决于驱动力，而驱动力与其温度呈正相关。目前仍然存在的问题有：一是滞后现象；二是散热问题；三是串扰。WANG等人[22]通过考虑几何非线性的拓扑优化方法开发了一款多输入多输出的自适应绳驱软体夹持器，如图1(j)所示。通过仿真和试验评估了该夹持器的性能，但是尚未解决每个自由度之间的耦合位移抑制问题。

尽管上述研究设计了不同种类的绳驱机械手，适应不同的应用场景和操作对象，但是对于非结构化环境的农业机械化无损采摘领域，这些机械手还存在一定的不足，比如连杆与绳索混合驱动机械手的柔顺性不足、二指夹持器无法实现包络抓取等。

1.2　绳驱柔性机械手的建模

日本关西学院大学的NAGASE等人[23]设计了一款变刚度气动腱绳驱动软体机械手，如图2(a)所示。该机械手通过调节输入压力实现对不同任务目标的抓取。意大利的GIORELLI等人[24]对绳索驱动非恒定曲率机械手的逆动力学问题进行了研究，提出了一种神经网络方法研究在三维空间中运动的柔性机械臂的逆动力学，通过该方法建立了机械手末端位置和施加到绳索上的力之间的映射关系。但是该研究还没有通过物理试验验证其有效性。新加坡国立大学的CHEN等人[25]基于水平集的拓扑优化方法开发了一种软绳驱夹持器，如图2(b)所示。该夹持器采用压力载荷和摩擦牵引的形式对夹持器和物体之间的相互作用进行了建模，研究了相互作用的不确定性如何通过改变接触位置和面积来影响优化解。但该夹持器能够承受的最大重量是1 kg，这对于农业领域的葡萄串果采摘等远远不够。WU等人[26]建立了绳索驱动软体夹持器的运动学和动力学模型，并进行仿真分析和有限元分析。该研究在建模时将软体夹持器看成由若干个柔性单元组成的平面绳索驱动连续机械手，如图2(c)所示，该研究忽略了绳索的弯曲刚度、重量和摩擦力。CHEN等人[27]研究了一种双向弹性被动传动绳索驱动机械手，如图2(d)所示。基于能量守恒定律建立了该绳驱机械手的半静态模型，分析其机械特性，并对机械手的抓取特性进行了动力学仿真。尽管该机械手在价格、重量、夹持力和夹持速度上有比较大的优势，但是没有解决手指的自由度耦合问题，导致一些复杂操作任务无法完成。

上述研究对绳驱机械手的运动学、动力学和力学模型都进行了深入研究，对模型的有效性进行了仿真验证，部分开展了物理样机试验。但是建模时尚未考虑农业采摘领域中面临的机械手与采摘对象动态交互的耦合问题，尤其是串果采摘时，由于流窜变形其耦合问题更加突出。



(a)气动腱绳混合驱动机械手　(b)绳驱柔顺夹持器　(c)绳驱软体机械手　(d)双向弹性绳驱机械手

图2　绳驱柔性机械手建模样机

Figure 2　Modelling prototype of cable-driven flexible manipulator

1.3 绳驱柔性机械手的控制

绳索驱动方式具有很显著的特征:绳索只能承受拉力,不能承受压力。这一特性使得绳驱机械手的控制要比其他驱动方式的机器人更具有挑战性。关于绳驱柔性机械手的控制问题,北京航空航天大学的王国庆等人[28]提出了一种绳驱灵巧手的位置/力反馈控制方法,实现非线性情况下灵巧手的稳定抓持。通过仿真验证了方法的有效性和可行性。但未对该方法进行试验验证。哈尔滨工业大学的何平等人[29]针对HIT-1型手建立了两自由度基关节的力矩和位置反馈控制系统,通过PID控制方法实现了基关节在约束条件下的力矩控制和自由空间的位置控制。FIROUZEH等人[30]提出了一种具有可调刚度关节的绳索驱动机械手。通过具有可调节刚度的聚合物层独立控制每个关节的刚度实现控制不同关节之间的输入能量分布,从而控制机械手的运动。GAO等人[31]通过层干扰技术和绳索驱动执行器结合开发了一种新型变刚度柔顺机械手。通过大量测试试验数据建立了单指刚度的指数控制模型,验证了机械手的刚度和夹持力。该工作没有考虑层堵塞的驱动力,因此难以实现对机械手的精确控制。QIAO等人[32]通过动能定理和拉格朗日动力学方法,对3自由度欠驱动绳驱机械手进行了简化,建立了一般的动力学模型,根据索力耦合特性设计了预弯曲阶段的3种抓取控制策略,通过仿真和试验验证了控制方法的有效性。当两个电机同时驱动绳索时,预弯曲阶段的抓取控制方法有多种,通过优化算法找出运动时间最短或功耗最低的方法可能才更有意义。

尽管上述研究采用的控制策略能够实现绳驱机械手的抓取任务,但是其控制精度还无法满足农业采摘领域中稳定抓持的要求。果蔬采摘不仅要综合考虑目标果实的空间形状、位姿、重量、软硬度等因素进行稳定抓持,以保证所摘取的果实不滑落,同时还需要考虑果实的损坏问题。农业采摘中有些果蔬由于果实娇嫩极易因为抓持力控制不当导致果粒脱落或压损,因此对抓持力的控制精度要求比较高,需要实时监测机械手与采摘目标动态交互的接触力,提高绳驱采摘机械手的防破损耦合能力。

2 绳驱柔性机械手的典型应用

2.1 肢体康复

韩国首尔国立大学的JEONG等人[33]设计了一种绳索驱动的可穿戴机械手进行力量训练,解决了传统外骨骼由于庞大机械结构引起的穿戴不方便问题。但由于结构的限制,索力不能准确反映关节扭矩的总和,手腕和手臂的运动会引起索力的扰动,需要解决变形建模和结构优化设计问题。2015年,该研究团队通过松弛使能机制提高腱绳系统的效率并保证其安全性。该研究所提出的机制消除了预张力,并最小化了由预张力引起的摩擦[34]。但是该研究需要布置多个线轴,控制系统变得复杂。KAZEMINASAB等人[35]对形状记忆合金和欠驱动绳索驱动系统耦合的可穿戴手套在不同模式下的控制方法进行了研究。在理疗模式中,控制手的运动频率,而在物体操纵模式中控制抓握力的大小。研究结果表明该机械手可以以准确的轨迹弯曲和伸展手指,并有效地抓住物体。尽管提出的简单控制策略在实际应用中可能是有效的,但开发同时进行位置和力控制的方法可以提高机械手在更复杂任务中的性能。

肢体康复领域中的研究成果可为农业采摘领域中绳驱机械手的结构优化设计、绳索的松弛迟滞问题提供了理论参考。

2.2 灵巧操作

绳驱机械手在灵巧操作方面的开发应用比较广泛。最早的是日本研发的Okada灵巧手,如图3(a)所示[36]。该机械手由1个3自由度的拇指和2个4自由度的手指组成,通过电机驱动绳索传递运动和动力。该机械手体积较小,抓取力不大。尽管该研究实现了抓取力恒定的抓取任务,但未对力的传递关系进行深入讨论。美国犹他大学生物医学设计中心和麻省理工学院人工智能实验室联合开发了Utah/MIT灵巧手,如图3(b)所示[37],该机械手由4个手指组成,每个手指都具有4个自由度,利用2N型绳驱系统进行运动和动力的传递,但该机械手的驱动器数量高达32个。该研究设计了整个系统的硬件和控制系统,但未对绳驱动系统的技术进行深入的研究。与Okada灵巧手相比,Utah/MIT灵巧手的控制变得更复杂。接着,美国斯坦福大学成功研制了Stanford/JPL灵巧手,如图3(c)所示[38]。该机械手由3个手指组成,分别具有3个自由度,通过N+1型绳驱系统进行运动和动力的传递。相比前两款灵巧手,该机械手的灵活性有较大的提高。这是早期最典型的灵巧手,是机械手仿人化、智能化发展的基础。随着传感器技术、新材料的高速发展,灵巧手的性能也得到了很大改善。2004年英国Shadow机器人公司研发了一款仿人机械手Shadow,如图3(d)所示[39],该机械手具有5个手指,19个自由度,通过绳索传动运动和动力实现对易碎品的抓取。同时该机械手通过压力传感器、位置传感器和触觉感应装置实现精准控制。美国德克萨斯大学的DESHPANDE等人[40]为了了解人手的内在生物力学和控制特征,搭建了假

手试验台模仿人手的抓握和操纵技能，如图3(e)所示。该假手通过腱绳驱动，可实现对毛巾、眼镜、矿泉水瓶、勺子、卡片等物品的稳定抓取。意大利理工学院微型生物机器人中心的MISHRA等人[41]设计了一种模块化、可重新配置、腱绳驱动的机械手，该机械手具有一定柔顺性，实现不同形状和大小物体的抓取。该研究设计的手指相邻指节间位移较大，难以实现弧面包络夹持。



(a)Okada灵巧手　(b)Utah/MIT灵巧手　(c)Stanford/JPL灵巧手　(d)Shadow机械手　(e)绳驱仿生手

图3　灵巧操作的绳驱机械手

Figure 3　Cable-driven robotic in the field of agile operation

3　绳驱柔性机械手在农业采摘中的应用分析

3.1　绳驱机械手在农业采摘中的意义

2022年，我国水果生产总量已达299 702 kt[42]，然而目前我国水果收获基本靠人工采摘，采摘劳动量约占果实生产总劳动量的40%[43-44]，劳动强度大且成本高。机械化采摘既能提高采摘效率，又能缓解人口老龄化加剧和劳动成本攀升带来的劳动力缺失问题。但现有的机械化采摘极易造成果实损伤，损伤率高达30%[45]。因此，果实无损机械化采摘成为当前我国农业生产亟待解决的难题[46-47]。

水果采摘主要是通过稳定抓持果实和精准切割果梗来完成[48]，实现无损机械化采摘需要综合考虑目标果实的空间形状、位姿、重量、软硬度等因素进行稳定抓持，以保证所摘取的果实不滑落、不压损[49]。由于果实形态各异、娇嫩易损等原因使得采摘过程具有极强的非线性，极易因为采摘机构抓持力控制不当导致果实掉落或压损[50]。但是目前大多数研究开发的采摘机械手刚性强、质量重，严重影响无损采摘的适应性和柔顺性[51]。因此，要想突破该难题，需要提高采摘目标和采摘机械手之间的适应性和柔顺性。

绳驱并联柔性机械手具有柔顺性强、运动惯性小、可重构、响应速度快等特点，其驱动绳索的柔弹性为采摘作业提供了一定的适应性和柔顺性[52]，能够实现采摘目标与机械手安全的动态交互，提高采摘目标与机械手的防破损耦合能力[53]。因此，绳驱柔性机械手在农业采摘中得到了重点关注，成为研究的热点。

3.2　绳驱采摘机械手的国内外研究现状

农业采摘中的机器人跟结构化环境下的工业机器人不同，其作业环境具有不确定性、非结构化的特点。同时果实外表皮脆弱易损，对直接与果实接触的采摘机械手要求更严格，既要满足稳定抓持又不能损伤果实[54]。为实现采摘机器人高效精准作业，与生物友好交互的轻量化柔性末端执行机构是急需重点突破的关键理论技术之一[55]。由于绳驱并联柔性机械手具有良好的柔顺性和适应性，在农业采摘中得到了一定的应用。国内外不少研究人员对其进行了深入研究，取得了一系列有代表性的成果。

3.2.1　番茄采摘

番茄采摘是一项需要选择性收割的特殊作业，其要在不破坏其他果实、茎叶等情况下采摘成熟的果实。由于番茄的花序梗很短，果实形成紧密的簇状花序，目标水果周围的相邻水果都有可能是机器人采摘过程中的障碍物。假如采用刚性的机械手进行采摘，很大可能会损伤相邻的果实和茎叶。而单纯采用吸盘分离目标果实又有可能因为花序梗太短而无法抓住果实。因此，设计柔性采摘末端执行器既能够稳定抓持果实又不损坏相邻果实，这对番茄机械化无损采摘十分重要。MONTA等人[56]设计了一种番茄采摘机械手，该机械手由4个等距分布的柔性指状物和1个硅吸盘组成[56-57]。每个指状物由四根中空管组成，通过柔性绳索串联，如图4(a)所示。每个手指通过空心管里的绳索驱动，拉动绳索，所有手指向彼此弯曲，当手指完全打开时可以实现最大直径60 mm的抓取范围。该机械手的绳索收放动作是通过直流电机和齿轮来回驱动。同时，为了防止采摘过程中损坏果实或打滑，机械手的手指内侧还铺设了5 mm厚的橡胶垫。机械手靠近果实前，先通过吸盘将目标果实挑选出来，机械手再前进稳定抓取果实。经测试，该机械手的果实收获率是78%，对于需要高效率连续作业的果实采摘来讲，这个收获率是偏低的。机械手对于过熟或者未熟的果实没有成功采摘，过熟的果实由于太软无法稳定抓取，未熟的果实由于果茎附着力太大而机械手自由度太少导致无法分离。因此，该作者认为为了提高采摘成功率，需

要开发具有足够自由度和能够检测果实成熟度的机械手。随着技术的发展,美国俄亥俄州立大学的LING等人[58]开发了一套由视觉检测单元、机械手采摘单元、真空抽吸单元和控制模块组成的番茄智能收割系统,如图4(b)所示。采摘机械手通过远端指骨的绳索提供驱动手指所有关节所需的力。结合扭矩弹簧,实现了手指自由弯曲伸展。该收割系统在文献[56]的真空抽吸加机械手抓取双重保障思想基础上增加了视觉检测单元和控制单元,使采摘过程更加自动化。为了更好地控制机械手,机械手的指状物由方形和矩形管组成以限制其横向运动。经过试验验证,视觉检测单元能够有效地识别重叠和遮挡的番茄,采摘机器人的视觉识别成功率达到95%以上,采摘成功率达到85%以上。该研究果实定位和收获成熟番茄的能力方面达到了设计要求,但是采摘和放置一个番茄的循环时间约为3 min 47 s,包括机器视觉所需的时间,可见采摘效率方面有待提升。

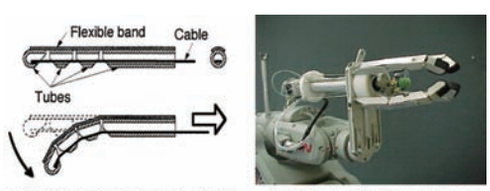


图4 绳驱番茄采摘机械手

Figure 4 Cable-driven tomato picking robot

YESHMUKHAMETOV等人[59-60]提出一种具有可变骨架刚度和柔顺万向节的离散超冗余绳索驱动仿生连续体机器人TakoBot,如图5所示。

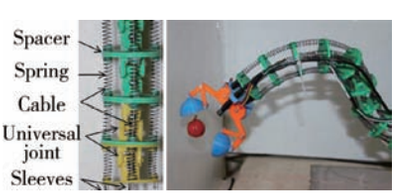


图5 超冗余绳驱连续体采摘机器人

Figure 5 Super redundant cable-driven continuous picking robot

该连续体机械臂由塑料垫片通过柔顺万向节连接。4根绳索穿过各个弹簧内通过绳索的收放运动启动机器人。通过将机械臂离散为n个带有万向节旋转轴的节段进行运动学和动力学建模,建立了抓取力的映射模型。由于该机械臂能够在有限的工作空间内进行高效安全的作业,非常适合农业采摘领域,通过改变不同的末端执行器就能够适应不同的农作物采摘,因此,该研究团队在绳驱连续体机械臂的基础上设计了一种具有被动茎秆切割机构的末端抓取工具,变成番茄收割机器人。通过试验证明TakoBot机器人在狭窄的工作空间具有高可行性。当有障碍物时,机械臂需要花更多的时间来适应新的约束环境并到达采摘点。测试发现,番茄收获过程平均耗时56 s,与人类手工采摘相比较慢。如何提高机器人的采摘效率是仍然是一个挑战,优化机器人的大小和控制算法可能是一个改进的方向。因此,该团队认为通过实现预测控制方法的非线性模型和收集数据来优化机器人轨迹,使机器人更快适应新的环境,并改进控制算法。

3.2.2 苹果采摘

苹果采摘的特殊性在于其树干高大,果实远离地面,人工采摘面临着坠落危险,因此,机械化采摘成了一个亟待解决的问题。

为了降低人工成本和对季节性劳动力的依赖,针对苹果采摘,美国华盛顿州立大学精密与自动化农业系统中心的SILWAL等人[61]设计了一种腱绳驱动的欠驱动3指苹果采摘末端执行器,如图6(a)所示。通过引入欠驱动实现对不同尺寸苹果的自适应抓取。该机械手在手掌和手指连接处增加了软聚氨酯垫,最大限度地减少水果擦伤,同时增加抓握过程中的摩擦力,提高抓取的稳定性。当绳索松弛不产生张力时,通过近端关节中的扭转弹簧实现复位。经测试,该机器人系统的苹果识别率达到100%,每个苹果平均定位时间为1.5 s,平均采摘时间为6 s,采摘成功率为84.67%。由于该末端执行器不包含任何传感器,采用纯开环的前馈控制,因此试验中存在无法避开障碍物问题。提高采摘效率需要增强系统的鲁棒性,尤其是在末端执行器上增加视觉传感和力传感以反馈抓取状态的情况下进行障碍物检测,显得尤为重要。

华盛顿州立大学机械与材料工程学院的DAVIDSON等人[62]针对苹果采摘设计了一种欠驱动的绳索驱动末端执行器,能够自适应抓取多个苹果品种,如图6(b)所示。其实现自适应抓取的关键是执行机构导螺杆上的滑动装置,通过设计一个固定在导螺杆移动螺母上的连接所有绳索的压缩弹簧,实现3根手指的渐进式抓取。与苹果接触的第1根手指的绳索开始压缩弹簧,当弹簧完全压缩时,弹簧将成为刚性连杆。致动器可以继续移动直到剩下的两根手指抓住苹果。同时,针对机器人选择性采摘面临的速度和鲁棒性不足的问题,通过对采摘机构的运动学进行理论分析并确定关键几何参数。通过设计了开环控制和闭环反馈控制对比试验,证明了该末端执行器具有速度快,复杂性低、球形法向抓取力最优的特点,能够适用于高度可变的田间环境,最大限度地降低果实损伤[63]。



(a)绳驱三指苹果采摘机械手　(b)欠驱动的绳驱末端执行器

图 6　绳驱苹果采摘机器人

Figure 6　Cable-driven apple picking robot

3.2.3　草莓采摘

草莓是一种很容易损坏和擦伤的高价值水果，高效可靠的选择性机械化采摘草莓是很困难的。草莓的市场销售量持续增长，然而其采摘又严重依赖人力，成本非常高。为了降低生产成本和解决传统草莓采摘机械手结构庞大的问题，挪威生命科学大学的XIONG等人[53]设立了一种具有感知能力的非接触式的绳索驱动草莓采摘器，如图7所示。



(a)绳索驱动的草莓采摘机械手　(b)草莓采摘机械手的内部结构

图 7　绳驱草莓采摘机械手

Figure 7　Cable-driven gripper for strawberry picking

该采摘器由6个手指组成，张开后形成一个封闭空间，可以吞下目标草莓并将周围的其他果实推离。为了实现目标精确定位，该采摘器配备了3个红外传感器，通过控制机械臂来提高定位精度。为了实现远程驱动和具备足够大的存储空间，该采摘器采用柔性绳索驱动手指，电机可以安置在远离手指的地方。手指由驱动绳索打开，由扭力弹簧关闭。为了计算手指的位置和刀具角度，该作者还进行了运动学建模与分析。经过自然环境中的草莓采摘测试，该系统采摘一个草莓的平均时间为10.62 s，而无损采摘草莓的成功率仅为53.57%，系统成功率可能受限于障碍物、采摘器可达工作空间、动态干扰等。而采摘器的主要挑战是在密集的草莓丛中采摘，其手指容易被枝叶或未熟的草莓遮挡，无法吞下成熟的目标草莓。为了解决上述问题，该研究团队在此基础上增加了视觉系统对目标草莓进行检测与定位，同时设计了采摘序列规划对多个果实位置进行从低到高排序[64]。经过测试，采摘草莓的平均时间和成功率没有变化，原因在于视觉系统对于簇状草莓的分割比较困难，造成重复检测或者未被检测，导致采摘器吞咽失败。

未来需要研究更先进的视觉算法，合并对多个帧的检测，实现从不同角度检测到被遮挡的草莓。为了解决文献[53]和[64]中的障碍物问题，实现非结构化环境下的连续采摘作业，该团队进一步提出了一种障碍物分离路径规划算法，该算法可以成功收获被其他草莓、树叶和其他障碍物包围的草莓。然而，在现场测试中，该系统无法选择完全被障碍物包围的目标。主要是由视觉系统的局限性和夹持器的灵活性不足引起的。但是跟以前的系统相比，采摘速度有所提高，单臂模式下采摘仅需6.1 s，双臂模式下仅需4.6 s[65]。

3.2.4　黑莓采摘

黑莓富含抗氧化剂，对健康有促进作用，近年来其市场需求量不断上升，但其人工采摘劳动量占了总耗时的50%，人工成本非常高。而黑莓非常娇嫩，极易因为抓持力不当导致果汁渗漏。为了实现黑莓的机械化无损采摘，美国佐治亚理工学院生物医学工程系的GUNDERMAN等人提出一种带有主动接触力反馈控制模块的绳索驱动软体夹持器，通过夹持器的被动顺应性实现对黑莓的无损采摘，如图8所示[66]。腱绳驱动使机械手比气动或液压驱动的软体机器人结构更紧凑。腱绳的收放运动由指尖的柔性电阻力传感器和运算放大器的反馈进行主动控制，确保超过生物人手的一致性。试验表明，绳驱软夹持器的夹持力可以低至0.5 N，每颗黑莓在约4.8 s的收获速率下保持95.24%的收获可靠性。



(a)绳驱软体手指内部组件　(b)绳驱软体黑莓采摘机械手

图 8　绳驱软体黑莓采摘机械手

Figure 8　Cable-driven soft gripper for blackberry picking

尽管研究人员对番茄采摘、苹果采摘、草莓采摘、黑莓采摘的绳驱柔性机械手进行了深入研究，取得了一定的成果[67]。但是真正能够大规模工程化应用的仍然鲜有报道，说明绳驱柔性采摘机械手离工程化应用还存在一定的距离，绳驱采摘机械手与当前其他的农业采摘机械手的对比如表1所示。综上可知，绳驱柔性机械手要实现果蔬机械化无损高效采摘，其关键技术包括具有触觉感知能力和高灵活性的末端执行机构优化设计技术、采摘目标高精度定位和识别技术、合理的采摘序列规划技术。

表1 不同类型的采摘机械手相关特性比较

Table 1 Comparison of relevant characteristics of different types of picking manipulator

性能参数	类型		
	刚性机械手	气动软体机械手	绳驱柔性机械手
结构特点	刚度高、笨重	刚度低、较笨重	可变刚度、轻量化
自由度	少	无限多	多
柔顺性	低	高	高
灵活性	低	较高	高
安全性	低	高	高
工作环境	结构化	结构化和非结构化	结构化和非结构化
建模难易	容易	困难	较容易
控制难易	容易	不易	较容易
传动效率	高	低	较高
操作对象	固定尺寸	可变尺寸	可变尺寸
输出力	大	小	可变

4 存在问题

到目前为止,绳驱柔性机械手已经得到了广泛的开发和应用。针对特定应用场景,一些基本问题,比如机构优化设计、运动学建模、运动控制等已经通过许多不同的方法得到了解决。然而,由于农业环境和作业对象的非结构化特性使得果蔬无损采摘受到果蔬形状、姿态、重量、成熟度、表面材料等几何物理参数及采摘速度、加速度等多种因素影响,要获得良好的抓取力是个挑战性问题,当抓取簇状作物时,比如葡萄、蘑菇等,由于密集成族产生流窜变形,抓取变得更加复杂。因此,农业采摘领域对末端执行机械手的要求更高,而现有的样机仍存在一定的局限性,距离商业化应用还有一定的距离,主要存在以下几方面的问题:

1)采摘准确度不高。农作物存在枝叶遮挡、簇状果实遮挡问题,即使果实被成功识别与定位,但是由于采摘路径的限制导致机械手无法靠近目标果实进行采摘。另外,不规则的种植方式使得果实的分布远近不同、高低不一,有些果实不在机械手的工作范围内,导致无法开展采摘作业。这些问题都会导致采摘作业准确度不高,甚至采摘失败。

2)通用性差、成本高。目前开发的采摘机械手都是针对单一的果实,而农业采摘具有季节性,如果单一的机械手利用率不高、通用性差,就会导致制造和运行成本偏高。

3)造成损伤。大部分的果实娇嫩易损,机械手采摘过程中可能会碰伤相邻成熟或未成熟的果实、可能会因为抓取力控制不当导致果实脱落或压损、可能会拉伤枝干等。

4)采摘效率低下。采摘效率是衡量农业机械化作业的一个重要指标。目前开发的机械手采摘效率跟不上人工的采摘效率,这个与机械手结构、采摘规划、控制方法等都有关系。

5 发展趋势

针对目前绳驱柔性机械手在农业采摘领域应用存在的问题,未来研究的重点应该围绕以下几点开展:

1)农机农艺协同。农业采摘的非结构化环境使得机械化无损采摘难度大,对采摘机械手的要求也更高。因此,今后的农业种植可以考虑机械化采摘的作业要求,进行枝叶修剪、树墙种植,减少枝叶遮挡,让果实尽可能暴露于同一侧,有利于绳驱柔性机械手对目标果实进行稳定抓持。通过农机农业协同,将非结构化环境转为结构化作业环境,提高采摘效率,推动农业机械化无损采摘的发展。

2)模块化、可重构设计。目前农业采摘领域开发的末端执行器是针对特定的果实种类,功能单一、通用性不强、移植性不高,导致开发成本高、周期长。为了提高设备的扩展性,对末端执行器进行模块化、可重构设计,通过更换末端执行器和识别算法就能用于不同的果蔬,提高农业装备的利用率,大大降低生产成本。

3)提高末端执行器的交互安全性。末端执行器的目标是实现果实准确采摘而不损坏作业对象,因此其应该具有一定的柔顺性和灵巧性,提高采摘过程的防破损耦合能力。未来绳索驱动方式与软体材料相结合的变刚度采摘机械手,可以提高采摘机械手与目标果实动态交互的安全性。

4)多传感器融合。目前安装在采摘机械手上的传感器主要有力觉传感,而单一传感器具有局限性,未来可以将力觉、触觉、滑觉、视觉等多种传感器集成到绳驱机械手上,增强机械手的智能感知能力和环境适应能力,既能提高识别与定位精度,又能实现抓取力的精确控制,确保果实无损采摘。

5)合理的采摘序列规划与强鲁棒控制策略。实现生物人手的灵巧无损采摘是农业机器人研究的重要目标。目前开发的绳驱机械手未能够达到这个目标,未来采用机器视觉和深度强化学习相结合的方法进行任务的学习建模,并运用数学的方法加以描述,是进行无损采摘序列规划与控制的基础。

6　结论

农业采摘作业是一项劳动密集型、季节性强的工作，因此急需实现果蔬机械化无损智能采摘。本研究对绳驱柔性机械手的设计、建模和控制等理论研究进行了深入分析，对肢体康复和灵巧操作等典型应用进行了阐述，对绳驱柔性机械手在农业采摘领域的应用意义和研究现状进行了综述，指出目前绳驱柔性机械手在机构优化设计、定位与识别、采摘规划等方面还有待提高，针对存在的问题提出了建议，以期为绳驱柔性机械手在农业采摘领域的后续研究提供参考，加快其关键技术的创新发展，实现绳驱柔性采摘机械手的商业化应用，解决目前劳动力短缺的问题，促进我国农业机械化的发展。

同时，绳驱柔性机械手还可以应用于其他潜在领域，如长距离传动要求的微创手术操作、狭小空间的管道操作、弯曲变形的连续体机器人等。因此，绳驱驱动柔性机械手将引起不同领域研究人员的更多关注，并得到相应领域的更多应用。

参　考　文　献

[1] LANGOWSKI J K A, SHARMA P, SHOUSHTARI A L. In the soft grip of nature [J]. Science Robotics, 2020, 5 (49): 1－3.

[2] KANEKO M, PAETSCH W. Input-dependent stability of joint torque control of tendon-driven robot hands [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 1992, 39 (2): 96－104.

[3] MANTI M, HASSAN T, PASSETTI G, et al. A bioinspired soft robotic gripper for adaptable and effective grasping [J]. Soft Robotics, 2015, 2(3): 107－116.

[4] TAN N, GU X Y, REN H L. Design, characterization and applications of a novel soft actuator driven by flexible shafts [J]. Mechanism and Machine Theory, 2018, 122: 197－218.

[5] ZHANG P, CHEN W C, TANG B. From two-dimensional to three-dimensional: Diversified bending modality of a cable-driven actuator and its grasping characteristics [J]. Soft Robotics, 2022, 9(6): 1154－1166.

[6] DONG H, ASADI E, QIU C, et al. Grasp analysis and optimal design of robotic fingertip for two tendon-driven fingers [J]. Mechanism and Machine Theory, 2018, 130: 447－462.

[7] CAMARILLO D B, MILNE C F, CARLSON C R, et al. Mechanics modeling of tendon-driven continuum manipulators [J]. IEEE Transactions on Robotics, 2008, 24 (6): 1262－1273.

[8] PU S W, CHANG H T, CHANG J Y. Modeling and development of tension force measurement system for cable-driven hand exoskeleton robot [C]//2015 IEEE International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics, 2015.

[9] MIN S, YI S. Development of cable-driven anthropomorphic robot hand [J]. IEEE Robotics and Automation Letters, 2021, 6(2): 1176－1183.

[10] BACKUS S B, DOLLAR A M. An adaptive three-fingered prismatic gripper with passive rotational joints [J]. IEEE Robotics and Automation Letters, 2016, 1 (2): 668－675.

[11] ABEACH A, NEFTI M S, DAVIS S. Design of a variable stiffness soft dexterous gripper [J]. Soft Robotics, 2017, 4(3): 1－11.

[12] LOVCHIK C S, DIFTLER M A. The robonaut hand: A dexterous robot hand for space [C]// Proceedings 1999 IEEE international conference on robotics and automation (Cat. No. 99CH36288C). IEEE, 1999, 2: 907－912.

[13] POTRATZ J, YANG J Z, ABDEL-MALEK K, et al. A light weight compliant hand mechanism with high degrees of freedom [J]. Journal of Biomechanical Engineering, 2005, 127: 934－945.

[14] WU L J, ANDRADE M J, SAHARAN L K, et al. Compact and low-cost humanoid hand powered by nylon artificial muscles [J]. Bioinspiration and Biomimetics, 2017, 12(2): 026004.

[15] PALLI G, NATALE C, MAY C, et al. Modeling and control of the twisted string actuation system [J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2013, 18 (2): 664－673.

[16] PALLI G, HOSSEINI M, MELCHIORRI C. Twisted string actuation with sliding surfaces [C]// 2016 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, Daejeon, Korea, 2016: 260－265.

[17] WISTE T, GOLDFARB M. Design of a simplified compliant anthropomorphic robot hand [C]// 2017 IEEE International Conference on Robotics and Automation, Singapore, 2017(1): 3433－3438.

[18] HAM K, HAN J, PARK Y J. Soft gripper using variable stiffness mechanism and its application [J]. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing, 2018, 19(4): 487－494.

[19] LI C, GU X, REN H. A cable-driven flexible robotic grasper with lego-like modular and reconfigurable joints [J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2017, 22 (6): 2757－2767.

[20] DONG H, ASADI E, QIU C, et al. Geometric design optimization of an under-actuated tendon-driven

robotic gripper [J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2018, 50: 80－89.

[21] TANG X T , LI K, LIU Y X, et al. A general soft robot module driven by twisted and coiled actuators [J]. Smart Materials and Structures, 2019, 28(3): 035019.

[22] WANG R X, ZHANG X M, ZHU B L. Topology optimization of a cable-driven soft robotic gripper [J]. Structural and Multidisciplinary Optimization, 2020, 62(5): 2749－2763.

[23] NAGASE J-Y, WAKIMOTO S, SATOH T, et al. Design of a variable-stiffness robotic hand using pneumatic soft rubber actuators [J]. Smart Materials and Structures, 2011, 20: 105015.

[24] GIORELLI M, RENDA F, FERRI G, et al. A feed-forward neural network learning the inverse kinetics of a soft cable-driven manipulator moving in three-dimensional space [C]// IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, Tokyo, Japan, 2013: 5033－5039.

[25] CHEN F F, XU W J, ZHANG H Y, et al. Topology optimized design, fabrication and characterization of a soft cable-driven gripper [J]. IEEE Robotics and Automation Letters, 2018, 3(3): 2463－2470.

[26] WU Q, YI Z L, WANG H Q, et al. Design and experiment of a soft gripper based on cable-driven continuum structures [C]// Proceedings of the 2021 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics, December 27－31, 2021, Sanya, China.

[27] CHEN T R, ZHAO X W, MA G C, et al. Design of 3D-printed cable driven humanoid hand based on bidirectional elastomeric passive transmission [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2021, 34(1): 1－11.

[28] 王国庆, 张启先, 李大寨, 等. 基于抓持稳定度的多指灵巧手抓持控制[J]. 航空学报, 1997, 18(3): 294－298.
WANG Guoqing, ZHANG Qixian, LI Dazhai, et al. Grasping control of the dexterous hand based on the degree of stability of grasping [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 1997, 18(3): 294－298.

[29] 何平, 金明河, 刘宏, 等. 机器人多指灵巧手基关节力矩/位置控制系统的研究[J]. 机器人, 2002, 24(4): 314－318.
HE Ping, JIN Minghe, LIU Hong, et al. Study of position and torque feedback control system of multi-fingered dexterous robot hand [J]. Robot, 2002, 24 (4): 314－318.

[30] FIROUZEH A, PAIK J. Grasp mode and compliance control of an under-actuated origami gripper using adjustable stiffness joints [J]. IEEE-ASME Transactions on Mechatronics, 2017, 22(5): 2165－2173.

[31] GAO Y, HUANG X G, MANN I S, et al. A novel variable stiffness compliant robotic gripper based on Layer jamming [J]. Journal of Mechanisms and Robotics, 2020, 12(5): 051013.

[32] QIAO S, ZHANG L, LI B, et al. Coupled bending inwards motion and control strategy analysis of a cable-driven underactuated finger [J]. IEEE Access, 2021, 9: 133902－133913.

[33] JEONG U, IN H K, CHO K J. Implementation of various control algorithms for hand rehabilitation exercise using wearable robotic hand [J]. Intelligent Service Robotics, 2013, 6: 181－189.

[34] IN H, LEE H, JEONG U, et al. Feasibility study of a slack enabling actuator for actuating tendon-driven soft wearable robot without pretension [C]// IEEE International Conference on Robotics and Automation, Seattle, Washington, 2015: 1229－1234.

[35] KAZEMINASAB S, HADI A, ALIPOUR K, et al. Force and motion control of a tendon-driven hand exoskeleton actuated by shape memory alloys [J]. Industrial Robot-the International Journal of Robotics Research and Application, 2018, 45(5): 623－633.

[36] TOKUJI O. Computer control of multijointed finger system for precise object-handling [J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, 1982, 12 (3): 289－299.

[37] JACOBSEN S C, WOOD J E, KNUTTI D F, et al. The UTAH/MIT dextrous hand: Work in progress [J]. The International Journal of Robotics Research, 1984, 3(4): 21－50.

[38] MATTHEW T M, J. KENNETH S, JOEY K P. Robot hands and the mechanics of manipulation [M]. MIT Press, Cambridge, USA, 1985: 3－93.

[39] TUFFIELD P, ELIAS H. The shadow robot mimics human actions [J]. Industrial Robot: An International Journal, 2003, 30(1): 56－60.

[40] DESHPANDE A D, XU Z, WEGHE M, et al. Mechanisms of the anatomically correct testbed hand [J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2013, 18(1): 238－250.

[41] MISHRA A K, DOTTORE E D, SADEGHI A, et al. SIMBA: Tendon-driven modular continuum arm with soft reconfigurable gripper [J]. Frontiers in Robotics and AI, 2017, 4(4): 1－10.

[42] 中华人民共和国国家统计局. 2022 中国统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2022.

[43] 刘继展, 李智国, 李萍萍. 番茄采摘机器人快速无损作业研究[M]. 北京: 科学出版社, 2018.

[44] BAC C W, VAN HENTEN E J, HEMMING J, et al.

Harvesting robots for high-value crops: State-of-the-art review and challenges ahead [J]. Journal of Field Robotics, 2014, 31(6): 888－911.

[45] MALDERA F, VIVALDI G A, IGLESIAS-CASTELLARNAU I, et al. Two almond cultivars trained in a super-high density orchard show different growth, yield efficiencies and damages by mechanical harvesting [J]. Agronomy, 2021, 11: 1406.

[46] 孙凝晖, 张玉成, 石晶林. 构建我国第三代农机的创新体系[J]. 中国科学院院刊, 2020, 35(2): 154－165.
SUN Ninghui, ZHANG Yucheng, SHI Jinglin. Build innovation system of third generation of agricultural machinery in China [J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2020, 35(2): 154－165.

[47] 赵春江. 智慧农业发展现状及战略目标研究[J]. 智慧农业, 2019, 1(1): 1－7.
ZHAO Chunjiang. State-of-the-art and recommended developmental strategic objectivs of smart agriculture [J]. Smart Agriculture, 2019, 1(1): 1－7.

[48] VASCONEZ J P, KANTOR G A, AUAT CHEEIN F A. Humane-robot interaction in agriculture: A survey and current challenges [J]. Biosystems Engineering, 2019, 179: 35－48.

[49] RICHARD H. How robots are grasping the art of gripping [J]. Nature, 2018, 557(7704): 23－25.

[50] LUO L, TANG Y, ZOU X, et al. Vision-based extraction of spatial information in grape cluster for harvesting robots [J]. Biosystems Engineering, 2016, 151(11): 90－104.

[51] 吴剑桥, 范圣哲, 贡亮, 等. 果蔬采摘机器手系统设计与控制技术研究现状和发展趋势[J]. 智慧农业(中英文), 2020, 2(4): 17－40.
WU Jianqiao, FAN Shengzhe, GONG Liang, et al. Research status and development direction of design and control technology of fruit and vegetable picking robot system [J]. Smart Agriculture, 2020, 2(4): 17－40.

[52] 蔡世波, 陶志成, 万伟伟, 等. 机器人多指灵巧手的研究现状、趋势与挑战[J]. 机械工程学报, 2021, 57(15): 1－14.
CAI Shibo, TAO Zhicheng, WAN Weiwei, et al. Multi-fingered dexterous hands: From simplicity to complexity and simplifying complex applications [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2021, 57(15): 1－14.

[53] XIONG Y, PENG C, GRIMSTAD L, et al. Development and field evaluation of a strawberry harvesting robot with a cable-driven gripper [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2019, 157: 392－402.

[54] CERES R, PONS J L, JIMÉNEZ A R, et al. Design and implementation of an aided fruit-harvesting robot (Agribot) [J]. Industrial robot, 1998, 5(5): 337－346.

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

[56] MONTA M, KONDO N, TING K C. Harvesting end-effector for inverted single truss tomato production systems [J]. Journal of the Japanese Society of Agricultural Machinery, 1998, 60(6): 97－104.

[57] MONTA M, KONDO N, TING K C. End-effectors for tomato harvesting robot [J]. Artificial Intelligence Review, 1998, 13(1－3): 11－25.

[58] LING P P, EHSANI R, TING K C, et al. Sensing and end-effector for a robotic tomato harvester [C]// ASAE Annual International Meeting, 2004: 1－12.

[59] YESHMUKHAMETOV A, KOGANEZAWA K, YAMAMOTO Y. Design and kinematics of cable-driven continuum robot arm with universal joint backbone [C]// IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics. IEEE, 2018, December 12－15, 2018, Kuala Lumpur, Malaysia, 2444－2449.

[60] YESHMUKHAMETOV A, KOGANEZAWA K, BURIBAYEV Z, et al. Development of continuum robot arm and gripper for harvesting cherry tomatoes [J]. Applied Science, 2022, 12: 6922.

[61] SILWAL A, DAVIDSON J R, KARKEE M, et al. Design, integration, and field evaluation of a robotic apple harvester [J]. Journal of Field Robotics, 2017, 34(6): 1140－1159.

[62] DAVIDSON J R, MO C. Conceptual design of an end-effector for an apple harvesting robot [C]// Conference on Automation Technology for Off－Road Equipment (ATOE), Beijing, China. 2014, 18: 2021.

[63] DAVIDSON J R, MO C. Mechanical design and initial performance testing of an apple-picking end-effector [C]// ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition. American Society of Mechanical Engineers, 2015, 57397: V04AT04A011.

[64] XIONG Y, FROM P J, ISLER V O. Design and evaluation of a novel cable-driven gripper with perception capabilities for strawberry picking robots [C]// 2018 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), May 21－25, 2018, Brisbane, Australia, 7384－7391.

[65] XIONG Y, GE Y Y, GRIMSTAD L, et al. An autonomous strawberry-harvesting robot: Design, development, integration, and field evaluation [J]. Journal

of Field Robotics, 2020, 37(2): 202－224.

[66] GUNDERMAN A L, COLLINS J, MYER A, et al. Tendon-driven soft robotic gripper for blackberry harvesting [J]. IEEE Robotics and Automation Letters, 2022, 7(2): 2652－2659.

[67] 高国华, 董增雅, 孙晓娜, 等. 基于3D打印的柔性机械手研制及试验研究[J]. 智慧农业, 2019, 1(1): 85－95.
GAO Guohua, DONG Zengya, SUN Xiaona, et al. Development and test of a flexible manipulator based on 3D printing [J]. Smart Agriculture, 2019, 1(1): 85－95.

Research progress of cable-driven flexible manipulator and its application in agricultural robots

WEI Huiling[1], LIANG Chengbin[1], WANG Jinhai[2], CHEN Mingyou[1], LUO Lufeng[1*]

(1. *School of Mechatronics Engineering and Automation, Foshan University, Foshan* 528000, *China*;
2. *School of Computer Science and Artificial Intelligence, Foshan University, Foshan* 528000, *China*)

Abstract: Cable-driven parallel robots have become a hot research topic in the field of robotics in recent years due to the characteristics of simple structure, small motion inertia, reconfigurability, and fast response speed, etc. The cable-driven flexible manipulator provides a certain adaptability and softness for operation due to the flexibility and elasticity of driving cable, and consequently it can achieve good dynamic interaction between the operating objects and the manipulators, and improve the ability to prevent broken loss coupling, which has also attracted widespread attention from researchers in the field of agricultural robotics. Due to the working environment of agricultural picking robots has the characteristics of unstructured and uncertainty, and most of the fruit outer skin is fragile and easy to damage , the requirements for picking robots that come into directly contacted with the fruits are stricter, ensuring stable grasping without damaging the fruits. In order to achieve efficient and precise operations of picking robots, lightweight and flexible end execution agencies that interact with biological friendly interaction are key theoretical technologies that urgently need to be broken through. This article first elaborates on the characteristics and development overview of cable-driven flexible manipulators with commercial application prospects. Then, the research progress of the theory such as the design, modeling and control of cable-driven flexible robotics at home and abroad is reviewed in detail. Further the typical application development of cable-driven flexible robots in the field of physical rehabilitation and dexterous grabbing is outlined. A detailed analysis is conducted on the significance of the application of cable-driven flexible manipulators in the field of agricultural picking, and the current research status of cable-driven flexible manipulators in tomato picking, apple picking, strawberry picking, and blackberry picking. Aiming at the problems of low picking accuracy, poor versatility, high cost, damage and low picking efficiency of cable-driven flexible manipulator in agricultural picking at the present stage, it is pointed out that in the future, the commercialization of cable-driven flexible manipulator needs to make innovations in agricultural machinery and agronomy collaboration, modular and reconfigurable design, improving interaction safety, multi-sensor integration, picking sequence planning and strong robust control in this study and it provides new ideas and methods for the design of mechanized non-destructive picking mechanisms for fruits and vegetables.

Keywords: cable-driven flexible manipulator; agricultural robots; picking; tomatoes; apple; strawberries; blackberry