

软体机械手关键技术研究进展

付敏, 王鹏, 王成梦, 曹众, 陈见坤

东北林业大学机电工程学院, 哈尔滨 150040

摘要 软体机械手具有良好的环境适应性、灵活性和人机交互性, 可应用于作物采摘、水下探索、医疗康复、野外救援、物品分拣等众多领域。综述了软体机械手的驱动方式、制造技术、构型, 以及建模与控制方法等关键技术进展, 分析了其目前存在的问题与难点, 提出了未来软体机械手探索方向: 制作材料智能化、提高控制精确度、探究新型驱动方式、仿生设计构型。

关键词 软体机械手; 驱动; 构型; 制造技术; 建模与控制

机械手是机器人的重要组成部分, 相关技术在飞速发展。传统刚性机械手具有较高的精确度和可控性, 被广泛用于替代人工进行高强度、重复性的工作。但刚性机械手易对抓取物体表面造成损伤, 且刚性机械手大多采用铰链等结构进行连接, 自由度有限, 影响机械手的灵活性。

随着硅胶、硅橡胶等软材料的发展, 研究人员开始将软材料应用到机械手的制造中^[1]。软体机械手的结构大多受到自然界中章鱼臂、象鼻等软体组织的启发, 相较于刚性机械手, 具有更好的环境适应性; 在抓取易损物体时, 可以通过自身材料的被动变形, 更好地完成抓取任务, 这一特性使得软体机械手对控制系统的要求大大降低。另外, 由于采用软体材料, 理论上软体机械手拥有无限的自由度, 灵活性更好, 在一些狭窄的工作环境中, 可以通

过自身的变形及高自由度的特性, 灵活地工作。

目前软体机械手已在物品分拣、果实采摘、医疗康复等领域得到广泛应用, 研究人员围绕着机械手的驱动方式、构型、制造技术及控制方法进行了大量的研究工作, 但目前仍存在驱动力不足、控制精度低等问题。本文综述软体机械手驱动方式、构型、制造技术及建模与控制方法等关键技术的研究现状及存在的问题。

1 驱动方式

要想实现机械手的正常工作, 需要有合适的方式进行驱动, 使机械手顺利完成弯曲、伸展等动作。目前软体机械手最常见的驱动方式是气压驱动, 此外电机驱动、智能材料驱动、化学反应驱动, 以及混

收稿日期: 2023-08-02; 修回日期: 2024-01-04

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(51975114)

作者简介: 付敏, 教授, 研究方向为创新设计理论、采摘机器人等, 电子信箱: fumin1996@163.com

引用格式: 付敏, 王鹏, 王成梦, 等. 软体机械手关键技术研究进展[J]. 科技导报, 2024, 42(8): 48-62;

doi: 10.3981/j.issn.1000-7857.2023.08.01178

合驱动也是研究热点。

1.1 气压驱动

相较于其他驱动方式,气压驱动方式应用更广泛,发展也较成熟。这种方式通常将气体通入机械手的腔室中,通过气体产生压力驱动机械手运动。由于空气具有无污染、易获得的特点,常被作为主要的驱动源。目前气动机械手结构主要有纤维约束型和气动网络结构。

纤维约束型机械手通常由外部缠绕的纤维和弹性管组成,在气体通入弹性管后,由外部缠绕纤维限制弹性管的径向变形,并增强弹性管的轴向变形;通过改变外部缠绕纤维的角度及缠绕方式,可以调整机械手的运动形式。McKibben型人工肌肉是一种典型的纤维约束型结构,如图1(a)所示^[2],通入气体之后,橡胶弹性管可以进行径向膨胀及轴向收缩,但由于编制网相互之间,以及与橡胶管之间存在摩擦,会导致迟滞现象的发生,从而使机械手的控制变得复杂;另外,由于结构限制,只能进行单向的变形。

气动网络结构机械手主要由气体腔室和限制层2部分组成。气体腔室作为应变部分,在引入气体后膨胀变形,而限制层弹性模量更高,不易变形,从而改变手指的弯曲方向。美国哈佛大学的WH-

ITESIDES组利用软光刻技术制作了一种慢速气动网络结构(slow pneumatic network, SPN)机械手(图1(b))^[3],在机械手内部嵌入气体通道,通过气体在通道内产生的压力驱动机械手运动,具有结构简单、抓取稳定的优点。之后该课题组又在SPN基础上设计了一种快速气动网络结构(fast pneumatic network, FPN)(图1(c))^[4],相较于SPN, FPN响应速度更快,弯曲能力也更强。但由于软体机械手材料限制,使得机械手的承载能力有限,且易受到自身重力的限制,影响抓取稳定性,为了获得更稳定的抓取能力, Sun等^[5]参考自然界中的蜂窝结构,设计了一种蜂窝型气动网络结构,该结构更加稳定且可以承受较大的变形,之后该课题组在这种结构的基础上,制作出了一种蜂窝结构软体机械手(图1(d)),可以准确、稳定地完成一系列的抓取任务^[6]。

研究人员在如何提高机械手的响应速度,弯曲性能及承载能力方面进行了大量研究, Guan等^[7]设计了一种由弯曲和螺旋气动人工肌肉(PAM)组成的仿象鼻机械手,机械手由连接在基座上的双向弯曲PAM,以及串联在末端的螺旋PAM组成,可以完成灵活的抓取任务。田德宝等^[8]在快速气动网络结构的基础上,设计了一种变腔室结构的机械手,该机械手在手指根部采用较大的气腔,以提高机械手

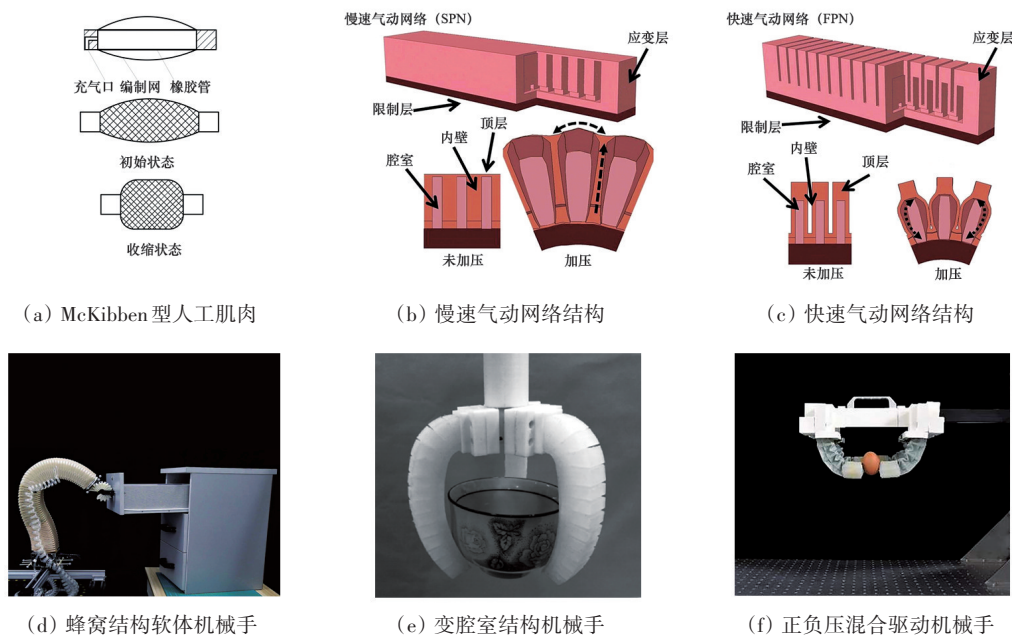


图1 气动软体机械手

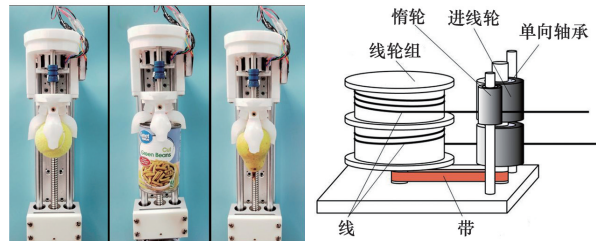
的变形能力和夹持力;之后气腔体积逐渐减小,以减少机械手端部的变形,增加夹持力及抓取稳定性,如图1(e)所示。张宴^[9]将快速气动网络和慢速气动网络相结合,设计出一种双气腔复合结构软体手指,提高了机械手的抓取性能。Fatahillah等^[10]将正压和负压同时应用到软体机械手的驱动当中,通过正负压混合驱动,提高机械手的承载能力和灵活性(图1(f))。

采用气压驱动的机械手制作简单,成本较低,响应速度较快,且不需要复杂的控制系统,因此应用十分广泛,但由于需要外接气泵等设备,导致这种机械手难以实现小型化,且气泵也存在一定的安全隐患;同时机械手对密封的要求高,以防止机械手发生气体泄漏影响驱动。

1.2 电机驱动

电机作为一种常见的动力源,在大多工业场合都有应用,因此,当软体机械手相关概念提出后,人们就将传统电机与软体材料结合,制作出了一系列采用电机驱动的机械手。此类机械手将电机作为动力源,通过传动机构传递动力,带动软体手指实现弯曲动作;拉线具有较好的柔性,可以很好地与软体手指结合,同时可以传递较大的力,因此拉线是最常见的传动机构。由于具有电机及传动装置,因此,体积和重量是限制此类机械手应用的普遍问题。为了减小机械手体积,高孟扬等^[11]设计了一种多指柔性康复机械手,该机械手采用一种单对多的传动结构,通过一个电机实现对多个手指的控制,减少了整体结构的体积和重量。另外,为了提高抓取效率及精确度,Gunderman等^[12]设计了一种用于浆果采摘的电机驱动软体机械手,如图2(a)所示,通过丝杆及嵌入软体手指内部的拉线,将电机的动力传递到软体手指上,该机械手增加了力反馈的控制方式,可以对输出力进行调节,以达到更好的抓取效果。拉线张合导致的松弛问题同样会影响机械手的效率,施加预紧力是一种有效的方式,但用于可穿戴设备时施加预紧力会对人体造成影响,为了解决这一问题,In等^[13]设计了一种无需预紧力的松弛机构(图2(b)),该装置在线轴的前端放置了一个惰轮和进线轮的组合,消除拉线的预张力,并

且可以通过多组叠加的方式驱动多根拉线,减少系统重量。



(a) 浆果采摘机械手

(b) 松弛机构

图2 电机驱动软体机械手

采用电机驱动的机械手具有较大的驱动力,同时响应速度较快,但电机和传动装置的存在增大了机械手的体积,同时传动机构也需要进行控制,这进一步增加了控制系统的复杂性。

1.3 智能材料驱动

智能材料是一类新型材料,对材料施加外部刺激(如热场、磁场等),可使其产生一定的形变;在外部刺激消失后,材料会恢复原先的状态。智能材料的这种特性可用于驱动机械手产生弯曲变形。常用的智能材料有形状记忆合金(shape memory alloys, SMA)、电活性聚合物(electroactive polymer, EAP)、响应水凝胶等。

1.3.1 SMA 驱动

SMA具有形状记忆效应^[14],在较低的温度下易变形,通过施加外力使其改变形状,之后进行加热,材料内部的马氏体会发生变化,从而使SMA恢复原先的形状。在使用时通常将SMA嵌入到软体基体中,通过加热使其发生变形,驱动机械手产生弯曲动作。相较于气压驱动,SMA驱动通过电流加热,使得驱动更易控制;改变输入电流的大小,可以使温度上升更快,从而提高机械手的弯曲效率。

影响SMA驱动的主要问题是快速散热。当需要驱动机械手时,可以通过调节电流大小来提高升温响应时间,然而由于SMA大多嵌入在聚合物基体中,使得加热后所需的散热时间很长,影响机械手的工作效率,因此通常将SMA制成丝状以减少散热时间,但这又限制了机械手的驱动力。为

为了提高驱动力, She 等^[15]开发出了一种 SMA 带(图 3), 采用间接加热的方式, 用较小的电流达到驱动效果, 在一定程度上减少了散热时间; 同时通过增加 SMA 的横截面积来增加驱动力, 从而提高弯曲变形效率。Lee 等^[16]将 SMA 弹簧置于机械手外部, 通过弹簧连接肌腱进行驱动, 由于 SMA 弹簧位于外部, 因此, 可以使用风扇对 SMA 弹簧进行冷却, 显著降低了机械手的冷却时间。Jeong 等^[17]设计了一种可以主动冷却的基于 SMA 的人工肌肉, 将 SMA 弹簧置于一种可拉伸冷却剂容器中, 通过冷却剂循环对 SMA 弹簧进行快速降温。

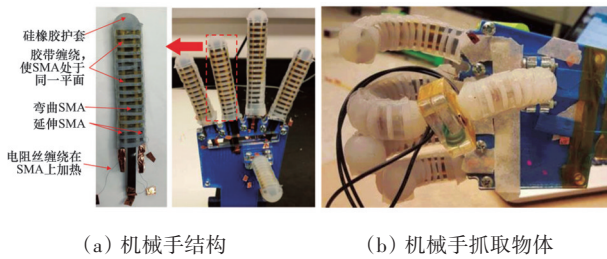


图3 SMA驱动的软体机械手

采用 SMA 进行驱动的机械手相较于气压驱动, 不再需要气泵等外部设备, 因此体积可以做到小型化, 同时不会产生噪声。但由于材料限制, SMA 驱动的机械手响应速度较慢, 且需要很长的散热时间。为了更好地解决散热问题, 研究人员提

出了在聚合物基体中增设微流体通道的方法, 通过在微流体通道中加入冷却液辅助冷却, 但由于冷却液存在热损失的问题, 会影响冷却效果, 因此研究人员希望找出一种更适合的方式, 进一步提高机械手的散热能力。

1.3.2 EAP 驱动

EAP 是一种通过改变自身形状或大小响应外部刺激的聚合物, 由于其具有特殊的电性能和机械性能, 从 20 世纪 90 年代初开始引起研究人员的广泛关注。按照作用原理, EAP 可分为电子聚合物和离子聚合物^[18], 电子 EAP 由电场或库仑力驱动, 通常需要较高的激活场, 但响应时间短, 具有高能量密度, 可以直接在空气中操作。离子 EAP 通过离子及其共轭物质的移动性或扩散而改变形状, 相较于电子 EAP, 可通过较低的电压驱动, 但由于电压较低, 离子 EAP 需在潮湿状态或者固体电解质中工作, 且响应时间较长, 驱动力也相对较小。

介电弹性体(DE)作为一种常见的电子聚合物, 被广泛应用于软体机械手制作。介电弹性体为一种“三明治”形结构, 如图 4(a)所示^[19], 介电高分子薄膜位于中间, 两侧存在电极, 通过施加电压产生应力, 使薄膜产生变形, 解除电压后薄膜恢复原状。Kofod 等^[20]采用介电弹性体材料制作了一种软体抓取装置, 如图 4(b)所示, 通过施加电压驱动机械手指张开, 撤去电压后手指闭合, 完成抓取任务,

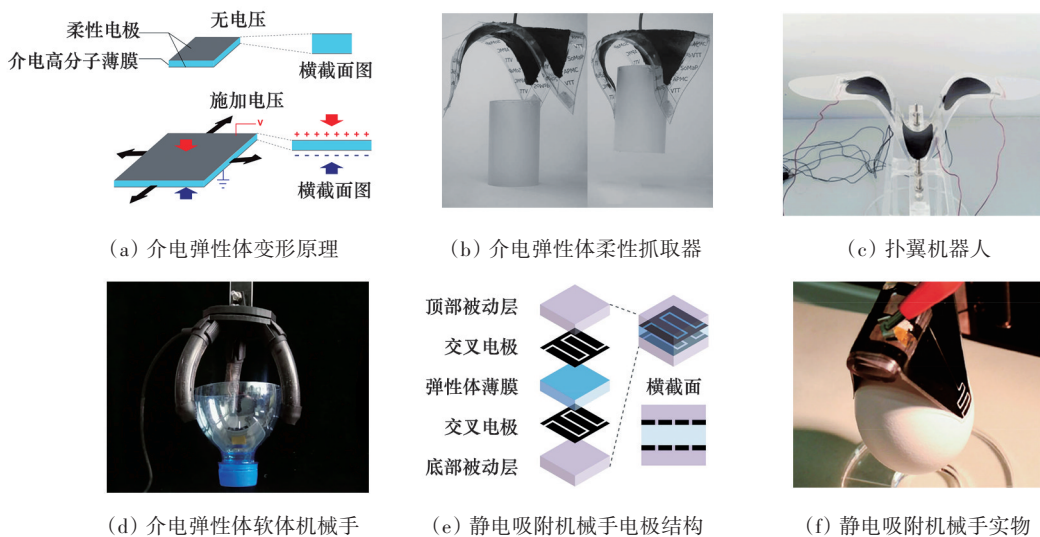


图4 基于EAP的柔性驱动器

具有结构简单、易于控制的优点。王树^[21]应用介电弹性体材料设计了一种柔性关节,并利用柔性关节的双稳态特性设计了一种新型对称双稳态结构,将该关节应用到扑翼机器人中,可以有效驱动机器人完成上、下扑动作(图4(c))。李金嵘^[22]设计了一种基于介电弹性体弹簧卷型弯曲驱动器的三指软体机械手(图4(d)),可以快速实现对物体的抓取。Xing等^[23]设计了一种基于介电弹性体的模块化软体机械手,每一个模块都由介电弹性体薄膜进行驱动,该机械手结构简单,可以实现较大的变形。Shintake等^[24]将柔性电极分割成双层偏移交错的四电极几何形状,如图4(e)所示,从而使驱动器的静电驱动以及电黏附效果最大化,并利用该结构制作出了一款双指软体手爪,进一步提高机械手的抓取性能,图4(f)为该机械手实物图。

采用电活性聚合物进行驱动的机械手响应速度较快,且体积较小,易于控制,但这种驱动方式产生的驱动力较小,很难抓取较重的物体,如何有效地提高机械手的负载能力是此类机械手急需解决的问题。此外,在驱动介电弹性体时,除了驱动弹性体变形的正常电场,还存在着可以产生吸附作用的电场,如何高效利用这一电场也是一个很有前景的研究方向。

1.3.3 响应水凝胶驱动

响应水凝胶是一类在环境刺激(如pH值、温度、光、电、磁等)或应力作用下能够发生临时形态改变,并在一定条件下可恢复原有状态的智能材料,当外界环境发生改变时,水凝胶网络中的聚合物分子链会发生构象转变或者相对位移,从而促使水凝胶体积发生溶胀、收缩、颜色变化或形状改变。根据外界的刺激来源,水凝胶可分为pH值敏感性水凝胶、温度敏感性水凝胶、磁场敏感性水凝胶、光敏感性水凝胶、电场敏感性水凝胶等^[25]。

双层水凝胶结构驱动器是一种应用比较广泛的水凝胶驱动器。Shiblee等^[26]设计了一种基于形状记忆水凝胶的双层系统,并制作了一种软抓持器,可以在水中准确地抓取、运输,并释放玻璃瓶。Ma等^[27]设计了一种结构水凝胶驱动器,制作流程如图5(a)所示,在驱动器两侧分别是非结构本体

水凝胶和结构化水凝胶柱,当温度升高或者溶剂成分转换时,可以迅速产生弯曲动作,该驱动器较传统的水凝胶驱动器具有更大的驱动力,图5(b)为该机械手抓取球形物体。Chen等^[28]将各向异性木材与热响应性PNIPAM(聚N-异丙基丙烯酰胺)凝胶结合,制作了一种木质复合水凝胶驱动器,该驱动器具有更好的力学性能,且在温度刺激下可以产生复杂的变形。Zheng等^[29]受自然界中含羞草的启发,设计了一种具有反热响应双层复合结构的水凝胶驱动器,该驱动器由具有低临界溶液温度聚合物的水凝胶层(LCST)和高临界溶液温度聚合物的水凝胶层(UCST)2部分组成,加热时,水分子从LCST层转移到UCST层,冷却时过程相反,从而通过水自循环机制,使驱动器可以在非水的环境下工作,其驱动原理如图6所示。

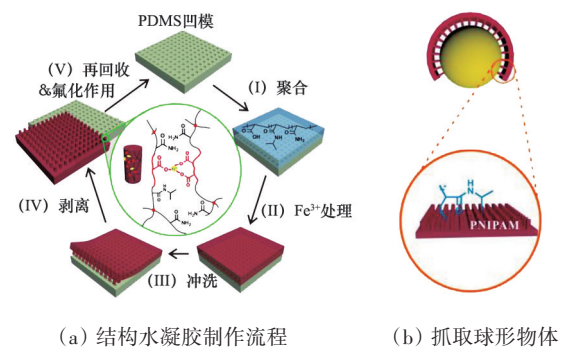


图5 结构水凝胶驱动器

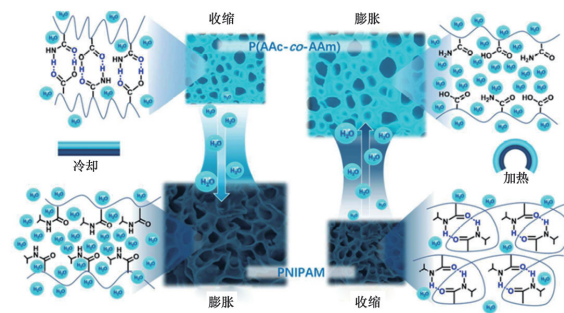


图6 自循环水凝胶驱动器

相较于其他驱动方式,水凝胶驱动器生物相容性好,更适于水下抓取任务,且可以实现较大的变形。在驱动时,可以对水凝胶材料施加多种刺激来完成不同的驱动任务, Kim等^[30]设计的水凝胶微机

机器人,通过施加电场和磁场,驱动机器人同时做出移动和抓握的动作。但由于材料的限制,水凝胶驱动器同样存在驱动力不足的问题;另外,如何在非水环境下正常工作也是一个需要解决的问题,虽然已有研究人员提出了通过自循环的方式在空气中工作的机械手,但在工作一段时间之后,机械手的弯曲性能及响应能力都会下降,从而影响到机械手的整体性能。

1.4 其他驱动

除了以上几种常见的驱动方式,研究人员也在不断寻找更加有效、易于控制,且能够提供足够驱动力的驱动方式。

通过化学反应进行驱动是近几年的一个研究方向。在化学反应过程中,可以产生一定的能量,且反应过程无污染,不需要其他设备,因此,研究人

员希望能将反应产生的能量应用到软体机器人的驱动当中。Wehner等^[31]运用化学反应原理设计了一种软体机器人(图7(a)),该机器人采用过氧化氢溶液作为驱动机器人的能源,通过微流控逻辑对过氧化氢溶液进行控制,自主调节液体的流动,从而利用催化剂使过氧化氢分解产生气体,进而驱动机器人。Aubin等^[32]设计了一种合成血管系统,并将其应用到软体机械鱼中(图7(b)),这种机械鱼将氧化还原液输入到内部通道中,通过液体压力进行驱动,同时通过氧化还原反应给同样容纳在空腔中的泵及控制系统供电,实现机械鱼的长时间工作,经试验该机械鱼可以工作36.7 h。但由于化学反应的不确定性,导致可控性较差,因此,采用化学反应作为驱动方式的机械手尚不多见。

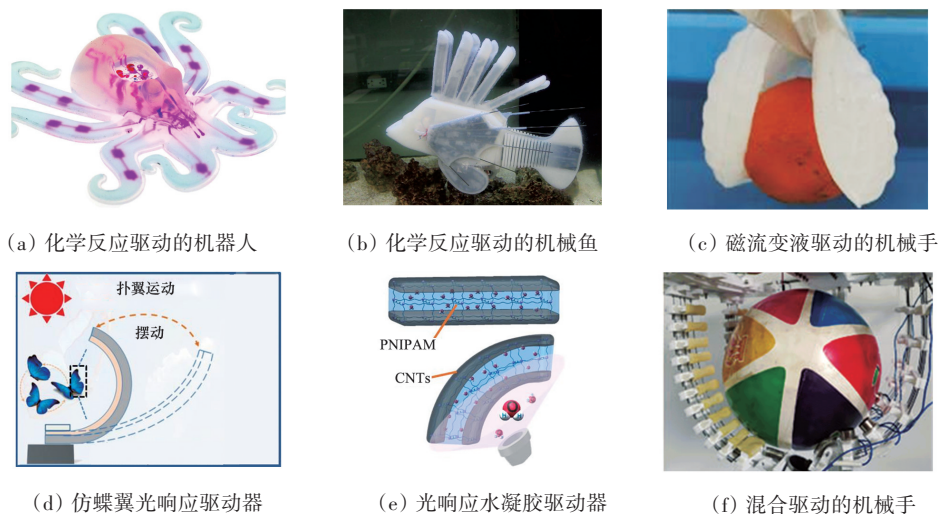


图7 其他驱动方式的软体机械手

磁流变材料可以根据外部磁场刺激,做出相对反应。该材料主要由磁性颗粒和基体组成,根据组成基体的不同,可以分为磁流变液及磁流变弹性体,由于具有响应快、可逆等特点,近年来开始被应用于软体机械手方面。华德正等^[33]设计了一种磁流变液软体机器人,该机器人由4个磁控单元和4个软体连接片组成,施加磁场后,可以在平面内实现滚动-变形运动,但由于在施加磁场时磁性粒子链大多为非线性动态变化,且磁场控制精度较低,

易导致机器人运动状态不稳定。王雨涵^[34]仿照捕蝇草的结构,设计了一种磁流变液驱动的软体机械手,如图7(c)所示,该机械手根据捕蝇草结构设计仿生叶片,并将磁流变液通入仿生叶片腔室中,驱动叶片运动;同时可以通过改变电流控制磁场大小,从而改变软体叶片刚度,提高机械手承载能力。

光作为一种常见能源,具有稳定、传输距离远、快速等特点,而一些新型智能材料可以通过光刺激产生相应动作,这使得光驱动软体机械手成为可

能。为了解决现有软体机械手无法远程控制、驱动慢的问题,研究人员进行了光驱动软体机械手的研究。这类机械手大多将光响应材料与软体材料相结合,通过光响应材料吸收光能,转化为热能、机械能,驱动机械手工作,具有远程可控、可局部响应的特点。Dong等^[35]仿照蝴蝶翅膀,设计了一种双层结构的光响应柔性驱动器(图7(d)),该驱动器2层结构具有不同热膨胀系数,在受到阳光照射时,会向光源方向弯曲,弯曲到一定程度后,可通过自遮挡的方式隔断阳光,使驱动器恢复上一状态,达到循环运动的目的。王震^[36]结合水凝胶材料,设计了一种光响应驱动器(图7(e)),该驱动器为碳纳米管(CNTs)与PNIPAM组成的夹层结构,CNTs具有良好的光热转化能力,分布在驱动器两侧,PNIPAM水凝胶材料位于中间,在一侧受到光照时,温度升高,而另一侧温度不变,形成温度差,使高温侧凝胶排出水分,产生收缩,实现驱动器的弯曲运动。

混合驱动方式通过多种驱动方式的组合来弥补单一驱动方式的不足,以提高机械手的抓持力和可控性。但由于结合多种驱动方式,导致机械手的制造及控制比较复杂。Li等^[37]提出了一种多种驱动方式混合的机械手(图7(f)),通过直流电机、SMA丝和电磁铁相结合完成对机械手的驱动,直流电机输出足够扭矩弯曲手指,SMA丝用于旋转指尖,电磁铁可以将机械手末端连接起来提高承载能力。Zhuo等^[38]设计了一种具有自适应能力的机械手,该机械手采用一种新型的智能水凝胶材料,通过加热使水凝胶从完全结晶态的刚性固体逐步阶跃性地转变为熔融态的完全液体;通过气动-热的混合驱动方式,可以实现材料的多重相态变化,进一步提高机械手的抓取能力。

2 构型

软体机械手构型对其抓取策略、制造工艺及控制系统等各个方面都有着较大的影响,合理构型设计可以极大提高机械手的抓取性能。按照抓取方式的不同,机械手构型可分为指抓型结构和缠握型结构。

2.1 指抓型结构

指抓型结构机械手大多采用仿人手结构,如图

8(a)所示^[39],此类机械手通过多个手指相互配合,完成对物体的抓取,改变手指个数,以及手指关节的结构,可以适应不同形状、大小物体的抓取。目前已有的机械手大多以三指、四指为主^[40-42],手指数量多,则抓取姿态多样,同时在抓取物体时与物体有更多的接触点,使得抓取更加稳定,权家乐^[43]对比正常五指人手及特殊六指人手,设计了一种六指刚柔耦合机械手,该机械手通过多个手指的配合,可以同时完成多个抓取任务,提高了机械手的灵活性和抓取稳定性,如图8(b)所示。但采用较多的手指需要考虑多指间的相互配合,防止出现各个手指在接触物体时施力不平衡,从而影响抓取稳定性的问题,这会使得控制系统更加复杂。

为了进一步提高机械手的抓取适应性,有研究人员提出了变结构的设计^[44-45],通过调节手指间距及角度,扩大机械手抓取范围,使机械手可以抓取尺寸差异较大的物体。也有研究人员针对某一物体设计独特形状手指,李健等^[46]以草莓外部轮廓作为手指设计曲线,设计了一种四叶片软体抓手,可以实现对草莓的无损抓取。Wang等^[47]对手指关节进行设计,通过3D打印将形状记忆聚合物嵌入到机械手铰链关节中,通过改变关节刚度,实现机械手局部变形,提高机械手的灵活性。杨羽^[48]分析人类手指抓取动作,在机械手指末端添加了一个直流电机驱动的可动指尖(图8(c)),在抓取物体时,可以通过电机驱动滚筒旋转,增大与物体接触的摩擦力,提升抓取稳定性。



(a) 五指机械手 (b) 六指机械手 (c) 具有可动指尖的机械手

图8 指抓型软体机械手

2.2 缠握型结构

缠握型结构机械手灵感大多来源于自然界中的象鼻、章鱼触手等结构,可通过单个手指缠绕包裹物体,完成抓取任务。相较于指抓型结构机械手,缠握型结构不需要多个手指相互配合,控制相

对简单,但由于抓取方式单一,灵活性较差。为了提高此类机械手的抓取稳定性,Xie等^[49]研究触手锥度对抓取性能的影响,同时结合仿生吸盘,设计了一种仿生章鱼机械手,通过仿生吸盘产生负压,增大抓持力,辅助软体手完成抓取,如图9(a)所示。此外,采用多段模块化结构设计同样是一个很好的研究方向,可将机械手分为多段式模块,使每一段具有不同的弯曲性能,从而有效提高机械手的灵活性。Ranzani等^[50]设计了一种双段结构软体机械手(图9(b)),该机械手具有2个完全相同的模块,2个模块可以独立控制,从而使机械手具有多向弯曲能力。Wang等^[51]受植物卷须结构启发,以3D打印的方式设计了一种软体机械手(图9(c)),通过预编程的方式打印机械手结构,可以使其完成如植物卷须一样的弯曲、螺旋扭曲等动作。



(a) 仿生吸盘机械手 (b) 双模块机械手 (c) 仿植物卷须机械手

图9 缠握型软体机械手

3 制造技术

制造技术的进步极大促进了软体机械手的发展,软体机械手制造所用材料大多为硅胶、橡胶等软材料,因此,常见的浇铸成型技术、3D打印技术,以及软光刻技术都可用于软体机械手的制造^[52]。

3.1 浇铸成型技术

浇铸成型技术^[53]适用于制造一体化、结构相对简单的机械手。浇铸成型工艺中,首先需制作浇铸模具。随着3D打印技术的发展及成本的降低,机械手浇铸模具大多采用3D打印制作。模具制作完成之后,将调配好的机械手成型硅胶材料添加到模具中,待材料固化成型后脱模,即可完成机械手的制作。在浇铸较复杂的结构时,由于存在脱模等工序,会增加制造难度,因此,有学者提出采用失蜡铸造的成型方法,进一步提高机械手的结构精细度。

3.2 3D打印技术

3D打印是指利用打印头、喷嘴或其他打印技术,通过材料堆积的方式来制造零件或实物的工艺^[54]。常见的3D打印技术有熔融沉积成型(FDM)、直接油墨书写(DIW)、喷墨打印(IP)、立体光刻(SLA)、选择性激光烧结(SLS)^[55]。随着各种新型软体材料的出现,3D打印技术逐渐普遍应用于软体机械手的制作中,可以制作出结构较复杂的机械手。此外,通过3D打印技术,还可以将传感器更好地与软体机械手相结合,从而提高机械手的可控性^[56]。Lin等^[57]通过3D打印技术,制作出了一种柔性多层触觉传感器,并将其直接打印到软体机械手指的表面,对接触力进行实时反馈,从而实现机械手的闭环控制。

目前,材料仍是限制3D打印技术在软体机械手制造方面应用的主要问题,适用于打印的软体材料并不多见,FDM、SLS大多采用热塑性材料,如聚氨酯(TPU)等作为打印材料,但由于材料硬度较高,会导致机械手变形能力降低,从而影响机械手的适应性;DIW、IP、SLA等虽然可采用硅橡胶、凝胶等软材料进行打印,但需要对油墨材料进行改进,增加材料流动性或使材料变为光敏材料。

为了制造出更灵活的机械手,有学者提出了多材料结合的3D打印方式^[58]。这种打印方式使用2种以上材料对同一零件进行打印,通过使用不同的材料交替打印,可以将不同材料的特性相结合,很适合制造出多功能、可变刚度的机械手。

4D打印技术同样是一种新兴的制造技术,这种技术对3D打印制造的零件进行时间维度上的加工,从而使零件在受到外部热、磁场等条件的刺激时,可随着时间产生相应变化。通过4D打印技术,可以制造出可控性能更好的机械手,随着越来越多适用于4D打印技术的新型智能材料的出现,这种制造技术将成为一个很好的发展方向。

3.3 软光刻技术

软光刻技术是指在光照作用下,借助光致抗蚀剂,将掩模版上的图形转移到基片上的技术^[59-60],适用于制作尺寸较小、结构复杂的机械手。制造过程中,将弹性材料涂抹在光刻形成的印模表面,干

燥后图形转移到弹性材料上形成弹性膜,再通过微传递、毛细管、溶剂辅助成模等方式成模。

微传递成模可以制作各自独立或者互相连接的微结构,但在制作完成后会在基底上留下一层聚合物膜,影响使用。毛细管成模将预聚物放在毛细管一端,通过毛细作用填充毛细管,干燥后得到微结构;这种方式需要一个毛细网络结构,且对网络粗细有一定要求,太细会使液体填充时间变长。溶剂辅助成模采用溶剂沾湿印模,之后将印模压在基底上,通过溶剂溶解聚合物,两者结合形成聚合物,再填充到印模空隙,待溶剂挥发后取下印模,得到微结构;这种方法对溶剂要求较高,需要既能溶解聚合物基底,又不会使印模膨胀变形的溶剂。

4 软体机械手的建模与控制

4.1 软体机械手的建模方法

由于软体机械手材料的非线性变形特性,传统刚性机械手的建模方法不再适用于软体机械手,因此,需要找到新的适合软体机械手的建模方法^[61]。目前,对软体机械手的建模研究主要集中在2个方面:基于数学模型的建模与无模型的建模^[62]。

基于数学模型的建模方式指通过建立数学模型,将驱动空间、配置空间和任务空间的各个参数相互映射,得到各个参数之间的关系。目前应用最为广泛的是分段常曲率模型(PCC)^[63-65],这种方法将软体机械手划分为若干虚拟关节,每一段虚拟运动关节可以当作一小段曲线,通过长度、曲率、偏转角等参数描述曲线在配置空间内的位姿,最后通过改进的D-H法,将曲线末端端点转换成任务空间的坐标。但PCC模型将曲率视为恒定,在受到较多的外部载荷作用时,会影响模型的精确度^[66-67]。为了更准确地对机械手进行建模,研究人员将Cosserat理论应用到软体机械手的建模中^[68],该理论模型将机械手视为许多微小部分,每一部分在变形时同时产生位移和转动,相较于PCC模型,Cosserat理论模型更准确。Renda等^[69]在连续Cosserat理论的基础上,提出了一种离散Cosserat模型,该模型具有更高的数值稳定性,同时也在一定

程度上简化了模型的计算。之后,Renda^[70]等又提出了一种新的几何应变方法,将其应用到离散Cosserat模型中,使离散Cosserat模型的恒定应变方法扩展到非恒定应变的情况,可以通过较少自由度模拟复杂变形。

通过数学模型对机械手进行建模需要进行复杂的计算,且针对逆运动学的建模更加复杂^[71-72],为了简化计算,研究人员将机器学习的方法应用到机械手的建模中。这种方法通过实验收集大量驱动空间参数与对应任务空间参数的数据,引入人工神经网络等机器学习的方法,对采集的样本进行训练,最终得到完整的从驱动空间到任务空间的映射关系。该方法不需要建立复杂的数学模型,同时具有较高的精度,但大量实验数据的采集消耗的时间较长。

在对软体机械手的建模研究中,许宗贵^[73]基于常曲率假设,将手指简化为弹簧模型,在驱动气压、变形几何参数与机械手任务空间位姿等参数外,引入了驱动腔伸长量参数作为驱动气压与几何变形参数之间的过渡,建立机械手的运动学模型。Chen等^[74]提出了一种基于Koopman算子的无偏移模型预测控制(OK-MPC)方案,将外部干扰和建模的不确定性影响最小化,提高软机械手在自由空间和受限空间中的控制性能。将数学模型和实验数据建模相结合的方式可以很好地提高建模准确性,Zou等^[75]提出了一种常曲率模型、机器视觉与深度神经网络(DNN)相结合的建模方法,对机械手的实时三维形状进行估计,如图10所示,首先通过常曲率模型,粗略估计出机械手的大体形状,再通过机器视觉的方式,精确估计机械手形状,最后引入深度神经网络,将常曲率模型中的数据作为输入值,摄像机观察提取出的数据作为输出值,使用深度神经网络进行训练,最终得到准确的三维形状。姜皓^[76]同样将PCC建模方法与神经网络相结合,首先通过PCC模型,建立配置空间与任务空间参数的映射关系,并通过代价函数建立评价体系确定机械手的最优姿态,之后使用人工神经网络,建立配置空间与驱动空间参数的映射关系,从而确立驱动空间与任务空间参数关系,完成对机械手的控制。董红

兵^[77]在使用线驱动模型对机械手进行建模之后,使用BP神经网络进一步辨识运动学模型,再基于分段常曲率模型建立完整的运动学模型,之后运用拉格朗日法建立机械手的动力学模型。

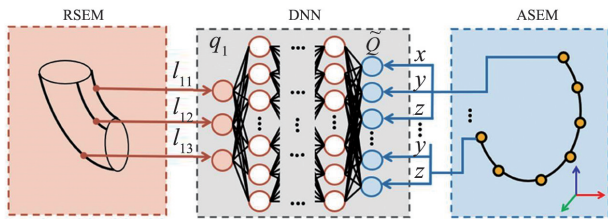


图10 深度神经网络原理

4.2 软体机械手的控制系统

由于驱动方式各不相同,软体机械手采用的控制系统也各不相同。对气压驱动的机械手来说,驱动空间参数主要为气体压力,因此大多采用电磁阀、比例阀等元件控制气压的变化。SMA驱动的机械手利用电流通过SMA丝产生的热效应,对SMA丝产生刺激来实现机械手的弯曲等动作。EAP驱动的机械手采用施加电场的方式进行工作,响应水凝胶驱动的机械手则可以通过加热、施加磁场等多种方式进行驱动。

在控制策略上,由于软体机械手自身所具有的柔顺性,在接触抓取物体时可以通过被动变形,减少对抓取物体的损坏,因此软体机械手大多采用开环控制方式。但随着越来越多柔性传感器的出现,闭环控制方式也开始应用于软体机械手的控制。相较于开环控制的方式,闭环控制增加了反馈调节,通过实时的反馈抓取信息,可以实现更精细地抓取任务,提高机械手的性能。Chen等^[78]考虑到障碍物对机械手运动的影响,对原有前馈控制模型进行改进,添加接触约束,以实现接触环境下的位置控制,同时考虑到机械手自身重力等因素影响,将滑模控制算法与改进后的静态前馈模型相结合,实现柔性机械臂的位置控制(图11)。Jin等^[79]提出了一种基于简化雅可比矩阵的气动机械手控制方法,通过简化雅可比矩阵,建立机械手模型,描述机械手位姿,之后通过运动捕捉系统对机械手相关参数实时更新,从而达到更好的控制效果。You等^[80]将

强化学习算法应用到软体机械手的控制当中,使用Q-learning算法,把目标点与手臂尖端的相对姿态定义为状态,之后将状态空间离散化,将机械手末端执行器位置的变化定义为动作,手臂尖端向目标点靠近的距离定义为奖励,通过相关公式,观察奖励值,实现机械手尖端向目标点的靠近,从而完成对机械手的控制。Li等^[81]在强化学习算法的基础上,引入了一个预训练模型,通过预训练模型减少所需的真实数据,进一步提高了模型的准确性和收敛速度。Thuruthel等^[82]提出了一种闭环预测控制策略学习算法,通过递归神经网络建立机械手正向动态模型,之后通过轨迹优化和监督学习得到机械手的闭环控制策略。

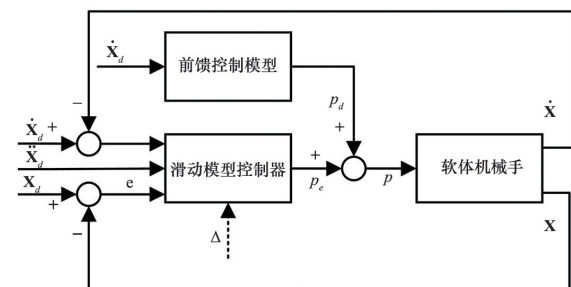


图11 前馈模型与滑模控制器结合的控制系统

4.3 传感器技术

传感器的应用可以极大提高机械手控制系统的精度及可靠性,但目前传感器大多采用刚性材料制作,应用到软体机械手时会对整体柔性结构产生影响,为了解决这一问题,研究人员在传感器的材料、结构上进行了一系列研究,以期将传感器与软体机械手更好地结合。

将一些传感材料嵌入到柔性基体中是目前的一个研究方向,Wang等^[83]设计了一种嵌入式柔性传感装置,该装置将光纤布拉格光栅(fiber bragg grating, FBG)传感器嵌入到柔性层中,形成柔性传感系统,并将其作为软体机械手的限制层,集成到软体机械手中,测量机械手的弯曲曲率变化,从而对机械手的弯曲状态进行估计,提高机械手的控制精度。刘会聪等^[84]将具有良好导电性的液态金属封装到弹性基体中,设计了用于软体机械手的应变

传感器及弯曲传感器,随着弹性体的变形,传感器电阻会产生相应变化,进而根据电阻变化判断机械手应变与弯曲状态,图 12 为应变传感器与弯曲传感器结构。Tang 等^[85]将导电聚合物纤维(conductive polymer fibers, CPF)卷绕制成的传感器嵌入到软体手指中,软体手指弯曲会导致 CPF 长度变化,从而引起 CPF 电阻改变,通过电阻变化对软体手指弯曲角度进行测量。除了将传感器嵌入到软体材料后再集成到机械手系统中,采用一些具有自传感功能的柔性材料进行传感器的制作,同样是一种有效的方式,这类材料制作的传感器可以更灵活地嵌入到软体系统中。Feng 等^[86]设计了一种具有各向异性的导电水凝胶可穿戴传感器,具有良好的拉压性能,可以有效地检测到人体动作。Wang 等^[87]将天然鱼类抗冻蛋白添加到水凝胶体系中,设计了一种性能可调的水凝胶传感器,该传感器可以在低温状态下工作,同时调整水凝胶网络结构,可以实现传感器自粘性及机械强度之间的切换。

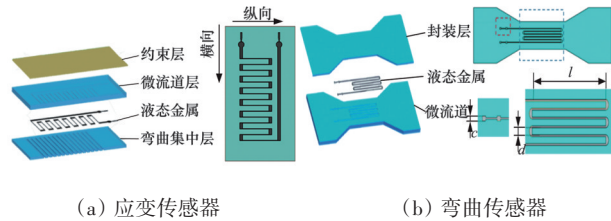


图 12 柔性传感器结构

5 结论

软体机械手的出现弥补了传统刚性机械手人机交互性、环境适应性不足的问题,近年来相关技术取得了极大进步。驱动方式上,有电机驱动、气压驱动、智能材料驱动等多种方式,驱动力不足是现有驱动方式普遍存在的问题。构型方面,按照抓取方式差异,可分为指抓型结构和缠握型结构。指抓型结构通过多指相互配合,灵活性较高,抓取稳定性更好,但需要考虑多个手指相互配合的问题,对控制系统要求较高;缠握型结构虽然灵活性不如指抓型,但不需要考虑多指配合的问题,控制相对

简单。制造技术方面,浇铸成型、3D 打印及软光刻技术都广泛应用于软体机械手的制作中,由于材料限制,3D 打印技术大多用于模具的制作,但随着材料技术的发展,这种方式的应用会越来越广泛。建模方面,PCC 模型是应用较广泛的建模方法,但由于将曲率视为恒定,存在一定误差。为了减少误差,研究人员进行了大量研究,以减少手指重力等因素造成的影响。控制策略上,通过视觉、机器学习等方式可以更准确地完成对机械手的控制,同时,传感器技术的应用进一步提升了软体机械手的控制精度。

作为一门涉及材料、控制、仿生学等多学科的新兴技术,软体机械手领域仍存在许多难点,未来软体机械手可以向以下方向进行探索。

1) 制作材料智能化。随着越来越多新型材料的出现,软体机械手的制作材料逐渐多样化。根据不同的应用环境,采用特性相匹配的材料进行机械手的制作,可以进一步提高机械手的相关性能。近些年响应水凝胶、SMA、EAP 材料的广泛应用证明智能材料是一个很好的研究方向,未来可以将更多的智能材料,例如磁流体材料、压电材料等应用到机械手的制作当中,使机械手变得更加灵活、可控。

2) 提高控制精确度。由于采用软体材料,软体机械手对控制系统的要求远低于刚性机械手,但随着高质量、高精度的设计理念成为未来发展趋势,仍需要不断提高软体机械手的控制精确度,以便完成更精细的抓取任务。柔性传感器的出现为机械手的控制提供了一个很好的方向。将柔性传感器与运动模型相结合,通过传感器获得机械手相关数据,再根据运动模型进行实时调整,是比较有效且准确的控制方法。

3) 探究新型驱动方式。合适的驱动方式可以有效提高机械手的性能,近年来,研究人员相继提出了气压驱动,智能材料驱动,化学驱动及混合驱动的方式,但都存在着一定的缺陷,因此,应完善现有驱动方式,同时探索新的、更适合软体机械手的驱动方式,如电磁驱动等,以进一步提高机械手的性能。

4) 仿生设计构型。自然界中存在着许多令人

惊艳的动植物,它们独特的结构给人们带来了许多的启发,如仿生鱼^[32]、仿含羞草软体抓手^[29]等,未来可以尝试对更多结构进行仿生设计,制作出适应性更好、更灵活的机械手。

参考文献(References)

- [1] Rus D, Tolley M T. Design, fabrication and control of soft robots[J]. *Nature*, 2015, 521: 467–475.
- [2] 吴枫, 韩亚丽, 李沈炎, 等. 柔性仿生驱动器研究综述[J]. *现代制造工程*, 2020(7): 146–156.
- [3] Ilievski F, Mazzeo A D, Shepherd R F, et al. Soft robotics for chemists[J]. *Angewandte Chemie (International Ed in English)*, 2011, 50(8): 1890–1895.
- [4] Mosadegh B, Polygerinos P, Keplinger C, et al. Pneumatic networks for soft robotics that actuate rapidly[J]. *Advanced Functional Materials*, 2014, 24(15): 2163–2170.
- [5] Sun H, Chen X P. Towards honeycomb PneuNets robots [M]//*Robot Intelligence Technology and Applications 2*. Cham: Springer International Publishing, 2014: 331–340.
- [6] Jiang H, Wang Z C, Jin Y S, et al. Hierarchical control of soft manipulators towards unstructured interactions[J]. *International Journal of Robotics Research*, 2021, 40(1): 411–434.
- [7] Guan Q H, Sun J, Liu Y J, et al. Novel bending and helical extensile/contractile pneumatic artificial muscles inspired by elephant trunk[J]. *Soft Robotics*, 2020, 7(5): 597–614.
- [8] 田德宝, 毕学文, 张欣欣, 等. 变腔室气动软体机械手结构设计及实验[J]. *机床与液压*, 2021, 49(11): 109–112.
- [9] 张宴. 双气腔复合结构软体手指的设计与基础性能研究[D]. 天津: 天津工业大学, 2021.
- [10] Fatahillah M, Oh N, Rodrigue H. A novel soft bending actuator using combined positive and negative pressures [J]. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, 2020, 8: 472.
- [11] 高孟扬, 王钰, 刘环宇, 等. 单电机线驱动多指柔性外骨骼机械手设计[J]. *青岛大学学报(自然科学版)*, 2024, 37(1): 79–84.
- [12] Gunderman A, Collins J, Myers A, et al. Tendon-driven soft robotic gripper for blackberry harvesting[J]. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 2022, 7(2): 2652–2659.
- [13] 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]//*Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*. Piscataway, NJ: IEEE, 2015: 1229–1234.
- [14] 赵连城, 郑玉峰. 形状记忆与超弹性镍钛合金的发展和应[J]. *中国有色金属学报*, 2004, 14(增刊1): 323–326.
- [15] She Y, Chen J, Shi H L, et al. Modeling and validation of a novel bending actuator for soft robotics applications [J]. *Soft Robotics*, 2016, 3(2): 71–81.
- [16] Lee J H, Chung Y S, Rodrigue H. Application of SMA spring tendons for improved grasping performance[J]. *Smart Materials and Structures*, 2019, 28(3): 035006.
- [17] Jeong J, Hyeon K, Han J, et al. Wrist assisting soft wearable robot with stretchable coolant vessel integrated SMA muscle[J]. *ASME Transactions on Mechatronics*, 2022, 27(2): 1046–1058.
- [18] Kim K J, Tadokoro S. Electroactive polymers for robotic applications[J]. *Artificial Muscles and Sensors*, 2007, 23: 291.
- [19] Qiu Y, Zhang E, Plamthottam R, et al. Dielectric elastomer artificial muscle: Materials innovations and device explorations[J]. *Accounts of Chemical Research*, 2019, 52(2): 316–325.
- [20] Kofod G, Wirges W, Paajanen M, et al. Energy minimization for self-organized structure formation and actuation [J]. *Applied Physics Letters*, 2007, 90(8): 081916.
- [21] 王树. 基于介电弹性体驱动的柔性关节力学特性及设计方法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2019.
- [22] 李金嵘. 介电弹性体驱动器在软体机器人领域的应用与设计研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2020.
- [23] Xing Z G, Zhang J M, McCoul D, et al. A super-lightweight and soft manipulator driven by dielectric elastomers[J]. *Soft Robotics*, 2020, 7(4): 512–520.
- [24] Shintake J, Rosset S, Schubert B, et al. Versatile soft grippers with intrinsic electroadhesion based on multifunctional polymer actuators[J]. *Advanced Materials*, 2016, 28(2): 231–238.
- [25] 成悦. 基于PVA微晶区的不对称分布构建智能水凝胶驱动器[D]. 太原: 中北大学, 2022.
- [26] Shiblee M N I, Ahmed K, Kawakami M, et al. 4D printing of shape-memory hydrogels for soft-robotic functions [J]. *Advanced Materials Technologies*, 2019, 4(8): 1900071.

- [27] Ma Y F, Ma S H, Yang W F, et al. Sundew-inspired simultaneous actuation and adhesion/friction control for reversibly capturing objects underwater[J]. *Advanced Materials Technologies*, 2019, 4(2): 1800467.
- [28] Chen L, Wei X S, Wang F, et al. In-situ polymerization for mechanical strong composite actuators based on anisotropic wood and thermoresponsive polymer[J]. *Chinese Chemical Letters*, 2022, 33(5): 2635-2638.
- [29] Zheng J, Xiao P, Le X X, et al. Mimosa inspired bilayer hydrogel actuator functioning in multi-environments[J]. *Journal of Materials Chemistry C*, 2018, 6(6): 1320-1327.
- [30] Kim D I, Song S, Jang S, et al. Untethered gripper-type hydrogel millirobot actuated by electric field and magnetic field[J]. *Smart Materials and Structures*, 2020, 29(8): 085024.
- [31] Wehner M, Truby R L, Fitzgerald D J, et al. An integrated design and fabrication strategy for entirely soft, autonomous robots[J]. *Nature*, 2016, 536(7617): 451-455.
- [32] Aubin C A, Choudhury S, Jerch R, et al. Electrolytic vascular systems for energy-dense robots[J]. *Nature*, 2019, 571(7763): 51-57.
- [33] 华德正, 申玉瑞, 彭来, 等. 磁流变软体机器人滚动-变形运动特性[J/OL]. *机械工程学报*, 1-9[2024-03-20]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2187.TH.20231218.1103.034.html>.
- [34] 王雨涵. 基于磁流变液驱动的变刚度仿生捕蝇草柔性抓手设计与实验研究[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2023.
- [35] Dong X, Xu J W, Xu X Z, et al. Sunlight-driven continuous flapping-wing motion[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2020, 12(5): 6460-6470.
- [36] 王震. 基于光固化制造系统的光驱动微机器人的制备和操控研究[D]. 烟台: 烟台大学, 2023.
- [37] Li J F, Sun M J, Wu Z Q, et al. Design, analysis, and grasping experiments of a novel soft hand: Hybrid actuator using shape memory alloy actuators, motors, and electromagnets[J]. *Soft Robotics*, 2020, 7(3): 396-407.
- [38] Zhuo S Y, Zhao Z G, Xie Z X, et al. Complex multiphase organohydrogels with programmable mechanics toward adaptive soft-matter machines[J]. *Science Advances*, 2020, 6(5): eaax1464.
- [39] Deimel R, Brock O. A novel type of compliant and underactuated robotic hand for dexterous grasping[J]. *International Journal of Robotics Research*, 2016, 35(1/2/3): 161-185.
- [40] 朱银龙, 赵虎, 苏海军, 等. 四指软体机械手机械特性分析与抓取试验[J]. *农业机械学报*, 2022, 53(9): 434-442.
- [41] Chen Y L, Zhang J H, Gong Y J. Utilizing anisotropic fabrics composites for high-strength soft manipulator integrating soft gripper[J]. *IEEE Access*, 2019, 7: 127416-127426.
- [42] Yan Y D, Cheng C, Guan M J, et al. Texture identification and object recognition using a soft robotic hand innervated bio-inspired proprioception[J]. *Machines*, 2022, 10(3): 173.
- [43] 权家乐. 仿人六指刚柔耦合机械手设计与实验研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2022.
- [44] Huang W K, Xiao J L, Xu Z P. A variable structure pneumatic soft robot[J]. *Scientific Reports*, 2020, 10(1): 18778.
- [45] 付敏, 王成梦, 郝镒林, 等. 变结构气动软体机械手的设计及试验研究[J]. *机床与液压*, 2023, 51(13): 7-13, 26.
- [46] 李健, 戴楚彦, 王扬威, 等. 面向草莓抓取的气动四叶片软体抓手研制[J]. *哈尔滨工业大学学报*, 2022, 54(1): 105-113.
- [47] Wang W, Ahn S H. Shape memory alloy-based soft gripper with variable stiffness for compliant and effective grasping[J]. *Soft Robotics*, 2017, 4(4): 379-389.
- [48] 杨羽. 面向果实采摘的仿生灵巧手结构设计与实验研究[D]. 镇江: 江苏大学, 2022.
- [49] Xie Z X, Domel A G, An N, et al. Octopus arm-inspired tapered soft actuators with suckers for improved grasping[J]. *Soft Robotics*, 2020, 7(5): 639-648.
- [50] Ranzani T, Gerboni G, Cianchetti M, et al. A bioinspired soft manipulator for minimally invasive surgery[J]. *Bioinspiration & Biomimetics*, 2015, 10(3): 035008.
- [51] Wang W, Li C Z, Cho M, et al. Soft tendril-inspired grippers: Shape morphing of programmable polymer-paper bilayer composites[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2018, 10(12): 10419-10427.
- [52] 徐丰羽, 郭义全, 周映江, 等. 软体机器人的驱动器及制作方法研究综述[J]. *南京邮电大学学报(自然科学版)*, 2018, 38(4): 69-80.
- [53] Gong Z Y, Xie Z X, Yang X B, et al. Design, fabrication and kinematic modeling of a 3D-motion soft robotic arm [C]//*Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO)*. Piscataway, NJ: IEEE, 2016: 509-514.
- [54] 王永青, 邓建辉, 李特, 等. 软体机器人3D打印制造技

- 术研究综述[J]. 机械工程学报, 2021, 57(15): 186-198.
- [55] 陈尤旭. 面向软体机器人的软材料3D打印实验研究[D]. 苏州: 苏州大学, 2020.
- [56] Goh G L, Yeong W Y, Altherr J, et al. 3D printing of soft sensors for soft gripper applications[J]. *Materials Today: Proceedings*, 2022, 70: 224-229.
- [57] Lin M, Vatani M, Choi J W, et al. Compliant underwater manipulator with integrated tactile sensor for nonlinear force feedback control of an SMA actuation system[J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2020, 315: 112221.
- [58] Yeong W Y, Goh G L, Goh G D, et al. 3D printing of soft grippers with multimaterial design: Towards shape conformance and tunable rigidity[J]. *Materials Today: Proceedings*, 2022, 70: 525-530.
- [59] 洪吉, 刘伟庭, 陈裕泉. 软光刻技术[J]. 国外医学(生物医学工程分册), 2001(3): 134-137.
- [60] 刘伟庭. 柔性微图形复制技术的研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2003.
- [61] 费燕琼, 庞武, 于文博. 气压驱动软体机器人运动研究[J]. 机械工程学报, 2017, 53(13): 14-18.
- [62] George Thuruthel T, Ansari Y, Falotico E, et al. Control strategies for soft robotic manipulators: A survey[J]. *Soft Robotics*, 2018, 5(2): 149-163.
- [63] Webster R J, Jones B A. Design and kinematic modeling of constant curvature continuum robots: A review[J]. *International Journal of Robotics Research*, 2010, 29(13): 1661-1683.
- [64] 张晗. 气动软体机械手抓取性能研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2019.
- [65] 肖宇. 气动软体机械手设计及实验研究[D]. 南京: 东南大学, 2016.
- [66] 周芳宇. 气动软体机械手的优化设计[D]. 南京: 东南大学, 2020.
- [67] 朱晓光. 气动软体机械手抓持力规划研究及结构优化设计[D]. 长沙: 湖南大学, 2020.
- [68] 邵冬冬, 夏晓舟. Cosserat理论与模型的研究进展[J]. 低温建筑技术, 2014, 36(1): 10-12.
- [69] Renda F, Cacucciolo V, Dias J, et al. Discrete Cosserat approach for soft robot dynamics: A new piece-wise constant strain model with torsion and shears[C]//*Proceedings of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*. Piscataway, NJ: IEEE, 2016: 5495-5502.
- [70] Renda F, Armanini C, Lebastard V, et al. A geometric variable-strain approach for static modeling of soft manipulators with tendon and fluidic actuation[J]. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 2020, 5(3): 4006-4013.
- [71] 王田苗, 郝雨飞, 杨兴帮, 等. 软体机器人: 结构, 驱动, 传感与控制[J]. 机械工程学报, 2017, 53(13): 1-13.
- [72] 闫继宏, 石培沛, 张新彬, 等. 软体机械臂仿生机理、驱动及建模控制研究发展综述[J]. 机械工程学报, 2018, 54(15): 1-14.
- [73] 许宗贵. 仿生软体机械手的运动学建模与抓持规划[D]. 杭州: 浙江工业大学, 2018.
- [74] Chen J, Dang Y, Han J D. Offset-free model predictive control of a soft manipulator using the Koopman operator[J]. *Mechatronics*, 2022, 86: 102871.
- [75] Zou S Q, Lyu Y Y, Qi J M, et al. A deep neural network approach for accurate 3D shape estimation of soft manipulator with vision correction[J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2022, 344: 113692.
- [76] 姜皓. 基于蜂巢气动网络结构的软体机器人手臂设计、控制与应用的研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2021.
- [77] 董红兵. 一种充气式软体全向弯曲模块关键技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2016.
- [78] Chen Y L, Sun Q, Wang J, et al. Sliding mode control with feedforward compensation for a soft manipulator that considers environment contact constraints[J]. *Journal of Marine Science and Engineering*, 2023, 11(7): 1438.
- [79] Jin Y S, Wang Y F, Chen X T, et al. Model-less feedback control for soft manipulators[C]//*Proceedings of 2017 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*. New York: ACM, 2017: 2916-2922.
- [80] You X K, Zhang Y X, Chen X T, et al. Model-free control for soft manipulators based on reinforcement learning[C]//*Proceedings of 2017 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*. New York: ACM, 2017: 2909-2915.
- [81] Li P J, Wang G T, Jiang H, et al. A Q-learning control method for a soft robotic arm utilizing training data from a rough simulator[C]//*Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO)*. Piscataway, NJ: IEEE, 2021: 839-845.
- [82] Thuruthel T G, Falotico E, Renda F, et al. Model-based reinforcement learning for closed-loop dynamic control of soft robotic manipulators[J]. *IEEE Transactions on Robotics*, 2019, 35(1): 124-134.
- [83] Wang Q L, Zhou X H, Jiang H J, et al. Polyimide sensing layer for bending shape measurement in soft surgical

- manipulators[J]. *Optik*, 2019, 183: 179–188.
- [84] 刘会聪, 杨梦柯, 袁鑫, 等. 液态金属柔性感知的人机交互软体机械手[J]. *中国机械工程*, 2021, 32(12): 1470–1478.
- [85] Tang X T, Li K, Liu Y X, et al. Coiled conductive polymer fiber used in soft manipulator as sensor[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2018, 18(15): 6123–6129.
- [86] Feng Y B, Liu H, Zhu W H, et al. Muscle-inspired MX-ene conductive hydrogels with anisotropy and low-temperature tolerance for wearable flexible sensors and arrays[J]. *Advanced Functional Materials*, 2021, 31(46): 2105264.
- [87] Wang Y, Xia Y, Xiang P, et al. Protein-assisted freeze-tolerant hydrogel with switchable performance toward customizable flexible sensor[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2022, 428: 131171.

Research progress on key technologies of soft manipulator

FU Min, WANG Peng, WANG Chengmeng, CAO Zhong, CHEN Jiankun

College of Mechanical and Electrical Engineering, Northeast Forestry University, Harbin 150040, China

Abstract The soft manipulator has good environmental adaptability, flexibility and man-machine interaction, and can be used in many fields such as crop picking, underwater exploration, medical rehabilitation, field rescue, and item sorting. In this paper, the driving mode, manufacturing technology, configuration, modeling and control methods of soft manipulator and other key technologies are reviewed, the development status of related technologies in recent years is introduced, the existing problems and difficulties are analyzed, and the future development direction of soft manipulator is discussed.

Keywords soft manipulator; actuation; configuration; manufacturing technology; modeling and control ●



(责任编辑 王微)