DOI: 10.3901/JME.2021.15.186

软体机器人 3D 打印制造技术研究综述^{*}

王永青¹ 邓建辉¹ 李特¹ 刘阔¹ 刘海波¹ 马书根²

(1. 大连理工大学精密与特种加工教育部重点实验室 大连 116024;

2. 立命馆大学机器人系 滋贺 525-8577 日本)

摘要: 基于弹性、软质材料的软体机器人变形能力强、人-机-环境共融性好,在工业、医疗、家庭服务等众多领域具有良好的应用前景。软体机器人是本体、驱动、感知等高度集成的新型机电一体化智能系统。软体机器人呈现的诸多新特征给机器人领域的制造、驱动、建模、感知及控制等技术带来了全新的挑战。软质材料 3D 打印技术与装备的快速发展为软体机器人制造实现提供了有力支撑。首先,介绍了主流软质材料 3D 打印技术的基本原理与特点,包括熔融沉积成形、直接墨水书写、喷墨打印、光固化成型和选择性激光烧结 3D 打印技术。然后,针对软体机器人一体化制造发展需求,介绍了多材料 3D 打印、4D 打印、嵌入式 3D 打印等前沿技术。最后,介绍和分析了国内外基于 3D 打印技术的软体驱动器和柔性传感器经典案例,结合控制-传感-驱动一体化的类生物结构软体机器人发展需求,预测了未来 3D 打印技术主要发展趋势与技术挑战。

关键词: 3D 打印; 软体机器人; 一体化制造技术; 软体驱动器; 柔性传感器

中图分类号: TP242

Review of Research on 3D Printing Manufacturing Technology of Soft Robots

WANG Yongqing¹ DENG Jianhui¹ LI Te¹ LIU Kuo¹ LIU Haibo¹ MA Shugen²

(1. Key Laboratory for Precision & Non-traditional Machining of Ministry of Education,

Dalian University of Technology, Dalian 116024;

2. Department of Robotics, Ritsumeikan University, Shiga-ken 525-8577, Japan)

Abstract: Soft robots based on elastic and soft materials have strong deformation ability and good human-machine-environment integration, and have good application prospects in many fields such as industry, medical treatment, and home service. Software robot is a new type of highly integrated mechatronics intelligent system such as ontology, drive and perception. Many new features presented by soft robots bring new challenges to manufacturing, driving, modeling, sensing and control technologies in the field of robotics. The rapid development of 3D printing technology and equipment for soft materials has provided favorable support for the realization of software robot manufacturing. First, the basic principles and characteristics of mainstream soft material 3D printing technology are introduced, including fused deposition modelling, direct ink writing, inkjet printing, stereo lithography and selective laser sintering 3D printing technology. Then, in response to the development needs of software robot integrated manufacturing, multi-material 3D printing, 4D printing, embedded 3D printing and other cutting-edge technologies were introduced. Finally, introduced and analyzed the classic cases of software drivers and flexible sensors based on 3D printing technology at home and abroad, combined with the development needs of control-sensing-drive integrated biostructure-like soft robots, and forecasted the main development trends and technologies of 3D printing technology in the future challenge.

Key words: 3D printing; soft robot; integrated manufacturing technology; software driver; flexible sensor

^{*} 国家自然科学基金(51805071)、中央高校基本科研业务费(DUT18RC(3)073)和大连市人才专项计划(2019RQ026)资助项目。20200810 收到初稿, 20201226 收到修改稿

0 前言

受章鱼、尺蠖等软质属性生物的仿生启发, 软体机器人技术研究迅速升温, 并发展成为机器人领域的热点方向。软体机器人是本体、驱动、感知高度集成的新型机电一体化智能系统, 在医疗手术(血管介入手术、微创手术等)^[1-2]、辅助康复(辅助行走等)^[3]、易碎体分拣(生物组织、果蔬等)^[4]、非结构环境探测(野外侦查、太空探测等)^[5-6]、水下操作(水下夹取、仿生鱼侦查等)^[7-8]等人-机-环境交互柔性和安全性要求较高的重点领域具有极好的应用前景。

软体机器人, 不同于由刚性关节、铰链、电动机等“硬”部件组成的传统机器人, 一般由软质、高弹性、可复的硅橡胶、聚氨酯、水凝胶等高分子复合材料作为本体, 气/液流体驱动^[9]形状记忆合金^[10]、介电弹性体^[11]等智能材料作为驱动器, 柔性、高感知密度的电/光/气压原理的检测器件作为环境和本体状态感知器。因此, 软体机器人可具有良好的连续变形能力、运动灵活性、友好交互性及生物相容性。

多功能高度集成导致软体机器人本体设计可能呈现有腔、孔道、多层、材料特性梯度变化、刚柔连接等复杂结构或力学特性, 从而使其制造理论和技术成为研究热点之一。软体机器人制造技术包括形状沉积制造、硅胶浇注、3D 打印和混合加工等工艺。形状沉积制造是一种多层沉积工艺, 通过重复沉积-去除的步骤, 制得所需的软体机器人本体结构^[12]。此外, 还可在沉积过程中嵌入传感器、驱动源和电路等功能部件, 实现本体-传感-驱动一体化制造。然而, 形状沉积制造一般只能采用手工操作且步骤繁琐, 限制了软体机器人的制造质量和效率。硅胶浇注是通过拆分模型并设计模具, 利用石蜡或凡士林涂层以防止粘连, 将弹性体混合溶液(例如硅橡胶和固化剂)倒入模具固化成型, 最后将各部分构件粘结成具有特定结构的软体机器人本体^[13]。然而, 硅胶浇注方式粘结面易破裂^[14]且难以适用于多材料制造等缺点限制了软体机器人的服役生命周期、操作安全性及多功能性。2016 年, 美国哈佛大学 MICHAEL 等^[15]采用 3D 打印工艺制造了仿章鱼软体机器人, 一定程度上引起了国内外学者对软体机器人 3D 打印制造工艺的关注。

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。目前, 可用于软体机器人制造技术的 3D 打印工艺

包括熔融沉积成形(Fused deposition modelling, FDM)、直接油墨书写(Direct ink writing, DIW)、喷墨打印(Inkjet printing)、光固化成型(Stereo lithography, SLA、Digital light processing, DLP)选择性激光烧结(Selective laser sintering, SLS)等技术。软体机器人 3D 打印制造技术避免了人工误差、简化了制造步骤, 实现了软体机器人低成本的个性化制造。未来, 随着 3D 打印工艺的不断发展, 软体机器人高质量一体化制造成为可能。

在本文中, 尽可能全面地综述了当下可用于软体机器人的 3D 打印工艺, 并介绍了在此基础上发展的多材料 3D 打印、4D 打印、嵌入式 3D 打印等适用于多功能需求的软体机器人前沿 3D 打印技术。列举了国内外较有代表性的基于 3D 打印工艺制备的软体驱动器和柔性传感器, 并在此基础上, 分析了 3D 打印工艺在软体机器人领域的现存问题与未来发展趋势。

1 软质材料 3D 打印技术

1.1 熔融沉积成形

熔融沉积成形是一种较为经济且应用广泛的 3D 打印技术。如图 1 所示, 通过挤压机构将丝材连续输送至喷嘴内并加热, 再将熔融的材料从喷嘴挤出沉积, 冷却固化成型。按照设计好的三维模型, 层层堆叠成型。

图 1 FDM 打印原理示意图

便于可靠挤出、快速加热熔化-冷却固化成型的软质打印丝材是熔融沉积成形技术应用于软体机器人制造领域的关键。目前, 较为成熟的 FDM 软质打印丝材主要为聚氨酯(Polyurethane, TPU)材料, 例如 3D Stratasys 公司的 FDM TPU 92A 和美国 NinjatTeK 公司 NinjatFlex(85A)。其中, 以 NinjatFlex 材料最为出色, 较常规的 TPU 丝材更加柔软, 并且可承受约 660% 的应变。澳大利亚伍伦贡大学 RAHIM 等^[16]基于 FDM 技术, 采用 TPU 丝材制备了仿手指软体机器人, 可用于抓取易碎、形状不规

则等物体。

但是,相较于硅橡胶等软质材料,TPU 材料硬度较高,变形能力和人-机交互能力略显不足。因此,对现有 TPU 丝材进行改性或者研发新型软质丝材至关重要。北京化工大学张迪等^[17]为了使石墨烯材料具备 FDM 打印所需性能,将石墨烯溶液与可 FDM 打印的 PLA 材料相混合,制备了可打印的石墨烯复合丝材。这一案例为开发 FDM 技术的软质丝材提供了新的思路。未来,可将硅橡胶等软质材料与 PLA、ABS、TPU 等 FDM 技术常用材料相混合,以制备可打印的软质丝材。从而使得基于 FDM 技术的软体机器人更为柔软,推进 FDM 技术在 3D 打印软体机器人领域内的应用。

1.2 直接油墨书写

直接油墨书写是当前最为灵活的 3D 打印技术之一。如图 2 所示,DIW 和 FDM 都是基于挤出式的 3D 打印技术。其基本原理是将油墨材料预装入打印头中,利用电动缸或高压气体等动力源驱动活塞,使油墨从喷嘴中挤出,挤出后的油墨通过硫化^[18]、相变^[19]、凝胶化^[20]、溶剂蒸发^[21]等方式固化成型,再层层堆积成零件。

图 2 DIW 打印原理示意图

在 DIW 技术中,油墨材料的流变学性能在一定程度上决定了挤出性能和成型精度。此外,挤出后油墨的固化成型速度决定了模型结构和尺寸等特性。目前,可用于 DIW 技术打印软体机器人的材料较为广泛,例如硅橡胶、硅酮、水凝胶等软质材料。其中,硅橡胶材料具备良好的力学性能,是目前制备软体机器人的理想材料之一。为了实现采用硅橡胶材料 DIW 软体机器人,一般需要对市售的硅橡胶材料进行改性,使硅橡胶具备可打印的流变学性能。常见措施是在硅橡胶材料中添加二氧化硅等触变剂。硅橡胶与二氧化硅形成弱化学键,在受到挤压时,化学键断裂,油墨黏度变低,以保证墨水能连续不断的挤出;挤出后,化学键恢复以保证挤出后的墨水能保持原有形状。基于此原理,浙江大学周

路瑜等^[22]通过往市售多种硅橡胶溶液添加不同质量分数的疏水性气相纳米二氧化硅,开发出了一种适用于大多数市售硅橡胶的改性方法。麻省理工学院 YUK 等^[23]在硅橡胶溶液添加二氧化硅,探索了 DIW 中喷头直径、高度、挤出速度等关键参数对长丝成型形状的影响。

虽然添加触变剂后,硅橡胶材料具备了可打印的流变学性能,但是如果不及时固化,在打印大尺寸软体机器人结构时,因自身重力原因会使形状发生变化。因此,研究硅橡胶油墨的快速固化是打印大尺寸结构的关键因素。目前常见措施为加热促进固化或者改性成 UV 光固化。美国俄勒冈州立大学 OSMAN 等^[24]在组装 DIW 打印机中,在两侧添加了加热板部件,在打印的同时,对油墨进行实时加热,加速了硅橡胶油墨的固化速度,从而制备了软体爬行机器人。瑞士苏黎世大学 MANUEL 等^[25]将硅橡胶油墨改性成光敏材料,在打印的同时辅以 UV 光照射,使得硅橡胶油墨能够及时固化,从而制备了仿象鼻驱动器。

在设备方面,目前可实现 DIW 技术的商用打印机多为生物 3D 打印机,例如 3D Discovery 的 Regenu 生物 3D 打印机和 Envision Tec 生物 3D 打印机。这些生物 3D 打印机价格昂贵、料筒较小,对于较大尺寸软体机器人制造只能频繁更换料筒,但会导致接续打印精度问题。未来,研发出低成本的打印机或者组装打印机的方法,对推进 DIW 在软体机器人制造领域的应用至关重要。

1.3 喷墨打印

喷墨打印是基于材料喷射的 3D 打印技术,如图 3 所示,将原材料(又称墨水)预装至打印头,打印头按预设路径将未固化的液态微滴或熔融材料连续喷射至成型平台上,之后相邻液滴融合并在 UV 光或加热-冷凝作用下固化。重复此步骤,层层堆积成零件模型。

图 3 喷墨打印原理示意图

与直接墨水书写类似,在喷墨打印技术中,墨

水的流变学性能决定了打印的质量。其中, 如果墨水的粘性力占优势, 则打印过程中不会形成液滴, 打印无法继续; 如果墨水的惯性或表面张力占主导地位, 则在打印过程中喷射的液滴将易于飞溅或分散成多个附属液滴, 打印精度将会降低。一般采用奥内佐格数数(Oh)来衡量墨水的可行性

$$O_h = \frac{\sqrt{Wb}}{Re} = \frac{\mu}{\sqrt{\rho l \gamma}} \quad (1)$$

式中, ρ 为密度; μ 为黏度; γ 为表面张力; l 为墨滴直径; Re 为雷诺数; Wb 为韦伯数。当 O_h 在 0.1 到 10 的范围代表墨水是较为理想的打印材料^[26]。

目前, 在喷墨打印技术领域中, 以 3D stratasys 公司研发的 polyjet 打印技术应用最为广泛。其中, Tangoplus 系列材料成形后柔软度与硅橡胶类似, 在 3D 打印软体机器人领域中有广泛的应用前景。上海交通大学谷国迎等^[27]采用 Tangoplus 系列材料打印了变刚度抓取手的柔性本体部分。哈佛大学 BARTLETT 等^[28]采用 Tangoplus 系列材料和 Vero white 材料(硬)打印了跳跃机器人软硬结合的本体部分。

受益于数以千计的液滴同时喷射成型, 喷墨打印技术能够高效快速的打印零件。此外, 与基于墨水打印的 DIW 相似, 喷墨打印也较易实现多材料 3D 打印技术。因此喷墨打印在软体机器人制造领域中有较好的应用前景, 但油墨流变学性能要求较高, 相关的油墨配置方法复杂, 并且打印设备较为昂贵。这些都限制了喷墨打印在软体机器人制造领域的应用, 未来, 油墨配置方法和打印设备的开发亟待进一步的研究。

1.4 光固化成型

光固化成型技术是最早使用的 3D 打印技术, 分为立体光固化和数字光处理技术。如图 4a 所示, UV 按照预设的图形照射, 以点、面的形式将光敏原材料迅速固化, 每层固化后, 升降台下降以固化下一层, 层层固化获得零件模型。

在光固化成型领域中, 有机硅材料是 3D 打印软体机器人的常用材料。然而, 单一的有机硅材料无法被光固化成型, 必须将有机硅材料改性成光敏材料, 这已成为当前的研究热点之一。美国弗吉尼亚理工大学 SIRRINE 等^[29]开发了一种新型的光固化有机硅树脂, 由二硫醇和二丙烯酸酯官能团的聚(二甲基硅氧烷)低聚物组成, 成型后的弹性体具有较高的断裂伸长率和拉伸应变。中国科学院赵婷婷等^[30]采用硅氧烷-环氧树脂并与丙烯酸酯混合, 合成了一种可用于光固化 3D 打印的混合油墨。相比传统的有机硅树脂, 成型后的弹性体具有更好的机

械性能。

光固化成型技术研究较早, 在打印设备方面较为成熟。常见的如 Formlabs 公司的 Formlab 数字系列的桌面式 SLA 打印机。但近几年来, 通过改装光固化 3D 打印机以提升打印速度方面, 研究员们展开了一系列的研究。相较于原有的光固化成型技术(SLA、DLP), 开发出了快数十倍的新型打印技术。美国北卡罗来纳大学的 JOHN 等^[31]基于 DLP 打印技术开发出了一种连续液态界面生成(CLIP)的打印方法。如图 4b 所示, 利用氧气抑制光固化的原理, 在打印机底部设置了既可以通光线(固化)又可以通氧气(抑制固化)的特殊薄层, 通过精确地控制氧气和 UV 光, 让液体光敏树脂按预设零件模型固化, 大大提升了打印速度。加利福尼亚大学伯克利分校 KELLY 等^[32]开发出了一种新型的容积式 3D 打印方式。如图 4c 所示, 在原有的打印机基础上, 采用旋转的打印平台, 使得光敏树脂能够接收到多方向的 UV 照射, 以多方向的成型面信息固化原材料, 从而提高了零件的打印速度。

图4 光固化成型及其改进技术原理示意图^[31-32]

1.5 选择性激光烧结

如图 5a 所示,选择性激光烧结技术采用红外激光器作为发射能源,激光束在计算机控制下根据分层截面信息进行有选择地烧结,将相邻粉末熔融,照射停止后冷却固化成预设成型面,层层烧结得到预设零件。

图 5 SLS 打印原理示意图

与 FDM 打印加热融化-冷却固化的成型模式类似,目前,适用于 SLS 打印软体机器人的材料主要为热塑性聚氨酯粉末。荷兰代尔夫特理工大学 SCHARFF 等^[33]基于 SLS 技术,采用 TPU-92A 粉末材料打印了集传感器于一体的气动夹持手。与 FDM 技术相似,未来,研发相应的软质材料粉末也是推进 SLS 技术在软体机器人制造领域应用的关键点。

1.6 3D 打印技术对比分析

软体机器人主要采用软弹性材料制造,设计结构、尺寸、力学特性等因素对打印技术和装备提出了较高要求。当前,FDM 技术虽然成本低、普及率高,但与 SLS 类似,可打印的材料仅限于热塑性材料,材料性能很难满足软体机器人高弹性需求。光固化成型技术虽然成型精度高、打印速度较快,但是设备较为昂贵且较难实现多材料 3D 打印方式。基于墨水打印的 DIW 和喷墨打印是目前在软体机器人领域中应用最为广泛的打印技术。但是,喷墨打印的油墨配置更为复杂且灵活性不如 DIW 技术。而 DIW 与 FDM 等挤出式打印技术类似,分辨率与速度相互权衡,在精度和速度方面不如喷墨打印。

2 3D 打印前沿技术

从仿生学角度看,软体机器人技术发展趋势之一是驱动、感知、控制、供能等不同功能组件的高度一体化集成。因此,这对软体机器人 3D 打印制造技术提出了新的挑战和需求。近年来,多材料 3D 打印、嵌入式 3D 打印、4D 打印等新技术不断发展。

2.1 多材料 3D 打印技术

多材料 3D 打印技术是指在 3D 打印时采用两种

以上材料对同一零件交替进行打印的方法。例如,采用 DIW 打印零件时,通过交替使用多个预装不同原材料的喷头,可实现以多种材料对同一零件进行打印。多材料 3D 打印技术的发展有利于多功能一体化打印软体机器人,实现智能材料与软质材料混合打印和梯度硬度材料打印,从而减少后期粘接处理,增加软体机器人连接精度和可靠性。

哈佛大学 BARTLETT 等^[28]采用基于喷墨打印原理的多材料 3D 打印技术制备了跳跃机器人软硬结合的本体结构。如图 6a 所示,采用 3D Stratasys 公司的类橡胶墨水与热塑性墨水协同喷射,打印了从高度柔韧(橡胶材料)过渡到完全刚性(热塑性材料)的本体结构。在软硬结合的本体结构中,软质部分提供了优秀的变形能力和良好的人-机交互能力。硬质部分不仅为刚性控制部件提供了接口,而且当采用内部燃烧的气体驱动时,还能将燃烧能量集中喷射至地面,提升跳跃机器人的运动效率。

北京航空航天大学文力等^[8]采用基于 DIW 原理的多材料 3D 打印技术,打印了水下软体吸附机器人本体。如图 6b 所示,仿生吸附于鲨鱼背上的鲫鱼的自体结构,采用不同硬度的油墨材料多喷头交替打印,构建了软硬结合的本体结构。

图 6 多材料 3D 打印应用实例^[8, 28, 34]

哈佛大学 JAMES 等^[34]基于 DIW 原理,开发了采用单个微流体打印头的多材料 3D 打印技术。如图 6c 所示,设计了一种新型的 3 通道打印喷头,左右两通道分别通入不同的原材料。在打印时,通

过调节左右通道的气压可在打印过程中无缝切换两种原材料, 实现两种材料交替打印。相较于多喷头的打印方式, 无需转换打印头, 节省了 3D 打印成本和减少了打印时间。

多材料 3D 打印技术的发展与软质材料 3D 打印技术密切相关。当前, 适用于多材料 3D 打印的软质材料 3D 打印技术受限, 较为常用的是喷墨打印和 DIW。然而, 基于喷墨打印的多材料 3D 打印受限于高设备成本、严格的墨水性能要求以及有限的材料选择, 在 3D 打印软体机器人领域中难以广泛应用。相较之下, 基于 DIW 的打印方法更为通用, 但是依然具有打印速度与分辨率相互权衡的局限性。而其他的 3D 打印技术在未来也有可能实现多材料 3D 打印, 以其独特的优势为多材料 3D 打印技术做出贡献, 例如, 光固化成型的 DLP, 尤其是 CLIP 快速成型的优势。因此未来应开发更多适用于多材料 3D 打印方式的 3D 打印技术, 为采用多材料 3D 打印方式制备软体机器人提供更为宽泛的选择。此外, 不同打印材料的相容性、硬度梯度将会影响成型制件的质量。例如在打印具有软硬结合需求的软体机器人本体时, 如果相邻界面硬度梯度值过高, 在软体机器人运行时, 界面处会导致应力集中, 影响软体机器人的寿命。因此, 对打印材料进行理论研究也是未来研究的重点。未来, 可基于 Comsol 等仿真软件, 结合理论推导模型, 以成型制件的质量为目的, 完善打印的材料理论模型并优化相应的打印参数。

2.2 4D 打印技术

4D 打印是指 3D 打印构件的几何形状或物理特性可在水、磁场、热或酸碱度等外界条件刺激下随时间发生变化^[35]。目前, 在 4D 打印软体机器人领域内, 研究员们将纤维素、铁磁粉等智能材料与硅橡胶、水凝胶等软质材料混合均匀, 以制备出复合油墨。采用复合油墨打印成形的软体机器人, 在外界刺激下, 能够实现自我组装^[36]、形状变化^[37]、自我修复^[38]等功能, 实现了将软质材料与机械、电气、磁场、温度等特性集成, 有助于满足软体机器人多功能与一体化发展的需求。

受自然界中卷须、叶子、花苞等通过内部膨胀来响应环境刺激的启发, 哈佛大学 SYDNEY 等^[39]基于 DIW 技术, 采用纤维素与水凝胶的复合油墨打印了复合零件。如图 7a 所示, 在打印时, 通过控制复合油墨中纤维素的排列, 以对水凝胶网络编码溶胀行为。因此, 当成型后的复合零件浸入水中后, 部分结构受硬质纤维的约束而无法溶胀, 整体结构

发生局部溶胀, 从而形成预设的零件模型。

美国麻省理工学院 KIM 等^[37]基于 DIW 技术, 采用磁性材料与硅胶的复合油墨打印了快速转变的磁弹性体。如图 7b 所示, 在磁弹性体的制造过程中, 首先在弹性体先驱液中混入磁粉(钕铁硼), 然后, 打印时在喷头周围施加定向磁场, 以在材料固化前编码磁畴方向。制备完成后的磁弹性体在外界磁场激励下发生预设的变形, 可以实现爬行、跳跃和载物等功能。

新加坡科技与设计大学 GE 等^[38]基于数字光处理技术, 采用形状记忆聚合物与甲基丙烯酸酯基共聚物打印了热响应的复合结构。如图 7c 所示, 在打印过程中通过自动交换料筒来交换不同的聚合物溶液, 巧妙地实现了基于数字光处理原理的多材料 3D 打印技术, 成功打印出了形状记忆聚合物与甲基丙烯酸酯基共聚物的复合零件。该零件可随外界温度的改变而形成预设的不同形状。

图 7 4D 打印应用实例^[37-40]

澳大利亚墨尔本大学 MILENA 等^[40]基于 FDM 技术, 打印了 PH 响应的复合零件。如图 7d 所示, 通过在 P2VP(聚-2-乙烯基吡啶)中添加一定质量分数的 ABS, 从而制备出可印刷的复合丝材。在特定的温度下, 采用此复合丝材打印了复合零件。复合零件表现出了随 pH 值变化而改变其溶胀程度的特性。

4D 打印是近几年来新出的一种新型的 3D 打印技术, 与其他的新兴技术类似, 4D 打印仍然面临许多的挑战。其中, 材料是 4D 打印面临的重大挑战, 迄今为止, 形状记忆聚合物和水凝胶是用于 4D 打印最广泛使用的材料, 但形状记忆聚合物变形较小, 难以满足软体机器人更为复杂变形的需求, 水凝胶受限于材料较差的力学性能, 在软体机器人领域中难以广泛应用。因此, 对新型智能材料的研发将是推进 4D 打印技术在软体机器人广泛应用的重点。其次, 为了采用 4D 打印技术制备的软体机器人能精确地完成预设的功能, 精确的理论建模也是必须的。4D 打印成型的零件具有打印状态和转换状态两种结构。需要对打印状态的结构进行精确的理论建模, 从而预测出转换状态的结构构型。或者基于精确的理论建模, 通过预设转换状态的结构构型来设计所需要打印的结构。未来, 随着新智能材料的研发, 新打印技术、新结构设计和建模工具/软件的进步将使得 4D 打印能满足更多的功能需求, 进一步扩宽在软体机器人领域的应用。

2.3 嵌入式 3D 打印技术

嵌入式 3D 打印是指基于 DIW 技术, 采用弹性体作为基质材料, 通过沉积喷嘴将导电性油墨等智能材料挤出到未固化的弹性基质材料中成型的一种打印技术。打印完成后, 两者共同固化形成一个整体。采用嵌入式 3D 打印技术, 可将传感器、驱动网络等元件集成至软体机器人本体, 对实现 3D 打印完全自主的软体机器人具有重要意义。

如图 8a 所示, MUTH 等^[41]基于嵌入式 3D 打印技术, 采用导电性油墨在弹性体内部直接书写, 打印了柔性应变传感器。如图 8b 所示, MICHAEL 等^[15]基于嵌入式 3D 打印技术, 采用逃逸性油墨在柔性仿章鱼软体机器人内部书写预设图案, 打印完成后, 加热去除逃逸性油墨制备了气动驱动网络。

嵌入式 3D 打印的关键点在于如何在未固化的弹性体内部书写时, 不改变弹性体的形状, 使得成型的零件具备较好的质量。针对这一问题, 未来, 研究 DIW 和未固化材料的流变学性能, 对嵌入式 3D 打印的发展至关重要。另一方面, 嵌入式 3D 打

印技术的出现, 使得在任意的弹性体内书写各种材料成为可能。因结合软质传感器、软质控制器等部件的打印技术发展, 进一步开发嵌入式 3D 打印在软体机器人的应用, 为 3D 打印传感-控制-驱动一体化的软体机器人奠定基础。

图 8 嵌入式 3D 打印应用实例^[15, 41]

3 3D 打印在软体机器人的应用

3.1 3D 打印软体驱动器

软体驱动器是构成软体机器人主要部件, 目前, 软体驱动器按驱动方式可分为流体^[13, 42-44]、热^[1, 45-46]、电^[11, 47-48]、磁场^[37]、化学反应^[28, 49-50]等种类。这些驱动方式与形状记忆合金、介电高弹体、磁弹性体等智能材料相关, 在制造技术方面偏向个性化、多材料混合制造。得益于 3D 打印技术的个性化、数字化制造, 3D 打印软体驱动器是现在和未来的理想制造方案之一, 为实现结构复杂、功能多样的软体驱动器设计得提供了新的思路。

香港大学 YANG 等^[51]采用基于 FDM 的多材料 3D 打印技术打印了仿手指变刚度软体抓取手。如图 9c 所示, 首先通过双螺杆挤出机将形状记忆聚合物(SMP)颗粒制备成丝材, 然后在原有 FDM 打印机中添加了冷却机构, 以保证状 SMP 丝材的顺利打印。再通过添加额外的打印头, 以实现 PLA 和 SMP 的多材料打印方式, 两种材料协同打印, 制备了仿手指变刚度软体抓取手。

瑞士苏黎世大学 MANUEL 等^[25]采用基于 DIW 的多材料 3D 打印技术制备了仿象鼻软体驱动器。如图 9d 所示, 预先调配好硬-较软-软 3 种可光固化油墨, 然后采用 regenHU 公司的 3D discovery 打印机进行打印, 打印时, 通过规划装载不同油墨的打印头的路径, 制造出了可实现弯曲、伸长、扭转等运动的软体驱动器。

上海交通大学谷国迎等^[27]采用基于喷墨打印和 DIW 的复合增材制造技术打印了一种变刚度软体抓手。如图 9e 所示, 软体夹持手主要由 4 层组成, 分别是气动执行器、SMP I 层、SMP II 层、冷却层。其中, 使用基于喷墨原理的 Polyjet 打印机打印各层的主体部分, 再使用直接墨水书写方式, 采用银纳米粒子油墨在 SMP II 层打印加热回路, 最后使用粘合溶液将 4 层粘结制得变刚度软体驱动器。

图 9 3D 打印软体机器人本体实例^[25, 27, 51]

当前, 受益于软质材料 3D 打印技术的发展, 以磁、气、电等方式驱动软体驱动器的数字化制造得以实现。然而, 在驱动源这一方面往往需要借助外界的气泵、磁场发生装置等设备, 在自主性、便携性方面略显不足。针对这一问题, 仿生自然界生物以质换能, 是实现完全自主的软体驱动器的理想解决方案之一。这对 3D 打印技术提出了新的挑战。未来, 在喷墨打印、DIW 等基于墨水的 3D 打印技术基础上, 对已有材料进行化学改性或者寻找新型原材料, 使得成型零件能在电、热等信号的刺激下按需分解释放能量。再结合多材料 3D 打印技术, 将能源组件与软体驱动器本体一体化打印, 为实现 3D 打印完全自主的软体驱动器的奠定基础。

3.2 3D 打印柔性传感器

软体机器人具有连续变形的特点, 其位形、力等感知无法采用传统硬质传感器, 必须采用顺应性良好的柔性传感器。目前, 主要通过在水凝胶、硅橡胶等弹性体中嵌入银纳米颗粒^[52]、炭黑^[53]、液态金属合金^[18, 54-56]和离子水溶液^[57]等导电材料制备成柔性电阻式、电容式、光电式传感器, 以检测软体机器人的应变^[41, 52, 54]、曲率^[56]、应力^[54-55]等几何或物理特征。

水凝胶因其具有良好的溶胀性, 在制备柔性传感器中得到了广泛的应用。如图 8a 所示, 美国康奈尔大学 ODENT 等^[57]在预聚丙烯酸酯(水凝胶)溶液中加入离子导电性二氧化硅纳米颗粒, 制备了可光

图 10 3D 打印柔性传感器实例^[18, 57-59]

固化的离子复合水凝胶溶液, 然后采用连续界面生成的打印技术, 按预设构型打印了以水凝胶为基体的电阻式柔性传感器。

液态金属具有稳定的导电性能, 在制备柔性传感器这一领域中获得了关注。如图 8b 所示, 浙江大学的周璐瑜等^[18]在 DIW 的基础上, 开发了液态金属与硅酮共印的打印技术, 打印了以硅酮为基体, 内嵌液态金属的电阻式柔性传感器。

图 8f 所示, 美国康奈尔大学 SANLIN 等^[58]制备了可光固化的硅橡胶墨水 and 离子导电性水凝胶墨水, 再采用基于 DIW 的多材料 3D 打印方式, 将两种墨水交替打印至柔性执行器上, 成功制备了电容式触觉柔性传感器。

伊利诺伊大学 DAVID 等^[59]制备了可光固化的液芯和加热逃逸性油墨, 采用基于 DIW 的核壳共印的打印技术, 打印了以有机-无机混合核心流体 OrmoClear 为芯以水性三嵌段共聚物 Pluronic F127

为柔性外壳的光电式传感器。

当前, 多采用基于 DIW 的多材料打印技术打印柔性传感器, 然而受限于打印精度, 相较于传统的硬质传感器, 柔性传感器的精度还有待提高。未来, 对 DIW 技术改进或者开发基于其他软质材料打印技术成为未来的研究重点。除此之外, 将柔性传感器集成至软体机器人本体的制造技术也是未来所研究的重点。考虑采用嵌入式 3D 打印方式, 将智能材料直接集成至软体机器人本体, 实现集传感一体化的制造技术。但材料配置、结构设计、打印工艺亟待研发。

3.3 3D 打印软体机器人总结

随着 3D 打印工艺的不断发展, 软体驱动器和柔性传感器的 3D 打印制造技术日趋成熟, 在 3D 打印软体机器人领域内得到了广泛应用。表 1 总结了目前软质材料 3D 打印技术在软体机器人制造领域的可用材料、特点和应用实例。

表 1 软质材料 3D 打印技术在软体机器人的应用

打印技术	材料	特点	应用实例
FDM	TPU、SMP、P2VP 与 ABS 复合材料等	成本低、工艺相对简单、但是可用软质线材较少	软体抓取手 ^[16, 60, 61] 、pH 响应零件 ^[40]
DIW	硅橡胶及以硅橡胶为基体的复合材料、硅酮、水凝胶、液态金属、纳米银等	灵活性较高、可用于软体机器人制造的材料种类较多、可实现多材料打印、但是速度与打印精度相矛盾	软体抓取手 ^[25, 27] 、爬行机器人 ^[24, 62] 、水下机器人 ^[8, 15] 、柔性传感器 ^[18, 41, 58] 、磁弹性体 ^[37, 63]
喷墨打印	Tangoplus 系列材料和 Vero white 材料等	成型速度快、打印精度较高, 可实现多材料打印、但是可用于软体机器人制造的打印材料相对受限	软体抓取手 ^[27] 、硬度梯度分布软体驱动器 ^[28, 64]
光固化成形	光敏改性有机硅材料和水凝胶材料等	打印精度较高、打印速度快、设备昂贵、但是可用软质耗材较少	仿章鱼机器人 ^[15] 、柔性传感器 ^[57] 、微型软体机器人 ^[65, 66] 、磁响应八面体 ^[67]
SLS	TPU 等热塑性材料	打印时无需支撑、但是可用软质耗材较少	软体抓取手 ^[33]

4 技术发展趋势与挑战

相较于刚性机器人, 虽然软体机器人具有良好的顺应性、人机交互性和绝对的安全性, 但是受限于软质传感器、控制器等部件的缺乏, 当前的软体机器人只能实现单一的弯曲、爬行、跳跃等运动, 在实际应用中依然面临各种限制。在自然界中, 动植物、人都是由复杂的组织组成的, 功能迥异、结构不同, 却是高度集成的有机整体。近些年来, 软体机器人从单一的仿生生物运动机理逐渐向控制-传感-驱动一体化的类生物结构机器人发展。3D 打印技术是实现一体化类生物结构软体机器人制造的核心技术。

麻省理工学院 ROBERT 等^[68]基于喷墨打印技术, 采用液固油墨交替喷射印刷, 打印了波纹管致动器本体和机械支撑, 并且在打印的同时将液压流体注入驱动通道, 从而制备了驱动系统-能源一体化

的六足机器人。哈佛大学 MICHAEL 等^[15]采用立体光固化和嵌入式 3D 打印相结合的复合增材制造技术, 将控制器-传感器-驱动集成至软体机器人本体, 制备了完全自主的章鱼软体机器人。

类生物结构软体机器人的实现已经并将继续与 3D 打印技术的进步密切相关。

类生物结构软体机器人需要以亚微米级的制造技术构造驱动器、控制器、仿生功能表面等组件, 从而实现功能组件与本体浑然一体, 以实现更为节能的运动^[69]。当前软质材料 3D 打印技术的分辨率尚存在不小的差距, 需要对材料、打印设备、原理等进行进一步的研究。未来, 要实现以亚微米级的制造技术, 将静电纺丝等精密制造技术与 3D 打印工艺相结合是最佳的制造策略之一。浙江大学的计剑等^[70]将静电纺丝和 3D 打印工艺相结合, 制备了可快速响应水凝胶驱动器。其中, 采用静电纺丝技术构造的具有介孔结构的电纺丝热响应聚膜, 得益于亚微米级的分辨率, 在外界的刺激下, 相比于 3D

打印的多孔结构, 具有更快的响应的速度。

此外, 大尺寸多功能部件的高效制造也是实现类生物结构软体机器人的关键点之一。然而, 当前的软质材料 3D 打印技术依然面临各种限制。FDM、SLS 等基于加热融化-冷却固化成型原理的 3D 打印技术, 仅限使用聚氨酯等热塑性材料, 很难满足多功能需求。光固化成形和喷墨打印技术虽然能实现高效率的制造, 但是当前可打印的材料仅限光敏树脂类。DIW 技术广泛的可打印软质材料库以及可对材料进行化学改性, 满足了软体机器人多功能需求。然而, 打印速度和分辨率的相互权衡限制了 DIW 应用于大尺寸部件的高效制造。因此, 多种 3D 打印技术相结合, 优势互补, 例如采用光固化成形等高效 3D 打印技术制备部件尺寸较大的部分, 以此为基础, 采用 DIW 技术制备相应多功能组件。为实现大尺寸多功能部件的高效制造提供了可能。

5 结论

(1) 在阐述并分析熔融沉积成形、直接油墨书写、喷墨打印、光固化成形、选择性激光烧结等可用于软体机器人制造的 3D 打印技术特点的基础上, 进一步介绍了多材料打印、4D 打印、嵌入式 3D 打印等新型 3D 打印技术原理及应用案例。

(2) 较为详细地介绍了软材料 3D 打印技术在软体机器人本体和柔性传感器领域的典型应用案例。针对一体化类生物结构软体机器人的未来发展需求, 提出了高精度 3D 打印技术和高效 3D 打印技术的发展趋势。

参 考 文 献

- [1] 付宜利, 李显凌, 梁兆光. 基于形状记忆合金的自主导向机器人设计[J]. 机械工程学报, 2008, 44(9): 76-82.
- [2] CIANCHETTI M, RANZANI T, GERBONI G, et al. Soft robotics technologies to address shortcomings in today's minimally invasive surgery : The STIFF-FLOP approach[J]. Soft Robotics, 2014, 1(2): 122-131.
- [3] AWAD L N, BAE J, O'DONNELL K, et al. A soft robotic exosuit improves walking in patients after stroke[J]. Science Translational Medicine, 2017, 9(400): i9084.
- [4] ZHANG J, WANG H, TANG J, et al. Modeling and design of a soft pneumatic finger for hand rehabilitation[C]// IEEE International Conference on Information & Automation, August 8-10, 2015, Lijiang, Yunnan, China. New York: IEEE, 2015, 2460-2465.
- [5] TOLLEY M T, SHEPHERD R F, MOSADEGH B, et al. A resilient, untethered soft robot[J]. Soft Robotics, 2014, 1(3): 213-223.
- [6] METHENITIS G, HENNES D, IZZO D, et al. Novelty search for soft robotic space exploration[C]//17th Genetic and Evolutionary Computation Conference (GECCO), July 11-15, Madrid, SAN MARINO. New York: ASSOC COMPUTING MACHINER, 2015, 193-200.
- [7] GALLOWAY K C, BECKER K P, PHILLIPS B, et al. Soft robotic grippers for biological sampling on deep reefs[J]. Soft Robotics, 2016, 3(1): 23-33.
- [8] WANG Yueping, YANG Xingbang, CHEN Yufeng, et al. A biorobotic adhesive disc for underwater hitchhiking inspired by the remora suckerfish[J]. Science Robotics. 2017, 2(10): eaan8072.
- [9] SHEPHERD R F, ILIEVSKI F, CHOI W, et al. Multigait soft robot[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences. 2011, 108(51): 20400-20403.
- [10] MAO Shixin, DONG Erbo, JIN Hu, et al. Gait study and pattern generation of a starfish-like soft robot with flexible rays actuated by SMAs[J]. Journal of Bionic Engineering, 2014, 11(3): 400-411.
- [11] GU Guoying, ZOU Jiang, ZHAO Ruike, et al. Soft wall-climbing robots[J]. Soft Robots, 2018, eat28874: 1-12.
- [12] GAFFORD J, DING Y, HARRIS A, et al. Shape deposition manufacturing of a soft, atraumatic, deployable surgical grasper1[J]. Journal of Medical Devices. 2014, 8(3): 030927.
- [13] CHEN Zhe, LIANG Xueya, WU Tonghao, et al. Pneumatically actuated soft robotic arm for adaptable grasping[J]. Acta Mechanica Solida Sinica, 2018, 31(5): 608-622.
- [14] YUK H, ZHANG T, PARADA G A, et al. Skin-inspired hydrogel - elastomer hybrids with robust interfaces and functional microstructures[J]. Nature Communications, 2016, 7(1): 12028.
- [15] 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.
- [16] MUTLU R, ALICI G, PANHUIS M, et al. 3D printed flexure hinges for soft monolithic prosthetic fingers[J]. *Soft Robotics*, 2016, 3(3): 120-133.
- [17] ZHANG Di, CHI Baihong, LI Bowen, et al. Fabrication of highly conductive graphene flexible circuits by 3D printing[J]. *Synthetic Metals*, 2016, 217: 79-86.
- [18] ZHOU Luyu, GAO Qing, ZHAN Junfu, et al. Three-dimensional printed wearable sensors with liquid metals for detecting the pose of snakelike soft robots[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2018, 10(27): 23208-23217.
- [19] JAKUS A E, RUTZ A L, JORDAN S W, et al. Hyperelastic "bone": A highly versatile, growth factor-free, osteoregenerative, scalable, and surgically friendly biomaterial[J]. *Sci. Transl. Med.*, 2016, 8(358): 127-358.
- [20] THERRIAULT D, WHITE S, LEWIS J A. Chaotic mixing in three-dimensional microvascular networks fabricated by direct-write assembly[J]. *Nature*, 2003, 5(2): 265-347.
- [21] QI Xing, PEI Peng, ZHU Min, et al. Three dimensional printing of calcium sulfate and mesoporous bioactive glass scaffolds for improving bone regeneration in vitro and in vivo[J]. *Scientific Reports*, 2017, 7(1): 1-12.
- [22] ZHOU Luyu, GAO Qing, FU Jianzhong, et al. Multimaterial 3D printing of highly stretchable silicone elastomers[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2019, 11(26): 23573-23583.
- [23] CAI Kunpeng, SUN Jingbo, LI Qi, et al. Direct-writing construction of layered meshes from nanoparticles-vaseline composite inks: Rheological properties and structures[J]. *Applied Physics A*, 2011, 102(2): 501-507.
- [24] YIRMIBESOGLU O D, MORROW J, WALKER S, et al. Direct 3D printing of silicone elastomer soft robots and their performance comparison with molded counterparts[C]// 2018 IEEE International Conference on Soft Robotics (RoboSoft), April 24-28, 2018, Livorno Italy. New York: IEEE, 2018, 295-302.
- [25] SCHAFFNER M, FABER J A, PIANEGONDA L, et al. 3D printing of robotic soft actuators with programmable bioinspired architectures[J]. *Nature Communications*, 2018, 9(1): 1-9.
- [26] DERBY B. Inkjet printing of functional and structural materials: Fluid property requirements, feature stability, and resolution[J]. *Annual Review of Materials Research*, 2010, 40(1): 395-414.
- [27] ZHANG Yuanfang, ZHANG Ninbin, HARDIK H, et al. Fast-response, stiffness tunable soft actuator by hybrid multimaterial 3D printing[J]. *Advanced Functional Materials*, 2019, 29(15): 1806698.
- [28] BARTLETT N W, TOLLEY M T, OVERVELDE J T, et al. A 3D-printed, functionally graded soft robot powered by combustion[J]. *Science*, 2015, 349(6244): 161-165.
- [29] SIRRINE J M, MEENAKSHISUNDARAM V, MOON N G, et al. Functional siloxanes with photo-activated, simultaneous chain extension and crosslinking for lithography-based 3D printing[J]. *Polymer*, 2018, 152: 25-34.
- [30] ZHAO Tingting, YU Ran, LI Xinpan, et al. A comparative study on 3D printed silicone-epoxy/acrylate hybrid polymers via pure photopolymerization and dual-curing mechanisms[J]. *Journal of Materials Science*, 2019, 54(6): 5101-5111.
- [31] TUMBLESTON J R, SHIRVANYANTS D, ERMOSHKIN N, et al. Continuous liquid interface production of 3D objects[J]. *Science*, 2015, 347(6228): 1349-1352.
- [32] KELLY B E, BHATTACHARYA I, HEIDARI H, et al. Volumetric additive manufacturing via tomographic reconstruction[J]. *Science*, 2019, 363(6431): 1075.
- [33] SCHARFF R, DOUBROVSKI E L, POELMAN W A, et al. Towards behavior design of a 3D-printed soft robotic hand[C]// *Soft Robotics Week-Trends, Applications and Challenges Biosystems and Biorobotics*, April 25-30, 2016, Livorno, ITALY. Switzerland: Springer Int Publishing A, 2017, 23-29.
- [34] HARDIN J O, OBER T J, VALENTINE A D, et al. Microfluidic printheads for multimaterial 3D printing of viscoelastic inks[J]. *Advanced Materials*, 2015, 27(21): 3279-3284.
- [35] KUANG Xiao, ROACH D J, WU Jiangtao, et al. Advances in 4D printing: Materials and applications[J]. *Advanced Functional Materials*, 2019, 29(29): 1805290-1805291.
- [36] GE Q, QI H J, DUNN M L. Active materials by four-dimension printing[J]. *Applied Physics Letters*, 2013, 103(13): 131901.

- [37] KIM Y, YUK H, ZHAO Ruike, et al. Printing ferromagnetic domains for untethered fast-transforming soft materials[J]. *Nature*, 2018, 558(7709): 274-279.
- [38] GE Q, SAKHAEI A H, LEE H, et al. Multimaterial 4D printing with tailorable shape memory polymers[J]. *Scientific Reports*, 2016, 6(1): 31110.
- [39] GLADMAN A S, MATSUMOTO E A, NUZZO R G, et al. Biomimetic 4D printing[J]. *Nature Materials*, 2016, 15: 413-418.
- [40] NADGORNÝ M, XIAO Zeyun, CHEN Chao, et al. Three-dimensional printing of pH-responsive and functional polymers on an affordable desktop printer[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2016, 8(42): 28946-28954.
- [41] MUTH J T, VOGT D M, TRUBY R L, et al. Embedded 3D printing of strain sensors within highly stretchable elastomers[J]. *Advanced Materials*, 2014, 26(36): 6307-6312.
- [42] 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.
- [43] DEIMEL R, BROCK O. A novel type of compliant and underactuated robotic hand for dexterous grasping[J]. *The International Journal of Robotics Research*, 2016, 35(1-3): 161-185.
- [44] POLYGERINOS P, WANG Zhen, GALLOWAY K C, et al. Soft robotic glove for combined assistance and at-home rehabilitation[J]. *Robotics and Autonomous Systems*, 2015, 73: 135-143.
- [45] 杭观荣, 王振龙, 李健, 等. 基于柔性鳍单元的尾鳍推进微型机器鱼设计研究[J]. *机器人*, 2008(2): 171-175.
HANG Guanrong, WANG Zhenlong, LI Jian, et al. Design and research of tail fin propulsion mini robot fish based on flexible fin unit[J]. *Robot*, 2008(2): 171-175.
- [46] KIM H, SONG S H, AHN S. A turtle-like swimming robot using a smart soft composite (SSC) structure[J]. *Smart Materials and Structures*, 2013, 22(1): 14007.
- [47] SHINTAKE J, SHEA H, FLOREANO D. Biomimetic underwater robots based on dielectric elastomer actuators[C]//IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), October 9-14, 2016, Daejeon, Korea. New York: IEEE, 2016, 4957-4962.
- [48] ZHAO Jianwen, NIU Junyang, MCCOUL D, et al. A rotary joint for a flapping wing actuated by dielectric elastomers: design and experiment[J]. *Meccanica*, 2015, 50(11): 2815-2824.
- [49] NAKAGAWA H, HARA Y, MAEDA S, et al. A novel design of nanofibrous gel actuator by electrospinning[C]//IEEE International Conference on Nanotechnology, August 17-20, 2010, KINTEX, Korea. New York: IEEE, 2010, 1135-1138.
- [50] SHEPHERD R F, STOKES A A, FREAKE J, et al. Using explosions to power a soft robot[J]. *Angewandte Chemie International Edition*, 2013, 52(10): 2892-2896.
- [51] YANG Yang, CHEN Yonghua, LI Yingtian, et al. Bioinspired robotic fingers based on pneumatic actuator and 3D printing of smart material[J]. *Soft Robotics*, 2017, 4(2): 147-162.
- [52] YEO J C, YAP H K, XI W, et al. Flexible and stretchable strain sensing actuator for wearable soft robotic applications[J]. *Advanced Materials Technologies*, 2016, 1(3): 1600018.
- [53] LU Nanshu, LU Chi, YANG Shixuan, et al. Highly sensitive skin-mountable strain gauges based entirely on elastomers[J]. *Advanced Functional Materials*, 2012, 22(19): 4044-4050.
- [54] PARK Y L, CHEN B R, WOOD R J. Design and fabrication of soft artificial skin using embedded microchannels and liquid conductors[J]. *Sensors Journal*, IEEE, 2012, 8(12): 2711-2718.
- [55] HAMMOND F, MENGUC Y, WOOD R J. Toward a modular soft sensor-embedded glove for human hand motion and tactile pressure measurement[C]//2014 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, September 14-18, 2014, Chicago, IL, USA. New York: IEEE, 2014, 4000-4007.
- [56] MAJIDI C, KRAMER R, WOOD R J. A non-differential elastomer curvature sensor for softer-than-skin electronics[J]. *Smart Materials and Structures*, 2011, 20(10): 105017.
- [57] ODENT J, WALLIN T J, PAN W, et al. Highly elastic, transparent, and conductive 3d-printed ionic composite hydrogels[J]. *Advanced Functional Materials*, 2017, 27(33): 1701807.
- [58] ROBINSON S S, O'BRIEN K W, ZHAO Huichan, et al. Integrated soft sensors and elastomeric actuators for tactile machines with kinesthetic sense[J]. *Extreme Mechanics Letters*, 2015, 5: 47-53.

- [59] LORANG D J, TANAKA D, SPADACCINI C M, et al. Photocurable liquid core-fugitive shell printing of optical waveguides[J]. *Advanced Materials*, 2011, 23(43): 5055-5058.
- [60] TAWK C, PANHUIS I H M, SPINKS G M, et al. Bioinspired 3D printable soft vacuum actuators for locomotion robots, grippers and artificial muscles[J]. *Soft Robotics*, 2018, 5(6): 685-694.
- [61] ROELS E, TERRY S, BRANCART J, et al. Additive manufacturing for self-healing soft robots[J]. *Soft Robotics*, 2020: 1-13.
- [62] TYAGI M, SPINKS G M, JAGER E W H. 3D Printing microactuators for soft microrobots[J]. *Soft Robotics*, 2020, 00(00): 1-9.
- [63] JEON S, HOSHIAR A K, KIM K, et al. A magnetically controlled soft microrobot steering a guidewire in a three-dimensional phantom vascular network[J]. *Soft Robotics*, 2019, 6(1): 54-68.
- [64] ZATOPA A, WALKER S, MENGUC Y. Fully soft 3D-printed electroactive fluidic valve for soft hydraulic robots[J]. *Soft Robotics*, 2018, 5(3): 258-271.
- [65] SORENI-HARARI M, PIERRE R S, MCCUE C, et al. Multimaterial 3D printing for microrobotic mechanisms[J]. *Soft Robotics*, 2020, 7(1): 59-67.
- [66] ZHANG Yuanfang, NG C J X, CHEN Zhe, et al. Miniature pneumatic actuators for soft robots by high-resolution multimaterial 3D printing[J]. *Advanced Materials Technologies*, 2019, 4(10): 1900427.
- [67] JACKSON J A, MESSNER M C, DUDUKOVIC N A, et al. Field responsive mechanical metamaterials[J]. *Sci. Adv.*, 2018, 4(12): u6419.
- [68] MACCUDY R, KATZSCHMANN R, KIM Y, et al. Printable hydraulics: A method for fabricating robots by 3D co-printing solids and liquids[C]//IEEE International Conference on Robotics and Automation ICRA, May 16-21, 2016, Royal Inst Technol, Ctr Autonomous Syst, Stockholm, Sweden. New York: IEEE, 2016, 3878-3885.
- [69] WALLIN T J, PIKUL J, SHEPHERD R F. 3D printing of soft robotic systems[J]. *Nature Reviews Materials*, 2018, 3(6): 84-100.
- [70] CHEN Tingting, BAKHSHI H, LIU Li, et al. Combining 3D printing with electrospinning for rapid response and enhanced designability of hydrogel actuators[J]. *Advanced Functional Materials*, 2018, 28(19): 1800514.

作者简介: 王永青, 男, 1969 年出生, 博士, 教授, 博士研究生导师, 长江学者特聘教授。主要研究方向为测量-加工一体化制造理论与技术、智能机电装备与系统、装备在机测量理论与技术等。

E-mail: yqwang@dlut.edu.cn

邓建辉, 男, 1995 年出生, 硕士研究生。主要研究方向为软体机器人、软体 3D 打印。

E-mail: dx187735@mail.dlut.edu.cn

李特(通信作者), 男, 1987 年出生, 博士, 副教授, 硕士研究生导师。主要研究方向为软体机器人、仿生机器人、智能装备控制等。

E-mail: teli@dlut.edu.cn

刘海波, 男, 1983 年出生, 博士, 教授, 硕士研究生导师。主要研究方向为测量-加工一体化、数字化精密测量等。

E-mail: hbliu@dlut.edu.cn

刘阔, 男, 1983 年出生, 博士, 副教授, 硕士研究生导师。主要研究方向为基于深度学习的加工质量智能预测、基于加工大数据的设备健康监测及智能诊断等。

E-mail: liukuo@dlut.edu.cn

马书根, 男, 1963 年出生, 博士, 教授, 博士生导师, IEEE Fellow, JSME Fellow。主要研究方向为仿生机器人的设计与控制方法研究、超冗长和多自由度仿生机器人的研究与开发等。

E-mail: shugen@se.ritsumei.ac.jp