

3D 打印软体机器人及其传感器

王广华^{1,2}, 冯迪^{1,2}, 唐文来^{1,2,3}, 杨继全^{1,2}

(1.南京师范大学南瑞电气与自动化学院,江苏 南京 210023)

(2.南京师范大学江苏省三维打印装备与制造重点实验室,江苏 南京 210023)

(3.南京大学医学院附属鼓楼医院,江苏 南京 210008)

[摘要] 软体机器人主要是由柔性材料制成,它模仿了软体生物如章鱼、蛇、蠕虫等. 由于软体机器人能够任意改变自身的形状与尺寸,其在医疗、野外勘探、物品抓持等方面具有广泛的应用前景. 3D 打印作为一种新兴的制造方法,其与软体机器人的结合近年来发展迅速. 首先,介绍典型的 3D 打印技术及其在软体机器人主体结构制造方面的应用. 然后,讨论软体机器人各类传感器的 3D 打印研究近况. 最后,总结现有技术的不足之处并探讨该领域的未来发展方向.

[关键词] 3D 打印,软体机器人,智能材料,柔性传感器

[中图分类号] TP242 **[文献标志码]** A **[文章编号]** 1672-1292(2020)03-0057-08

3D Printing Soft Robots and Sensors

Wang Guanghua^{1,2}, Feng Di^{1,2}, Tang Wenlai^{1,2,3}, Yang Jiquan^{1,2}

(1.School of NARI Electrical and Automation, Nanjing Normal University, Nanjing 210023, China)

(2.Jiangsu Key Laboratory of 3D Printing Equipment and Manufacturing, Nanjing Normal University, Nanjing 210023, China)

(3.Nanjing Drum Tower Hospital, The Affiliated Hospital of Nanjing University Medical School, Nanjing 210008, China)

Abstract: Soft robots are mainly made of flexible materials, which imitate soft creatures that are common in nature, such as octopuses, snakes and worms. Since the soft robot can arbitrarily change its shape and size, it has extremely broad application prospects in medical treatment, filed exploration and object grasping. As an emerging manufacturing method, 3D Printing has become widely used in the areas of soft robots in the recent years. This article firstly introduces the typical 3D printing technologies and their applications in the construction of soft robots, and then focuses on the latest developments in the research of 3D printing for various sensors of soft robots. Finally, it summarizes the shortcomings of the existing 3D printing soft robots and sensors, and discusses the future development directions in this field.

Key words: 3D printing, soft robot, smart materials, flexible sensor

在当代社会,机器人已经深入到大众生活的方方面面,其中较为典型的工业机器人由刚性硬材料制成,例如常见的机械臂,此类机器人具有输出力大、精度高、可控性强等优点^[1],但其极高的刚性特征也使其在复杂环境中的运动会遭受到阻碍,这也就限制了传统机器人在某些特定领域的作用^[2-3]. 例如在人体解剖学中,需要机器人能够安全地沿着复杂轨迹运动^[3]. 在自然资源勘探中,需要机器人进入复杂多变的陌生环境中. 为了应对上述难题,研究人员深入研究发现在自然界中,大多数生物都是柔软的、可伸缩的,这就使得它们能够与外界不确定的环境相互作用^[4]. 基于此,研究人员提出了软体机器人的概念.

软体机器人多由柔性材料制成,如硅橡胶等. 相比于传统的刚性机器人而言,软体机器人刚性较低,但这正是其优势所在,能够减少复杂性、增加与环境的相互作用^[5],自身的柔软性带来了更高的灵活性和适应性,柔软的身体使其具有极高的自由度^[6]. 也就使得软体机器人能够克服传统机器人在与非结构化环境或脆弱生物对象互动中的局限性^[7]. 例如一种光驱动的人工捕蝇草^[8]、能够快速移动的软体电子鱼^[1]、受章鱼启发而制成的软体机器人手臂^[9-10]. 到目前为止,大多数软体机器人经由传统方式加工而

收稿日期:2020-05-23.

基金项目:国家自然科学基金项目(51805272)、江苏省重点研发计划项目(BE2018010)、中国博士后科学基金资助项目(2020M671450)、江苏省博士后科研资助计划项目(2020Z042)、江苏省高等学校自然科学研究项目(18KJB460022).

通讯作者:唐文来,博士,副教授,研究方向:3D 打印、微纳加工. E-mail:wltang@njnu.edu.cn

成,如模塑法和软光刻^[11]. 这些加工方式具有较高的加工精度,然而二维平面的加工能力与较低的加工效率使其只能适用于简单、小尺寸的结构. 随着目标结构的复杂程度不断增加,上述加工方式的工艺流程也变得越来越繁琐,已经无法适应目前的要求.

3D 打印技术在 1990 年左右进入我国,它能够快速原型化目的结构,基于此思路,可以避开传统加工方式的繁琐制造过程^[12]. 3D 打印技术通过多种不同的方法沉积或者固化某些特定材料,逐层加工目标物体^[13]. 随着时代的不断发展,可以用于 3D 打印技术的材料种类数量已经极大丰富,同时该技术的精确度和分辨率也得到了极大提升. 3D 打印技术作为一种自动化、信息化的加工方法,能够基于软体、智能化材料,将研究人员的设计思想融入到制造的整个过程中,为设计与加工个性化、功能化的软体机器人提供了一种有力工具. 目前,3D 打印主要是应用于软体机器人结构的制造,近年来也出现了将 3D 打印与软体机器人中的传感器制造结合起来的例子. 表 1 总结了现阶段应用于软体机器人制造的不同加工方法的典型特征^[13],可以看出 3D 打印技术在个性化加工和材料适应性等方面具有明显优势.

表 1 应用于软体机器人制造的不同技术的典型特征

Table 1 Characteristics of different technologies used in the manufacture of soft robots

技术	光刻	3D 打印	数控	铸塑成形
维度	2.5-D(分层)	3-D	3-D(有限)	3-D(有限)
材料	无机	有机	无机	有机
	刚性	刚性、柔性	刚性	刚性、柔性
	线性	蠕变、迟滞	线性	蠕变、迟滞
成品方式	批次生产	单个生产	单个生产	批次生产
精度	纳米级	微米级	亚微米级	微米级
单件价格	低	高	高	低
批次价格	高	视情况而定	视情况而定	高
个性化服务	无	有	有	无
制造周期	长	短	短	长

本文将从软体机器人的主体结构与可用于软体机器人的传感器两个方面论述 3D 打印技术在软体机器人领域的应用进展. 首先,简要介绍了典型的 3D 打印技术及其在软体机器人主体结构制造方面的应用,随后详细讨论了 3D 打印技术在软体机器人传感器制造方面的最新研究进展,最后对 3D 打印软体机器人及其传感器的现存问题进行总结并讨论了该领域的未来发展方向.

1 3D 打印软体机器人主体结构

1.1 数字光处理技术

基于数字光处理(digital light processing,DLP)的 3D 打印技术通过局部光聚合作用,能够在目标物体上生成微尺度级别的复杂三维结构,具有高分辨率和高表面质量的特点^[14]. 基于此,该技术可应用于制造需要微尺度孔洞的目标物体. 研究人员利用 DLP 技术进行三维设计和精确尺寸控制,实现了在不同电解质浓度和电场强度下的电话性水凝胶(electroactive hydrogels,EAH)驱动^[15]. 结果表明,EAH 的弯曲曲率随电场强度线性增加. 基于此,本文设计的“手指”夹持器(如图 1 所示). 其两个“手指”厚度不同,当左侧手指受到正电场作用时能够实现握持动作,左侧手指受到负电场作用时能够实现释放动作.

Ge 等^[14]将 DLP 技术应用于制造亚毫米级的微型驱动器,设计了一种具有 0.4 mm 宽方形空气通道和 0.2 mm 厚腔室壁的微型软体气动夹具(如图 2 所示). 该三角夹持器的三个爪为等角分布,且共同连接一个进气通道,抓持性能良好.

图 3 展示了基于 DLP 技术制造的一系列软体机器人^[11],其中图 3(a)是微型多步态软体机器人,它的前肢、主体和后肢均由三个相互独立的气动网络控制^[16]. 图 3(b)是微型柔性制动器,其表面的波纹呈现侧斜状,该波纹能够使其在受到正压或负压时沿着波纹的方向转动^[17]. 图 3(c)是微型柔性线性驱动器,当该驱动器受到负压作用时能做出弯曲反应^[18]. 图 3(d)是微型软爪,当其受到正压作用时会进入工作状态^[19]. 图 3(e)是由柔性和刚性材料一起制成的微型夹持器,其中黑色部分为两只硬爪,当其余部分受到负压时会导致主体做出反应从而驱动硬爪动作^[20]. 图 3(f)是微型柔性表面,当受到正压作用时,其表面的位移距离限制在可控范围内^[21]. 该技术可应用于软体机器人的伪装.

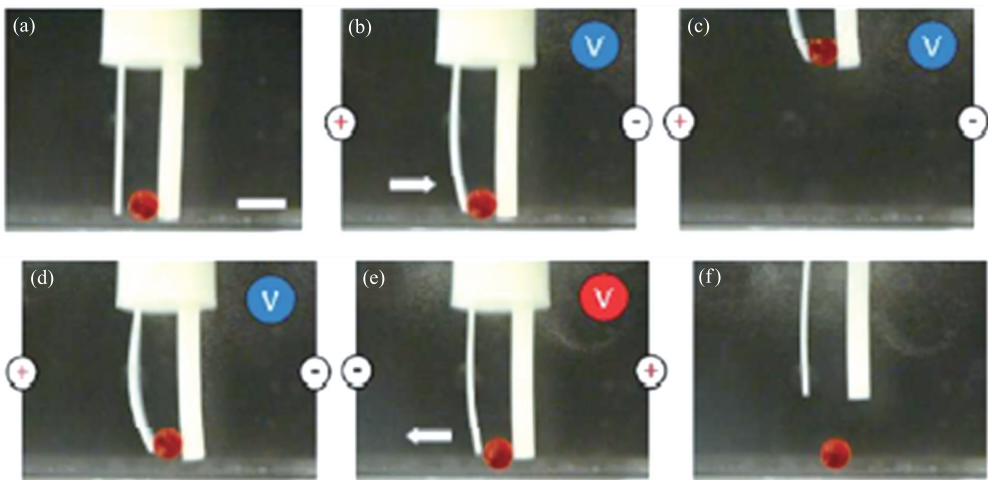


图 1 电活性水凝胶“手指”夹持器
Fig. 1 “Finger” holder based on electroactive hydrogels

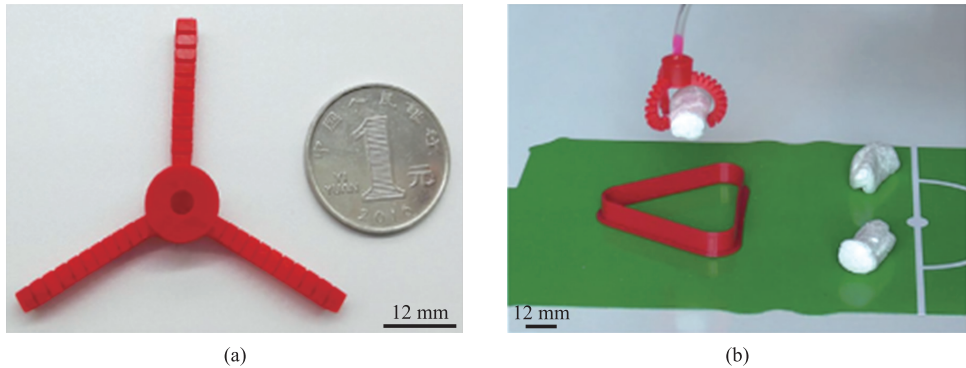


图 2 基于 DLP 技术的微型软体气动夹具
Fig. 2 Micro-soft pneumatic fixture based on DLP

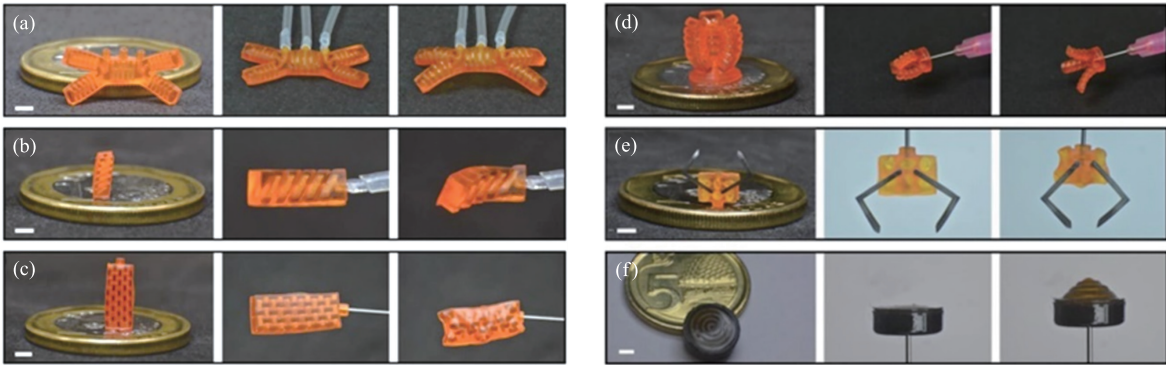


图 3 基于 DLP 技术的微型柔性气动机器人
Fig. 3 Miniature flexible pneumatic robots based on DLP

1.2 熔融沉积技术

熔融沉积技术(fused deposition modeling, FDM)是将各种热熔性的材料经加热熔化后成型的方法. 图 4(a)是 Jiang 等提出软-硬结合机器人的 FDM 打印过程^[22]. 首先通过标准黏合剂将聚碳酸酯膜固定到加热表面上,并在聚碳酸酯周边贴上高温遮蔽胶带. 升高打印平台温度至 90 ℃、喷嘴温度至 215 ℃左右再进行打印. 当打印过程结束后,热塑性塑料和打印材料会进行短暂的冷却(大约需要 2 min),而后可以将目标物体从热塑性材料上分离开(如图 4(b)所示).

Taylor 等^[3]将聚氨酯材料 NinjaFlex 与 FDM 技术结合起来研制了一种模块化的软体机器人气动执行器. 在模块化下,可以通过多个执行机构的连接达到多自由度的目标,其中加入了四阶多项式回归模型显示负载、充气压力和末端效应器位移之间的关系,同时也加入了前馈神经网络模型控制执行器,该执行器

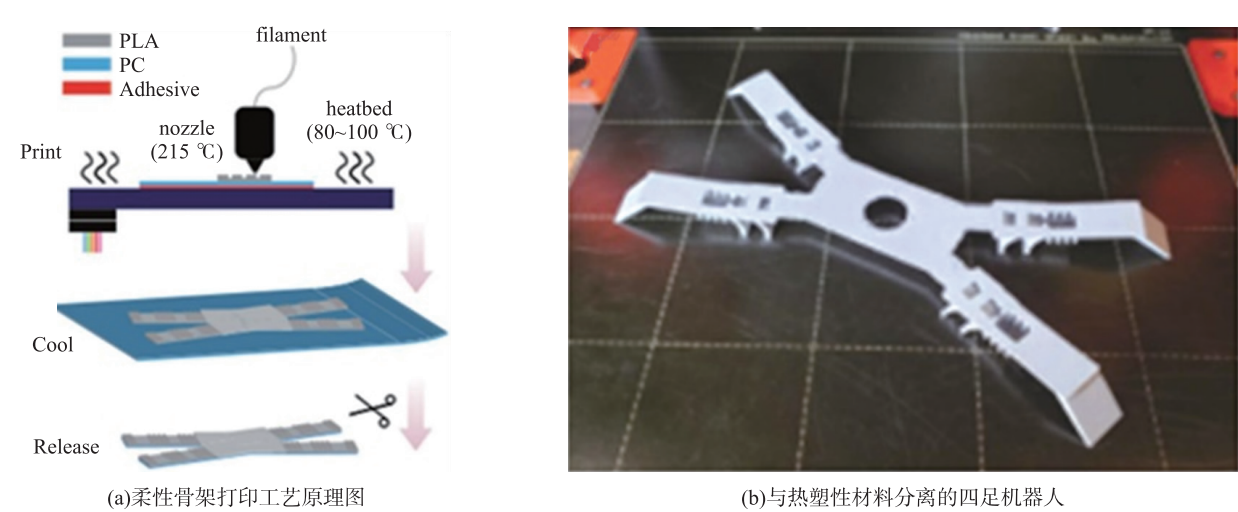


图 4 基于 FDM 技术的软-硬结合机器人

Fig. 4 Hybrid soft and rigid robot based on FDM

在工作时能够获得比较大的弯曲角度。

1.3 墨水直写成型技术

墨水直写成型技术(direct ink writing, DIW)是利用由计算机控制的喷嘴在沉积平台上生成各种复杂的图案,其挤出的多为具有剪切变稀性质的半固体墨水材料。Cheng 等^[23]将水凝胶与 DIW 技术结合起来应用于仿生软体机器人的打印。水凝胶本体无法满足打印要求,而海藻酸钠在低添加量(6 wt%)的情况下,能够保留功能性水凝胶的性能且能增强水凝胶的机械韧性。故将水凝胶与海藻酸钠结合起来是一个有效解决问题的方法。为了能够在 PDMS 窄带的四周直写打印上述墨水,采用一个定制化的旋转夹具固定 PDMS 窄带,并在打印过程中将其进行按需旋转。由于聚丙烯酰胺聚合物的共价键合特性能够为射流式执行器的可靠运行提供必要的伸展性,故利用聚丙烯酰胺水凝胶可构建灵活机动的触状机器人。将触状机器人的一侧注入水并使腔室充气便能控制该机器人的弯曲程度(如图 5 所示)。

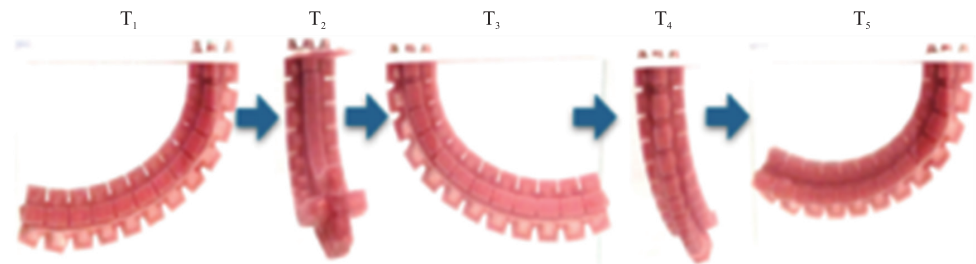


图 5 基于直写技术的触状机器人

Fig. 5 Touch robot based on DIW

2 3D 打印软体机器人传感器

2.1 触觉传感器

触觉传感器能够感知软体机器人在运动过程中遇到的微小压力、扭转、弯曲和震动。正确感知外部环境的信息以保证与外部环境进行正确交互。因此,在软体机器人的技术中,触觉传感器理所当然地占据重要位置,它影响着软体机器人操作的精确性。

Peshan 等使用硅橡胶制成了一种新型触觉传感器^[24],该触觉传感器的传感元件采用弹簧结构,该结构的上下底均为方形结构。该结构可使触觉传感器的工作范围随意改变。触觉传感器在制造过程中分为两步,即传感元件和传感结构的制造。在传感元件的制备中,材料主体为室温硫化硅橡胶,其中加入了 Si-69 硅烷作为偶联剂,同时还加入了超导材料以保证其性能。在传感器的结构制造中,使用了 FDM 技术打印了包含底垫、内支撑和方型弹簧结构。该触觉传感器可使传感器的偏差控制在较小的范围内,同时也扩大了它的可传导范围。

Vatani 等使用一种填充有多壁碳纳米管的可光固化和可拉伸的液体树脂制造了触觉传感器^[25]。此树脂是一种高度可拉伸的类橡胶光敏聚合物,它的高度可拉伸特性保证了其可用于制造一种类似于皮肤的柔性触觉传感器。本文提出的一种新型混合制造方法,包括直接印刷、固化技术和基于投影的立体光刻技术。在光固化的制造过程中,每层都需要接受 7 s 左右的照射以充分固化该层。当形成一层后,平台会下降,等待树脂在重力作用下自然沉降,当达到目标层厚时,系统会继续打印第二层。打印得到的传感元件与裸线相连便会得到触觉传感器。

Guo 等使用自研发的无烧结油墨来直写制造可拉伸的触觉传感器^[26]。使此种无烧结油墨能够兼容各种生物基板。本文将亚微尺寸的银粒子混合入一个高度可拉伸的硅弹性体中,同时加入缓凝剂、增稠剂和二氯甲烷来调整油墨的流变性能和使用寿命。当在 68 wt% Ag 浓度下对油墨施加持续的压力时,感受器层导电油墨的阻力会直线下降,最终达到一个平衡状态。实验表明,75 wt% Ag 浓度的油墨最合适电极层,用其制成的触觉传感器具有很高的性能。

2.2 压力传感器

压力是结构健康领域极其重要的物理参数之一,例如在大气层中的压力测量、深海作业时的压力检测,由于压力检测多是应用于恶劣环境中,所以传统意义中的压力传感器无法适应越来越复杂的自然环境。Tuna 等提出了一种基于 3D 打印的瓦楞面电容式压力传感器,该压力传感器设计图如图 6(a) 所示^[27]。

传感器的电容值通过下式计算:

$$C = \iint_A \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_r dx dy}{d(x, y) - \Delta(x, y)}.$$

式中, C 是在压差的情况下得到的电容值, ε_r 是介电材料的相对介电常数, ε_0 是介电常量, $d(x, y)$ 是上下板之间的距离, $\Delta(x, y)$ 是顶板的偏差函数。传感器尺寸为 11 mm×11 mm×4.6 mm, 在无外部压力时电容为 2.7 pF, 施加外部压力时电容为 4.3 pF, 传感器在 0.71~2.13 kPa 的范围内最大的灵敏度为 0.14 pF/kPa。基于上述设计思路,采用多材料喷墨打印技术得到的 3D 打印电容传感器如图 6(b) 所示。

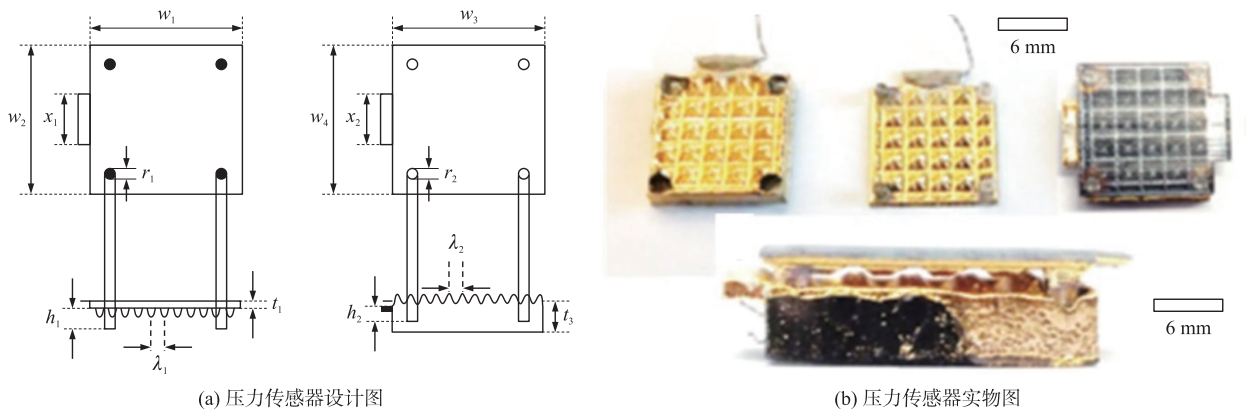


图 6 3D 打印瓦楞面电容式压力传感器

Fig. 6 3D printed capacitive pressure sensor with corrugated surface

Hong 等^[28]基于 FDM 打印技术制作了一种光纤光栅压力传感器,在 PLA 打印过程中嵌入裸光纤光栅传感器,此方法制备得到的光纤光栅压力传感器测量范围为 0~2 000 kPa,灵敏度为 13.22 kPa/pm。Schenato 等^[29]设计的光纤光栅压力传感器在外部加了防水壳,顶部使用橡胶膜密封,内部放置传感器。该传感器嵌入了一个机械传感器,能够将施加的外部压力转换为光纤光栅的测量信号,同时使用额外的光纤光栅进行温度补偿。采用多射流打印技术加工得到传感器的压力灵敏度达到了 240 pm/kPa,对于快速压力变化的响应也非常快速。

Zhang 等^[30]利用 3D 打印技术将全玻璃纤维外壳打印在熔融石英衬底上,然后将光纤插入全玻璃纤维外壳内,并靠近膜片形成法布里-伯罗干涉仪。该传感器的压力灵敏度为 3.18 nm/kPa,分辨率为 44.34 Pa,具有较高的精细度。同时在低温状态下灵敏度为 0.125 nm/℃,温度-压力交叉灵敏度为 67.6 Pa/℃,表明其在恶劣环境中仍然有使用价值。

2.3 应变传感器

在检测系统中,无论是静态还是动态,应变测量都是必不可少的. 3D 打印应变传感器的填充物类型多为单/多壁碳纳米管、石墨、石墨烯薄膜和炭黑. Marco 等^[31]采用 FDM 工艺避免了使用上述材料,基于 FDM 的特点,能够使用一些低成本的功能材料和结构材料. 采用由 NatureWorks 的 4043 聚乳酸、分散剂和导电炭黑合成的功能性材料进行加工,非功能性材料和感官元件采用不同的加工温度,在样品连接器和引线直接涂有银浆涂料以减少接触电阻.

Christ 等^[32]设计的多壁碳纳米管高弹性应变传感器使用合成的热塑性聚氨酯/多壁碳纳米管作为原材料,利用 FDM 技术进行加工. 因为在多壁碳纳米管中加入了热塑性聚氨酯使得打印能力得到了提高,同时对于纳米复合材料的弹性模量影响也比较小,因此,成型物的导电率得到了极大的保证. 当在外部施加的应变达到 100%时,压电阻率测量因子达到了 176.

Wang 等^[33]利用水凝胶设计了一种可穿戴的电阻式应变传感器. 在水凝胶内加入热响应琼脂和离子响应海藻酸盐. 琼脂能够提高其黏度,改变其流变特性保证精密打印,海藻酸盐改善了水凝胶的力学性能. 将 200 mg 的海藻酸钠溶于 10 mL 的 DI 中,搅拌后放置 24 h 以上,然后将海藻酸钠溶液加热到 95 ℃,同时加入 200 mg 琼脂,当琼脂完全溶解后加入 3 000 mg 丙烯酰胺、NN'-亚甲基双丙烯酰胺和光引发剂 2959,冷却后即可得到打印材料. 用此方式得到导电、透明、可拉伸的水凝胶,将一层 3D 打印的水凝胶薄膜与导电胶带连接后能够快速检测到运动信号.

2.4 温度传感器

温度传感器有广泛的应用范围,如实时监测医疗设备、精密的电子监控设备、食品的保鲜装置中都需要掌握每时每刻的温度变化. Wang 等^[34]将石墨烯和 PDMS 应用到温度传感器的制备中,将 5 g 的天然石墨薄片与 150 mL 的硫酸混合并搅拌,随后加入 50 mL 发烟硝酸,在室温下搅拌、保存 24 h. 倒入 200 mL 去离子水,再进行三次水洗、离心,在 60 ℃下干燥 24 h,即可得到石墨烯夹层化合物. 将干燥的石墨烯夹层化合物粉末在 1050 ℃下膨胀 25 s,得到片状纳米颗粒形态的石墨烯(graphene nanoplatelets, GNPs). 取少量 GNPs 浸入乙酸乙酯中,在超声波浴中处理 6 h,得到 GNPs/乙酸乙酯分散体. 将 PDMS 溶于乙酸乙酯,再与 GNPs/乙酸乙酯继续溶混,在 70 ℃条件下对混合物加热,直至乙酸乙酯完全蒸发,加入固化剂和抑制剂继续搅拌,即可得到石墨烯/PDMS 油墨,利用直写工艺得到不同结构的光学图片如图 7 所示. 此种材料的优异性来源于它的有序多孔结构,能够实时高效地感知外部变化. 相比于传统的刚性传感器,基于此种材料设计的传感器具有更好的复杂曲面适配性.

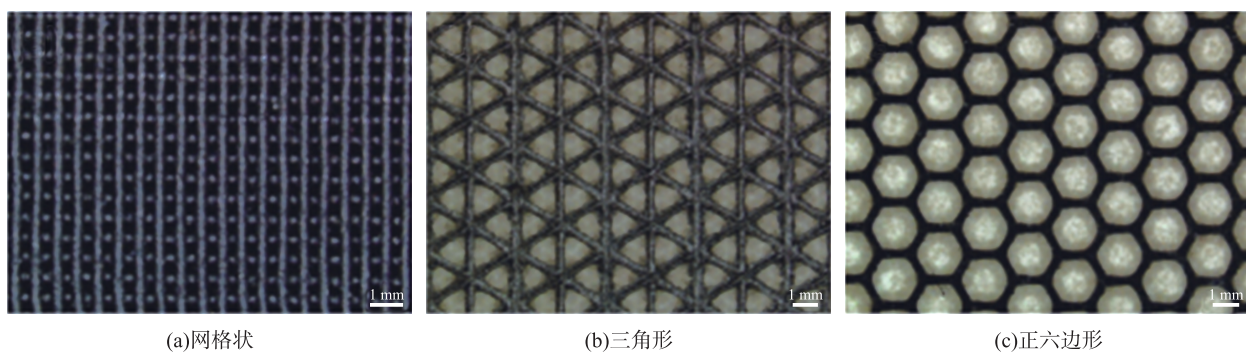


图7 3D 打印石墨烯/PDMS 复合材料的典型图案

Fig. 7 3D-printed graphene/PDMS composites

Memoon 等^[35]基于聚乳酸和石墨烯纳米棒复合材料制成了线性电阻式温度传感器. 其中在石墨烯纳米棒的作用下保证了导电性能,聚乳酸扮演黏合剂的角色. 当外界温度升高时,聚合物集体会发生物理膨胀,导致体积的微观变化,使得空间层增大,减少了石墨烯纳米棒直接接触,从而使得电阻增加. 温度降低后,物理性能保持不变,电阻会继续下降. 由实验可知,在 70 ℃以下的环境中,传感器具有良好的稳定性,当温度超过 70 ℃时,物理膨胀的变形即为不可逆的状态.

3 结论

软体机器人作为一种新兴的机器人,它的发展潜力不容小觑.但是目前也存在着许多问题,这牵涉到诸多学科,如化学、材料、微电子、控制、智能算法等等.为了达到软体机器人“软”的目的,通常都会使用新型材料,但是新型材料使用寿命仍然未知.且需要在新型材料中加入不同种类的化学材料,此类化学材料对于环境的影响也未知.总体而言,软体机器人的主体结构与传感器的打印,受到了 3D 打印方法和材料的限制.现阶段 3D 打印技术的发展仍处于早期,能够与软体机器人结合起来的打印方法少之又少.

在未来发展中,希望软体机器人在工作过程中能够进行自主的判断、反应,这就需要智能算法的加入,正由于其“软”的特性,它的自由度相比于传统机器人也是极大丰富,这也就带来了在每个自由度下,软体机器人实时的反馈与反应问题,希望它具有学习功能,智能算法必不可少.在传感器方面,使用场景越来越趋向于复杂环境,能够实时得知复杂环境的各种参数,是未来传感器的发展目标.此外,软体机器人应当是在高度集成化的道路上前进,内部集成了各种类型的传感器、性能强劲的 CPU,能够在各种复杂环境下应对自如.未来 3D 打印技术如何能够在保证软体机器人精准成型的基础上,满足其智能化、集成化和功能化的发展要求,仍有待研究学者进一步深入探讨.

[参考文献] (References)

- [1] LI T F, LI G R, LIANG Y M, et al. Fast-moving soft electronic fish[J]. *Science Advances*, 2017, 3(4): e1602045.
- [2] 曹玉君, 尚建忠, 梁科山, 等. 软体机器人研究现状综述[J]. *机械工程学报*, 2012, 48(3): 25–33.
- [3] TAYLOR A J, MONTAYRE R, ZHAO Z, et al. Modular force approximating soft robotic pneumatic actuator[J]. *International Journal of Computer Assisted Radiology and Surgery*, 2018, 13(11): 1819–1827.
- [4] KHONDOKER M A, BAHARI N, SAMEOTO D. Tendon-driven functionally gradient soft robotic gripper 3D printed with inter-mixed extrudate of hard and soft thermoplastics[J]. *3D Printing and Additive Manufacturing*, 2019, 6(4): 191–203.
- [5] PEYMAN A, MOHAMMAD A N, MOHAMMAD Z, et al. Position and force control of a soft pneumatic actuator[J/OL]. *Soft Robotics*, 2020, <http://doi.org/10.1089/soro.2019.0065>.
- [6] WALKER J, ZIDEK T, HARBEL C, et al. Soft robotics: a review of recent developments of pneumatic soft actuators[J]. *Actuators*, 2020, 9(1): 3–30.
- [7] NGUYEN C T, PHUNG H, NGUYEN T D, et al. Multiple-degrees-of-freedom dielectric elastomer actuators for soft printable hexapod robot[J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2017, 267: 505–516.
- [8] OWIES M W, HAO Z, ARRI P. A light-driven artificial flytrap[J]. *Nature Communications*, 2017, 8: 15548.
- [9] LASCHI C, CIANCHETTI M, MAZZOLAI B, et al. Soft robot arm inspired by the octopus[J]. *Advanced Robotics*, 2012, 26(7): 709–727.
- [10] 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.
- [11] ZHANG Y F, NG C J X, CHEN Z, et al. Miniature pneumatic actuators for soft robots by high-resolution multimaterial 3D printing[J]. *Advanced Materials Technologies*, 2019, 4(10): 1900427.
- [12] ERIC M, RUDY S, DAVID E, et al. 3D printing for the rapid prototyping of structural electronics[J]. *IEEE Access*, 2014, 2: 234–242.
- [13] DIJKSHOORN A, WERKMAN P, WELLEWEERD M, et al. Embedded sensing: integrating sensors in 3-D printed structures[J]. *Journal of Sensors and Sensor Systems*, 2018, 7(1): 169–181.
- [14] GE L S, DONG L T, WANG D, et al. A digital light processing 3D printer for fast and high-precision fabrication of soft pneumatic actuators[J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2018, 273: 285–292.
- [15] HU F W, LYU L M, HE Y H. A 3D printed paper-based thermally driven soft robotic gripper inspired by cabbage[J]. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 2019, 20(11): 1915–1928.
- [16] REICH P, WALTERS M, ELLSWORTH D, et al. Multigait soft robot[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences Current Issue*, 2011, 108(51): 20400–20403.
- [17] WANG T Y, GE L S, GU G Y. Programmable design of soft pneu-net actuators with oblique chambers can generate coupled bending and twisting motions[J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2018, 271: 131–138.
- [18] YANG D, VERMA M S, SO J H, et al. Buckling pneumatic linear actuators inspired by muscle[J]. *Advanced Materials Tech-*

- nologies, 2016, 1(3):1600055.
- [19] PATEL D K, SAKHAEI A H, LAYANI M, et al. Highly stretchable and UV curable elastomers for digital light processing based 3D printing[J]. *Advanced Materials*, 2017, 29(15):1606000.
- [20] YANG D, MOSADEGH B, AINLA A, et al. Buckling of elastomeric beams enables actuation of soft machines[J]. *Advanced Materials*, 2015, 27(41):6323–6327.
- [21] PIKUL J H, LI S, BAI H, et al. Stretchable surfaces with programmable 3D texture morphing for synthetic camouflaging skins[J]. *Science*, 2017, 358(6360):210–214.
- [22] JIANG M S, ZHOU Z Y, GRAVISH N. Flexoskeleton printing enables versatile fabrication of hybrid soft and rigid robots[J]. *Soft Robotics*, 2020, <http://doi.org/10.1089/soro.2019.0156>.
- [23] CHENG Y, CHAN K H, WANG X Q, et al. Direct-ink-write 3D printing of hydrogels into biomimetic soft robots[J]. *ACS Nano*, 2019, 13(11):13176–13184.
- [24] PESHAN S, ERANGA D S, UDITHA R, et al. Design and development of a conductive polymer based 3D-printed tactile sensor with square type spring structure[C]//The 2018 International Conference on Artificial Life and Robotics. Oita, Japan, 2018.
- [25] VATANI M, LU Y F, ENGBERG E D, et al. Combined 3D printing technologies and material for fabrication of tactile sensors[J]. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 2015, 16(7):1375–1383.
- [26] GUO S Z, QIU K Y, MENG F B, et al. 3D printed stretchable tactile sensors[J]. *Advanced Materials*, 2017, 29(27):1701218.
- [27] TUNA A, ERDEN O K, GOKDEL Y D, et al. 3D printed capacitive pressure sensor with corrugated surface[C]//PRIME 2017. Giardini, Naxos-Taormina, Italy, 2017.
- [28] HONG C Y, ZHANG Y F, BORANA L. Design, fabrication and testing of a 3D printed FBG pressure sensor[J]. *IEEE Access*, 2019, 7:38577–38583.
- [29] SCHENATO L, RONG Q Z, SHAO Z H, et al. Highly-sensitive FBG pressure sensor based on a 3D-printed transducer[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2019, 37(18):4784–4790.
- [30] ZHANG Q, LEI J C, CHEN Y Z, et al. 3D printing of all-glass fiber-optic pressure sensor for high temperature applications[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2019, 19(23):11242–11246.
- [31] MARCO M, JANKO S, FILIPPO C, et al. Dynamic measurements using FDM 3D-printed embedded strain sensors[J]. *Sensors*, 2019, 19(12):2661.
- [32] CHRIST J F, ALIHEIDARI N, AMELI A, et al. 3D printed highly elastic strain sensors of multiwalled carbon nanotube/thermo-plastic polyurethane nanocomposites[J]. *Materials and Design*, 2017, 131:394–401.
- [33] WANG J L, LIU Y, SU S H, et al. Ultrasensitive wearable strain sensors of 3D printing tough and conductive hydrogels[J]. *Polymers*, 2019, 11(11):1873.
- [34] WANG Z Y, GAO W L, ZHANG Q, et al. 3D-printed graphene/polydimethylsiloxane composites for stretchable and strain-insensitive temperature sensors[J]. *ACS Applied Materials and Interfaces*, 2019, 11(1):1344–1352.
- [35] MEMOON S, JAHAN Z G, SOO W K, et al. Development of 3D-printed embedded temperature sensor for both terrestrial and aquatic environmental monitoring robots[J]. *3D Printing and Additive Manufacturing*, 2018, 5(2):160–169.

[责任编辑:陈 庆]