

引用本文:唐金科,王瑞乾,张艺伟,等.基于光子晶体结构色传感器的软体机器人运动检测方法[J].光通信技术,2024,48(3):74-78.

基于光子晶体结构色传感器的软体机器人运动检测方法

唐金科^{1,2,3,4},王瑞乾^{1,2,3,4},张艺伟^{1,2,3,4},张 闯^{1,2,3},王文学^{1,2,3*}

(1.中国科学院 沈阳自动化研究所,沈阳 110016;2.机器人学国家重点实验室,沈阳 110016;

3.中国科学院 机器人与智能制造创新研究院,沈阳 110169;4.中国科学院大学,北京 100049)

摘要:为了解决软体机器人难以实现基于实时反馈信号的精确运动控制的问题,提出了一种基于光子晶体结构色传感器色相的软体机器人运动检测方法。该方法的工作机理在于,当软体机器人活动时,集成在其上的光子晶体结构色传感器颜色会发生变化,通过图像处理技术检测这些色相变化,并根据色相信号和运动状态之间的映射关系,实现对软体机器人运动状态的跟踪监测。色相检测稳定性测试结果表明,不同亮度和饱和度下的平均色相值分别为 179.97°、179.67°,标准差分别为 0.51、0.36。

关键词:光子晶体;色相检测;软体机器人;运动检测;结构色

中图分类号:TN256;TB383;O734 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-5561(2024)03-0074-05

DOI:10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2024.03.013

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Motion detection of soft robot based on photonic crystal structural color sensor

TANG Jinke^{1,2,3,4}, WANG Ruiqian^{1,2,3,4}, ZHANG Yiwei^{1,2,3,4}, ZHANG Chuang^{1,2,3}, WANG Wenxue^{1,2,3*}

(1. Shenyang Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China;

2. State Key Laboratory of Robotics, Shenyang 110016, China; 3. Institutes for Robotics and Intelligent Manufacturing, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110169, China; 4. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: In order to address the challenge of achieving precise motion control based on real-time feedback signals in soft robot, a motion detection method for soft robot based on the hue of photonic crystal structural color sensors is proposed. The working mechanism of this method lies in the fact that when the soft robot moves, the color of the photonic crystal structural color sensor integrated on it will change. By detecting these hue changes through image processing techniques and utilizing the mapping relationship between hue signals and motion states, the tracking and monitoring of the soft robot's motion state can be achieved. The results of hue detection stability test show that the average hue values under different brightness and saturation are 179.97° and 179.67°, and the standard deviations are 0.51 and 0.36, respectively.

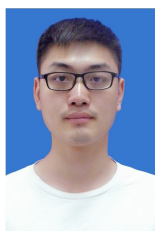
Key words: photonic crystals, hue detection, soft robot, motion detection, structural color

收稿日期:2023-12-05。

基金项目:国家重点研发计划(2022YFB4700100)资助;国家自然科学基金项目(U1908215、62333021、61925307、62003338)资助;辽宁省“兴辽英才计划”项目(XLYC2002014)资助。

作者简介:唐金科(1997—),男,硕士研究生,现就读于中国科学院沈阳自动化研究所模式识别与智能系统专业,主要研究方向为光子晶体结构色传感器的制备与应用、软体机器人的运动检测算法以及微纳机器人等领域。

***通信作者:**王文学(1973—),男,博士,研究员,主要研究方向为微纳机器人、类生命软体机器人,以及机器人智能学习与控制。



0 引言

软体机器人是当前机器人领域中的热点。这种机器人具有连续变形的结构和类肌肉的驱动单元,相较于刚体机器人,它具备更多的灵活性和自由度^[1]。在过去的十年里,软体机器人这一新兴研究领域取得了显著进展^[2-3]。其研究领域广泛,涵盖了通用夹持器^[4]、多步态软体机器人^[5-6]、仿蠕虫机器人^[7]、章鱼仿生机器人^[8]、生长型机器人^[9]以及软体多运动微型机器人^[10]等多种类型。尽管软体机器人在任务执行中展现出了前所未有的灵活性,但由于其复杂的动力学行为,如非线性、迟滞、粘弹性效应、大应变或变形等特性,研究人员难

以准确预测其响应^[11-12]。这种预测的不准确性往往导致模型和物理系统之间存在微小的不匹配,从而产生完全不同的结果^[13]。此外,外部载荷会影响软体机器人的形状、状态和位置,使其即使在良好的环境中也难以通过开环控制准确地达成目标。因此,对软体机器人进行运动检测是实现其精确运动控制的关键,这有助于软体机器人展现出与生物系统相似的运动能力。然而,软体机器人的运动检测面临着巨大挑战。目前常见的运动检测方法主要包括直接检测和量化机械响应2种。直接检测的方法需要在小型可移动结构中集成外部传感器,技术复杂度非常高^[14-15]。对于小型软体机器人,量化机械响应的方法要么是结合有线电触点和压电材料^[16],要么使用外部大型激光定位系统^[17-18],或者通过成像分析来分析形状变化^[19],但这些方法都比较复杂并且效率较低。

光子晶体由于其固有的周期性纳米结构,当其与一定波长范围的光发生物理相互作用时,会呈现出结构色^[20]。特别是,当光子晶体材料由水凝胶聚合物制成时,其运动和形变会导致光子带隙变化,进而改变结构色。由于其可以制备成柔性薄膜,因此易于集成到小型结构上^[21]。研究人员利用了这一特点,通过光谱仪测量结构色波长的变化来检测心肌组织的收缩行为^[22-23]。与传统的检测方法相比,基于光子晶体结构色的检测方法不仅具有更高的可控性,而且可以轻松地与小型软体机器人集成,实现对其运动状态的无线和实时检测。但是,由于光谱测量技术的局限性,如环境光的干扰和外部测量平台移动困难等问题,该方法在实现结构色的自动跟踪检测时仍面临挑战。

为此,本文提出一种基于光子晶体结构色传感器的软体机器人运动检测方法,使软体机器人能够执行更为精细和复杂的动作任务。

1 结构和原理

本文提出了一种基于光子晶体结构色传感器色相的检测方法,其原理示意图如图1所示。结构色传感器主要由水凝胶和二氧化硅纳米粒子构成,其中水凝胶的表面被修饰了带有负电荷的二氧化硅纳米粒子。这些纳米粒子在电荷排斥和追求最小能量配置的双重作用下,会在水凝胶内部自发地形成非密堆积阵列。

由于纳米颗粒的有序排列,二氧化硅纳米粒子的掺杂会使结构色传感器具有光子带隙特性和特征反射波长,这些特性会随着入射角的变化而展现出不同的光学特征。这种光学特征^[24]可以表示为

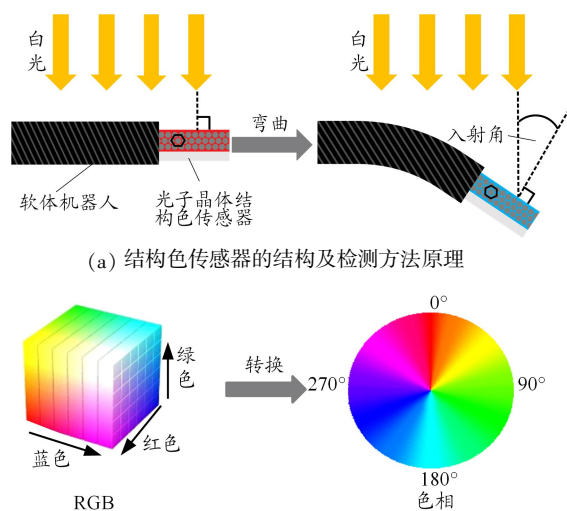


图1 基于光子晶体结构色传感器的检测方法示意图

$$\lambda = 1.633d \left(n_{\text{ave}}^2 - \sin^2 \phi \right)^{\frac{1}{2}} \quad (1)$$

其中, λ 为特征反射波长, d 为二氧化硅阵列内的晶格间距, n_{ave} 为复合水凝胶的平均折射率, ϕ 为入射角(入射光与水凝胶平面法线之间的夹角)。

根据式(1)可知,光子晶体反射光的结构色效果与晶格间距、材料折射率和入射角等因素有关。随着入射角的增大,特征反射波长会变短,使反射光颜色发生蓝移^[23]。因此,在特定角度的白色入射光下,当软体机器人发生弯曲时,光子晶体结构色传感器的入射角会改变,导致反射光颜色发生变化(如图1(a)所示)。通过分析这些颜色变化,可以计算入射角并估计软体机器人的弯曲状态。

本文使用相机以图像或视频模式捕获光子晶体结构色传感器的反射颜色。通过对捕获的图像进行分析,可以计算得到反射光的红色、绿色、蓝色(RGB)数据,并根据式(2)~式(4)将其转换为色相、饱和度和亮度(HSL)数据(如图1(b)所示)。从HSL数据中提取出色相值^[25],可以进一步了解软体机器人的弯曲状态。

$$h = \begin{cases} 0^\circ, M=m \\ 60^\circ \times \frac{g-b}{M-m} + 0^\circ, M=r \text{ and } g \geq b \\ 60^\circ \times \frac{g-b}{M-m} + 360^\circ, M=r \text{ and } g < b \\ 60^\circ \times \frac{g-b}{M-m} + 120^\circ, M=g \\ 60^\circ \times \frac{g-b}{M-m} + 240^\circ, M=b \end{cases} \quad (2)$$

$$l = \frac{1}{2} (M+m) \quad (3)$$

$$s = \frac{M-m}{1-|2I-1|} \quad (4)$$

其中, h 、 l 和 s 分别表示色相、亮度和饱和度; r 、 g 、 b 分别代表红、绿、蓝通道强度值; M 和 m 分别表示 $\max(r, g, b)$ 和 $\min(r, g, b)$ 。

据此, 将三轴 RGB 编码转化为色相的单一指标, 从而获取色相值。由于特征反射波长与其所呈现的色相之间具有一一对应的关系^[26-28], 因此可以根据所获取的光子晶体结构色传感器的色相来对其入射角进行估计, 进而实现对软体机器人的弯曲运动状态检测。

2 色传感器制备与机器人系统实验

本文采用微球自组装方法制备了光子晶体结构色传感器, 具体过程如图 2 所示。首先, 将丙烯酰胺(AAm)和聚(乙二醇)二丙烯酸酯(PEGDA)按照 15:3 的比例混合, 制备出水凝胶。接着, 在水凝胶中加入了光引发剂 2-羟基-2-甲基-1-苯基-1-丙酮(HMPP)。然后, 将表面修饰有负电荷的二氧化硅纳米粒子与水凝胶混合, 得到光子晶体薄膜预凝胶溶液。在电荷排斥和最小能量配置的作用下, 二氧化硅纳米颗粒会组装成非密堆积阵列结构。最后, 将预凝胶溶液转移到模板上, 并用紫外线照射 20 s, 使水凝胶固化, 从而将非密堆积阵列的结构锁定在水凝胶网络中, 最终得到光子晶体结构色传感器。

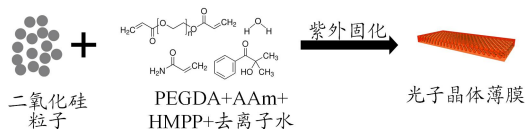


图 2 光子晶体结构色传感器的制备

为了验证所提出的基于光子晶体结构色传感器的软体机器人运动检测方法的有效性, 本文构建了一个软体机器人运动系统, 如图 3 所示。系统中, 通过向软体机器人的两端施加高压直流电压, 可以控制软体机器人进行弯曲运动。实验开始时, 软体机器人的初始角度为 0° , 而在电压的控制下, 它可以弯曲到的最大角度为 36° 。

为了实时跟踪光子晶体结构色传感器的色相变化并获取相关数据, 本文将相机置于色传感器正上方。在此过程中, 软体机器人的弯曲角度与入射角保持相等。

本文采用图像处理的方法对光子晶体结构色传感器的位置进行实时跟踪, 跟踪结果如图 4 所示。具体的目标识别跟踪原理如下: 首先, 采集原始图片并

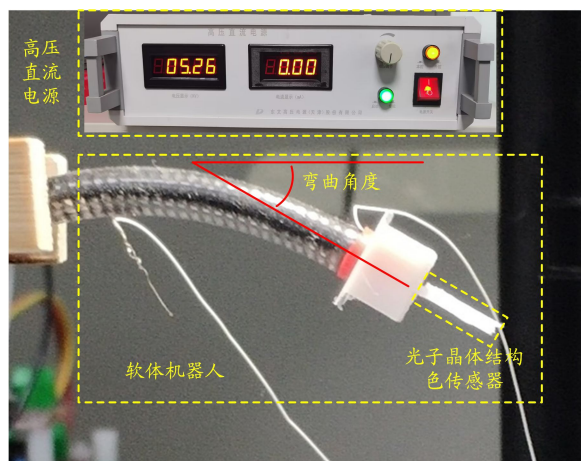
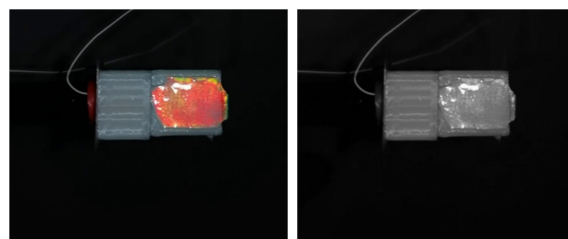
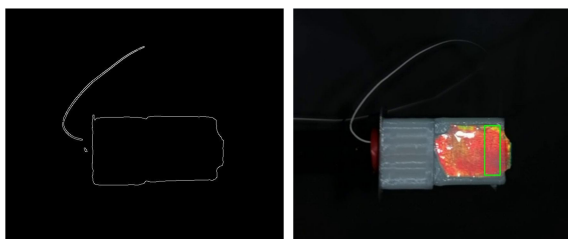


图 3 软体机器人运动系统实物图



(a) 原始图像

(b) 灰度图



(c) 边缘检测图

(d) 目标跟踪图

图 4 目标识别跟踪结果

将其转换为灰度图; 然后, 对光子晶体结构色传感器进行边缘检测; 最后, 基于边缘检测的结果, 实现对光子晶体结构色传感器的自动跟踪监测。

3 结果与讨论

3.1 色相检测稳定性测试

调整图像的亮度和饱和度时, 得到的色相检测结果如图 5 所示。可以看出, 不同亮度下的平均色相值为 179.97° , 标准差为 0.51; 不同饱和度下的平均色相值为 179.67° , 标准差为 0.36。这种色相值的稳定性表明, 无论光强度如何变化或相机性能如何波动, 色相值都能够有效地映射光子晶体结构色传感器的角度变化。

3.2 色相与入射角之间的映射

为了确定光子晶体结构色传感器的色相与其特

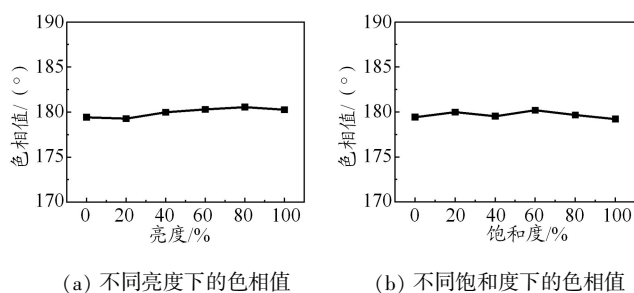


图5 色相检测稳定性测试

征反射波长之间的映射关系,本文使用相机获取不同颜色的光子晶体薄膜的反射颜色,提取出其色相值 h ,并通过光谱仪测得了不同颜色的光子晶体薄膜的特征反射波长 λ 。随后,对光子晶体结构色传感器的特征反射峰波长和色相进行了线性回归分析,线性拟合图如图6所示。可以看出,光子晶体结构色传感器的特征反射波长与HSL颜色空间的色相值存在单调递减的线性关系,其拟合度 R^2 为 0.963 37,线性回归方程为

$$h = -2.17\lambda + 1\,312.261 \quad (5)$$

将式(5)代入式(1),可得到色相值 h 与入射角 ϕ 的映射关系为

$$h = -3.54d \left(n_{\text{ave}}^2 \sin^2 \phi \right)^{\frac{1}{2}} + 1\,312.261 \quad (6)$$

式(6)表明了当入射角为 $0^\circ \sim 90^\circ$ 时,光子晶体结构色传感器的色相值 h 和入射角 ϕ 之间存在单调递增的映射关系。

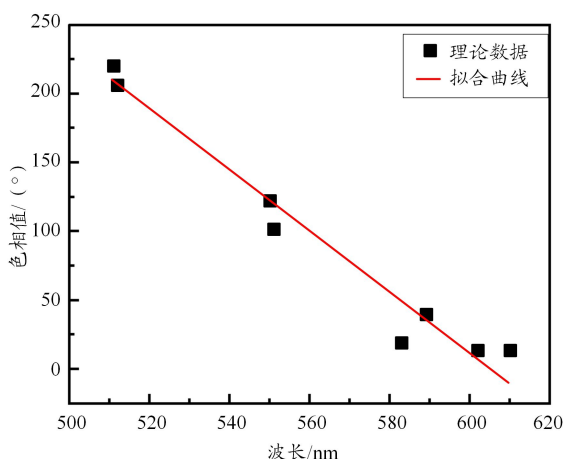


图6 光子晶体结构色传感器特征反射峰波长与色相的线性拟合图

3.3 实验结果

实验过程中,软体机器人的弯曲带动光子晶体结构色传感器运动,通过相机捕获到其颜色随着弯曲角度的变化情况如图7(a)所示。可以看出,光子晶体结构色传感器的颜色随着弯曲角度的增大而发生蓝移。这是由于软体机器人的弯曲运动使得光子晶体结构

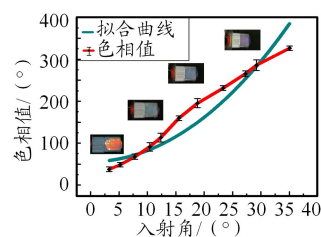
色传感器的入射光入射角逐渐增大引起的。本文利用相机对运动中的光子晶体结构色传感器的图像进行捕获,经过图像处理分析,从传感器上提取弯曲过程中的RGB值。

可以看出,随着弯曲角度从 0° 逐渐增大到 36° ,色相值从 25° 逐渐上升到 330° 。根据式(6)对图7(a)的色相数据进行拟合,得到一条与理论预测相符的拟合曲线。由此,本文建立了色相与入射角之间的映射关系。基于这一映射关系,本文对光子晶体结构色传感器的入射角测量准确性进行了测试,结果如图7(b)所示。可以看出,估计角度与实际角度呈现较好的线性关系,且线性拟合的斜率非常接近1。这证明了通过本文提出的检测方法,可以较为准确地跟踪监测软体机器人的弯曲运动。

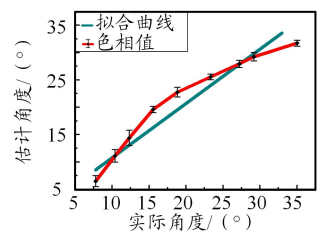
软体机器人在弯曲运动过程中的自动跟踪监测结果如图7(c)所示。可以看出,在大部分情况下,实际角度曲线与估计角度曲线比较吻合,验证了本文提出的基于光子晶体结构色传感器的软体机器人弯曲运动检测方法的有效性。

4 结束语

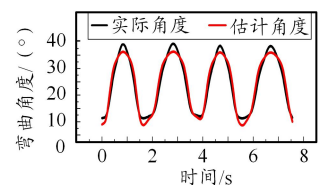
针对软体机器人在实现实时反馈信号的自动且精确运动控制功能,以及进行运动实时检测方面所面临的挑战,本文提出了一种利用光子晶体结构色传感器色相变化来检测软体机器人弯曲运动的方法。该方法通过图像处理技术检测运动状态下软体机器人上的光子晶体薄膜结构色的色相变化,建立了结构色信号和运动状态信号之间的映射关系,最终实现了对软体机器人运动状态的自动跟踪监测。色相检测稳定性测试结果表明,不同亮度和饱和度下的平均色相值分别为 179.97° 、 179.67° ,标准差分别为 0.51、0.36。该方法能实现无线实时的运动状态检测,具有应用场景多



(a) 色相随弯曲角度变化曲线图



(b) 实际角度和估计角度对比



(c) 自动跟踪检测曲线

图7 软体机器人弯曲运动检测实验

唐金科,王瑞乾,张艺伟,等:基于光子晶体结构色传感器的软体机器人运动检测方法

样化和自动化程度高等优点,有助于提高软体机器人的运动控制精确度。尽管该方法仍有待优化,但为软体机器人的运动检测提供了新的思路。

参考文献:

- [1] RUS D, TOLLEY M T. Design, fabrication and control of soft robots [J]. *Nature*, 2015, 521: 467–475.
- [2] BAO G, FANG H, CHEN L, et al. Soft robotics: academic insights and perspectives through bibliometric analysis [J]. *Soft Robot*, 2018, 5(3): 229–241.
- [3] KIM S, LASCHI C, TRIMMER B. Soft robotics: a bioinspired evolution in robotics [J]. *Trends Biotechnol*, 2013, 31(5): 287–294.
- [4] BROWN E, RODENBERG N, AMEND J, et al. Universal robotic gripper based on the jamming of granular material [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2010, 107(44): 18809–18814.
- [5] SHEPHERD R F, ILIEVSKI F, CHOI W, et al. Multigait soft robot [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2011, 108(51): 20400–20403.
- [6] SEOK S, ONAL C D, CHO K J, et al. Meshworm: a peristaltic soft robot with antagonistic nickel titanium coil actuators[J]. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2013, 18(5): 1485–1497.
- [7] LIN H-T, LEISK G G, TRIMMER B. GoQBot: a caterpillar-inspired soft-bodied rolling robot [J]. *Bioinspiration & Biomimetics*, 2011, 6(2): 026007-1–026007-14.
- [8] SHEN H. The soft touch [J]. *Nature*, 2016, 530: 24–26.
- [9] HAWKES E W, BLUMENSCHEN L H, GREER J D, et al. A soft robot that navigates its environment through growth [J]. *Science Robotics*, 2017, 2(8): eaan3028-1–eaan3028-7.
- [10] HU W, LUM G Z, MASTRANGELI M, et al. Small-scale soft-bodied robot with multimodal locomotion [J]. *Nature*, 2018, 554: 81–85.
- [11] CASE J C, WHITE E L, KRAMER R K. Soft material characterization for robotic applications [J]. *Soft Robotics*, 2015, 2(2): 80–87.
- [12] HORCHLER A D, KANDHARI A, DALTORIO K A, et al. Peristaltic locomotion of a modular mesh-based worm robot: precision, compliance, and friction [J]. *Soft Robotics*, 2015, 2(4): 135–145.
- [13] MOSELEY P, FLOREZ J M, SONAR H A, et al. Modeling, design, and development of soft pneumatic actuators with finite element method? [J]. *Advanced Engineering Materials*, 2015, 18(6): 978–988.
- [14] ZHAO H C, O'BRIEN K, LI S, et al. Optoelectronically innervated soft prosthetic hand via stretchable optical waveguides [J]. *Science Robotics*, 2016, 1(1): 7529-1–7529-10.
- [15] 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): 1600018-1–1600018-9.
- [16] AMJADI M, SITTI M. Self-sensing paper actuators based on graphite-carbon nanotube hybrid films [J]. *Advanced Science*, 2018, 5(7): 1800239-1–1800239-8.
- [17] NAKAMURA A, KAWAKAMI S. An actuator – sensor hybrid device made of carbon-based polymer composite for self-sensing systems [J]. *AIP Advances*, 2019, 9(6): 065311-1–065311-6.
- [18] CHEN L Z, WENG M C, ZHOU P D, et al. Graphene-based actuator with integrated-sensing function [J]. *Advanced Functional Materials*, 2019, 29(5): 1806057-1–1806057-9.
- [19] GUELL-GRAU P, ESCUDERO P, PERDIKOS F G, et al. Mechano-chromic detection for soft opto-magnetic actuators [J]. *ACS Appl Mater Interfaces*, 2021, 13(40): 47871–47881.
- [20] 谢卓颖,赵远锦,顾忠泽. 结构色纳米材料[M]. 北京:化学工业出版社, 2018.
- [21] SUN L, CHEN Z, BIAN F, et al. Bioinspired soft robotic caterpillar with cardiomyocyte drivers [J]. *Advanced Functional Materials*, 2019, 30(6): 1907820-1–1907820-8.
- [22] FU F, SHANG L, CHEN Z, et al. Bioinspired living structural color hydrogels [J]. 2018, 3(16): eaar8580-1–eaar8580-8.
- [23] SHANG Y, CHEN Z, FU F, et al. Cardiomyocyte-driven structural color actuation in anisotropic inverse opals[J]. *ACS Nano*, 2019, 13(1): 796–802.
- [24] FU F, CHEN Z, WANG H, et al. Graphene hybrid colloidal crystal arrays with photo-controllable structural colors [J]. *Nanoscale*, 2019, 11(22): 10846–10851.
- [25] 程杰铭,陈夏洁,顾凯编著. 色彩学 [M]. 北京:科学出版社, 2006.
- [26] 徐艳芳. 色彩管理原理与应用 [M]. 北京:印刷工业出版社, 2011.