

DOI:10.3969/j.issn.1003-5060.2023.09.003

# 用于手部康复的热塑性聚氨酯软体驱动器研究

刘彩霞<sup>1,2</sup>, 潘亭亭<sup>2</sup>, 孙一帆<sup>2</sup>, 马菲<sup>2</sup>, 黄英<sup>2</sup>

(1. 合肥工业大学 物理学院, 安徽 合肥 230601; 2. 合肥工业大学 微电子学院, 安徽 合肥 230601)

**摘要:**针对软体康复训练手套制作流程复杂和辅助力低等问题,文章基于热塑性聚氨酯(thermoplastic polyurethane, TPU),借助3D打印技术,研制具有单、双向软关节的分段式气动软体驱动器。通过有限元软件建立TPU材料超弹性本构模型,仿真分析软体驱动器弯曲特性,试验测试研究软体驱动器弯曲角度、运动轨迹和握力,结果表明,软关节特性满足人手关节最大弯曲角度120°需求,软体驱动器弯曲状态与人手运动轨迹相符,最高握力达11.5 N。直接3D打印的软体驱动器制作简单,辅助力强,满足手指康复训练需求,为手功能损伤患者提供一种更加安全有效的康复训练设备。

**关键词:**热塑性聚氨酯(TPU);3D打印;软关节;分段式软体驱动器;康复训练手套

**中图分类号:**TP242.3 **文献标志码:**A **文章编号:**1003-5060(2023)09-1166-06

## Study on thermoplastic polyurethane soft actuator for hand rehabilitation

LIU Caixia<sup>1,2</sup>, PAN Tingting<sup>2</sup>, SUN Yifan<sup>2</sup>, MA Fei<sup>2</sup>, HUANG Ying<sup>2</sup>

(1. School of Physics, Hefei University of Technology, Hefei 230601, China; 2. School of Microelectronics, Hefei University of Technology, Hefei 230601, China)

**Abstract:** Aiming at the problems of complex manufacturing process and low auxiliary force of soft rehabilitation training gloves, segmented pneumatic soft actuators with unidirectional and bidirectional soft joints were developed based on thermoplastic polyurethane (TPU) and with the help of 3D printing technology. The simulation analysis on the bending properties of the soft actuators was conducted with TPU material hyperelastic constitutive model established by finite element software, and the bending angle, motion trajectory and grip strength of the soft actuators were tested. The results show that the soft joints satisfy the demand of the maximum hand joint bending angle of 120°, the bending state of the soft actuators is in line with the hand motion trajectory, and the maximum grip strength is up to 11.5 N. The directly 3D printed soft actuator has simple manufacturing process and strong auxiliary power, and can be used for finger rehabilitation training. It provides a more safe and effective rehabilitation training equipment for patients with hand function injury.

**Key words:** thermoplastic polyurethane (TPU); 3D printing; soft joint; segmented pneumatic soft actuator; rehabilitation training gloves

使用康复训练手套已成为医疗康复领域中辅助治疗手功能障碍患者的方法之一<sup>[1]</sup>,传统康复训练手套<sup>[2]</sup>大多由刚性材料制成,与人手交互时的安全性大大限制其在医疗康复方面的应用。随

着仿生技术、新型柔性材料、3D打印技术快速发展,软体机器人<sup>[3]</sup>应运而生,软体康复训练手套也成为众多研究者关注的热点。软体康复训练手套核心部件是由软材料制作的软体驱动器,具有刚

收稿日期:2022-01-20;修回日期:2022-03-31

基金项目:浙江省“领雁”研发攻关计划资助项目(2022C03052);中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(JZ2020HGQB0027; JZ2020HGQA0165)

作者简介:刘彩霞(1975—),女,河南禹州人,博士,合肥工业大学副教授,硕士生导师;

黄英(1960—),女,安徽休宁人,博士,合肥工业大学教授,博士生导师,通信作者, E-mail: hf\_hy@163.com.

度小、柔顺性高等特点<sup>[4]</sup>,可以提供比刚性康复训练手套更安全的交互形式,使得软体驱动器成为康复训练手套的理想选择<sup>[5]</sup>。

众多研究者研制软体驱动器时,硅橡胶是最常用的柔性材料。文献[6]通过引入纤维增强方式研制一种可弯曲、延伸和扭转的气动软体驱动器,并将其应用于手部康复训练;文献[7]提出一种用于手功能康复的圆环加箍型的气动软体驱动器;文献[8]提出一种嵌套结构手指康复软体驱动器。这些软体驱动器在驱动过程中弯曲轨迹与实际的人手运动轨迹不符。文献[9]研制一种双分段的软弹性复合驱动器,并基于此制作了软体康复训练手套;文献[10]提出一种内嵌气囊式分段式气动软体驱动器,增加了手指与软体驱动器之间贴合度。尽管这些软体驱动器采用了分段式设计,但是每个关节不能独立弯曲,灵活性有限。此外,这些软体驱动器均采用硅橡胶材料制作而成,制作流程复杂,往往需要多步才能成型,而且硅橡胶材料相对较大的材料质量和较小的材料刚度导致软体驱动器具有较低的辅助力,妨碍其在实际应用中的效用。

针对上述问题,本文设计了基于柔性热塑性聚氨酯(thermoplastic polyurethane, TPU)的3种用于不同手指康复的分段式独立驱动的气动软体驱动器。该分段式软体驱动器由2种具有波纹管气腔的软关节(单、双向软关节)组成,使用低成本的桌面级熔融沉积制造(fused deposition modeling, FDM)3D打印机和TPU直接打印而成,制作步骤简单。通过有限元建模获得TPU材料的最佳本构模型,仿真分析软关节和软体驱动器特性。对软关节和软体驱动器弯曲性能、运动轨迹、抓握能力等进行测试。通过集成5个软体驱动器制作康复训练手套,成功地带动手指进行康复训练,完成多个抓取任务。

## 1 结构设计

### 1.1 人手关节结构分析

人的手指主要由关节、指骨及其周围软组织构成,依靠肌腱屈伸驱动关节转动。关节包括掌指关节、近端指间关节、远端指间关节,拇指有近节、中节2节指骨,其余手指为近节、中节和远节3节指骨。掌指关节为双轴向关节,可实现屈伸、外展、内收运动,其余关节只可做屈伸运动,各关节运动范围见表1所列<sup>[11]</sup>,掌指关节可达到一定后伸角度,在手指运动中至关重要。因此,为达到

手指康复训练目的,不能仅依靠弯曲运动带动手指进行康复训练,需要设计符合人类手指结构和运动规律的软体驱动器。

表1 人手各关节的运动范围

手指名称	关节	运动方向	运动范围/(°)
拇指	掌指关节	屈伸	-20~60
	远端指间关节		-10~90
其余四指	掌指关节	屈伸	-10~90
	近端指间关节		0~120
	远端指间关节		0~90

### 1.2 软体驱动器结构设计

软关节和软体驱动器结构设计如图1所示。

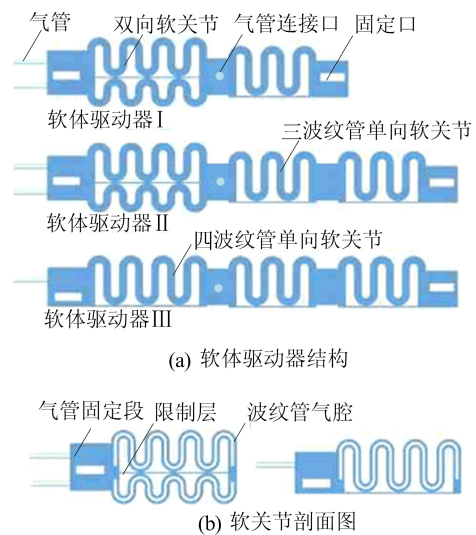


图1 软关节和软体驱动器结构设计

日常生活中每根手指功能占比不同。拇指占手功能36%,食指和中指各占18%,无名指和小指各占9%<sup>[12]</sup>。因此,基于手指关节分布及运动规律,设计3种用于不同手指康复训练的分段式独立驱动的软体驱动器(图1a)。软体驱动器I由1个双向软关节和1个三波纹管单向软关节组成,用于辅助大拇指进行康复训练。软体驱动器II由1个双向软关节和2个三波纹管单向软关节组成,用于辅助食指和中指屈伸。软体驱动器III由1个四波纹管单向软关节和2个三波纹管单向软关节组成,用于辅助其他2根手指。为让软体驱动器能够更好贴合手指形状采用分段设计;为增加软体驱动器灵活性,采用独立驱动方式,在固定段侧面设置一个气管连接口,便于独立驱动单向软关节弯曲(图1a)。考虑到后续软体驱动器装配到手套上,在软体驱动器两端各设置1个固

定口便于固定魔术贴。软体驱动器 I、II、III 的长度分别为 102、139、147 mm。

单、双向软关节结构剖面图见图 1b, 双向软关节包括 2 个波纹管气腔、中间限制层、气管固定段和 2 个气管, 下层波纹管高度小于上层。单向软关节由波纹管气腔、底层限制层、气管固定段和 1 个气管组成。充气时, 波纹管气腔会趋向伸直, 限制层约束使软关节弯曲。单向软关节只可向下弯曲, 而双向软关节可向上下 2 个方向弯曲, 向上弯曲角度小于向下弯曲角度。

## 2 有限元分析

### 2.1 TPU 材料本构模型

TPU 是柔性聚氨酯材料, 与橡胶有相似特性, 具有高弹性、耐磨性、撕裂强度、耐化学性和广泛温度兼容性等<sup>[13]</sup>特点。试验用 TPU 材料购于长沙易泰龙新材料有限公司, 邵氏硬度为 75A。使用 ZQ-990 万能试验机(东莞市智取精密仪器有限公司)对 75A TPU 材料进行拉伸试验, 以 100 mm/min 速度拉伸获得应力、应变数据, 对 75A TPU 的应力、应变数据和 4 种(Ogden、Yeoh、Mooney-Rivlin、Neo Hooke)不同超弹性模型<sup>[13]</sup>进行拟合, 在 ABAQUS/CAE 中建立材料模型, 导入拉伸试验获得的数据, 应用最小二乘法拟合, 结果如图 2 所示, 选取 Ogden 模型作为 75A TPU 最佳本构模型。

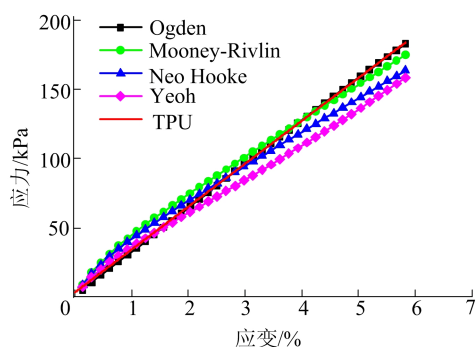


图 2 75A TPU 的材料本构模型拟合

### 2.2 有限元仿真

用 Ogden 模型对软关节和软体驱动器进行有限元仿真。对单向和双向软关节有限元应力与变形进行分析, 仿真云图如图 3a、图 3b 所示, 气腔内施加压力时, 应变集中在波纹管气道, 波纹管气道膨胀展开, 软体驱动器整体增长, 限制层约束导致软体驱动器弯曲。向四波纹管单向软关节施加压力, 软关节只向下弯曲; 向双向软关节下波纹

管气腔施加压力, 双向软关节向上弯曲; 向上波纹管气腔施加压力, 双向软关节向下弯曲。对 3 种软体驱动器进行有限元仿真, 软体驱动器 I、II、III 仿真云图如图 3c~图 3e 所示, 从图 3c~图 3e 可以看出, 3 种软体驱动器单、双向软关节可实现独立驱动, 在弯曲过程中运动轨迹与人手运动轨迹符合。

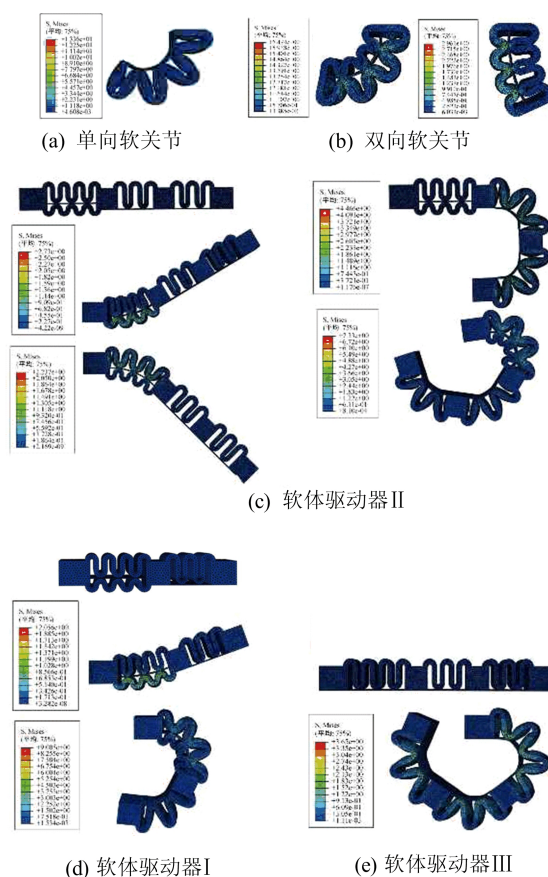


图 3 软关节和软体驱动器仿真云图

## 3 软体驱动器制作与测试应用

### 3.1 软体驱动器制作

软体驱动器使用 FDM 3D 打印机和柔性 TPU 进行直接打印, 制作工艺简单。利用 3Dmax 软件建立软关节和软体驱动器模型, 在 Cura 软件中进行切片并导出 .gcode 文件。为解决 3D 打印软体驱动器时无法使用支撑结构存在的问题, 确保 3D 打印的软体驱动器气密性, 对 Cura 软件中 3D 打印参数进行多次调整, 调整 3D 打印参数见表 2 所列。3D 打印的软关节如图 4a 所示, 在气压驱动下软关节呈现不同程度弯曲, 气密性好。3D 打印的软体驱动器如图 4b 所示, 不同结构软体驱动器可应用到不同手指。

表 2 TPU(75A)的 3D 打印参数

设置类型	参数	数值
分辨率	喷嘴直径/mm	0.4
	初始层高/mm	0.1
	第 1 层层高/mm	0.05
	外壳厚度/mm	0.8
	底部、顶部厚度/mm	1.2
	挤出宽度/mm	0.4
	打印速度/(mm/s)	10
速度	轮廓打印速度/(mm/s)	8
	填充速度/(mm/s)	8
	第 1 层速度/(mm/s)	8
	回抽速度/(mm/s)	30
回抽	回抽长度/mm	3
	打印温度/°C	230
温度	热床温度/°C	60
	填充参数/%	100
填充	填充交叉/%	20

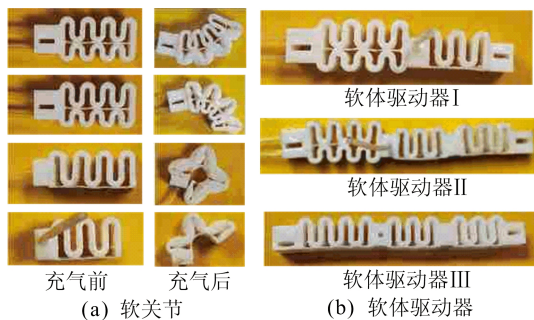
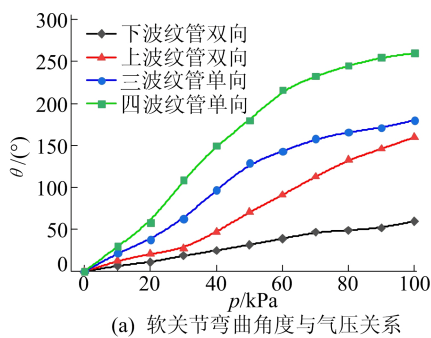


图 4 3D 打印的软关节和软体驱动器

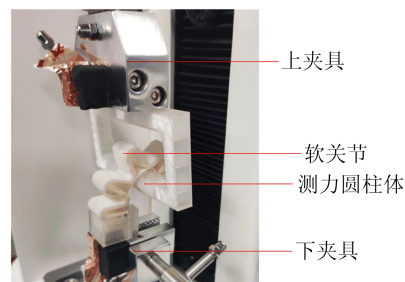
### 3.2 特性测试

软关节作为软体驱动器基础部件,直接反映软体驱动器特性,将软关节一端垂直固定进行特性测试,施加 0~100 kPa 气压,步长为 10 kPa,在每个气压下,记录其弯曲角度,结果如图 5a 所示。随着气压增加,软关节弯曲角度随之增加,四波纹管单向软关节弯曲角度能实现 0~260°变化,三波纹管单向软关节弯曲角度能实现 0~180°变化,双向软关节弯曲角度能实现 -60°~160°变化,弯曲角度均能满足手指弯曲所需角度。对软关节进行握力测试,如图 5b 所示。打印 2 个测试握力硬质支架,通过正方体支架将软关节固定在万能试验机下夹具,在上夹具固定 1 个直径 15 mm 圆柱体。逐渐向软关节充入气体,软关节弯曲并夹持住圆柱体,以 0.5 mm/s 速度向上拉动圆柱体,测量软关节在整个拉动过程中握力,直到其失去对圆柱体抓握。双向软关节握力如图 5c 所示,其上波纹管和下波纹管在 100 kPa 时可达到最高握力,分别为 4.4、3.0 N。单向软关节握力如图 5d 所示,四波纹管和三波纹管单向软关节在 100 kPa 时可达到最高握力,分别为 6.5、5.5 N。

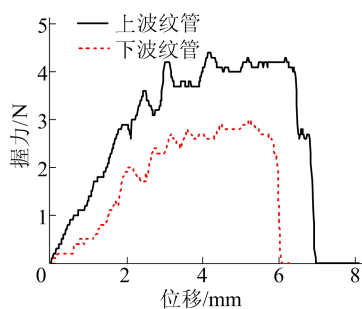
为测试软体驱动器特性,在坐标纸上记录 3 种软体驱动器在不同气压下弯曲轨迹和末端点运动轨迹,施加 0~100 kPa 压力,步长 20 kPa,结果如图 6a~图 6c 所示。



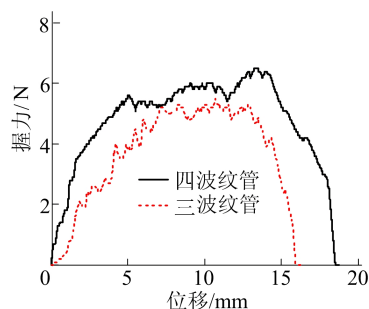
(a) 软关节弯曲角度与气压关系



(b) 握力测试图



(c) 双向软关节握力测试



(d) 单向软关节握力测试

图 5 软关节特性测试结果

不同气压下, 软体驱动器表现出不同弯曲状态, 与手指弯曲轨迹类似, 软体驱动器可以很好地贴合人体手指表面。软体驱动器运动轨迹与插图仿真结果相同, 验证了仿真结果的正确性。使用直径为 50 mm 的圆柱体对这 3 种软体驱动器进行握

力测试, 测试方法与软关节握力测试方法相同, 结果如图 6d~图 6f 所示, 在 100 kPa 最高握力分别为 9.2 N(软体驱动器 I)、10.5 N(软体驱动器 II) 和 11.5 N(软体驱动器 III), 3D 打印 TPU 制作的软体驱动器辅助力强, 具有较强的实用性。

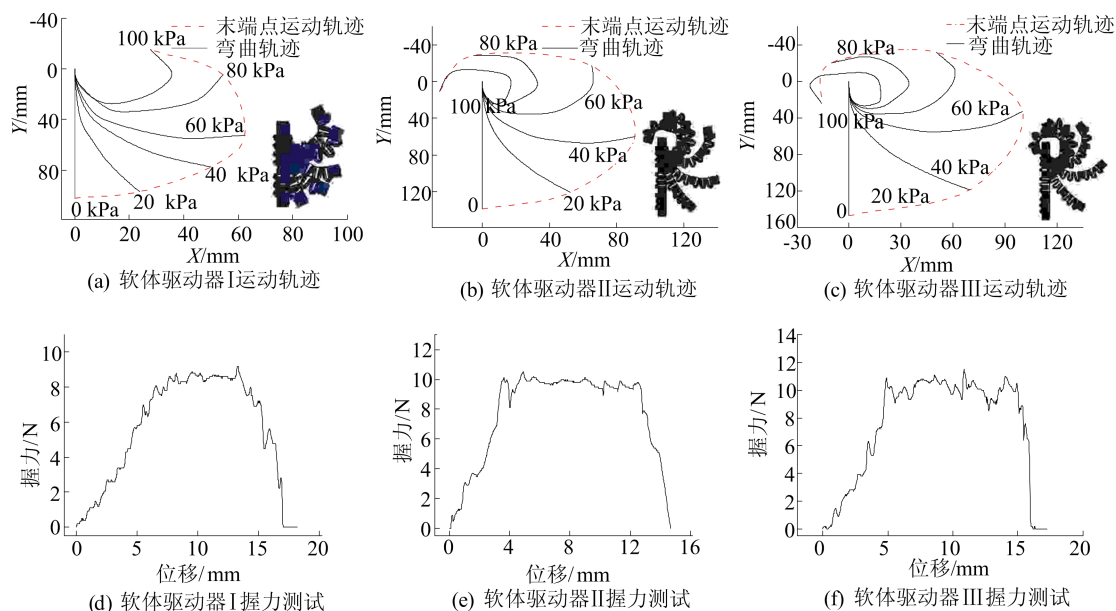


图 6 软体驱动器特性测试结果

### 3.3 软体康复训练手套应用

软体驱动器集成在一个织物手套上制作软体康复训练手套, 如图 7 所示。



图 7 软体康复训练手套应用

软体康复训练手套可驱动拇指和食指弯曲, 具有对手指进行康复训练的能力。为观察该软体康复训练手套抓取性能, 实验抓取胶带、木块、黑板擦等不同大小物体, 质量分别为 154、87、34 g。结果表明, 软体康复训练手套可以辅助人手完成康复训练以及常见物体抓取。

## 4 结 论

本文提供了一种 3D 打印 TPU 的参数, 根据设计的单、双向软关节结构, 直接 3D 打印 TPU, 制备了 3 种用于不同手指康复训练的分段式软体驱动器, 简化了软体驱动器制作流程。软关节和软体驱动器弯曲能力和握力测试显示, 设计的软体驱动器弯曲轮廓与人手弯曲相符, 在 100 kPa 下最高握力分别为 9.2 N(软体驱动器 I)、10.5 N(软体驱动器 II) 和 11.5 N(软体驱动器 III), 与硅橡胶制作的软体驱动器相比, 该软体驱动器握力高、质量轻。将软体驱动器用于康复训练手套, 可满足日常生活的康复训练和抓握需求, 为手功能损伤患者提供一种更加安全有效的康复训练设备。

## [参 考 文 献]

- [1] 吕赢, 孟青云, 喻洪流. 手部康复机器人技术研究进展[J]. 北京生物医学工程, 2018, 37(6): 650-656.
- [2] SUSANTO E A, TONG R K Y, HO N S K. Hand exoskeleton robot for assessing hand and finger motor impairment after stroke[J]. HKIE Transactions, 2015, 22(2): 78-87.

(下转第 1184 页)

进行 3D SIFT 关键点提取,将模板点云与目标工件表面点云缩至特征点集,既保留了点云的主要特征,又能够提高点云配准效率。以三通和弯管工件为实验对象,实验对比分析了无关键点提取、3D Harris 关键点提取、3D SIFT 关键点提取以及本文关键点提取混合算法,结果表明,本文算法能够显著降低点云配准时间,提高配准精度,为后续的机器人抓取提供更加快速准确的位姿估计。

### [参 考 文 献]

- [1] 曹文武. 基于 RGB-D 视觉识别的机器人抓取规划研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2018.
- [2] 伍锡如,黄国明,孙立宁. 基于深度学习的工业分拣机器人快速视觉识别与定位算法[J]. 机器人,2016,38(6):711-719.
- [3] 杜学丹,蔡莹皓,鲁涛,等. 一种基于深度学习的机械臂抓取方法[J]. 机器人,2017,39(6):820-828,837.
- [4] 张云洲,李奇,曹赫,等. 基于多层级特征的机械臂单阶段抓取位姿检测[J]. 控制与决策,2021,36(8):1815-1824.
- [5] 夏晶,钱堃,马旭东,等. 基于级联卷积神经网络的机器人平面抓取位姿快速检测[J]. 机器人,2018,40(6):794-802.
- [6] REDMON J,ANGELOVA A. Real-time grasp detection using convolutional neural networks[J]. Proceedings IEEE International Conference on Robotics & Automation,2015:1316-1322.
- [7] ALEXANDRE L A. 3D object recognition using convolutional neural networks with transfer learning between input channels[C]//Proceedings of the 13th International Conference IAS-13. [S. l.]: Springer International Publishing,2016:889-898.
- [8] RAD M,LEPETIT V. BB8: A scalable, accurate, robust to partial occlusion method for predicting the 3D poses of challenging objects without using depth[C]//2017 IEEE International Conference on Computer Vision (ICCV). [S. l.]: IEEE,2017:3828-3836.
- [9] REN S,HE K,GIRSHICK R, et al. Faster R-CNN: towards real-time object detection with region proposal networks[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis & Machine Intelligence,2017,39(6):1137-1149.
- [10] HE K,GKIOXARI G,P DOLLAR P, et al. Mask R-CNN[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis & Machine Intelligence,2017:2961-2969.
- [11] 俞浩,高飞. 基于特征向量的点云配准方法研究[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版),2020,43(7):958-962.
- [12] SIPIRAN I,BUSTOS B. Harris 3D: a robust extension of the Harris operator for interest point detection on 3D meshes[J]. Visual Computer,2011,27(11):963-976.
- [13] 陈学伟,朱耀麟,武桐,等. 基于 SAC-IA 和改进 ICP 算法的点云配准技术[J]. 西安工程大学学报,2017,31(3):395-401.
- [14] 荆路,武斌,方锡禄. 基于 SIFT 特征点结合 ICP 的点云配准方法[J]. 激光与红外,2021,51(7):944-950.
- (责任编辑 胡亚敏)
- 
- (上接第 1170 页)
- [3] CARMEL M. Soft-matter engineering for soft robotics[J]. Advanced Materials Technologies,2019,4(2):1800477.
- [4] CIANCHETTI M,LASCHI C,MENCIASSI A, et al. Biomedical applications of soft robotics[J]. Nature Reviews Materials,2018,3:143-153.
- [5] PENG Z,HUANG J. Soft rehabilitation and nursing-care robots: a review and future outlook[J]. Applied Sciences,2019,9(15):3102.
- [6] POLYGERIONS P,WANG Z,GALLOWAY K C, et al. Soft robotic glove for combined assistance and at-home rehabilitation[J]. Robotics and Autonomous Systems,2015,73:135-143.
- [7] SUN Z S,GUO Z H,TANG W. Design of wearable hand rehabilitation glove with soft hoop-reinforced pneumatic actuator[J]. Journal of Central South University,2019,26(1):106-119.
- [8] NING M,WANG K,LI M, et al. Design, analysis and experiment of finger soft actuator with nested structure for rehabilitation training[J]. Advances in Mechanical Engineering,2020,12(11):1-15.
- [9] HEUNG K,TONG R,LAU A, et al. Robotic glove with soft-elastic composite actuators for assisting activities of daily living[J]. Soft Robotics,2019,6(2):289-304.
- [10] WANG J B,FEI Y Q,WU P. Design, modeling, and testing of a soft pneumatic glove with segmented PneuNets bending actuators[J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics,2019,24(3):990-1001.
- [11] 戴红. 人体运动学[M]. 北京:人民卫生出版社,2008:103-115.
- [12] 吴小瑜,周晓明. 人体损伤程度鉴定标准中手功能丧失的评定[C]//全国第十七届法医临床学学术研讨会论文集. 北京:中国法医学会,2014:628-629.
- [13] 管国阳,孟政委,谢立新,等. 聚氨酯橡胶超弹性本构模型拟合效果评估[J]. 力学季刊,2021,42(3):571-580.
- (责任编辑 张 镗)