文章编号:1674-2869(2025)01-0099-06

基于智能触觉感知的软体理疗执行器

黄自鑫,李欣澎,许义伟,张 翼,常 涛
武汉工程大学电气信息学院,湖北 武汉 430205

摘 要:穴位理疗可以有效治疗老年人退行性疾病和慢性疾病,但由于医护人员数量少、培养周期长、理疗器械普及率低等问题,便携式穴位理疗服务难以惠及所有患者。针对上述问题,设计并制作了一款具有智能触觉感知功能的软体理疗执行器,分析其弯曲特性;搭建实验平台;通过向该软体理疗执行器内通入气压周期性变化的压缩空气,驱动该软体理疗执行器实现其穴位理疗功能;嵌入触觉感知传感器,设计基于低通滤波的数据采样算法,实现其脉搏检测功能。通过实验验证了软体理疗执行器穴位理疗和脉搏检测功能的有效性,证明软体理疗执行器可以安全有效地与老年人交互,在智慧养老领域具有广泛应用前景。

关键词:穴位理疗;软体理疗执行器;低通滤波;脉搏检测;智慧养老
中图分类号:TP273 **文献标识码**:A **DOI**:10.19843/j.cnki.CN42-1779/TQ.202401003

Soft physical therapy actuator based on intelligent tactile perception

HUANG Zixin, *LI Xinpeng*, *XU Yiwei*, *ZHANG Yi*, *CHANG Tao*
School of Electrical and Information Engineering, Wuhan Institute of Technology, Wuhan 430205, China

Abstract: Acupoint physical therapy can effectively treat degenerative and chronic diseases in the elderly. However, due to issues such as a shortage of medical staff, a long training cycle, and low penetration of physical therapy equipment, it is difficult for portable acupoint physical therapy services to reach all patients. To address the above problems, we designed and fabricated a soft physical therapy actuator with smart tactile sensing capabilities. We analyzed its bending characteristics, and then built an experimental platform to drive its function of acupoint physical therapy by introducing compressed air with periodically changing pressure into it; and we designed a data sampling algorithm based on low-pass filtering to realize its pulse detection function by embedding a tactile sensor. In this study, the effectiveness of the acupoint physical therapy and pulse detection functions of the soft actuator physical therapy was verified through experiments, which proves that it can safely and effectively interact with the elderly, and has broad application prospects in the field of smart elderly care.

Keywords: acupoint physical therapy; soft physical therapy actuator; low-pass filtering; pulse detection; smart elderly care

中国逐渐进入人口老龄化社会,老龄化问题持续加重,2050年中国老年人口将达到4.8亿,养老成为必须解决的民生问题[1]。医疗健康和养老服务在人工智能[2]、大数据[3]、物联网[4]和机器人[5]等新一代信息技术的推动下,呈现出“跨界融合”的新态势与新特征。

老年人随年龄增长,人体细胞活性逐渐降低,机体免疫功能和再生功能衰退[6]。老年人易患退行性疾病和慢性疾病,长期用药会加重老年人肝、肾功能负担[7]。

收稿日期:2024-01-05
基金项目:湖北省自然科学基金(2023AFB380);智能机器人湖北省重点实验室创新基金(HBIRL202301);湖北省数字化纺织装备重点实验室开放课题(KDTL2022003)
作者简介:黄自鑫,博士,副教授。Email:huangzx@wit.edu.cn
引文格式:黄自鑫,李欣澎,许义伟,等. 基于智能触觉感知的软体理疗执行器[J]. 武汉工程大学学报,2025,47(1):99-104.

理疗是一种以中医理论为基础，以经络理论为指导的外部治疗方法[8]，中医穴位理疗方法主要有针灸法[9]、推拿法[10]、按摩法[11]以及刮痧法[12]等。穴位理疗方法具有提高人体免疫力、疏通经络、缓解疲劳和失眠、调节内分泌等益处，能够有效治疗疾病，提高治疗舒适度。传统中医理疗对医护人员要求较高，但由于专业医护人员数量少、培养周期长、理疗器械普及率低等问题，导致穴位理疗与服务难以惠及所有患者。针对上述问题目前迫切需要研发一款应用于家庭养老服务背景下的便携式穴位理疗智能设备，提高穴位理疗服务普及度，并使穴位治疗走向标准化和现代化。

随着智能材料驱动与传感和人工智能等关键科学技术的发展，形状记忆聚合物[13]、光敏材料[14]、压电材料[15]、软体材料[16]等智能材料应用逐渐广泛。其中软体材料具有欠驱动性[17-18]、高灵活性[19]、强人机交互性和高安全性[20]，软体材料制作方法如分层注塑法、3D打印法和失蜡注塑法等发展日益成熟。软体材料制成的机器人执行器提高养老服务舒适性的同时，可以更精准贴合人体穴位提高穴位理疗效果。这些特点有助于推动穴位理疗智能设备的研发与制备。

柔性触觉传感器可应用于机器人[21]、穿戴式设备[22]和人机交互设备[23]。常见的传感器有电容式传感器[24]、压电式传感器[25]和压阻式传感器等[26-27]。将软体材料和柔性触觉传感技术相结合，执行器可直接获取人体生理信号，反馈穴位理疗效果。控制系统对执行器进行反馈调节提高穴位理疗的精准度和安全性，制作出更符合家庭养老服务要求的穴位理疗智能设备。

基于上述分析，本文设计了一款具有触觉感知功能的软体理疗执行器，利用3D打印技术和分层注塑方法制作触觉理疗手指，分析软体理疗执行器的弯曲特性，通过向软体理疗执行器内通入气压周期性变化的压缩空气，驱动软体理疗执行器实现穴位理疗功能，此外，还设计了基于低通滤波的数据采样算法，实现软体理疗执行器的脉搏检测功能，通过实验验证了软体理疗执行器脉搏检测功能的有效性。

1 系统设计与制作

1.1 制造流程

软体理疗执行器由基板、触觉理疗手指、驱动管和触觉感知传感器组成。驱动管用束线带固定于触觉理疗手指末端，触觉感知传感器嵌入触觉理疗手指内部。将两个带有驱动管和触觉感知传感器的触觉理疗手指安装在3D打印制成的模具中，固定在基板上，将触觉感知传感器的串口连接至下位机，软体理疗执行器的成品图如图1所示。

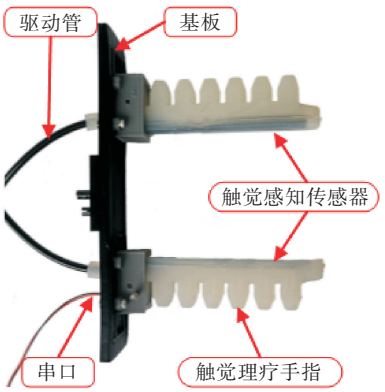

图1 软体理疗执行器

Fig. 1 Soft therapy actuator

考虑穴位理疗和脉搏检测实验设备使用者为个体用户，需注意普适性，且针对每位使用者手腕粗细不同、脉搏信号强弱不同等情况，制作方法需满足节约成本、操作便捷、可塑性高等条件，综上所述本文选用分层注塑方法制作，具体步骤如下：

(1)制作触觉理疗手指模具，模具分为基模、气管孔芯、下模、固定孔芯和上模5个部分。将气管孔芯和固定孔芯嵌入上模中，如图2所示。

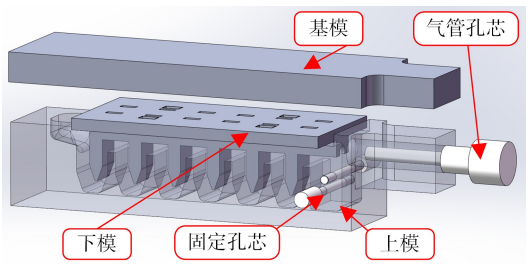

图2 触觉理疗手指模具

Fig. 2 Tactile therapy finger mold

(2)将流体硅胶充分混合消泡处理后，使用注射器将流体硅胶均匀注入上模中，将下模固定在上模中，如图3所示。

(3)流体硅胶固化后得到未成型手指。将流体硅胶注入基模中，固化后，将触觉感知传感器和限制层材料固定在固化的硅胶上，如图4所示。

(4)在触觉感知传感器上注入流体硅胶，将未成形手指置于流体硅胶上，流体硅胶固化后，得到完整的触觉理疗手指，如图5所示。

触觉理疗手指尺寸参考人体手指尺寸设计，可以准确地模拟人体手指实现穴位理疗和脉搏检

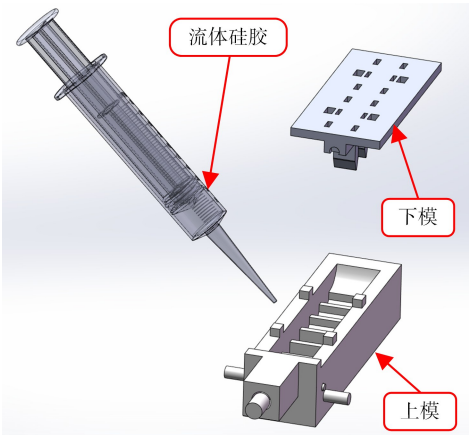

图 3　上模注射成型过程

Fig. 3　Upper die injection molding process

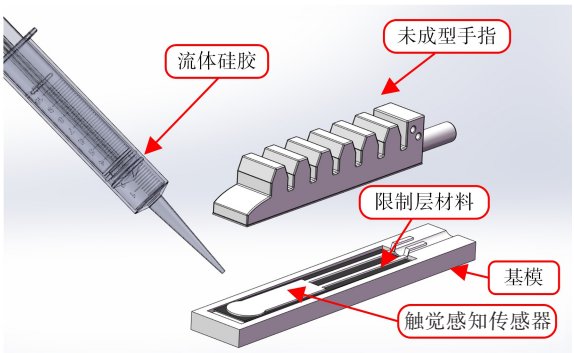

图 4　基模注射成型过程

Fig. 4　Basic mold injection molding process

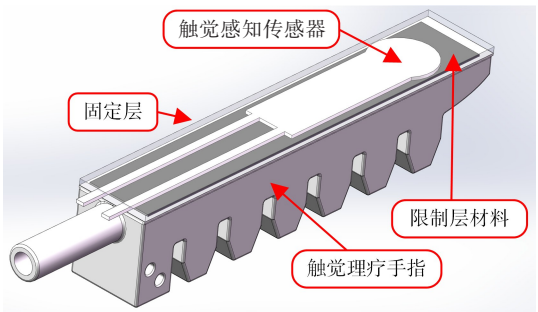

图 5　触觉理疗手指

Fig. 5　Tactile therapy finger

测功能，手指尺寸：长度 70 mm，高度 15 mm，限制层厚度 5 mm。

1.2　实验平台

实验平台的系统电源为 220 V，直接为气泵供电，并作为开关电源的输入，气泵给软体理疗执行器提供压缩空气，比例调压阀用于调节气泵输入到软体理疗执行器中的压力值。下位机控制器通过控制比例调压阀进而控制触觉软体执行器，将采集到的压力数据经低通滤波处理后转换为压力值和脉搏数显示在上位机上，实验平台如图 6 所示。

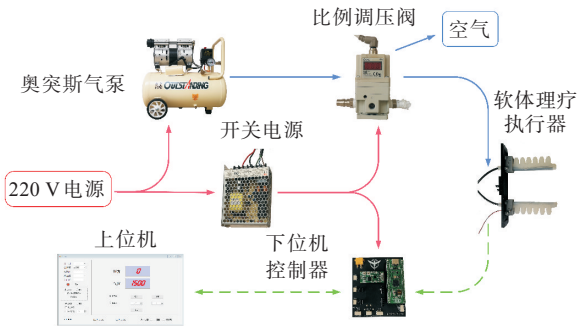

图 6　软体理疗执行器实验平台

Fig. 6　Soft therapy actuator experimental platform

2　软体理疗执行器特性分析

对软体理疗执行器进行特性分析，通过控制比例调压阀输出不同压力值，得到执行器末端位移 D 随输入压缩空气压力值变化的线性关系。

比例调压阀用于调节输入触觉理疗手指的压缩空气压力值，采用脉宽调制（pulse width modulation，PWM）技术对压力进行控制，比例调节阀输出空气的压力为：

$$p = \alpha p_{\max} \tag{1}$$

其中，α 为 PWM 的占空比，$p_{\max}$ 为比例调压阀的最大输出气压。

通过在软体理疗执行器上反复进行驱动实验，观察理疗手指的形变程度。将 $p_{\max}$ 的范围设定为 0.10~0.25 MPa。同时，α = 0.4，将不同的压缩空气注入理疗手指，末端位移 D 变化如表 1 所示。

表 1　软体理疗执行器末端位移统计

Tab. 1　Displacement statistics of soft therapy actuator

$p_{\max}$ / MPa	p / MPa	D / cm
0.100	0.040	2.13
0.110	0.044	2.42
0.120	0.048	2.62
0.130	0.052	3.07
0.140	0.056	3.18
0.150	0.060	3.43
0.160	0.064	3.66
0.170	0.068	3.89
0.180	0.072	4.12
0.190	0.076	4.32
0.200	0.080	4.56
0.210	0.084	4.79
0.220	0.088	4.98
0.230	0.092	5.04
0.240	0.096	5.12
0.250	0.100	5.23

3 软体理疗执行器脉搏检测机制

根据特性分析结果，将压力值为0.08 MPa的压缩空气施加到软体理疗执行器时，其触觉理疗手指形变程度可以抓住人的手腕，同时使触觉感知传感器接近到被检测穴位。触觉感知传感器在不受外力影响情况下，测得压力数据为恒定数值，这时可以清晰检测到人体周期性脉搏跳动，测得压力呈周期性变化。

以采集压力波峰为一次脉搏跳动可计算出人体脉搏，设计基于低通滤波的数据采样算法，对检测数据低通滤波降噪处理后，使用采样算法计算出测得数据对应人体脉搏值。

触觉感知传感器检测到的志愿者A受到的力用F表示，测得数据（采样时间$t_d = 15$ s，采样间隔$h = 0.01$ s）如图7所示。

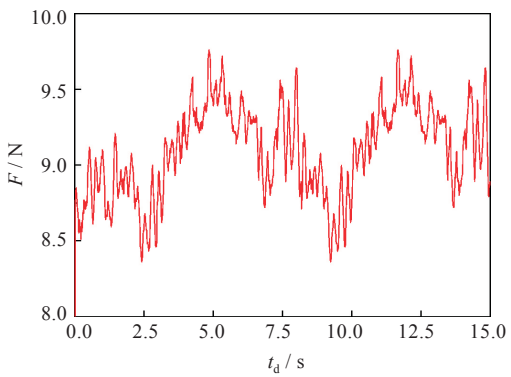

图7 志愿者A受到的力随时间的变化

Fig. 7 The force for volunteer A versus time

图7显示压力数据受噪声影响比较严重，为减少外界噪声对实验数据的影响，选择低通滤波方式减少噪声干扰，将压力数据转化为二进制序列计算人体脉搏数。在第k次采样时，测试压力记作$p(k)$，压力的变化被定义为：

$$\Delta p(k) = \begin{cases} p(1) - 0 = p(1), k = 1 \\ p(k+1) - p(k), k \geqslant 2 \end{cases} \tag{2}$$

转换规则如下：

$$p_B(k) = \begin{cases} 1, \Delta p > 0 \\ 0, \Delta p \leqslant 0 \end{cases} \tag{3}$$

其中，$p_B(k)$为第k次采样后$p(k)$经式(3)转换后的二进制值。

在去除干扰噪声的操作中，使用长度为4的滑动窗口对二进制序列进行滤波。

将滑动窗口所选择数据分别表示为a_1、a_2、a_3和a_4，以便更直观地显示实验过程与结果。该窗口每次会滑动1个网络网格，并生成1个滤波后的数据，滤波的规则用p_{BF}表示如下：

$$p_{BF}(k) = \begin{cases} 1, \sum_{i=k}^{k+3} p_B(i) = 4 \\ 0, \sum_{i=k}^{k+3} p_B(i) = 0 \\ p_B(k), \sum_{i=k}^{k+3} p_B(i) \notin [0\,4] \end{cases} \tag{4}$$

其中$k = 1, 2, \cdots, N-3$，N为二进制值p_B的总数。

为了计算脉搏数量，利用式(4)生成一个新序列$p_{BP}(k)$，表示为：

$$p_{BP}(k) = \begin{cases} 1, p_{BF}(k+1) - p_{BF}(k) = 1 \\ 0, p_{BF}(k+1) - p_{BF}(k) \neq 1 \end{cases} \tag{5}$$

1 min内志愿者A的脉搏数N_d是：

$$N_d = \frac{60}{t_d} \sum_{k=1}^{N-3} p_{BP}(k) \tag{6}$$

当t_d选择一个较小值时，检测速度较快，但检测精度不高；当t_d选择较大值时，可以保证检测精度，但检测速度较慢。因此，需要权衡检测精度和检测速度，通过反复实验，分析实验结果，得出本文所建实验平台最优t_d为15 s。

为了避免偶然因素对检测结果的影响，通过对同一目标采集5次脉搏数据，将5次脉搏数据的平均值N_p作为实验结果，表示为：

$$N_p = \frac{1}{5} \sum_{i=1}^{5} N_{d_i} \tag{7}$$

其中，N_{d_i}是第i次检测值。

4 穴位理疗和脉搏检测实验

4.1 穴位理疗实验

选择合谷穴进行穴位理疗实验，在手掌上使用标记贴对人体合谷穴进行标记，将软体理疗执行器移动至穴位理疗位置并注入周期性压缩空气，注入手指气压p_I的范围设定为0.09~0.25 MPa，理疗周期$T = 3$ s，每间隔0.5 s对软体理疗执行器穴位理疗过程进行记录，穴位理疗过程如图8所示。

4.2 脉搏检测实验

为验证软体理疗执行器脉搏检测功能的有效性，利用本文提出的数据采样算法和脉搏计对5名志愿者进行脉搏检测实验。

为便于表述，5名志愿者分别被记为A、B、C、D和E。

对于志愿者A，脉搏检测示意图如图9所示。

为更清晰地描述数据采样算法的过程，选择采样测得志愿者A压力数据的一个子集，具体描述数据采样算法的工作原理。

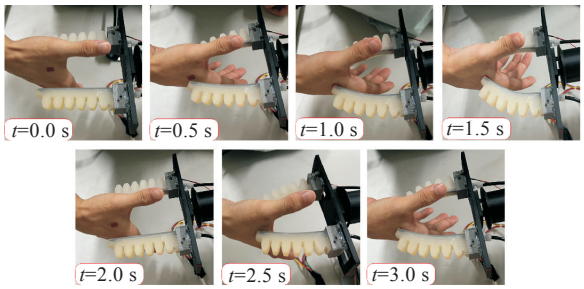

图 8　穴位理疗过程

Fig. 8　Acupoint therapy process

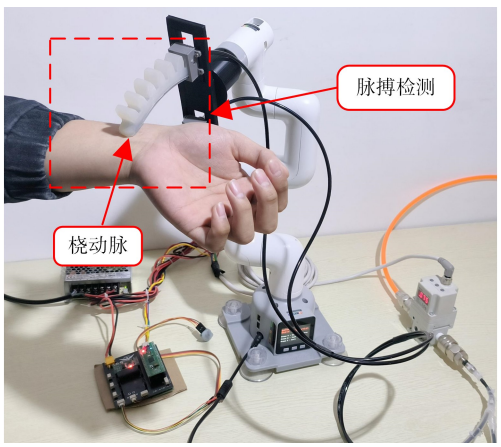

图 9　脉搏检测示意图

Fig. 9　Pulse detection diagram

根据式(3)和式(4)，滑动窗口滤波原理及不同时间下动态滤波过程如图 10 所示，为了清晰地显示滤波效果，$t \in [2.5, 5.0]$ s的二进制序列p_B和滤波后的二进制序列p_{BF}的对比如图 11 所示。

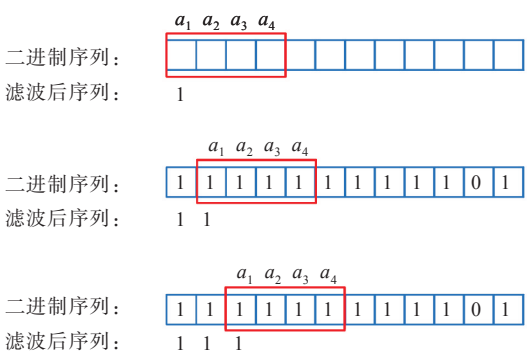

图 10　滑动窗口滤波原理图

Fig. 10　Sliding window filtering schematic

根据式(6-7)，得到N_d = 80，N_p = 77。使用脉搏计对志愿者 A 进行脉搏检测，得到脉搏数N_I为 77。两次实验脉搏检测结果相同，证明数据采样算法是可行的。

为进一步验证所提出的数据采样算法的有效性，对另外 4 名志愿者 B、C、D 和 E 进行脉搏检测，如表 2 所示。

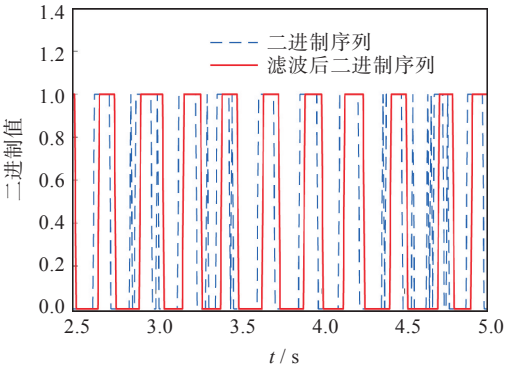

图 11　滤波前后二进制序列对比图

Fig. 11　Comparison of binary sequences before and after filtering

表 2　志愿者脉搏检测结果

Tab. 2　Pulse test results of volunteers

次数	脉搏值				
	A	B	C	D	E
1	80	75	69	69	74
2	79	75	65	67	77
3	75	73	66	71	71
4	75	74	68	71	73
5	76	77	67	70	75

根据表 2 和式(6)得到志愿者使用软体理疗执行器和脉搏计检测的结果，如表 3 所示。从表 3 可以看出，软体理疗执行器检测到的脉搏与脉搏计测得的脉搏非常接近，说明了本文使用的基于低通滤波的数据采样算法的可行性。

表 3　志愿者通过软体理疗执行器和脉搏计检测的脉搏值

Tab. 3　The volunteers' pulse values measured by the soft therapy actuator and the pulse meter

志愿者	N_P	N_I
A	77	77
B	75	75
C	67	68
D	70	69
E	74	73

根据上述实验结果可知，每一位志愿者的N_p和N_I数值非常接近，软体理疗执行器检测结果是准确的，提出的数据采样算法具有良好的泛化性能。

5　结　论

本文设计了一款软体理疗执行器，选用分层注塑方法和 3D 打印技术制作软体理疗执行器，向软体理疗执行器内注入不同压力值的压缩空气得到软体理疗执行器的弯曲特性，注入周期性压力

值的压缩空气,实现软体理疗执行器穴位理疗功能。嵌入触觉感知传感器,设计基于低通滤波原理的数据采样算法,实现软体理疗执行器脉搏检测功能。在对比实验中软体理疗执行器的脉搏检测结果与脉搏计结果接近,表明软体理疗执行器的可行性。验证了软体理疗执行器在医疗保健和智能养老护理等领域具有广阔的应用前景。

参考文献

[1] RUS D, TOLLEY M T. Design, fabrication and control of soft robots[J]. Nature,2015, 521: 467-475.

[2] 文力,王贺升. 软体机器人研究展望:结构、驱动与控制[J]. 机器人, 2018, 40(5): 577.

[3] WU Y C, YIM J K, LIANG J M, et al. Insect-scale fast moving and ultrarobust soft robot [J]. Science Robotics, 2019, 4(32):eaax1594.

[4] BARTLETT N W, TOLLEY M T, OVERVELDE J T B, et al. A 3D-printed, functionally graded soft robot powered by combustion[J]. Science, 2015, 349(6244): 161-165.

[5] XU F, WANG H S. Soft robotics: morphology and morphology-inspired motion strategy [J]. IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica, 2021, 8(9): 1500-1522.

[6] GUO J L, XIANG C Q, HELPS T, et al. Electroactive textile actuators for wearable and soft robots[C]//2018 IEEE International Conference on Soft Robotics. Piscataway, NJ: IEEE,2018: 339-343.

[7] ZHOU S Y, LI K, OGIHARA A, et al. Perceptions of traditional Chinese medicine doctors about using wearable devices and traditional Chinese medicine diagnostic instruments: a mixed-methodology study [J]. Digital Health, 2022, 8:1-15.

[8] 李思娜, 王锡友, 唐镜全, 等. 推拿治疗膝骨关节炎临床试验中不同手法干预方案的标准化研究[J]. 中华中医药杂志, 2020, 35(3): 1422-1427.

[9] 翟春晓, 叶桦. 社区老年人中医养生与智慧养老的融合路径[J]. 商业经济, 2022(8): 22-23.

[10] 赵波, 任奎羽, 夏子昊,等. 针灸推拿疗法在医养结合社区养老模式中的应用现状[J]. 按摩与康复医学, 2021, 12(22): 4-5,9.

[11] 王梦娜, 刘倩汝, 邓新茹,等. 医养结合模式下老年人中医护理服务需求研究进展[J]. 护理学杂志, 2022, 37(21): 102-105.

[12] 吕越, 晁利芹. 中医推拿运用于"医养结合"模式防治脑卒中初探[J]. 中医学报, 2019, 34(9): 1997-2000.

[13] Al-RUBAIAI M, PINTO T, QIAN C Q, et al. Soft actuators with stiffness and shape modulation using 3D-printed conductive polylactic acid material [J]. Soft Robotics, 2019, 6(3): 318-332.

[14] CHI Y D, TANG Y C, LIU H J, et al. Leveraging monostable and bistable pre-curved bilayer actuators for high-performance multitask soft robots [J]. Advanced Materials Technologies, 2020, 5: 2000370.

[15] ZHANG Z, NI X Q, WU H L, et al. Pneumatically actuated soft gripper with bistable structures[J]. Soft Robotics, 2022, 9(1): 57-71.

[16] 梅栋,赵鑫,唐刚强, 等. 软体机器人建模与控制技术研究进展[J]. 机器人,2024,46(2): 234-256.

[17] 黄自鑫, 王乐君. 一类平面欠驱动机械系统控制方法综述[J]. 武汉工程大学学报, 2021, 43(3): 448-454.

[18] 黄自鑫, 秦翔宇, 王乐君. 二阶非完整平面欠驱动机械系统的位置控制[J]. 武汉工程大学学报, 2021, 43(5): 567-572.

[19] DROTMAN D, JADHAV S, SHARP D, et al. Electronics-free pneumatic circuits for controlling soft-legged robots [J]. Science Robotics, 2021, 6 (51): eaay2627.

[20] GAI L J, ZONG X F. A fully soft bionic grasping device with the properties of segmental bending shape and automatically adjusting grasping range [J]. Journal of Bionic Engineering,2022,19(5):1334-1348.

[21] XU H P, SHEN Z Q, GU G Y. Performance characterization of ionic-hydrogel based strain sensors [J]. Science China Technological Sciences, 2020, 63 (6): 923-930.

[22] 张远飞,刘胜,霍前俊,等. 模块化气动扭转软体抓手的仿真与实验[J]. 制造业自动化, 2022, 44(7): 72-77.

[23] ZHOU C, YANG Y Z, WANG J X, et al. Ferromagnetic soft catheter robots for minimally invasive bioprinting [J]. Nature Communications, 2021, 12: 5072.

[24] HU W Q, LUM G Z, MASTRANGELI M, et al. Small-scale soft-bodied robot with multimodal locomotion[J]. Nature, 2018, 554: 81-85.

[25] 黄鹏, 王亚午, 叶雯珺, 等. 基于介电弹性体的软体机器人设计、建模与运动控制研究综述[J]. 控制工程, 2023, 30(8): 1389-1401.

[26] HUANG Z X, LI X P, WANG J R, et al. Human pulse detection by a soft tactile actuator[J]. Sensors, 2022, 22: 5047

[27] HUANG P, WU J D, YE W J, et al. Study of soft force and displacement sensor based on dielectric elastomer[C]//2020 5th International Conference on Advanced Robotics and Mechatronics. Piscataway, NJ: IEEE, 2020:414-418.

本文编辑:霍淑利