

中医穴位智能按摩协作机器人研究现状及关键技术分析

贡泓俊, 王怡昕, 李毅

宁夏大学机械工程学院, 宁夏银川 750021

基金项目: 宁夏自然科学基金(2024AAC03058)

通信作者: 李毅, liyi173@nxu.edu.cn 收稿/录用/修回: 2025-03-25/2025-06-19/2025-06-13

摘要

研究表明, 中医穴位按摩可以疏通经络、缓解疼痛、治疗疾病。近几年, 我国慢性疼痛及相关疾病患者不断增加, 穴位按摩作为一种有效的非药物治疗手段, 需求快速增长。由此引发的按摩师资源短缺、劳动强度高及人力成本攀升等问题, 短期内难以有效缓解。因此亟需研发适用于穴位按摩的机器人技术, 以替代人工, 并推动医疗康复机器人高端化、智能化发展。本文聚焦于集成多传感器、执行器并融合智能感知、机器视觉与人工智能等技术的机器人在中医医疗的应用研究, 从穴位智能按摩功能实现的视角出发, 对基于视觉的穴位识别与定位方法、按摩轨迹规划及接触力控制、按摩装置结构设计三个主要方面的国内外研究现状和关键技术进行了深入分析, 详细介绍了穴位2维图像识别、3维点云重建、穴位特征提取和定位、按摩机器人轨迹规划、主动按摩接触力控方法以及按摩装置设计的创新研究。最后在目前的研究现状基础上, 总结和展望了穴位智能按摩协作机器人的发展趋势。

关键词

中医按摩
穴位识别
智能感知
轨迹规划

中图法分类号: TP242

文献标志码: A

Research Status and Key Technology Analysis of Intelligent Massage Collaborative Robots for TCM Acupoint

YUN Hongjun, WANG Yixin, LI Yi

College of Mechanical Engineering, Ningxia University, Yinchuan 750021, China

Abstract

Research indicates that acupoint massage in traditional Chinese medicine (TCM) can effectively unblock meridians, alleviate pain, and treat diseases. In recent years, China has witnessed a continuous increase in patients with chronic pain and related disorders, leading to rapidly growing demand for acupoint massage as an effective non-pharmacological therapy. Consequently, challenges such as therapist shortages, excessive labor intensity, and rising human resource costs have emerged, which remain difficult to resolve in the short term. This urgent situation necessitates the development of robotic technologies specialized for acupoint massage to replace manual operations and promote the advancement of high-end, intelligent medical rehabilitation robots. This paper focuses on the application research of robots integrating multi-sensor systems, actuators, and intelligent perception technologies combined with machine vision and artificial intelligence (AI) in TCM healthcare. From the perspective of intelligent acupoint massage implementation, it conducts an in-depth analysis of three key research areas: vision-based

Keywords

traditional chinese medicine
massage;
acupoint identification;
intelligent perception;
trajectory planning

acupoint recognition and positioning methods, massage trajectory planning with contact force control, and structural design of massage devices. The study elaborates on innovative research achievements including 2D image recognition of acupoints, 3D point cloud reconstruction, acupoint feature extraction and localization, robot trajectory planning for massage operations, active massage contact force control methods, and breakthrough developments in massage device design. Finally, building upon current research progress, the paper summarizes and forecasts development trends for intelligent collaborative robots in acupoint massage applications.

0 引言

近年来,全球范围内的人口老龄化趋势日益明显,同时人们生活节奏不断加快,工作压力持续增大,身体容易出现各种不适症状,导致慢性疼痛患者增多。《中国疼痛医学发展报告(2020)》^[1]显示,我国慢性疼痛患者超过3亿人,且正以每年1 000万至2 000万的速度增长,疼痛已成为继心脑血管疾病、肿瘤之后的第三大健康问题,严重影响人们的健康和生活质量。穴位,学名腧穴,主要指人体经络线上特殊的点区部位,经过刺激后会对身体产生不同作用,中医可通过针灸、推拿、点按或艾灸等方法刺激特定穴位,达到疏通经络、缓解疼痛和治疗疾病的效果^[2]。在我国慢性疼痛及相关疾病患者不断增加的背景下,穴位按摩作为一种有效的非药物治疗手段而广受欢迎,按摩治疗需求不断增加^[3]。然而,中医类执业医师紧缺一直是整个行业中存在的一大问题^[4]。一次穴位按摩往往需要30 min到1 h的时间,对按摩师体力和时间成本要求高。且按摩师对穴位定位、按摩手法和力度的掌握需要大量实践经验,会导致不同按摩师按摩治疗效果不一致。随着人工智能技术在医疗保健行业的兴起^[5],穴位按摩机器人的出现,为解决这一问题提供了契机,因此亟需研发适用于穴位按摩的机器人技术,以替代人工。

近年来,被动式(如穿戴设备^[6])与主动式(如自动按摩床^[7])穴位按摩机器人技术并行发展。工信部等十五个部委印发的《“十四五”机器人产业发展规划》^[8]提出,要推动医疗康复机器人高端化、智能化发展。协作机器人作为一种新型的工业机器人,扫除了人机协作的障碍,凭借其较高的交互性、安全性和适应性,在医疗康复领域得到了广泛的研究和实践。通过协作机器人搭载的视觉、力觉传感器及按摩装置实现对人体穴位自主定位和智能按摩作业,有望替代人工按摩,降低按摩成本,并改善按摩效果不一致的问题,满足日益增长的按摩需求。

目前协作机器人在穴位自主按摩中的应用研究

主要基于传统中医学中对人体穴位的划分及其相应作用的描述,结合机器视觉精确识别患者穴位,根据穴位不同规划机器人按摩路径,调整穴位识别方法、接触力控策略和按摩手法,并依靠机器学习算法进行迭代和优化,不断提升按摩效果,成为当下的研究热点。行业已推出了部分产品,如法奥的inside艾灸机器人、思灵的X-SPA理疗康养机器人、越疆的Nova协作机器人、艾利特的“奥方智能磁疗机器人”和昊志机电的AI智能按摩机器人等^[9]。本文围绕中医穴位智能按摩协作机器人核心功能的实现,如图1所示,从穴位识别技术、轨迹规划及力控、按摩装置设计三个方面展开综述,通过总结近年来穴位按摩机器人的前沿技术发展,分析行业发展现状并展望未来发展方向,以期为穴位按摩机器人相关研究提供参考。

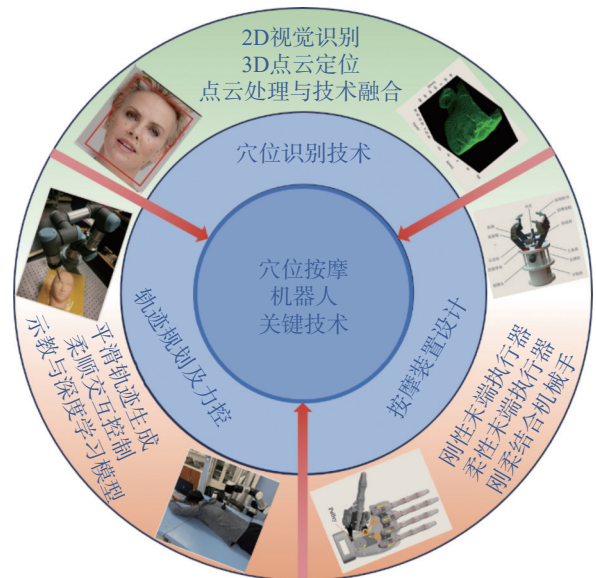


图1 中医穴位智能按摩协作机器人关键技术

Fig.1 Key technology of intelligent massage collaborative robots for TCM acupoint

1 穴位识别技术

协作机器人自主穴位按摩的前提是让其具备视觉能力,即根据视觉传感器的信息通过视觉模型对

人体穴位进行识别和定位, 从而控制机器人对穴位进行按摩。主要依靠神经网络模型将视觉传感器采集到的人体 2 维图像或 3 维点云数据进行特征识别, 结合图像深度信息、穴位特征点与视觉伺服控

制机器人按摩动作。人体穴位总计有 720 个, 医用 402 个^[2], 分布于各个部位, 穴位定位精确与否直接影响着治疗效果。本节对穴位识别技术研究现状进行介绍, 如图 2 所示。

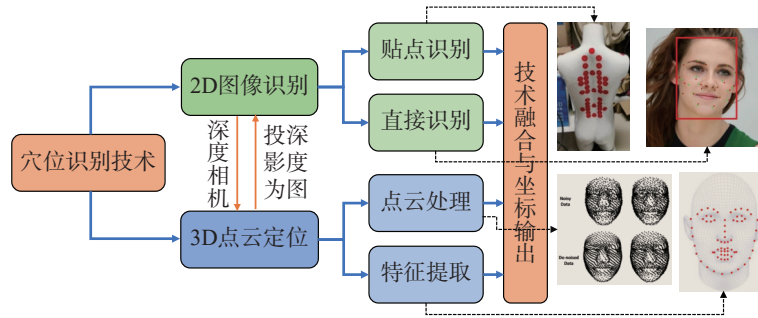


图 2 穴位识别技术

Fig.2 Acupoint recognition technique

1.1 2 维图像识别技术

2 维图像识别技术起源于 20 世纪 50 年代后期, 随着计算机性能的提升和算法的进步, 尤其是深度学习的兴起, 卷积神经网络(CNN)等模型的应用使得图像识别在准确性、效率和鲁棒性上取得了突破性的进展。

穴位 2 维图像识别主要依靠视觉传感器获取人体图像, 通过神经网络模型对穴位特征进行识别。目前国内外研究主要聚焦于贴点识别和特征识别两种方式, 如图 3 所示。

对稀疏, 所以贴点识别主要用于背部穴位。但这种方式需要依靠人工进行定位、贴点, 效率相对较低。闻煜等^[10]在实验中, 采用张友正标定法^[11]对协作机器人工作范围参数进行标定, 先对穴位贴上红色标记点, 通过转换图像的色相、饱和度和明度空间, 分割并提取红色特征, 再进行图像开运算和高斯滤波对图像降噪, 最后根据 Canny 算子对贴点的几何特征进行提取, 进而识别出圆心即穴位的坐标并将其转换为机械臂关节运动参数。唐瑞尹等^[12]则运用 YOLOv5 算法模型对贴点处进行识别, 通过边缘检测、最小二乘拟合等步骤, 使得视觉模型在复杂背景下对贴点中心的识别误差稳定在 1.8% 以内。

1.1.2 特征识别

特征识别是通过视觉传感器图像, 结合图像预处理、特征提取和特征选择等方法, 直接识别穴位并计算位置信息, 主要用于面部、手部、背部等穴位。

刘赏等^[13]基于 YOLOv5 改进提出 YOLO-pose 算法, 通过人体关键点识别实现姿态估计, 为后续穴位定位提供基础。后随着 YOLO 系列算法的发展, 逐步诞生了 YOLOv8 和改进后的 YOLOv8-pose^[14]算法并被应用于关键点特征的穴位图像识别。陈嘉诚等^[15]将 YOLOv8 算法模型用于手部穴位的检测, 针对手掌、手背、手指三个不同部位的穴位, 提出了基于特征点^[16]、基于轮廓和基于指甲的三种不同检测方法, 进一步缩小了穴位检测误差。YUAN 等^[17]则通过在 YOLOv8-pose 算法中引入 ECA(Efficient Channel Attention) 机制、细颈模块

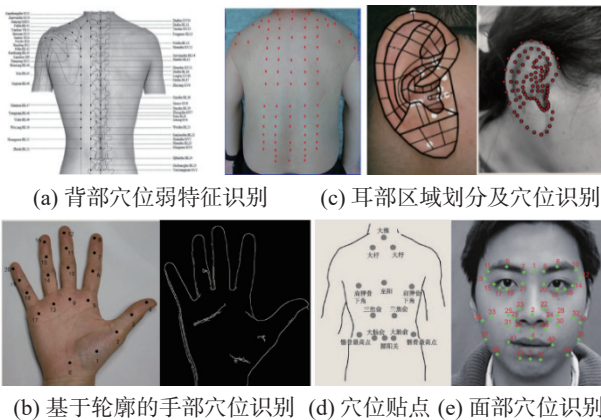


图 3 不同部位的 2 维图像穴位识别

Fig.3 2D image acupoint recognition of different parts

1.1.1 贴点识别

贴点识别是通过人工标记点对穴位进行定位。通过粘贴特征明显的标记点, 机器视觉识别到圆片后计算出圆心坐标, 即为穴位点。由于贴点圆片面积较大, 不适用于穴位密集的区域, 而背部穴位相

和改进损失函数,提出了一种新的视觉算法模型YOLOv8-ACU,并将其应用于面部穴位检测,相较于其他YOLO算法模型,该模型在保持轻量化的同时,在面部穴位识别的数量和精度上都有较大提升。

除了YOLO系列算法外,RCNN(Region based Convolutional Neural Networks)、Faster-RCNN^[18]、HRNet(High-Resolution Network)、ResNet^[19-20](Residual Network)等算法模型^[21]也在穴位识别模型训练方面得到了应用和发展。况荣欣等^[22]在进行背部穴位识别时,对HRNet和PFLD(Progressive Facial Landmark Detection)模型进行了对比,发现PFLD模型的准确率要高于HRNet。而LIU等^[23]在用WFLW(Wide Face Landmarks in the Wild)数据集进行人脸穴位识别模型训练时发现,PFLD模型中过度使用SE(Squeeze-and-Excitation)注意力机制和h-wish激活函数,造成模型计算量大幅上涨但准确性并未明显提高。对此,LIU等^[23]提出了Faster-PFLD模型,通过合理设计网络参数来减小计算量,并通过融合特征的方法来提高识别准确率。同时,考虑到机器在按摩时会使相机产生振动,通过添加噪声、裁剪、旋转等对WFLW数据集进行了大幅度增强,最后使得Faster-PFLD模型对振动场景具有鲁棒性,识别速度和精度都高于PFLD模型。张婷婷等^[24]指出HRNet模型在穴位识别中虽然性能良好,但在特征融合上存在不足,无法满足实际应用需求。基于此,张婷婷等^[24]结合了RCSfNet(Resolution, Channel and Spatial fused Network)和FADbR^[25](Facial Acupoint Detection by Reconstruction)模型,提出了一种基于高分辨率网络的面部穴位识别方法。并引入RCSFA^[26](Recurrent Context-Specific Facial Acupoint)特征融合模块以增强特征融合,模拟专家进行穴位定位,实验结果显示,改进后的算法收敛更快,最大误差减至6像素,且FADbR模型在小样本数据集上表现更佳。此外,LI等^[27]、WEN等^[28]和SUN等^[29]分别将AAM(Active Appearance Model)、ASM(Active Shape Model)和MobileNetV2等模型用于耳部穴位的识别,通过算法模型^[30]对图像进行精确的区域分割^[31],以此来识别耳部的91个穴位。其中LI等^[27]提出的基于AAM的方法穴位识别准确率达到95%以上。耳部、面部、手部等部位相对于背部面积较小,轮廓特征更明显,穴位特征提取难度相对较低。而对于背部穴位等弱特征的图像识别,

YANG等^[32]提出了一种结合Mamba^[33]模型和Transformer架构的背部穴位实时检测模型RT-DEMT(Real-Time Detection with Efficient Mamba-Transformer),通过Mamba模型在长序列处理与高效推理上的优势,结合Transformer架构提供全局注意力建模,模型既保留了DETR架构的全局优势,又降低了计算复杂度,使得背部穴位识别准确率和效率都得到了提升。上述算法的性能对比如表1所示,需要说明的是,由于医学类数据集的隐私性,目前尚无公开的穴位识别数据集供研究者使用,因此表1中各实验所用数据集不同,评价指标也不一致。

以上两种方法都是采用2维视觉相机对穴位进行识别。贴点识别由于依靠人工定位,其穴位识别准确率接近100%,但相对于直接识别,机器人自主性较低。该方法的改进方向主要以减小贴点圆心的识别误差为主。而直接识别可较大程度提高穴位识别效率,机器人自主性高,没有贴点的限制使其应用范围也更加广泛,因此具有更大的发展潜力。其采用的基于神经网络的识别方法,主要聚焦于YOLO^[34]系列、RCNN、PFLD等算法模型,随着算法性能的改进,2维图像穴位识别的准确率和速度将逐步提高。但由于样本图像采集难导致的数据集规模不足、部分穴位特征不明显、难识别等问题,同样影响着模型性能。因此在改进算法的同时,要增大数据集的规模,或通过引入预训练等方式提高算法模型在小样本数据集训练和弱特征识别中的性能。

1.2 3维视觉技术

随着3维视觉传感器技术发展和广泛应用,通过引入多视角图像、多模态数据融合以及深度学习技术,使得机器不仅能分析单张图像,还能理解3维空间,实现精确的深度感知。图像深度信息使得穴位空间坐标更精确,从而获得更有效的按摩治疗。因此越来越多的学者开始对3维视觉技术进行研究,并将其用于穴位识别与3维坐标定位。

3维视觉传感器相继发展出双目、结构光、TOF(Time of flight)三种类型,其性能对比如表2所示。

在3维特征识别和定位方面,主要聚焦于基于深度图像、基于点云、点云与2维图像相结合的三种方案^[35]。其中,较为主流的方式是基于点云识别,即通过深度相机扫描出的深度图像,结合各像素点的平面坐标及深度坐标,在3维空间中生成被

表 1 2 维图像穴位识别模型
Tab.1 2D image acupoint recognition models

算法模型	识别类型	穴位识别准确性	轻量化/效率改进
YOLOv5 ^[12]	背部贴点	AE < 1.8%	/
YOLOv8 ^[15]	手部穴位	AE = 14.8%	/
YOLOv8-ACU ^[17]	面部穴位	mAP = 99.5%	较YOLOv8-pose缩小0.82 MB
Faster-RCNN ^[18]	手部穴位	mAP = 92%	特征提取速度较RCNN提升9倍
HRNet ^[22]	背部穴位	AP = 96.3%	参数大小9.65 MB, 识别时间32s
PFLD ^[22]	背部穴位	AP = 98.3%	参数大小2.06 MB, 识别时间3s
Faster-PFLD ^[23]	面部穴位	MSE = 2.212 8	检测速度较PFLD提升27.34%
RCSfNet ^[24]	面部穴位	MSE = 2.422 8	/
FADbR ^[24]	面部穴位	MSE = 1.286 6	/
AAM ^[27]	耳部穴位	AP = 95%	/
ASM ^[28]	耳部穴位	NME = 0.049 3±0.001 2	/
MobileNetV2 ^[29]	耳部穴位	HD=6.28±0.50; ED=6.67±0.59	/
RT-DEMT ^[32]	背部穴位	EPE=7.792	检测平均时间为10.05 ms

注: AE: Average Error, 平均误差; mAP: Mean Average Precision, 平均精确率; AP: Average Precision, 平均准确率; MSE: Mean Square Error, 均方误差; NME: Normalized Mean Error, 归一化平均误差; ED: Euclid distance, 欧几里得距离; HD: Hausdorff distance, 豪斯多夫距离; EPE: Euclidean distance pixel error, 欧几里得像素误差。

表 2 深度相机性能对比
Tab.2 Comparison of different depth cameras

相机类型	光源	测距方式	弱光表现	优点	缺点	代表产品
双目相机	自然光	被动式	弱(严重依赖光源)	低成本、抗光线干扰能力强	计算量大、测量范围有限	Bumble Bee
结构光相机	红外光	主动式	良好(依赖光源)	高分辨率、低功耗	探测距离短、易受光线干扰	Kinect v1
TOF	红外光	主动式	良好(不依赖光源)	高帧率、探测距离远	边缘精度低、功耗高、成本高	Kinect v2

扫描物体表面的点云, 依靠算法模型通过各点的位置关系特征直接识别和定位穴位点; 而另外两种方案, 则是依靠 2 维视觉模型识别到穴位后, 通过深度图或点云进行穴位的 3 维坐标定位。本小节将对点云重建、穴位的 3 维特征识别和定位进行介绍。

1.2.1 3 维点云重建

点云重建是从原始点云数据中恢复或构建出一个精确的、连续的表面模型的过程, 包括去噪、滤波、特征提取、曲面拟合等多个步骤。在对人体部位进行点云扫描时, 受环境等因素影响, 扫描出的点云存在不同程度的缺损和噪声, 使识别和定位结果出现较大偏差。因此在穴位点云识别流程中, 首先要提高点云重建精度, 即对扫描出的原始点云数据进行滤波、拟合和去噪等操作^[36], 目前主要的处

理方式如图 4 所示。

针对背部点云冗余噪声的影响, 陆英豪等^[37]提出了一种基于 YOLOv4 的区域检测算法, 首先识别人体脊柱并确定点云识别区域; 随后采用直通滤波过滤掉脊柱附近不相关的背景和离群点云, 从而显著减少数据量; 最后通过双边滤波器使背部边缘点云更加平滑。CHOUGULE 等^[42]则提出了结合边缘检测与表面分割的算法, 并利用 B 样条曲线拟合点云。针对点云数据集的获取, CHOUGULE 等^[42]采用的点云数据集由患者 CT 图像逆向转换而来, 采集成本较高。对此, 冀晓昀等^[43]利用 Python 生成了包含 10 100 个背部点云的数据集, 用于模型特征识别训练。该方法简化了数据集获取过程, 并可通过添加噪声或去除部分像素点等方式开展初步实

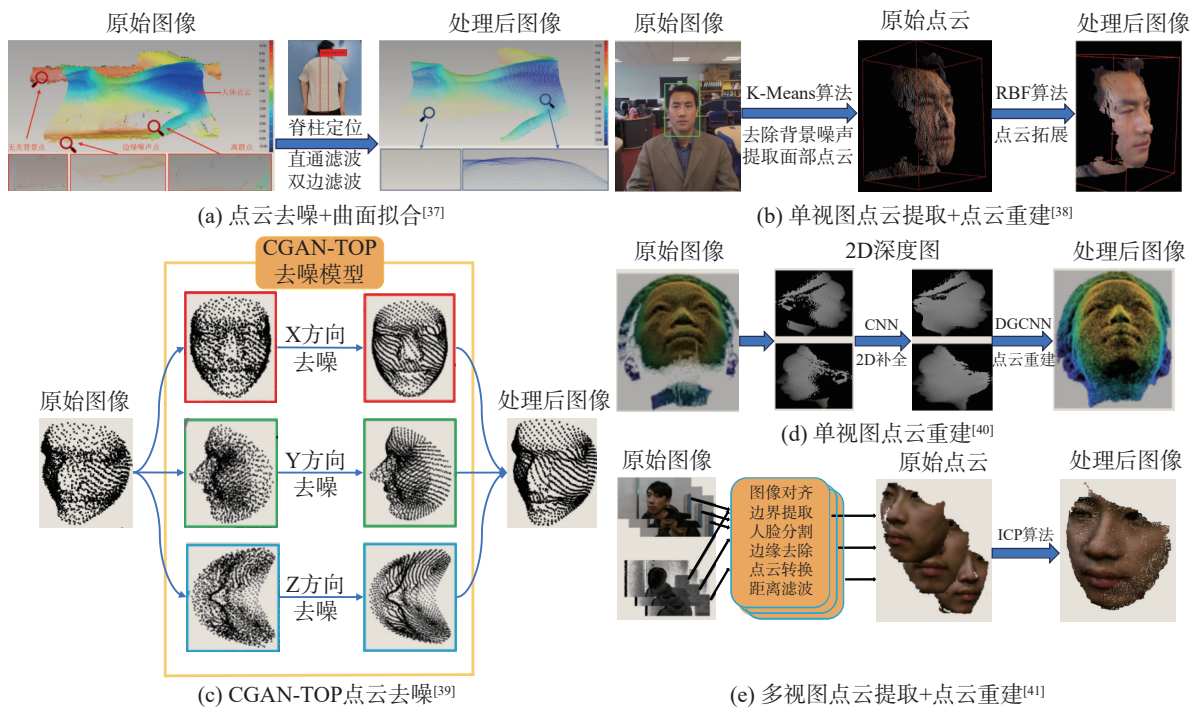


图4 点云处理方法

Fig.4 Processing methods of point cloud

验，降低了研究门槛。

针对于按摩作业范围小、曲率变化大的面部等穴位容易出现遮挡及点云缺损问题，国内外学者主要聚焦于点云的补全和拓展。ZHANG等^[38]采用Kinect V1结构光相机进行面部穴位识别研究，通过K-Means算法在复杂背景中提取出人脸信息，并提出了一种基于径向基函数的人脸稠密点云生成方法，将采集到的点云数据进行补全和拓展，使点云密度提升了8.17~10.2倍。孙一民等^[44]采用了双目相机，结合改进的AD-Census算法得到面部视差图。胡燕等^[45]、彭德祥等^[46]和WANG等^[41]则采用了Kinect V2 TOF相机进行面部扫描，获得了更高精度的点云。此外，在单一视角数据采集、点云重建方面，胡燕^[45]和彭德祥等^[46]利用Dlib、Face Mesh库中的面部特征点，对面部点云变形进行约束，保留面部大致轮廓和主要特征；同时通过记分函数进行面部点云的细化，使点云更密集，面部特征更明显。WANG等^[41]提出了基于ICP(Iterative Closest Point)算法的面部点云补全方法，并对头发、衣服等无关部分进行了分割。

单视图点云重建因其低成本和结果准确而成为一种流行的技术。然而，单视图重建方法通常依赖于昂贵的CAD模型和复杂的几何先验知识^[47]。有效利用有关数据的先验知识仍然是一个挑战^[48]。对

此，UDDIN等^[40]引入卷积神经网络估计点云缺失部分并重建面部点云。通过将面部3维点云转化为2维深度图，训练神经网络模型对残缺的2维深度图进行补全，通过DGCNN(Dynamic Graph Convolutional)算法将补全后的2维深度图在3维空间进行重建，从而得到更加完整的面部点云，其点云倒角距离值低至1.29。LI等^[48]提出了一种基于双曲神经网络的点云重建方法；FANG等^[49]则提出了一种边缘引导技术，提高了点云的边缘质量。此外，LUO等^[50]提出了一种基于多视图的面部点云重建方法。通过对左、中、右侧面部扫描获取多张2维深度图像，然后进行图像变换、点云转换及滤波，并采用ICP算法进行点云配准和补全，获得人脸点云。优化后的面部点云密度提升了5倍，且对无关背景分割得更加精确。为了消除噪声对单视图/多视图补全的面部点云的影响，LIU^[39]等提出了cGAN-TOP(Conditional Generative Adversarial Network on Three Orthogonal Planes)去噪模型，将3维点云分别投影到XY、XZ、YZ三个2维平面。在每个平面中，与平面正交的点坐标被视为灰度值，而其他两个平面中的点空间坐标保持不变，通过cGAN对每个平面图像进行去噪，最终将3个平面中的去噪灰度值组合起来形成新的点云。

目前，精确的点云重建是人体穴位识别中主要

研究方向之一。与单视图点云重建方法相比,多视图的方法能够覆盖更多易遮挡区域、准确性更高、效果更好。将多视图点云重建方法与神经网络相结合,通过算法模型对点云进行处理,经过多次模型训练和迭代,以获得更加理想点云和识别精度。

1.2.2 3 维穴位特征识别及定位

深度学习技术的兴起对深度图像、3 维点云的处理和分析产生了重大影响。一些创新的深度学习模型,如 Point Net^[51]、Point Net++^[52]、Point Conv^[53]、Point Clip^[54] 等用于点云分类、图像分割和目标检测等任务,在穴位识别和定位方面也得到了广泛研究。

ZHANG 等^[55] 在识别点云姿态时,用 Blensor 软件生成点云并制作数据集,其与利用 python 生成样本图像的方法^[39] 相比,生成点云不再局限于背部,且形状模型可由 Solid Works、CAD 等软件导入。该方法通过调整模型姿态制作点云数据集,运用 Point Net-like^[56] 和 Pose Detection^[57] 网络模型进行训练,以识别点云的类型和旋转状态,可以达到很高的物体类型识别准确率,旋转状态识别平均误差为 3°。OKADA 等^[58] 提出了一种基于 Point Net++ 及最远点采样的 3D 面部识别,通过最远点采样提取人脸的轮廓特征,结合深度学习网络,实现对两个地区的人群面部特征的分辨。MUSSI 等^[59] 则提出了一种基于卷积神经网络对耳部深度图像进行轮廓分割的方法,并取得了较好的实验效果。

在 3 维穴位特征识别及定位方面,陆英豪等^[37] 提出了一种基于 RANSAC(RANdom SAMple Consensus) 的背部穴位定位算法,如图 5(a) 所示,通过学习脊柱点云数据,确定 S 形轮廓并按比例分段;再根据穴位相对脊柱位置标注其纵向和横向坐标。孙一民等^[44] 则用 ASM 进行 2 维图像识别模型训练以对面部的 68 个特征点进行定位,再通过穴位与特征点的相对位置在 3 维点云中得到坐标点,如图 5(b) 所示。同时 MASOOD 等^[60] 提出了一种结合 RGB-CNN 和 Depth-CNN 的手部穴位识别方法,如图 5(c) 所示,通过结合 RGB 图像与深度图像的特点,对穴位特征识别、定位进行融合。

穴位识别与定位是一个 3 维点云识别的细分方向,在点云识别、特征提取方面的研究成果也可应用于穴位识别与定位中。如 LI 等^[61] 提出的将 GPT 引入穴位识别和 ZHU 等^[62] 提出将 Point Clip 与 GPT3 相结合的 Point Clip V2 模型,为 3 维点云

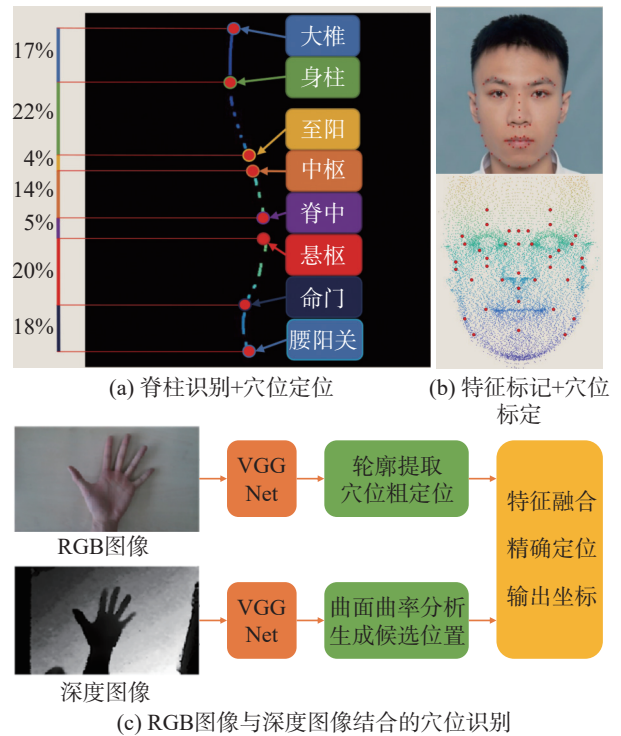


图 5 穴位特征识别

Fig.5 Acupoint feature recognition

重建和特征识别提供了新的思路。ZHU 等^[62] 将 3 维点云投影为 2 维深度图,将 GPT3 作为预训练模型引入到特征识别模型的训练当中,在零样本图像分类中,相较于 Point Clip^[54] 准确率最高提升 42.9%。利用大模型作为预训练并与现有算法模型相结合,将有望成为未来主流的穴位识别研究和算法设计模型。

综上,穴位识别正由 2 维图像朝着结合深度图像、3 维点云的 3 维视觉识别与定位方向发展。3 维视觉方案为机器人位置控制提供了更高的参考坐标精度,但目前对于穴位 3 维识别、定位,还有很多难题亟待解决。由于点云能很好地捕捉复杂的形状和细节,包括非平面或曲面特征,而深度图像对遮挡部位、视线外部位信息获取较为困难,因此在身体部位数据补全、拓展时,多采用 3 维点云,此时单纯的 RGB 图像与深度图像相结合的方案^[60] 不再适用。但仅依靠点云识别,图像内容的缺失又对穴位特征提取带来了挑战,尤其对于背部穴位这种弱特征点的识别^[25]。现有的识别方式大多先识别特征明显的点,再根据穴位相对特征点的先验知识进行穴位定位^[63-67]。鉴于不同患者体态特征差异性,该方法在大规模应用时需要频繁进行针对性的先验知识调整。穴位的 2 维视觉识别经过较长

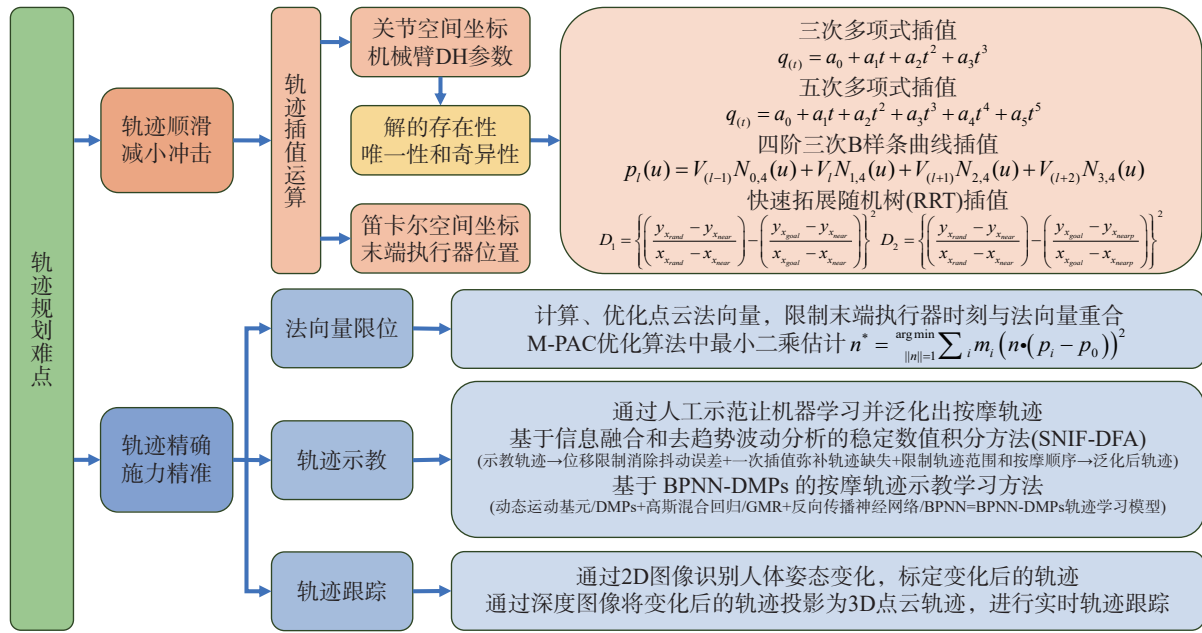


图6 轨迹规划要求及实施方法

Fig.6 Trajectory planning requirements and implementation methods

时间发展, 其成果也得到了广泛应用和验证。因此, 未来2维图像与点云相结合的3维视觉识别方法^[68-69]可能会成为主流。对于面部等易遮挡部位, 可先进行点云扫描, 保留点云色彩信息并进行降噪、补全、着色、法向量计算等处理后, 通过投影得到RGB图像, 再由神经网络进行RGB图像的穴位特征识别; 而对于背部等其他部位, 可同时获取点云与RGB图像, 由两个神经网络分别独立处理点云的去噪、平滑、法向量计算和RGB图像的穴位特征识别。最后将识别结果与点云进行匹配, 得到目标穴位的坐标信息和法向量信息, 进而进行按摩操作。该方法利用成熟的2维视觉识别模型, 结合深度信息确定穴位坐标, 以及皮肤表面向量信息限制末端执行器姿态, 能够提高按摩协作机器人的轨迹规划和力控精度, 提高人机交互安全性和施力精确性, 同时结合了RGB图像识别模型准确性和效率高^[60], 以及3维点云精度高的优势, 具有发展潜力。

2 轨迹规划及力控

在穴位视觉识别定位后, 需要规划期望的按摩动作, 主要包括规划按摩轨迹和按摩接触力, 以达到期望的穴位按摩治疗效果。本节将介绍穴位按摩机器人的轨迹规划和力控策略的研究现状。

2.1 轨迹规划

在机器人穴位按摩中, 对于其运动规划主要有

两个要求, 一要确保轨迹尽可能平滑, 以减少冲击和关节机械抖动; 二要在接触面法线方向控制按摩力, 在接触面的切线方向控制按摩轨迹。机器人按摩的运行轨迹主要有接触点和连续接触作业两种^[37,70], 前者主要应用于穴位的点按, 后者主要应用于穴位及周围部位的揉搓, 如图7(c)所示。为了准确控制施加的按摩力, 以上方法都要求机器人在按摩作业时末端按摩装置全程垂直于接触皮肤表面。对此, 在对人体进行点云扫描、图像处理, 计算出每个点相对于皮肤表面的法向量, 配合法向量的约束将路径上每个点的坐标转换为机械臂的关节参数或末端执行器的位置参数。对于后者, 需要通过逆运动学解算将末端执行器的坐标和轨迹转化到关节坐标系, 该过程容易产生奇异点。在实际应用中, 一般选择关节坐标系参数^[71-72], 如HONG等^[73]提出一种将点云坐标转换为机械臂关节参数的方法。

目前在按摩机器人的轨迹规划应用研究中, 主要分为面部和背部两个方向。在面部按摩中, 胡燕^[42,74]等先根据采集特征点将面部划分为工作区和非工作区; 然后将面部3D图像划分成若干小三角区域, 采用等平面法截取交线得到轨迹点^[75]; 最后通过二分法得到完整的轨迹, 如图7(a)所示。路东伟等^[76-77]提出了一种基于示教学习的轨迹规划方法, 通过人工按摩动觉示教、DMPs(Dynamic Movement Primitives)轨迹学习方法提取按摩轨迹和

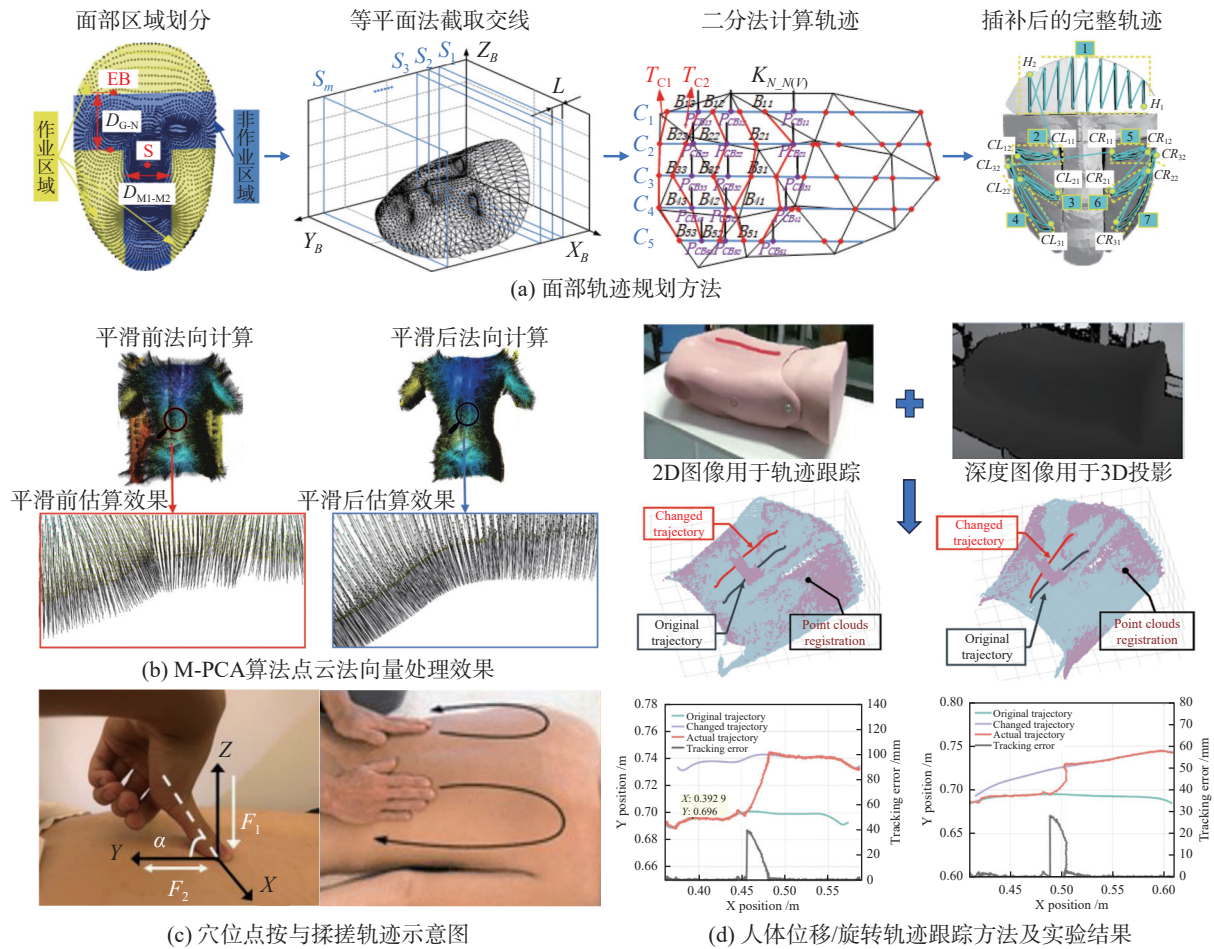


图 7 穴位按摩机器人轨迹规划研究

Fig.7 Research on trajectory planning of acupoint massage robot

按摩力, 并引入高斯混合回归^[78] 提升其非线性拟合能力; 采用 BPNN(Back Propagation Neural Network) 算法拟合 DMPs 中的强迫项, 解决算法中基函数拟合强迫项误差较大的问题。

在背部按摩中, 龚胜等^[70] 对按摩轨迹插值进行了研究, 其分别采用三次多项式^[79]、五次多项式和四阶三次多项式 B 样条^[80-81] 曲线对轨迹进行插值运算, 发现五次多项式插值更适用于点到点的按摩路径, 四阶三次多项式 B 样条曲线插值更适用于连续按摩路径。陆英豪^[37] 则先对扫描出的背部点云进行降采样, 再用最小二乘法对点云进行近似计算; 为了使得点云更加平滑, 提出 M-PCA (Multilinear Principal Component Analysis) 算法对点云的法向量进行计算, 该算法能更好地排除噪声点云影响, 降低位姿误差, 如图 7(b) 所示; 最后通过 RRT 算法规划按摩穴位点轨迹。为了消除按摩过程中的抖动并学习有效的按摩力, MA 等^[82] 在背部刮痧按摩中提出了 SNIF-DFA, 一种基于多传感器融合的轨迹

示教学习及规划方法。首先通过位移限制消除幅度较大的抖动误差, 然后进行轨迹插值, 并对示教轨迹和示教力进行匹配。根据按摩范围和顺序得到合适的按摩轨迹, 结合采用恒力控制算法得到的按摩轨迹和力轨迹, 并通过对其进行缩放以适应不同人体。XU 等^[83] 则针对按摩过程中人体的移动导致轨迹偏离问题, 提出了一种基于 ICP 算法的轨迹跟踪方法。通过位移前后的 2 维图像计算出人体位移的距离和转角, 再通过 3 维点云对轨迹进行配准, 计算出人体移动后的机器按摩轨迹, 实验结果表明, 该方法能有效降低轨迹误差, 为穴位按摩的轨迹规划提供了新的优化方向, 如图 7(d) 所示。

以上轨迹规划研究聚焦于协作机器人穴位按摩中轨迹生成(包括基于视觉计算和动觉示教)、轨迹插值以及轨迹实时修正, 这些技术对轨迹规划的准确性都会产生影响。因此如何将以上研究方向的研究有效结合、优化并实际应用, 是一个亟待解决的问题。

2.2 力控策略

按摩机器人技术不仅需要准确的穴位识别的按摩轨迹规划技术,还需要对按摩力的准确控制。机器人根据穴位坐标和运动轨迹,控制自身姿态和按摩接触力,以确保实现安全交互和有效按摩^[7]。由于人体软组织模型存在差异,传统的力控方式在解决复杂非线性接触问题时还存在实时性、自适应性以及准确性较差等问题,为了进一步提升交互安全性和按摩准确性,诸多学者对人体按摩力控进行了更深入的研究。本节主要从穴位按摩协作机器人力控研究、力跟踪及柔顺交互等方向进行综述,如表3所示。

按摩力控研究主要聚焦实现力/位混合控制、阻抗/导纳控制等控制方法。传统力控方法在处理复杂任务,尤其是

与人体软组织交互时,存在模型依赖、响应速度慢、参数敏感以及自适应能力不足等局限。为了克服上述缺点,研究人员正在探索诸如机器学习、智能控制理论和其他先进的技术手段,旨在开发更加灵活、智能且适应性强的新一代协作机器人力控解决方案。目前发展出了滑模、模糊理论下的无模型按摩力控^[84-87]、传统方法与压力补偿模型结合的力控^[37,88]以及基于阻抗/导纳控制的示教与深度学习相结合^[89,91-93,105]的多种机器人按摩力控方法,同时诞生了基于多模态的人机交互按摩方式^[94]。其中,在完善阻抗/导纳力控理论的基础上,压力补偿模型和基于深度学习的力控示教方法的出现为协作机器人力控带来了新的发展方向。前者的特点在于自主性,它根据主动辨识得末端与皮肤的接触力对按摩力进行自主修正。但其难点在于如何进行模型参数的调整,使其具有更好的普适性和准确性;后者的特点在于其将深度学习与示教结合,使深度学习模型能对人工示教的准确力控流程进行复现和模仿。通过优化示教数据(抖动消除、数据插补等)、扩大数据集以及调整模型参数并进行多次迭代,该方法的效果会逐步提高,最终接近人工按摩的效果。此外,ZHAI等^[106]对按摩过程中的皮肤摩擦变形行为进行了研究,为理解由皮肤变形导致的摩擦力差异提供了思路,并为在特定工作条件下选择适当的参数提供了实用指导。

同时,在辅助康复领域的力跟踪、柔顺交互^[95,107]和轨迹跟踪^[96]研究也有了进展,提出了利用冗余机械臂运动柔顺特性进行人机交互的同时规避障碍物的新方法^[97],在给定的运动轨迹约束下,

冗余机械臂交互柔顺性更高,同时可以避免碰撞,因此可尝试将其运用到穴位按摩协作机器人中。在柔顺控制相关领域也对协作机器人控制中遇到的问题进行了改进,发展出了示教与强化学习结合的变刚度运动控制方法^[98]、变刚度机械结构^[99],以及基于力/位混合控制的创新控制理论^[100-102];对由于末端执行器自重控制时产生的误差,提出了采用激光跟踪仪进行末端重力补偿的方法^[103-104]。尤其是变刚度结构,其使用4根长杆连接末端执行器的上下部分,电机结合丝杠控制中间连接件的上下移动,改变下半部滑动刚度。连接件位置越高,末端执行器刚度越低。通过电机调整连接件位置,可精确调节末端执行器刚度,适应不同操作需求。这些研究为按摩力柔顺控研究提供了更多的技术参考。

上述力控方法研究都聚焦于提高人机交互的安全性和按摩接触力的准确性。接下来,力控研究主要方向为沿着现有成果,进一步提高补偿模型精度、强化学习模型性能以及控制算法效率,以提高接触力控制的实时性、自适应性和准确性。此外,基于多模态的人机交互按摩控制方法也是一种思路,机器可以通过人的语句、动作以及依靠脑机接口^[108-109]获得的脑电信号识别人的意图^[110],从而进行控制,通过不断调整达到理想的按摩位置和按摩力。

3 按摩装置设计

中医穴位按摩的原理基于中医理论中的经络学说和气血运行理论,其核心在于通过刺激特定穴位调节人体的阴阳平衡和气血流通,而从现代科学的角度理解,穴位多位于神经末梢或血管密集处,按摩可增加穴位局部血流量,加速代谢,从而达到疏通经络、缓解疼痛以及治疗疾病的作用。这种刺激可以是力刺激,也可以是热、电、光以及超声波等多种形式的刺激。

中医按摩机器人作为物理干预的执行终端,其末端执行器(按摩装置)是实现人机交互并直接影响治疗效果的核心部件。中医人工按摩包含多种手法,例如使用拇指或掌根垂直施压的点按法,以及用手掌或鱼际部进行环形揉动的掌揉法。此外,刮痧、针灸、火罐等基于不同工具的操作也可能整合或区别于传统意义上的按摩手法。针对特定病症和穴位位置,选择并灵活应用恰当的按摩手法至关重要,这同时也对按摩装置的功能多样性和结构适应性提出了具体需求。

表3 力控相关研究
Tab.3 Research on force control

类型	文献	主要思路	特点
按摩力控研究	[84]	末端重力补偿+导纳控制+基于 虚拟力 的力/位混合控制	计算当前受力与下一时刻运动状态得出虚拟引导力; 修正导纳控制参数, 提高轨迹跟踪精度。
	[85]	基于位置控制的阻抗控制 +自适应阻抗控制+模糊控制	减小末端接触力突变产生的影响; 减少系统响应时间和振动, 提高系统稳定性。
	[86]	PID控制+模糊控制+ 滑膜控制	PID和模糊控制参数可根据不同人体进行调整。
	[87]	变论域模糊控制 +自适应阻抗控制	弥补基于位置阻抗控制的缺点, 提高系统的动态性能
	[88]	模糊控制+自适应阻抗/力位控制+ Kelvin-Voigt模型	自适应位置控制与阻抗控制分别控制力和位; 通过模型进行阻抗在线辨识和接触力补偿。
	[37]	力/位混合+主动柔顺+ Hunt-Crossley压力补偿模型	建立软组织补偿模型, 自主修正接触压力。
	[89-90]	多源传感器示教 +导纳控制+技能传递模型	融合示教过程中的多传感器信息, 经人机技能传递模型实现了机器人按摩技能的仿真复现。
	[91]	深度强化学习 +阻抗控制	在阻抗控制中引入深度强化学习方法, 提高机器代替人工进行阻抗调节的准确性。
	[92-93]	残差强化学习 +阻抗控制	通过强化学习来补偿控制的残余项, 调节阻抗控制以适应皮肤变化, 力控误差稳定在0.2 N。
	力跟踪及柔顺交互研究	[94]	人体关键点检测+ 手势识别 +语义识别+按摩点生成
[95]		阻抗在线辨识 +自适应阻力调节+阻抗控制	提高力跟踪效果和运动控制柔顺性; 实现交互力实时自适应调节, 随动随停。
[96]		基于力/位的速度控制	在末端执行器起点不同时, 都能够在短时间内接近参考轨迹。
[97]		冗余机械臂 +导纳控制+增广雅可比矩阵	采用基于增广雅可比矩阵的逆运动学算法避开关节极限和障碍物, 实现了顺滑人机交互和冗余利用。
[98]		变刚度运动示教+ DMP-SP模型 + 变刚度运动强化学习	在动态基元模型中引入刚度基元, 实现了运动信息和刚度信息向机器人的多模态传递, 以及机器人对变刚度运动的自主学习。
柔顺力控研究	[99]	连续可变刚度手腕 +主/被动混合控制	通过视、力觉传感器进行主、被动控制; 通过机械结构改变末端执行器刚度调节接触力, 误差小于0.5 N。
	[100]	力/位混合+ 自适应模糊计算扭矩控制 +模糊比例积分	AFCTC用于位置控制子系统, 以跟踪末端执行器的期望位置; FPI用于力控子系统, 以跟踪期望的交互力。平均位置误差比PID控制降低了87.14%。
	[101]	力/阻抗混合控制	对运动方向进行几何约束, 实现快速运动中任务方向上的柔顺行为和约束方向上的显式力跟踪。
	[102]	分段自适应力/位混合控制	快速过渡段采用自适应导纳控制; 稳定控制段采用自适应阻抗控制, 减小超调量和动态偏差。
末端误差补偿	[103-104]	定长记忆窗增量学习算法 +激光跟踪仪	平衡机器人新、旧位姿数据映射关系的精度和效率, 提高补偿精度, UR10机器人的定位误差从2.11 mm降至0.17 mm。

注: **DMP-SP**: 动态运动基元-刚度基元(Dynamic Movement Primitives - Stiffness Primitives); **AFCTC**: 自适应模糊计算扭矩控制(Adaptive Fuzzy Computed Torque Control); **FPI**: 模糊比例积分(Fuzzy Proportional Integral)。

传统的按摩装置常采用结构固定、功能单一的机械设计(如特定形状的刚性触头或滚轮)模拟人工操作,实现基础的按压、拍打或振动等功能。虽在一定程度上减轻了人力负担,但普遍存在适应性不足的问题:难以根据不同穴位特性和病症需求动态切换或调整按摩手法。

为解决传统装置的局限性,近年来的研究重点转向了可变结构按摩装置的开发,主要分为刚性结构与柔性结构两大类。刚性可变按摩装置^[70,111-115]:多基于多自由度机械臂或灵巧手结构。通过精确控制电机驱动关节运动,可实现模拟手指关节屈伸的“指揉”、“指按”、“指捏”,以及集成滚轮或按摩头实现的“掌揉”、“掌按”、“拍打”等多种手法。此类装置通常集成接触式力传感器,结合闭环控制算法,能够较精准地监测并调节输出力的大小,因此技术相对成熟,应用和研究较为广泛;柔性可变按摩装置^[116-121]:通常以硅胶等弹性材料为主体,安装在机械驱动结构末端。其工作原理是通过外部机械结构驱动柔性体发生形变或位移,或利用气压/液压驱动主动改变柔性体的刚度、伸缩量或形状。这类装置虽在驱动精度和控制算法上要求更高,但凭借其触感柔软、柔顺性良好、交互安全性高(对皮肤、骨骼损伤风险较低^[122])的优势,能够更接近地还原人工按摩中的皮肤触感体验。

此外,按摩装置的形态设计也日益多元化,涌现出立式^[123-124]、穿戴式^[6,125-126]、仿生柔性结构^[127-128]、便携式^[108,126-127]等各具特色的装置形式。新型机械夹爪^[129-131]以及面向康复应用的可穿戴式外骨骼康复机器人^[132-133]也被探索应用于穴位按摩,为装置创新提供了丰富的思路。

注意到,无论是前述功能相对单一的早期装置,还是近年来发展的具备多种手法但结构相对固定的康复、按摩机器人(包括上述各类装置搭载的机器人本体),在应对不同应用场景(如切换不同身体部位、疗法或适应个体差异)时,往往面临较大挑战,常需对硬件的核心结构或整体的系统配置进行复杂甚至昂贵的重新设计与调整。与此形成对比的是,基于协作机器人平台构建的按摩系统展现出更强的适应性。协作机器人本体固有的安全性(具备碰撞检测与动态功率/力限制)、可灵活编程性以及模块化设计理念,使其能够便捷地更换针对不同任务优化的专用末端执行器,同时通过融合更强大的环境感知系统(如高分辨率视觉/多模态传感模型)、提升反馈控制精度并动态调整力控算法等方

式,显著提高了系统适应多样化复杂按摩需求的能力。

综上所述,柔性材料、软体驱动技术以及仿生设计理念的深度融入,将进一步驱动按摩装置形态和功能朝着高度多样化发展,并加速穿戴式、单体化、立式等专用按摩机器人产品的迭代升级。面向协作机器人的按摩系统,融合刚性结构(提供驱动精度与强度)和柔性材料(提供安全触感与适应性)的末端仿生结构可能成为主流发展方向。此类设计有望兼具机械臂/手的灵活可控性和柔性材料的仿生触感与交互安全性,从而发展出性能趋近甚至超越人工的按摩执行器。然而,实现这一目标仍面临诸多挑战,核心难点在于如何提升机械臂/手的精密力/位控制能力、提高多自由度柔性触觉反馈的精度与响应速度,以及优化刚性骨架与柔性蒙皮之间的复杂驱动协同控制机制。

4 发展趋势及挑战

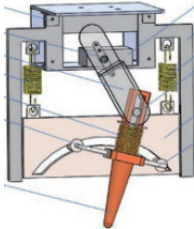
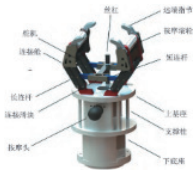
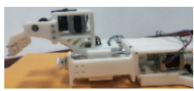
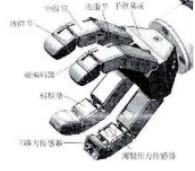
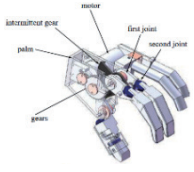
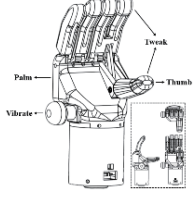
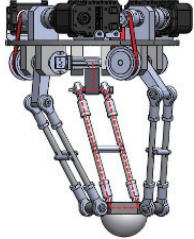

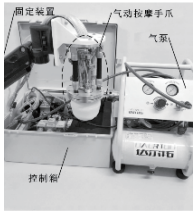
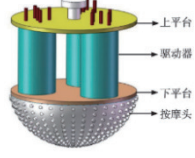
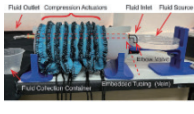

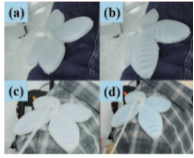

当前,神经网络、多传感器融合、协作机器人以及软体机器人等技术的快速发展,为中医穴位智能按摩协作机器人发展提供了新的思路和契机。

1)对于穴位识别技术,未来2维图像与3维点云相结合的3维视觉识别、定位方案可能会成为主流,且在神经网络模型中引入大模型进行预训练是更新颖的研究方向。2维图像识别模型实时性和准确性较高,3维点云可通过计算点的法向量以限制末端执行器姿态,提高人机交互的安全性和按摩效果。大模型(如Deep Seek、GPT)凭借其强大的推理能力,能够很大程度上节省模型训练时间并提高识别准确性。

2)在轨迹规划和力控中,将轨迹、力示教与深度学习相结合能够提高机器人进行轨迹规划和力控制的准确性,依靠深度学习模型强大的学习和迭代能力,机器能够更加自主和精确地对按摩过程进行还原。同时,依靠大型语言模型、动作识别以及脑机接口等技术的多模态人机交互也是一种思路,通过识别人的意图,自主判断、调整,实现理想的穴位按摩。

3)在按摩装置设计中,传统的刚性机械结构已有较多研究成果,但都避免不了与皮肤的刚性接触,按摩时装置形变量远小于皮肤,难以完全模拟人工操作。随着刚性仿生机械手以及软体机器人技术的发展,机械手结合柔性材料的仿生结构可能会成为主流,但如何提高机械手触觉反馈及驱动控制的精度、响应速度、提升刚性骨架和柔性皮肤控制

表 4 按摩装置设计相关研究
Tab.4 Related research on massage device design

类型	名称	示意图	按摩部位、按法及特点	名称	示意图	按摩部位、按法及特点
	以一指禅为主的多手法按摩机器人 ^[70]		手部、背部; 指推、指按; 将肌肉类软组织简化为线性、非线性弹簧和弹簧阻尼器模型, 实现一指禅按摩操作。	双开合结构的多功能按摩机械手 ^[111-112]		背部、手部; 多种按摩手法; 配合机械臂实现, 解决了传统按摩机械手结构复杂、体积大、按摩方式单一的问题。
	便携式颈肩康复按摩机械手 ^[113]		肩部、颈部; 指捏、掌摩和敲击等; 实现多手法按摩, 促进血液循环和经络疏通。	面向上肢康复的按摩机械手 ^[114]		上部部位; 指揉、捏拿和点按等; 实现多种针对上肢偏瘫中的康复按摩手法。
末端执行器	一种基于中医按摩疗法的机械手 ^[115]		背部; 指揉、滚动、拍打、挤捏等; 可以再现专家的操作和技术, 具有个性化的参数。	多功能按摩手 ^[90]		多部位按摩; 多按摩手法; 模拟人手的穴位指、掌按压、揉捏等各式按摩手法, 还可产生高频振动。
	柔顺关节交互式并联按摩机器人 ^[116-117]		背部、手部; 按压、敲击和推动等; 可以实现多模式按摩, 同时实现与人体安全柔顺交互。	具有被动柔顺与力感知驱动的欠驱动抓取器 ^[129]		能够执行柔顺性抓取、测量和控制抓取力, 无需任何额外的外部传感器, 可应用于穴位按摩。
	气动柔性按摩机械手 ^[118]		多部位; 按压、振动; 利用气动肌肉, 结合柔性硅胶材料, 解决传统结构功能单一、柔性不足、形体较大的问题。	软体按摩机器人驱动器 ^[119-120]		多部位; 掌按和掌揉; 相比刚性机器人具有更好的灵活性和人机交互安全性。
穿戴式机器人	蠕动式可穿戴软体机器人 ^[125]		上肢、下肢部位; 按压、挤压、类揉搓; 够通过小型流体致动器的蠕动运动提供动态压缩和按摩, 以改善血液循环。	一种头戴式机器人 ^[126]		头部; 多种按摩手法; 通过两个软体驱动器运动模仿人工穴位按摩。
单体、气动软体四立式机器人	气草按摩机器人 ^[127]		多部位; 以指捏为主; 便携性、安全性和普适性高, 解决了传统理疗机器人理疗部位单一的问题。	家用自动按摩机器人 ^[123]		背部为主; 区域电刺激; 实现了对人体按摩区域的有效识别、空间定位及按摩作业。

的协同性是研究的重点。

未来, 通过多学科、全方位的融合发展, 不断提高中医穴位智能按摩协作机器人的安全性、智能

性、准确性以及降低使用成本, 其有望能够逼近人工按摩效果并具备自主性, 以解决按摩效果不一、人才短缺的问题。

5 结论

近几年,我国慢性疼痛及相关疾病患者不断增加,穴位按摩作为一种有效的非药物治疗手段,需求快速增长。导致的按摩师紧缺、按摩劳动强度大和人工成本高等问题难以在短时间内得到解决,因此亟需研发适用于穴位按摩的机器人技术,以替代人工,并推动医疗康复机器人高端化、智能化发

展。本文以中医穴位智能按摩协作机器人功能实现的视角出发,围绕穴位识别、轨迹规划及力控、按摩装置设计三个方面开展综述,详细介绍了穴位2维图像识别、3维点云重建、穴位特征提取和定位、按摩机器人轨迹规划、主动按摩接触力控方法以及按摩装置设计的创新研究,总结了中医穴位智能按摩协作机器人的发展现状,并探讨了其发展趋势和挑战。

参考文献

- [1] 樊碧发. 中国疼痛医学发展报告[M]. 北京: 清华大学出版社, 2020.
FAN B F. China pain medicine development report[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2020.
- [2] LI F, HE T, XU Q, et al. What is the Acupoint? A preliminary review of Acupoints[J]. *Pain Medicine*, 2015, 16(10): 1905 – 1915.
- [3] 中企顾问网. 2023-2029年中国中医理疗行业分析与行业前景预测报告[EB/OL]. (2023-01) [2025-02-25]. <https://www.cction.com/report/202301/334601.html>.
Zhongqi Consultant. Analysis and industry prospect forecast report on China's traditional chinese medicine physiotherapy sector 2023-2029[EB/OL]. (2023-01). [2025-02-25].
- [4] 国家中医药管理局. 关于印发《“十四五”中医药人才发展规划》的通知: 国中医药人教发〔2022〕7号[Z]. 2022.
National Administration of Traditional Chinese Medicine. Notice on issuing the "14th Five-Year Plan" for traditional chinese medicine talent development: No. 7〔2022〕[Z]. 2022.
- [5] BOHR A, MEMARZADEH K. The rise of artificial intelligence in healthcare applications[M]. *Artificial Intelligence in healthcare*. Pittsburgh, USA: Academic Press. 2020: 25 – 60.
- [6] PAYNE C J, HEVIA E G, PHIPPS N, et al. Force control OF textile-based soft wearable robots for mechanotherapy[C]//IEEE International Conference on Robotics and Automation. Piscataway, USA: IEEE, 2018: 5459 – 5465.
- [7] 高焕兵, 鲁守银, 王涛, 等. 中医按摩机器人研制与开发[J]. *机器人*, 2011, 33(5): 553 – 562.
GAO H B, LU S Y, WANG T, et al. Development of traditional chinese medicine massage robot[J]. *Robot*, 2011, 33(5): 553 – 562.
- [8] 工业和信息化部, 国家发展和改革委员会, 科学技术部, 等. 十五部门关于印发《“十四五”机器人产业发展规划》的通知: 工信部联规〔2021〕206号[Z]. 2021.
Ministry of Industry and Information Technology, National Development and Reform Commission, Ministry of Science and Technology, et al. Notice on issuing the "14th Five-Year Plan" for robotics industry development: MIIT joint regulation No. 206 [2021][Z]. 2021.
- [9] 高工机器人. 协作机器人做“按摩理疗”何时驶入起量通道?[EB/OL](2025-01-27). [2025-2-25]. https://mp.weixin.qq.com/s?__biz=MzA3NDMyMzQzMg==&mid=2650196898&idx=1&sn=f228394bb3172bc4dafdc3ef006201cf&chksm=86479c3857b9b21f6729e3b5226f8e0d2c9d3b275f2d21f6f4f96a9b2dbc2398335bd25e0070&mpshare=1&scene=1&srcid=0128ftzfKB1c7yvxGK6BFzyG&sharer_shareinfo=05e3a9969d2f905f8c5ea904d8a8f660&sharer_shareinfo_first=05e3a9969d2f905f8c5ea904d8a8f660#rd
Gaogong Robot. When will collaborative robots enter the mass adoption stage for "therapeutic massage"?[EB/OL].(2025-01-27).[2025-02-25].
- [10] 闻煜. 移动艾灸机器人运动规划研究[D]. 南京: 东南大学, 2023.
WEN Y. Motion planning research for mobile moxibustion robot[D]. Nanjing: Southeast University, 2023.
- [11] ZHANG Z. A flexible new technique for camera calibration[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2000, 22(11): 1330 – 1334.
- [12] 唐瑞尹, 彭岸辉, 李巍, 等. 基于YOLOv5和图像处理的按摩机器人穴位贴定位方法[J]. *机械设计与制造*, 2025(1): 281 – 285, 290.

- TANG R Y, PENG A H, LI W, et al. Acupoint positioning method for massage robots based on YOLOv5 and image processing[J]. *Machinery Design & Manufacture*, 2025(1): 281 – 285, 290.
- [13] [13] 刘赏, 代烧, 周煜炜, 等. 增强人体关键点特征的姿态估计算法[J/OL]. 计算机辅助设计与图形学学报, 1 – 12 [2025-03-25]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2925.TP.20240821.1035.014.html>.
- LIU S, DAI R, ZHOU Y W, et al. Pose estimation algorithm enhanced by human keypoint features[J/OL]. *Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics*, 1 – 12 [2025-03-25].
- [14] LIU S, ZHANG T, JI H, et al. A novel YOLOv8-pose-based algorithm for abnormal behavior analysis of quadruped robots[C]//IEEE Data Driven Control and Learning Systems Conference. Piscataway, USA: IEEE, 2024: 1538 – 1543.
- [15] 陈嘉诚. 基于关键点特征的手部穴位定位方法研究与应用[D]. 长沙: 湖南大学, 2023.
- CHEN J C. Research and application of hand acupoint localization method based on keypoint features[D]. Changsha: Hunan University, 2023.
- [16] 何强, 郑毅, 张红星, 等. 手部穴位定位方法、装置、针灸机器人及存储介质: CN202410791960.8[P]. 2024-10-22.
- HE Q, ZHENG Y, ZHANG H, et al. Hand acupoint positioning method, device, acupuncture robot, and storage medium: CN202410791960.8[P]. 2024-10-22.
- [17] YUAN Z, SHAO P, LI J, et al. YOLOv8-ACU: Improved YOLOv8-pose for facial acupoint detection[J/OL]. *Frontiers in Neurorobotics*, 2024 [2025-03-25]. <https://doi.org/10.3389/fnbot.2024.1355857>.
- [18] 魏雨, 马晓阳, 高志宇. 基于卷积神经网络的人体穴位识别研究[J]. *中医药信息*, 2024, 41(2): 39 – 43.
- WEI Y, MA X Y, GAO Z Y. Human acupoint recognition based on convolutional neural networks[J]. *Journal of Traditional Chinese Medicine Information*, 2024, 41(2): 39 – 43.
- [19] 谢里, 覃渝茜, 郑进, 等. 一种高精度脸部穴位判别方法及判别模型: CN202311691291.9[P]. 2024-09-06.
- XIE L, QIN Y X, ZHENG J, et al. High-precision facial acupoint discrimination method and model: CN202311691291.9[P]. 2024-09-06.
- [20] 费红琳, 黄理杰, 陆东海, 等. 基于视觉的腰背部中医通络机器人穴位定位方法[J]. *现代中医药*, 2023, 43(5): 24 – 30.
- FEI H L, HUANG L J, LU D H, et al. Vision-based acupoint localization method for waist and back meridian-regulating robot in traditional chinese medicine[J]. *Modern Traditional Chinese Medicine*, 2023, 43(5): 24 – 30.
- [21] 韩小瑜, 章唐思远, 马睿杰, 等. 基于深度学习网络的智能针灸定位装置: CN202411045919.2[P]. 2024-10-22.
- HAN X Y, ZHANG T S Y, MA R J, et al. Intelligent acupuncture positioning device based on deep learning network: CN202411045919.2[P]. 2024-10-22.
- [22] 况嘉欣. 基于深度学习的人体背部穴位的识别与定位[D]. 南昌: 南昌大学, 2022.
- KUANG R X. Recognition and localization of human back acupoints based on deep learning[D]. Nanchang: Nanchang University, 2022.
- [23] LIU Y B, QIN J H, ZENG G F. Facial acupoint location method based on Faster PFLD[J]. *Signal, Image and Video Processing*, 2023, 17(8): 4455 – 4463.
- [24] 张婷婷. 中医面部穴位智能识别方法研究[D]. 成都: 四川大学, 2023.
- ZHANG T T. Research on intelligent recognition method for facial acupoints in traditional chinese medicine[D]. Chengdu: Sichuan University, 2023.
- [25] 张婷婷, 杨红雨, 林毅. 融合表示学习的中医面部穴位检测框架[J]. *电子科技大学学报*, 2023, 52(2): 175 – 181.
- ZHANG T T, YANG H Y, LIN Y. Representation learning-integrated framework for facial acupoint detection in traditional chinese medicine[J]. *Journal of University of Electronic Science and Technology of China*, 2023, 52(2): 175 – 181.
- [26] ZHANG T, YANG H, GE W, et al. An image - based facial acupoint detection approach using high - resolution network and attention fusion[J]. *IET Biometrics*, 2023, 12(3): 146 – 158.
- [27] LI Q, CHEN Y, PANG Y, et al. An AAM-based identification method for ear acupoint area[J/OL]. *Biomimetics*, 2023 [2025-03-25], <https://doi.org/10.3390/biomimetics8030307>.
- [28] WEN J, JIANG M, WANG Y, et al. An auricular division method based on ASM algorithm[J]. *Technology and Health Care*, 2021, 29(S1): 487 – 495.
- [29] SUN X, DONG J, LI Q, et al. Deep learning-based auricular point localization for auriculotherapy[J]. *IEEE Access*, 2022, 10: 112898 – 112908.

- [30] 潘景良, 林健哲, 陈灼, 等. 一种基于深度学习的耳部穴位识别装置及其方法: CN201710880679.1 [P]. 2018-12-07.
PAN J L, LIN J Z, CHEN Z, et al. Auricular acupoint recognition device and method based on deep learning: CN201710880679.1 [P]. 2018-12-07.
- [31] 陈文潇, 黄长军, 周文, 等. 一种基于大数据的耳穴识别方法及系统: CN202410788042. X [P]. 2024-09-13.
CHEN W X, HUANG C J, ZHOU W, et al. Auricular acupoint recognition method and system based on big data: CN202410788042. X [P]. 2024-09-13.
- [32] YANG S, ZANG Q, ZHANG C, et al. RT-DEMT: A hybrid real-time acupoint detection model combining mamba and transformer [EB/OL]. (2025-02-16) [2025-03-25]. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2502.11179>.
- [33] GU A, DAO T. Mamba: linear-time sequence modeling with selective state spaces [EB/OL]. (2023-12-01) [2025-03-25]. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2312.00752>.
- [34] 李巍, 彭岸辉, 杨婧翮, 等. 一种基于 yolo 的按摩机器人穴位检测与定位方法: CN202111295931.5 [P]. 2023-02-03.
LI W, PENG A H, YANG J H, et al. YOLO-based acupoint detection and localization method for massage robots: CN202111295931.5 [P]. 2023-02-03.
- [35] 贾明达, 杨金明, 孟维亮, 等. 融合点云与图像的环境目标检测研究进展 [J]. *中国图象图形学报*, 2024, 29(6): 1765 – 1784.
JIA M D, YANG J M, MENG W L, et al. Research progress on environmental target detection by fusing point cloud and image [J]. *Journal of Image and Graphics*, 2024, 29(6): 1765 – 1784.
- [36] WEN J. A study on target recognition algorithm based on 3D point cloud and feature fusion [C] // IEEE 4th International Conference on Automation, Electronics and Electrical Engineering. Piscataway, USA: IEEE, 2021: 630 – 633.
- [37] 陆英豪. 基于立体视觉成像的机器人按摩柔顺控制系统 [D]. 天津: 天津工业大学, 2023.
LU Y H. Compliance control system for robot massage based on stereo vision imaging [D]. Tianjin: Tiangong University, 2023.
- [38] ZHANG S, YU H, DONG J, et al. Automatic reconstruction of dense 3D face point cloud with a single depth image [C] // IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics. Piscataway, USA: IEEE, 2015: 1439 – 1444.
- [39] LIU J, REN J, SUN H, et al. Face recognition on point cloud with cgan-top for denoising [C] // IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing. Piscataway, USA: IEEE, 2023: 1 – 5.
- [40] UDDIN K, JEONG T H, OH B T. Deep learning-based incomplete regions estimation and restoration of 3D human face point cloud [C] // IEEE International Conference on Consumer Electronics-Asia. Piscataway, USA: IEEE, 2022: 1 – 4.
- [41] WANG C W, PENG C C. 3D face point cloud reconstruction and recognition using depth sensor [J/OL]. *Sensors*, 2021 [2025-03-25], <https://doi.org/10.3390/s2108258>.
- [42] CHOUGULE V N, MULAY A V, AHUJA B B. Clinical case study: Spine modeling for minimum invasive spine surgeries (MISS) using rapid prototyping [J/OL]. *Bone (CT)*, 2018 [2025-03-25]. <https://www.researchgate.net/publication/323377607>.
- [43] 冀晓响. 基于改进图卷积的艾灸机器人穴位检测方法研究 [D]. 上海: 上海应用技术大学, 2023.
JI X Y. Research on acupoint detection method for moxibustion robot based on improved graph convolution [D]. Shanghai: Shanghai Institute of Technology, 2023.
- [44] 孙一民. 基于双目视觉的针灸机器人面部寻穴及轨迹规划的研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2023.
SUN Y M. Study on facial acupoint localization and trajectory planning for acupuncture robot based on binocular vision [D]. Harbin: Harbin University of Science and Technology, 2023.
- [45] 胡燕. 面部肌肤按摩机器人轨迹规划与作业优化方法研究 [D]. 广州: 华南理工大学, 2020.
HU Y. Trajectory planning and operational optimization methods for facial skin massage robot [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2020.
- [46] 彭德祥. 面向按摩机器人的轨迹规划与舒适度监测方法研究 [D]. 广州: 华南理工大学, 2022.
PENG D X. Trajectory planning and comfort monitoring methods for massage robots [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2022.
- [47] HUANG Z, BOSS M, VASISHTA A, et al. SPAR3D: Stable point-aware reconstruction of 3D objects from single images [EB/OL]. (2025-01-08) [2025-03-25]. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2501.04689>.
- [48] LI W, YANG Z, HAN W, et al. Hyperbolic-constraint point cloud reconstruction from single RGB-D Images [C] // AAAI Conference on Artificial Intelligence. Menlo Park, USA: AAAI, 2025, 39(5): 4959 – 4967.
- [49] FANG Z, YE K, LIU Y, et al. EGP3D: Edge-guided geometric preserving 3D point cloud super-resolution for RGB-D camera

- [EB/OL]. (2024-12-16) [2025-03-25]. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2412.11680>.
- [50] LUO J Y, CHIU C T, HSIEH A T. Multi-view RGB-D based 3D point cloud face model reconstruction system[C]//IEEE International Symposium on Circuits and Systems. Piscataway, USA: IEEE, 2022: 3008 – 3012.
- [51] QI C R, SU H, MO K, et al. Pointnet: Deep learning on point sets for 3d classification and segmentation[C]//IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Piscataway, USA: IEEE, 2017: 652 – 660.
- [52] CHARLES R Q, YI L, SU H, et al. Pointnet++: Deep hierarchical feature learning on point sets in a metric space[J]. *Advances in Neural Information Processing Systems*, 2017, 30: 4 – 9.
- [53] WU W, QI Z, LI F. PointConv: Deep convolutional networks on 3D point clouds[C]//IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Piscataway, USA: IEEE, 2019: 9613 – 9622.
- [54] ZHANG R, GUO Z, ZHANG W, et al. PointCLIP: Point cloud understanding by CLIP[C]//IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Piscataway, USA: IEEE, 2022: 8542 – 8552.
- [55] ZHANG T, ZHANG Q, LIM E, et al. Deep learning based 3D point clouds recognition for robotic manufacturing[C]//International Conference on Automation and Computing. Piscataway, USA: IEEE, 2022: 1 – 5.
- [56] LIU Z, ZHANG Z, CAO Y, et al. Group-free 3D object detection via transformers[C]//IEEE/CVF International Conference on Computer Vision. Piscataway, USA: IEEE, 2021: 2949 – 2958.
- [57] FAN Z, ZHU Y, HE Y, et al. Deep learning on monocular object pose detection and tracking: A comprehensive overview[J]. *ACM Computing Surveys*, 2022, 55(4): 1 – 40.
- [58] OKADA K, TERADA T, KIMURA R, et al. 3D facial ethnicity identification using pointnet++ with data augmentation based on farthest point sampling[C]//IEEE Global Conference on Consumer Electronics. Piscataway, USA: IEEE, 2023: 838 – 841.
- [59] MUSSI E, SERVI M, FACCHINI F, et al. A novel ear elements segmentation algorithm on depth map images[J/OL]. *Computers in Biology and Medicine*, 2021 [2025-03-25]. <https://doi.org/10.1016/j.compbiomed.2020.104157>.
- [60] MASOOD D, QI J. 3D localization of hand acupoints using hand geometry and landmark points based on RGB-D CNN fusion[J]. *Annals of Biomedical Engineering*, 2022, 50(9): 1103 – 1115.
- [61] LI Y, PENG X, LI J, et al. Relation extraction using large language models: A case study on acupuncture point locations[J]. *Journal of the American Medical Informatics Association*, 2024, 31(11): 2622 – 2631.
- [62] ZHU X, ZHANG R, HE B, et al. PointCLIP V2: prompting CLIP and GPT for powerful 3D open-world learning[C]//IEEE/CVF International Conference On Computer Vision. Piscataway, USA: IEEE, 2023: 2639 – 2650.
- [63] 周炎丽, 陈怀玉, 宋昌梅, 等. 基于红外图像的人体穴位获取方法: CN202310288038.2[P]. 2024-01-26.
ZHOU Y L, CHEN H Y, SONG C M, et al. Human acupoint acquisition method based on infrared image: CN202310288038.2[P]. 2024-01-26.
- [64] 王怡杨, 王强, 赵伟, 等. 一种基于超声成像的穴位识别方法: CN202410667569.7[P]. 2024-08-09.
WANG Y Y, WANG Q, ZHAO W, et al. Acupoint recognition method based on ultrasonic imaging: CN202410667569.7[P]. 2024-08-09.
- [65] 宋康, 孟程磊, 梁梅叶, 等. 一种穴位定位方法、装置、中医医疗设备及存储介质: CN202310127904. X[P]. 2023-05-26.
SONG K, MENG C L, LIANG M Y, et al. Acupoint localization method, device, tcm physiotherapy equipment, and storage medium: CN202310127904. X[P]. 2023-05-26.
- [66] 何强, 王靖, 张红星, 等. 一种背部穴位确定方法、装置及艾灸机器人: CN202410785069.3[P]. 2024-09-03.
HE Q, WANG J, ZHANG H X, et al. Back acupoint determination method, device, and moxibustion robot: CN202410785069.3[P]. 2024-09-03.
- [67] 何强, 冯之浩, 张红星, 等. 腹部穴位确定方法、装置、艾灸机器人及存储介质: CN202410571306.6[P]. 2024-08-06.
HE Q, FENG Z H, ZHANG H X, et al. Abdominal acupoint determination method, device, moxibustion robot, and storage medium: CN202410571306.6[P]. 2024-08-06.
- [68] 冯伟, 梁繁荣, 赵凌, 等. 一种基于计算机视觉技术的人体穴位识别、定位及应用系统: CN202011175669.6[P]. 2022-07-05.
FENG W, LIANG F R, ZHAO L, et al. Human acupoint recognition, localization, and application system based on computer vision technology: CN202011175669.6[P]. 2022-07-05.
- [69] 杨芳, 郭寅, 张创波, 等. 一种基于人体穴位二维图像处理和三维立体定位方法: CN201910173409.6[P]. 2021-11-19.

- YANG F, GUO Y, ZHANG C B, et al. 2D image processing and 3D spatial localization method for human acupoints: CN201910173409.6[P]. 2021-11-19.
- [70] 龚胜. 机器人按摩手法控制系统关键技术的研究[D]. 福州: 福州大学, 2020.
- GONG S. Research on key technologies of robot massage manipulation control system[D]. Fuzhou: Fuzhou University, 2020.
- [71] 张雷, 程林云, 罗浩, 等. 一种多自由度机械臂系统的控制器的优化设计方法: CN201910696177.2[P]. 2021-01-22.
- ZHANG L, CHENG L Y, LUO H, et al. Optimization design method for controller of multi-DOF Robotic Arm System: CN201910696177.2[P]. 2021-01-22.
- [72] 张颖, 董芹鹏, 张旭龙, 等. 机械臂逆运动学求解方法及装置: CN202311257231.6[P]. 2023-12-22.
- ZHANG Y, DONG Q P, ZHANG X L, et al. Inverse kinematics solving method and device for robotic arm: CN202311257231.6[P]. 2023-12-22.
- [73] HONG S, WEI Y, MA M, et al. Research of robotic arm control system based on deep learning and 3D point cloud target detection algorithm[C]//IEEE International Conference on Automation, Electronics and Electrical Engineering. Piscataway, USA: IEEE, 2022: 217 – 221.
- [74] HU Y, ZHAI J, CHEN Y. A research on face profile surface acquisition and robot trajectory planning[C]//2nd International Conference on Information Systems and Computer Aided Education. USA: IEEE, 2019: 635 – 639.
- [75] LUO R C, CHEN S Y, YE H K C. Human body trajectory generation using point cloud data for robotics massage applications[C]//IEEE International Conference on Robotics and Automation. Piscataway, USA: IEEE, 2014: 5612 – 5617.
- [76] 路东伟. 按摩机器人轨迹示教学习策略与作业位置优化方法研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2023.
- LU D W. Research on trajectory demonstration learning strategy and position optimization method for massage robot[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2023.
- [77] 翟敬梅, 路东伟. 按摩机器人优化示教策略及 BPNN-DMPs 轨迹学习模型[J]. *华南理工大学学报(自然科学版)*, 2023, 51(12): 1 – 8.
- ZHAI J M, LU D W. Optimized demonstration strategy and BPNN-DMPs trajectory learning model for massage robots[J]. *Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition)*, 2023, 51(12): 1 – 8.
- [78] 林立民, 刘成菊, 马璐, 等. 基于 STFT 的仿人机器人手臂轨迹生成方法[J]. *机器人*, 2019, 41(5): 591 – 600.
- LIN L M, LIU C J, MA L, et al. Humanoid robot arm trajectory generation method based on STFT[J]. *Robot*, 2019, 41(5): 591 – 600.
- [79] 王迎智, 靳津, 张书猛. 三次三段式的机械臂轨迹规划方法、系统、设备及介质: CN202310579238.3[P]. 2023-10-13.
- WANG Y Z, JIN J, ZHANG S M. Triple three-segment trajectory planning method, system, device, and medium for robotic arm: CN202310579238.3[P]. 2023-10-13.
- [80] 吕佳俊, 郎晓磊, 李宝润, 等. 基于 B 样条的连续时间轨迹状态估计研究综述[J]. *机器人*, 2024, 46(6): 743 – 752.
- LYU J J, LANG X L, LI B R, et al. Review on B-spline-based continuous-time trajectory state estimation[J]. *Robot*, 2024, 46(6): 743 – 752.
- [81] 陆辰晖, 王福元. 一种基于 b 样条的六轴机械臂轨迹规划方法: CN202211539346. X[P]. 2024-11-12.
- LU C H, WANG F Y. Six-axis robotic arm trajectory planning method based on B-spline: CN202211539346. X[P]. 2024-11-12.
- [82] MA Z, GENG Y, NIE S, et al. Research on Chinese scraping automation based on sensor-fusion method[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2024, 24(2): 1751 – 1759.
- [83] XU Q, DENG Z, ZENG C, et al. Toward automatic robotic massage based on interactive trajectory planning and control[J]. *Complex & Intelligent Systems*, 2024, 10(3): 4397 – 4407.
- [84] 高箴, 韩栋明, 王奕儒, 等. 基于导纳控制与虚拟力控制的运动员康复按摩机器人[J]. *制造业自动化*, 2023, 45(11): 212 – 216.
- GAO Z, HAN D M, WANG Y R, et al. Athlete rehabilitation massage robot based on admittance control and virtual force control[J]. *Manufacturing Automation*, 2023, 45(11): 212 – 216.
- [85] 刘相权, 蒙胤, 卢路. 面向穴位按摩机械臂的阻抗控制算法研究[J]. *浙江工业大学学报*, 2024, 52(3): 248 – 255.
- LIU X, MENG Y, LU L. Research on impedance control algorithm for acupoint massage robotic arm[J]. *Journal of Zhejiang University of Technology*, 2024, 52(3): 248 – 255.

- [86] PHUC P T, TAI N D, THINH N T. Applying sliding mode control to massage robot apply for healthcare therapy[C]//International Conference on System Science and Engineering. Piscataway, USA: IEEE, 2019: 605 – 608.
- [87] 刘梦麟. 基于协作机器人的按摩机器人控制技术研究[D]. 福州: 福建工程学院, 2023.
LIU M L. Research on control technology of collaborative robot-based massage robot[D]. Fuzhou: Fujian University of Technology, 2023.
- [88] ZHANG X, ZHANG J, XIONG G, et al. Research on adaptive fuzzy impedance control of human-massage robot interaction based on Kelvin-Voigt modeling[J]. *IEEE Access*, 2024, 12: 89562 – 89572.
- [89] 姚崇. 基于示范学习的中医按摩机器人控制方法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2023.
YAO C. Research on demonstration learning-based control method for TCM massage robot[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2023.
- [90] XU Y, HUANG K, GUO W, et al. Digital modeling of massage techniques and reproduction by robotic arms[EB/OL]. (2024-12-08) [2025-03-25]. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2412.05940>.
- [91] LI Z, ZENG C, DENG Z, et al. Learning variable impedance control for robotic massage with deep reinforcement learning: A novel learning framework[J]. *IEEE Systems, Man, and Cybernetics Magazine*, 2024, 10(1): 17 – 27.
- [92] XIAO M, ZHANG T, ZOU Y, et al. Research on robot massage force control based on residual reinforcement learning[J]. *IEEE Access*, 2023, 12: 18270 – 18279.
- [93] XIAO M, ZHANG T, ZOU Y, et al. Study on force control for robot massage with a model-based reinforcement learning algorithm[J]. *Intelligent Service Robotics*, 2023, 16(4): 509 – 519.
- [94] 周丽然. 面向按摩机器人的人机协同模型与关键算法研究[D]. 济南: 济南大学, 2023.
ZHOU L R. Human-robot collaboration model and key algorithms for massage robots[D]. Jinan: University of Jinan, 2023.
- [95] 杨大勇, 田志林, 饶晓晓, 等. 基于阻抗在线辨识的自适应力跟踪上肢主动康复训练机器人控制方法[C] 第37届中国自动化学会青年学术年会(YAC 2022)论文集. 北京: 中国自动化学会, 2022: 104 – 111.
YANG D. Y., TIAN Z. L., RAO X. X., et al. Adaptive force tracking control method for upper-limb active rehabilitation training robots based on online impedance identification[C] Proceedings of the 37th Chinese Association of Automation Youth Academic Annual Conference (YAC 2022). Beijing: Chinese Association of Automation, 2022: 104 – 111.
- [96] TIAN J, WANG H, LU H, et al. Force/position-based velocity control strategy for the lower limb rehabilitation robot during active training: Design and validation[J/OL]. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, 2024[2025-03-25], <https://doi.org/10.3389/fbioe.2023.1335071>.
- [97] LI Y, WANG L. Human-redundant robot interaction and redundancy utilization based on three-dimensional force sensor[J/OL]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2024[2025-03-25]. <https://doi.org/10.1016/j.sna.2024.115820>.
- [98] 边飞飞. 面向机器人柔顺操作的变刚度运动学习和协作控制研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2021.
BIAN F F. Variable stiffness motion learning and collaborative control for robot compliant operation[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2021.
- [99] XU D, MO H, YI J, et al. Hybrid compliant control with variable-stiffness wrist for assembly and grinding application[J/OL]. *Robotics and Autonomous Systems*, 2024[2025-03-25]. <https://doi.org/10.1016/j.robot.2024.104756>.
- [100] WANG Z, ZOU L, SU X, et al. Hybrid force/position control in workspace of robotic manipulator in uncertain environments based on adaptive fuzzy control[J/OL]. *Robotics and Autonomous Systems*, 2021[2025-03-25]. <https://doi.org/10.1016/j.robot.2021.103870>.
- [101] ISKANDAR M, OTT C, ALBU-SCHÄFFER A, et al. Hybrid force-impedance control for fast end-effector motions[J]. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 2023, 8(7): 3931 – 3938.
- [102] 殷文喆, 练达芑, 李凯悦, 等. 基于分段自适应的机械臂力/位混合控制[J]. 北京航空航天大学学报, 2023, 51(1): 161 – 166.
YIN W Z, LIAN D P, LI K Y, et al. Force/position hybrid control for robotic arm based on segmented adaptation[J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2023, 51(1): 161 – 166.
- [103] 薛雷, 杨应科, 李东升, 等. 基于激光跟踪仪的机器人末端负载重力辨识与在线补偿方法[J]. 航空制造技术, 2024, 67(5): 53 – 59.
XUE L, YANG Y K, LI D S, et al. Gravity identification and online compensation method for robot end-effector load based on laser tracker[J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2024, 67(5): 53 – 59.

- [104] 周健, 郑联语, 樊伟, 等. 工业机器人定位误差在线自适应补偿[J]. *机械工程学报*, 2023, 59(5): 53 – 66.
ZHOU J, ZHENG L Y, FAN W, et al. Online adaptive compensation for industrial robot positioning errors[J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2023, 59(5): 53 – 66.
- [105] 陈韦池, 曾超, 郭靖, 等. 一种基于多源信息深度强化学习的机械臂控制方法及系统: CN202210468964.3 [P]. 2024-02-23.
CHEN W C, ZENG C, GUO J, et al. Multi-source information deep reinforcement learning-based robotic arm control method and system: CN202210468964.3 [P]. 2024-02-23.
- [106] ZHAI J, LI R, SU Z. Friction and deformation behavior of human skin during robotic sliding massage operation[J]. *Journal of Bionic Engineering*, 2024, 21(4): 1892 – 1904.
- [107] 任丹梅, 边飞飞. 机器人柔顺行为控制方法综述[J]. *信息与控制*, 2024, 53(4): 433 – 452.
REN D M, BIAN F F. Review on compliant behavior control methods for robots[J]. *Information and Control*, 2024, 53(4): 433 – 452.
- [108] 徐碧阳. 基于穴位自主定位的青年群体腰部按摩产品设计研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2023.
XU B Y. Acupoint autonomous localization-based waist massage product design for young adults[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2023.
- [109] ZHOU Y, YU T, GAO W, et al. Shared three-dimensional robotic arm control based on asynchronous BCI and computer vision[J]. *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*, 2023, 31: 3163 – 3175.
- [110] XU R, WANG X, WANG T, et al. Pointllm: Empowering large language models to understand point clouds[C]//European Conference on Computer Vision. Berlin, Germany: Springer, 2024: 131 – 147.
- [111] 余可, 宁萌, 黄彪, 等. 基于中医推拿的新型按摩手的设计与研究[J]. *机械设计与研究*, 2021, 37(3): 22 – 28.
YU K, NING M, HUANG B, et al. Design and research of novel massage manipulator based on TCM tuina[J]. *Machine Design & Research*, 2021, 37(3): 22 – 28.
- [112] 余可. 中医按摩机械手的设计与研究[D]. 无锡: 江南大学, 2021.
YU K. Design and research of TCM massage manipulator[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2021.
- [113] 郑小石. 颈肩康复按摩机械手的设计与性能研究[D]. 长春: 吉林大学, 2020.
ZHENG X S. Design and performance study of neck-shoulder rehabilitation massage manipulator[D]. Changchun: Jilin University, 2020.
- [114] 何诚. 面向上肢康复的按摩机械手的设计与力控研究[D]. 苏州: 苏州大学, 2022.
HE C. Design and force control research of upper limb rehabilitation-oriented massage manipulator[D]. Suzhou: Soochow University, 2022.
- [115] HU L, WANG Y, ZHANG J, et al. A massage robot based on Chinese massage therapy[J]. *Industrial Robot: An International Journal*, 2013, 40(2): 158 – 172.
- [116] DONG H, FENG Y, QIU C, et al. Enabling massage actions: an interactive parallel robot with compliant joints[C]//IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Piscataway, USA: IEEE, 2022: 4632-4637.
- [117] DONG H, FENG Y, QIU C, et al. Construction of interaction parallel manipulator: Towards Rehabilitation Massage[J]. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2023, 28(1): 372 – 384.
- [118] 张禹, 陆登宇, 赵文川, 等. 气动柔性按摩机械手爪的设计与实现[J]. *机床与液压*, 2021, 49(9): 28 – 33.
ZHANG Y, LU D Y, ZHAO W C, et al. Design and implementation of pneumatic soft massage gripper[J]. *Machine Tool & Hydraulics*, 2021, 49(9): 28 – 33.
- [119] 杨晓京, 刘用. 软体按摩机器人驱动器的设计与仿真[J]. *信息与控制*, 2021, 50(4): 490 – 497.
YANG X J, LIU Y. Design and simulation of actuator for soft massage robot[J]. *Information and Control*, 2021, 50(4): 490 – 497.
- [120] LIU Y, YANG X, SU R. Design and modeling of a driving system for soft massage robot[J/OL]. *Mechatronics*, 2021 [2025-03-25], <https://doi.org/10.1016/j.mechatronics.2021.102640>.
- [121] XING K, CHEN D, XUE R, et al. Flexible physiotherapy massage robot[C]//IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics. Piscataway, USA: IEEE, 2021: 417 – 421.
- [122] 刘文博, 王韞, 杲有宁, 等. 基于柔性传感的软体机器人交互研究进展[J]. *机器人*, 2024, 46(2): 195 – 218.
LIU W B, WANG Y, DUO Y N, et al. Research progress on soft robot interaction based on flexible sensing[J]. *Robot*, 2024,

- 46(2): 195 – 218.
- [123] 张楠. 家用自动按摩机器人的设计与实现[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2021.
ZHANG N. Design and implementation of household automatic massage robot[D]. Xi'an: Xidian University, 2021.
- [124] 杨宏冠. 柔性中医推拿拍打机器人设计与研制[D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2023.
YANG H G. Design and development of flexible TCM tuina percussion robot[D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2023.
- [125] ZHU M, FERSTERA A, DINULESCU S, et al. A peristaltic soft, wearable robot for compression therapy and massage[J]. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 2023, 8(8): 4665 – 4672.
- [126] WAN X, HUANG Z, LI Y, et al. Distributed pneumatic physiotherapy robot for human acupoints[C]//IEEE 12th Data Driven Control and Learning Systems Conference. Piscataway, USA: IEEE, 2023: 429 – 433.
- [127] HUANG Z, YU C, YU Z, et al. Soft four-leaf clover physiotherapy robot for traditional Chinese medicine massage physiotherapy[C]//China Automation Congress. Piscataway, USA: IEEE, 2023: 1977 – 1982.
- [128] 严家琪. 仿生柔性按摩机器人的设计与试验研究[D]. 长春: 吉林大学, 2020.
YAN J Q. Design and experimental study of bionic flexible massage robot[D]. Changchun: Jilin University, 2020.
- [129] RUIZ-RUIZ F J, VENTURA J, URDIALES C, et al. Compliant gripper with force estimation for physical human–robot interaction[J/OL]. *Mechanism and Machine Theory*, 2022[2025-03-25]. <https://doi.org/10.1016/j.mechmachtheory.2022.105062>.
- [130] NARAYAN J, MISHRA S, JAISWAL G, et al. Novel design and kinematic analysis of a 5-DOFs robotic arm with three-fingered gripper for physical therapy[J]. *Materials Today: Proceedings*, 2020, 28: 2121 – 2132.
- [131] NAKANE A, YANOKURA I, HASEGAWA S, et al. WARABI Hand: Five-fingered robotic hand with flexible skin and force sensors for social interaction[J]. *IEEE International Conference on Robotics and Automation*. Piscataway, USA: IEEE, 2024: 18120-18126.
- [132] WANG Y, LIU X J, ZHAO H. Control and implementation of a fluidic elastomer actuator for active suppression of hand tremor[J]. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 2024, 9(2): 939 – 946.
- [133] 程龙, 夏修泽. 上肢康复外骨骼智能控制综述[J]. *机器人*, 2022, 44(6): 750 – 768.
CHENG L, XIA X Z. Review on intelligent control of upper limb rehabilitation exoskeleton[J]. *Robot*, 2022, 44(6): 750 – 768.

作者简介

负泓俊(2001 –), 男, 硕士生。研究领域为机器视觉, 机器人运动控制。

王怡昕(1993 –), 男, 博士, 讲师。研究领域为软体机器人, 外骨骼。

李毅(1994 –), 男, 博士, 讲师。研究领域为机器人设计、建模与运动控制。