

面向手指缺损功能重建的仿生机械指微机电驱动、精细抓握与残肢神经痛调控机制研究进展

高佳凤¹ 李佳蓓¹ 杨修龙² 马依珊² 赵雪^{2*}

1.宁夏医科大学第一临床医学院, 中国·宁夏 银川 750004

2.宁夏医科大学第二临床医学院, 中国·宁夏 银川 750004

摘要: 手指缺损虽属局部肢体缺损, 却可显著影响捏持、抓握、书写、进食、工具操作及社会交往。传统硅胶美容型或被动机械型手指假体多以外观补偿和简单支撑为主, 存在功能恢复有限、佩戴舒适性不足、价格较高和长期使用依从性不佳等问题。近年来, 仿生材料、微机电驱动、柔性腱绳传动、肌电识别、触觉反馈及神经调控技术快速发展, 使手指假体由“外观替代”逐渐转向“功能重建—精细抓握—感觉反馈—疼痛辅助干预”一体化方向。本文围绕手指缺损功能重建需求, 综述仿生机械指的材料设计、佩戴适配、微机电驱动、精细抓握控制及残肢神经痛电刺激调控机制, 以期低成本、轻量化、舒适化和智能化手指假体研发提供参考。

关键词: 手指假体; 仿生机械指; 微机电驱动; 精细抓握; 残肢神经痛; 电刺激

Research Progress on Bionic Mechanical Finger Micro-EMC Actuators for Functional Reconstruction of Finger Defects, Precision Grasping, and Nerve Pain Modulation Mechanisms in Residual Limbs

Gao Jiafeng¹, Li Jiabei¹, Yang Xiulong², Ma Yishan², Zhao Xue^{2*}

1. First Clinical College, Ningxia Medical University, China Ningxia Yinchuan 750004

2. Second Clinical College, Ningxia Medical University, China Ningxia Yinchuan 750004

Abstract: Although finger defects belong to local limb defects, they can significantly impair pinch grip, grasping, writing, eating, tool manipulation, and social interaction. Traditional silicone cosmetic or passive mechanical finger prostheses primarily focus on aesthetic compensation and basic support; however, they often suffer from limitations in functional recovery, inadequate wearing comfort, high costs, and poor long-term compliance. In recent years, rapid advancements in bionic materials, microelectromechanical systems (MEMS) actuation, flexible tendon-driven mechanisms, electromyography (EMG) recognition, tactile feedback, and neuromodulation technologies have enabled finger prostheses to evolve from a mere "aesthetic replacement" toward an integrated approach encompassing "functional reconstruction – precise grasping – sensory feedback – and pain-assisted intervention." Centering on the functional reconstruction needs associated with finger defects, this article reviews the material design, wearing adaptability, MEMS actuation, precise grasping control, and electrical stimulation-based neuromodulation mechanisms of bionic mechanical fingers, aiming to provide a reference for the development of low-cost, lightweight, comfortable, and intelligent finger prostheses.

Keywords: Finger prosthesis; Bionic mechanical finger; Microelectromechanical system actuation; Precise grasping; Residual limb neuropathy; Electrical stimulation

0 引言

手指是人体完成精细运动和环境感知的重要结构。外伤、烧伤、感染、肿瘤切除及先天畸形等均可导致手指缺损, 患者虽可能保留腕掌部功能, 但在对指捏持、三指捏持、柱状抓握、钥匙捏、书写支撑和工具操作等方面常出现明显受限。与前臂或上臂截肢相比, 手指缺损残端短、可利用肌电信号少、固定空间有限, 对假体的轻量化、稳

定性、舒适性和外观协调性提出更高要求。因此, 手指假体不能简单套用完整假手设计, 而应围绕局部缺损、精细功能和低负担佩戴建立专门研发路径。

传统手指假体主要包括美容型、被动机械型和主动驱动型。美容型假体多采用硅胶材料, 外观修复效果较好, 但主动功能有限; 被动机械型假体依靠残指、邻指或腕部运动带动关节活动, 结构简单但动作模式单一; 主动驱动

型假体可借助微型电机、形状记忆合金、腱绳传动或软体驱动实现关节屈伸，是近年仿生机械指研究的重要方向^[1-3]。与此同时，截肢后残肢痛和幻肢痛会降低患者佩戴依从性，电刺激和神经调控技术为改善残端不适、增强感觉反馈和提升假体具身感提供了新的思路^[7-9]。因此，未来手指假体应从单纯“能戴”发展为“能动、能抓、能感知、能舒适长期使用”。

1 手指缺损功能重建需求与现有假体局限

手指缺损后的功能障碍具有“小缺损、大影响”的特点。拇指、示指和中指缺损会显著削弱捏持和精细操作能力，多指缺损则进一步影响包绕抓握和双手协同。理想的功能性手指假体应满足四方面需求：一是外形与残端适配，佩戴稳定且不妨碍邻指活动；二是关节活动范围符合日常动作需要，可完成屈曲、伸展和一定被动顺应；三是抓握输出稳定，可辅助完成纸张夹持、杯体扶持、手机操作、餐具使用和书写支撑；四是长期佩戴安全，避免皮肤压迫、残端疼痛加重和机械夹伤。

现有手指假体仍存在明显不足。硅胶美容型假体功能性弱，长期佩戴可出现闷热、摩擦、边缘压迫及固定不牢；被动机械型假体成本较低，但控制依赖残端或邻指，难以完成连续精细动作；主动驱动型假体虽能改善功能，但驱动器、电池、传感器和控制模块需在狭小空间内集成，容易带来体积增大、重量增加、续航不足和成本升高等问题^[1,10]。因此，面向手指缺损患者的机械指设计不宜盲目追求高自由度，而应强调低成本、轻量化、模块化、易维护和个性化适配。

2 仿生材料与佩戴适配进展

材料设计决定机械手指的外观、力学性能、触感和耐久性。传统硅胶材料柔软、可染色、生物相容性较好，适合作为外层仿生皮肤，但其支撑能力和长期耐磨性有限。功能性仿生机械指更适合采用“刚柔结合”结构：内部以轻质工程塑料、3D 打印材料或碳纤维增强材料构建指骨框架，外部以医用硅胶、弹性体或柔性复合材料模拟皮肤触感，中间通过柔性铰链、弹性连接或腱绳传动实现关节运动。指腹区域可增加微纹理、防滑垫或柔性触觉层，以提升抓握摩擦和接触稳定性。

佩戴适配是决定假体能否长期使用的核心。手指残端常伴瘢痕、软组织覆盖不足、局部敏感或神经瘤痛，固定结构若设计不当，可能导致压迫痛和皮肤破损。常见固定方式包括负压吸附、环形套接、邻指固定、掌侧支撑和个体化残端套筒。负压或硅胶套接隐蔽性好，但对残端长度

和皮肤条件要求较高；邻指固定可增强稳定性，但可能影响健指活动；掌侧支撑适合残端短或多指缺损者，但外观隐蔽性较差。三维扫描、健侧镜像建模和 3D 打印可实现个体化内腔设计，在承力区增加支撑，在敏感区预留缓冲空间，从而降低压迫并提高舒适度。

3 微机电驱动技术进展

微机电驱动是主动机械指实现功能重建的关键。理想驱动系统应具有小体积、轻重量、低噪声、低功耗、输出稳定和安全可控等特点。微型电机控制成熟、响应快，可通过齿轮、连杆或腱绳带动指节屈伸，适合早期转化应用。但多关节独立电机驱动会增加体积和重量，因此单驱动器带动多关节联动的欠驱动结构更适合单指假体。欠驱动结构通过腱绳、弹簧、连杆或柔性铰链使多个关节协同运动，可减少驱动器数量、降低成本，并使指节在接触物体时产生一定被动适应。

形状记忆合金驱动具有功率密度高、体积小、噪声低和便于嵌入狭小空间等优势。2025 年报道的 19 自由度轻量假手通过多组形状记忆合金驱动器实现五指和腕部控制，提示类肌肉驱动有助于突破传统电机假手在重量和自由度之间的矛盾^[9]。但形状记忆合金也存在响应速度受热传导限制、连续工作可能热积累、疲劳寿命需验证等问题。因此，在手指假体中更适合作为低频精细动作辅助或轻负荷屈伸驱动，并需配合机械限位、温度保护和弹性回位结构。

腱绳传动是机械指实现轻量化的重要路径。其可模拟屈肌腱走行，将驱动模块布置于掌侧、手背或近端固定结构内，通过柔性腱绳牵引远端指节。2026 年腱绳驱动揭示指假体研究显示，齿轮与滑轮结合的传动结构可实现稳定抓握，为手指假体小型化提供了参考^[5]。未来产品应重点优化腱绳摩擦、走线半径、关节限位和维修便利性，避免卡滞、磨损和过度屈曲。

4 精细抓握控制与感觉反馈

手指缺损患者最需要恢复的往往不是大力抓握，而是日常精细操作。机械指应优先建立有限而稳定的动作库，包括辅助捏持、支撑抓握和精细操作三类模式。辅助捏持用于纸张、卡片和钥匙；支撑抓握用于杯子、手机和瓶体；精细操作用于书写、按键和触屏。动作切换可采用机械按键、压力触发、残端肌电或多传感融合方式。由于手指局部缺损患者可采集肌电信号有限，早期产品可采用“按钮控制 + 压力闭环”的低成本方案，后续逐步升级为肌电识别或共享控制。

感觉反馈是假体从“工具”走向“身体延伸”的关

键。没有触觉反馈时,患者需依赖视觉判断抓握状态,容易出现抓握过紧或滑脱。高分辨触觉机器人手研究显示,大面积触觉覆盖可提升动态环境下的自适应抓握能力^[4]。但对于低成本机械指,不必追求全表面高密度传感,可优先在指尖和指腹布置压力、滑移或角度传感器,实现接触检测、抓握力调节和滑脱预警。反馈方式可采用振动、电刺激、声音或灯光提示,其中电刺激和振动反馈体积小、功耗低、易集成,适合手指假体应用。

5 残肢神经痛与电刺激调控机制

截肢后残肢痛和幻肢痛常影响假体佩戴。疼痛可能来源于外周神经瘤、瘢痕牵拉、局部炎症、机械压迫,也可能与脊髓和大脑皮层可塑性重组有关。残端疼痛不是单纯不适,而是导致假体弃用的重要因素。若机械手指仅重视运动功能,却忽视残端疼痛和皮肤耐受性,可能出现“功能先进但患者不愿佩戴”的问题。

电刺激调控疼痛的理论基础包括闸门控制理论、下行抑制通路激活、外周神经兴奋性调节和感觉输入重建。经皮神经电刺激可通过低强度电脉冲激活粗大感觉纤维,抑制疼痛信号传递;外周神经刺激和脊髓电刺激则主要用于较顽固的神经病理性疼痛^[7-9]。对于手指假体,较适合早期集成的是非侵入式、低强度、可调节的经皮电刺激或电触觉反馈。其作用不应被简单宣传为“治愈疼痛”,而应定位为缓解残端不适、提供触觉提示和增强佩戴体验的辅助技术。

电刺激模块设计应遵循安全、舒适、可调和可关闭原则。电极应避免破溃皮肤、明显瘢痕和高度敏感神经瘤区,刺激强度从低水平开始,以轻微麻感或可接受触觉为宜。参数应允许个体化调节,包括频率、脉宽、强度、时长和工作模式。若与微型电机或形状记忆合金驱动共存,还需做好绝缘、限流、防潮和温升控制,避免热刺激、电刺激和机械压迫叠加造成残端损伤。

6 应用边界与展望

仿生机械指并非适用于所有手指缺损患者。较理想对象包括残端皮肤稳定、无活动感染、残端可承受一定压力、存在明确精细抓握需求且愿意进行训练者。对于残端过短、软组织覆盖差、严重神经瘤痛、皮肤反复破溃或电刺激不耐受者,应谨慎选择主动驱动型假体,可优先考虑轻量化美容型或被动辅助型方案。

未来研发应聚焦四个方向:第一,建立面向手指缺损的专用评价体系,将捏持、书写、手机操作、餐具使用、穿衣辅助等真实任务纳入测试;第二,优化单驱动多关节

联动、柔性腱绳传动和机械自锁结构,在有限空间内实现稳定低功耗运动;第三,发展低成本触觉反馈和电刺激模块,在指腹关键区域实现基本感知闭环;第四,开展真实世界随访,评价佩戴时长、残端疼痛、皮肤安全、抓握能力、患者满意度和经济可及性。

7 结语

手指假体正由传统美容修复向仿生化、微型化、智能化和舒适化方向发展。仿生材料和个体化适配为稳定佩戴提供基础,微机电驱动和欠驱动结构为主动屈伸与精细抓握提供技术支撑,触觉反馈和电刺激调控则为改善操作体验及残肢神经痛管理提供新的可能。对于创新型机械手指而言,核心不是堆叠复杂功能,而是在低成本、轻量化、安全性、舒适度和日常实用性之间取得平衡。随着柔性传感、微型驱动、3D打印、智能控制和神经调控技术融合,面向手指缺损患者的仿生机械指有望成为兼具功能重建、感觉反馈和疼痛辅助管理能力的新型康复辅助器具。

参考文献:

- [1] Guo K, Lu J, Wu Y, et al. The Latest Research Progress on Bionic Artificial Hands: A Systematic Review[J]. *Micromachines*, 2024, 15(7): 891. DOI: 10.3390/mi15070891.
- [2] Abdikenov B, et al. Emerging Frontiers in Robotic Upper-Limb Prostheses: Mechanisms, Materials, Tactile Sensors and Machine Learning-Based EMG Control: A Comprehensive Review[J]. *Sensors*, 2025, 25(13): 3892. DOI: 10.3390/s25133892.
- [3] Yang H, Tao Z, Yang J, et al. A lightweight prosthetic hand with 19-DOF dexterity and human-level functions[J]. *Nature Communications*, 2025, 16: 955. DOI: 10.1038/s41467-025-56352-5.
- [4] Zhao Z, Li W, Li Y, et al. Embedding high-resolution touch across robotic hands enables adaptive human-like grasping[J]. *Nature Machine Intelligence*, 2025, 7: 889-900. DOI: 10.1038/s42256-025-01053-3.
- [5] Gomes P, et al. Development and Preliminary Assessment of a Tendon-Driven Thumb-Index Prosthesis with a Novel Hobbed-Pulley Actuation Mechanism[J]. *Bioengineering*, 2026, 13(2): 197. DOI: 10.3390/bioengineering13020197.
- [6] Walters S, et al. Demystifying upper limb hybrid prostheses: a scoping review[J]. *Frontiers in Rehabilitation Sciences*, 2025. DOI: 10.3389/fresc.2025.1610336.
- [7] Tao X, Ma S, Gong J, et al. Effects of neuromodulation

techniques on pain and depression in patients with phantom limb pain: a systematic review and meta-analysis[J]. Frontiers in Neurology, 2025, 16: 1682650. DOI: 10.3389/fneur.2025.1682650.

[8] Ishigami S, et al. Epidemiology and risk factors for phantom limb pain[J]. Frontiers in Pain Research, 2024, 5: 1425544. DOI: 10.3389/fpain.2024.1425544.

[9] 2024 中美脊髓电刺激管理慢性疼痛共识工作组. 脊髓电刺激管理慢性疼痛中美专家共识 (2024)[J]. 协和医学杂

志, 2024, 15(2): 285-293. DOI: 10.12290/xhyxzz.2024-0033.

[10] 郑悦, 李向新, 田岚等. 多功能上肢假肢技术研究进展与发展建议[J]. 前瞻科技, 2026, 5(1): 49-60. DOI: 10.3981/j.issn.2097-0781.20250051.

基金项目: 宁夏医科大学大学生创新创业训练计划项目 (项目编号: S202510752001)。

作者简介: 高佳凤 (2004-), 女, 宁夏省中卫市人, 宁夏医科大学临床医学本科生, 主要研究方向: 临床医学。

* 通讯作者: 赵雪。