

Design and Verification of Finger Rehabilitation Robot Based on Visual Kinematics

Chaofu Luo¹ Libo Zhang¹ Ling Zhou² Xinyi Zhang³

1. China Aero-Engine Guizhou Honglin Aero-Engine Control Technology Co., Ltd., Guiyang, Guizhou, 550025, China

2. Wudang District Traditional Chinese Medicine Hospital, Guiyang, Guizhou, 550025, China

3. Chongqing University, Chongqing, 401331, China

Abstract

To address the limitation that most existing finger rehabilitation robots are designed based on idealized fixed-axis joint models and therefore fail to accurately match the real kinematic characteristics of human grasping motions, this study investigates finger kinematics and rehabilitation robot mechanism design from the perspective of functional grasping. A vision-based measurement method is employed to obtain the motion trajectories of the metacarpophalangeal and proximal interphalangeal joints during grasping, revealing pronounced non-fixed-axis kinematic characteristics caused by continuous migration of instantaneous centers of rotation. Based on these characteristics, an arc-shaped sliding-track-driven finger rehabilitation robot mechanism is proposed to achieve kinematic compatibility between exoskeleton joint motions and human finger physiological movements, and a passive self-adaptive tensioning mechanism is designed to improve transmission stability. Prototype experiments are conducted to evaluate the motion performance of the proposed mechanism. The results demonstrate good motion consistency and structural compactness, providing an engineering reference for the mechanism configuration design of finger rehabilitation robots.

Keywords

finger rehabilitation robot; vision-based kinematics; non-fixed-axis joint; arc-shaped sliding-track mechanism; mechanism design

基于视觉运动学的手指康复机器人机构设计与验证

罗朝夫¹ 张理博¹ 周玲² 张心怡³

1. 中国航发贵州红林航空动力控制科技有限公司, 中国·贵州 贵阳 550025

2. 乌当区中医医院, 中国·贵州 贵阳 550025

3. 重庆大学, 中国·重庆 401331

摘要

针对现有手指康复机器人多基于理想化定轴关节模型、难以准确匹配人手抓握过程中真实运动特性的问题,从功能性抓握运动出发,开展基于视觉测量的人手运动学分析与手指康复机器人机构设计研究。采用视觉测量方法获取抓握过程中掌指关节(MCP)与近端指间关节(PIP)的运动轨迹,揭示关节瞬时回转中心随运动连续迁移的非定轴运动特性。在此基础上,提出一种弧形滑轨驱动的手指康复机器人机构构型,实现外骨骼关节运动路径与人体关节生理运动特性的匹配,并设计被动自适应张紧机构以提升传动稳定性。通过样机实验对机构运动性能进行验证,结果表明该机构具有良好的运动一致性与结构紧凑性,可为手指康复机器人机构构型设计提供工程参考。

关键词

手指康复机器人; 视觉运动学; 非定轴关节; 弧形滑轨驱动; 机构设计

1 引言

手功能障碍是脑卒中等中枢神经系统疾病患者常见且严重的后遗症之一^[1-2]。研究表明,重复、可控且符合人体生理特性的运动训练能够有效促进神经可塑性重建,从而改善患者的手部运动功能。作为康复训练的重要技术手段,手部外骨骼机器人因其可实现高重复性、可量化控制及个性化

训练等优势,近年来受到了广泛关注。主动式手部外骨骼机器人的系统综述研究表明,其设计重点逐渐由单纯的驱动能力提升转向人机运动匹配性与舒适性优化^[3]。然而,现有多数手指康复机器人在机构设计中仍采用理想化的人体关节模型,通常假设关节绕固定轴线转动,难以反映人手在抓握等功能性动作过程中关节瞬时回转中心连续变化的真实运动特性。

在控制策略方面,已有研究提出基于肌电信号的人机交互控制方法,通过识别使用者运动意图实现外骨骼的主动驱动^[4]。该类研究在提升人机交互性能方面取得了一定进展,

作者简介: 罗朝夫(1998-),男,中国贵州遵义人,硕士,初级,从事智能制造研究。

但其研究重点主要集中于控制算法与信号处理，对外骨骼机构运动路径与人体真实生理运动之间的匹配问题关注相对不足。HEXORR 手部外骨骼通过对机器人关节与人体关节轴线进行对准，实现了较大的关节活动范围，但其机构运动仍主要基于定轴转动假设，难以精确复现人手抓握过程中连续变化的关节运动路径^[5]。针对传统定轴机构在人机运动匹配方面的不足，国内已有研究尝试通过机构构型优化与参数调整改善手指外骨骼的运动性能，在一定程度上扩大了机构的有效运动范围并提升了运动协调性^[6]。然而，该类研究仍以预设关节运动模型为基础，对手抓握过程中关节真实运动路径的依赖程度有限。外骨骼机器人在结构耦合与人机运动协调性方面仍面临挑战^[7-8]。

针对现有手指康复机器人多基于理想化定轴关节模型、难以准确反映人手抓握过程中关节真实运动特性的问题，本文从机械系统设计角度出发，引入基于视觉测量的人手抓握运动学分析方法，对掌指关节与近端指间关节在抓握过程中的运动轨迹进行定量建模。已有研究将视觉感知技术集成于软体手外骨骼设计中，以实现高精度关节状态感知，表明视觉测量技术在手部康复机器人运动学分析中的潜力与应用前景^[9]。在此基础上，将人手关节非定轴运动特性转化为可实现的不确定性几何约束形式，提出一种弧形滑轨驱动的手指康复机器人机构构型，实现外骨骼关节运动路径与人体关节生理运动特性的匹配。同时，针对弧形滑轨驱动条件下同步带传动中绳轮中心距随关节运动发生变化所引起的传动稳定性问题，建立相应的几何分析模型，并设计一种无需主动控制的动态自适应张紧机构。通过样机实验对所提出机构的运动能力及运动一致性进行验证，为手指康复机器人机构构型设计及其传动系统优化提供一种工程可行的设计思路。

2 基于视觉测量的人手抓握运动学分析

有学者对便携式可穿戴手部外骨骼进行了系统的运动学建模与结构设计研究，验证了通过运动学分析指导机构设计的可行性与有效性^[10]。本章重点获取人手抓握过程中关键关节的真实运动轨迹，为后续非定轴机构约束形式的确定提供定量依据。

为获取人手在抓握过程中的真实运动轨迹，本文采用多特征点视觉测量方法对抓握动作进行运动学分析。选取掌指关节（MCP）、近端指间关节（PIP）及指尖（TIP）作为关键特征点，对其在抓握全过程中的位姿变化进行连续跟踪，实验流程如图 1 所示，图 2 是实验平台及设备。相关关节及测量点定义见表 1。

对采集到的轨迹数据进行平滑处理与函数拟合分析，

结果表明，抓握过程中 MCP 与 PIP 关节的运动轨迹均呈现连续变化的弧线特征，其瞬时回转中心并非固定点。在对多种常见函数形式进行对比拟合的基础上发现，两类关节轨迹均可采用二次正弦函数进行较好描述，拟合误差较小，能够反映抓握过程中关节运动的整体规律。

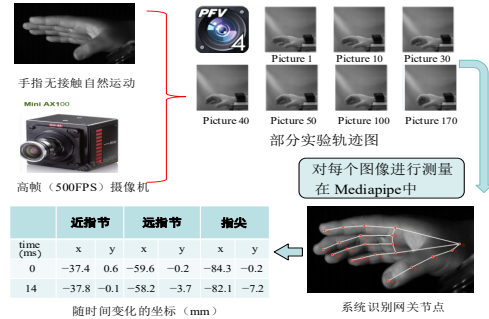


图 1 实验流程图

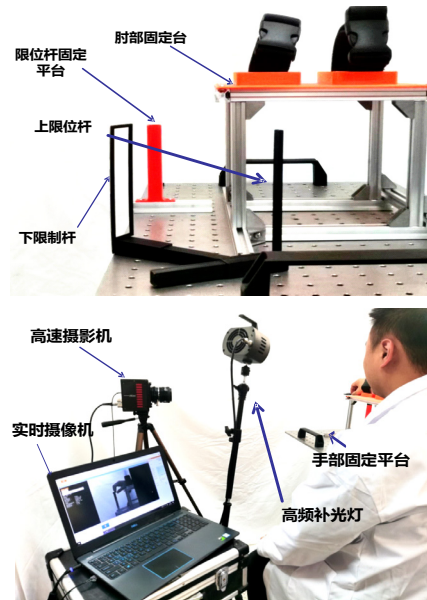


图 2 实验平台及设备

表 1 人手抓握过程中关键关节及对应测量点定义

| 关节名称 | 符号 | 说明 |
|--------|-----|--------|
| 掌指关节 | MCP | 指根关节 |
| 近端指间关节 | PIP | 第一指间关节 |
| 指尖 | TIP | 手指末端点 |

图 3 给出了 MCP 与 PIP 关节在抓握过程中的轨迹拟合结果。可以看出，随着抓握动作的进行，关节回转中心沿一定路径发生迁移，该特性表明采用传统定轴转动副难以准确复现人手抓握运动，而基于非定轴约束的滑轨驱动形式在运动学层面具有更高的匹配潜力。

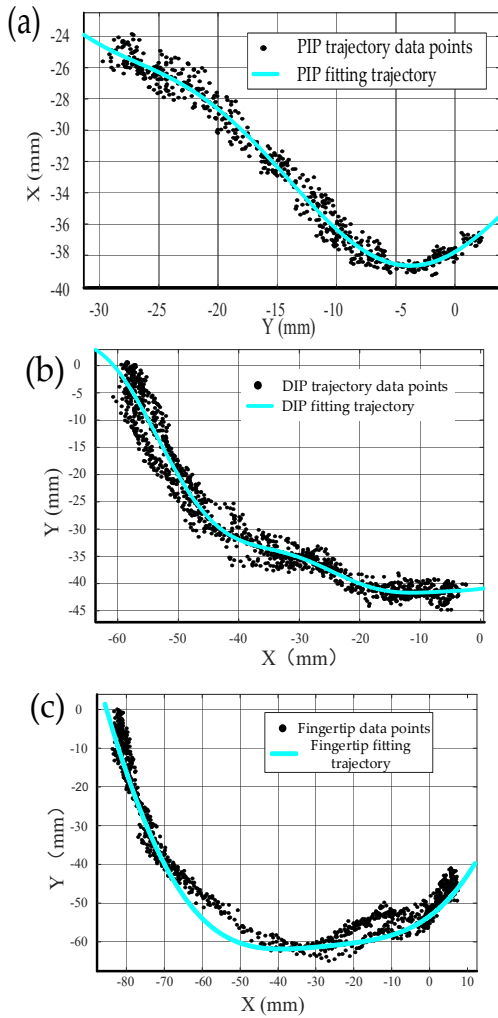


图3 人手抓握过程中 MCP 与 PIP 关节运动轨迹拟合结果

为进一步分析不同关节在抓握过程中的运动特性，对 MCP 与 PIP 关节的角度变化进行分段统计，结果见表 2。由表可知，在抓握的快速屈曲阶段，PIP 关节承担主要角度变化，而 MCP 关节变化相对平缓，二者在运动幅值与角速度上存在明显差异。这一特性表明，在机构设计中需保证关节运动具有一定独立性协调性，避免采用单一刚性耦合驱动方式。

表 2 人手抓握过程中 MCP 与 PIP 关节角度及角速度统计结果

| 关节名称 | 阶段时间 (ms) | 弯曲角度(°) | 平均角速度(°/s) |
|------------|-----------|---------|------------|
| 掌指关节 (MCP) | 0-100 | 5 | 50 |
| | 100-400 | 20 | 66.7 |
| | 400-500 | 5 | 50 |
| 近指关节 (PIP) | 0-100 | 10 | 100 |
| | 100-400 | 24 | 80 |
| | 400-500 | 10 | 100 |

上述运动学分析结果表明，人手抓握过程中关节运动具有明显的非定轴特征，为后续采用弧形滑轨约束实现关节运动路径匹配提供了直接的运动学依据。

3 手指康复机器人机构设计

针对人手抓握过程中复杂的多关节运动特性，已有研究从机构构型角度提出了多种手指康复机器人设计方案。例如，有学者提出采用回环关节 (circuitous joints) 的手部康复外骨骼结构，并通过实验与运动学分析验证了该类机构在实现连续屈伸运动方面的可行性^[11-13]。然而，该类机构通常仍基于预设的关节运动形式，难以灵活适应人手抓握过程中关节瞬时回转中心的连续变化。基于上述人手抓握运动学特性，本文提出一种弧形滑轨驱动的手指康复机器人机构构型，如图 4 所示。本章在前述运动学分析基础上，重点围绕机构构型与传动形式展开设计，以实现外骨骼关节运动路径与人体生理运动特性的匹配。

其中，滑轨曲线依据图 3 中关节运动轨迹拟合结果进行设计，使外骨骼关节在屈伸过程中沿近似于人体关节生理运动的路径运动，从而在结构层面实现人机运动学匹配。为改善传统定轴关节在运动匹配性方面的不足，已有研究从不同角度提出了改进方案。例如，Kong 等通过引入柔性仿生关节结构，使外骨骼关节能够通过柔性变形适应关节运动中心的变化，从而提升了运动匹配性^[14]。与现有基于预设关节模型的设计方法不同，本文从真实人手运动学特性出发，采用弧形滑轨这一确定性几何约束形式，在保证运动路径匹配的同时，兼顾了机构刚度与运动可控性，避免了复杂多自由度机构的引入，有利于实现结构紧凑化设计。

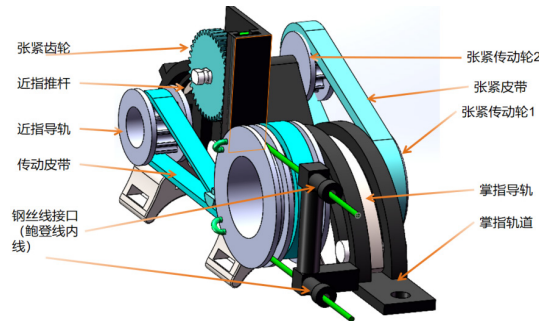


图4 弧形滑轨驱动手指康复机器人整体机构示意图

在弧形滑轨驱动条件下，机构采用同步带进行动力传递。由于关节屈曲过程中外骨骼各构件相对位置发生变化，同步带传动系统中绳轮之间的相对位置关系随关节运动不断改变。图 5 给出了弧形滑轨驱动条件下同步带传动系统的几何关系示意图。



图5 弧形滑轨驱动手指康复机器人关节运动原理示意图

可以看出,随着关节沿弧形滑轨发生屈伸运动,绳轮中心距不再保持恒定,而是随关节角度发生动态变化。为分析该变化规律,建立了绳轮中心距与关节屈曲角度之间的几何关系模型,结果表明,在正常工作角度范围内,绳轮中心距随关节屈曲角度变化近似呈线性关系,如图6所示。该变化规律为后续张紧机构行程与结构参数设计提供定量依据。

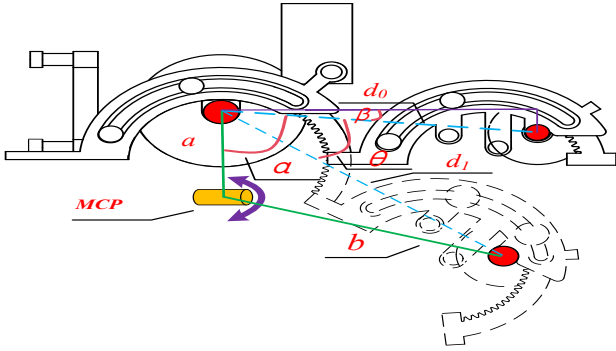


图6 绳轮中心距随关节屈曲角度变化关系曲线

在弧形滑轨驱动条件下,外骨骼关节在屈伸过程中沿预定轨迹运动,其几何约束形式将直接影响动力传递路径。由于同步带传动系统中绳轮的相对位置随关节运动发生变化,传统定中心距假设不再适用,有必要对弧形滑轨驱动条件下同步带传动的几何特性进行分析。绳轮中心距的动态变化将导致同步带有效长度发生改变,若采用固定张紧方式,易引起张紧力波动,进而影响传动稳定性,故设计动态自适应张紧机构。对张紧机构分段,如图7所示,设定同步带总长求对应Y值。为便于动态自适应张紧机构参数设计,有必要进一步将同步带有效长度变化关系进行分段分析。

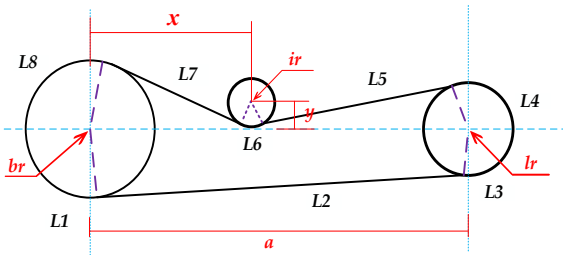


图7 张紧机构分段分析图

结果表明,掌指关节角度增大时,张紧推杆伸长量递减,每增加1°掌指弯曲角度,张紧推杆伸长量减少0.25毫米,测试范围内推杆总移动量7.5毫米。据此设计一种动态自适应张紧机构,如图8所示。该机构可随关节运动自动调整张紧轮位置,对同步带有效长度变化进行实时补偿,从而在整个运动过程中维持较为稳定的张紧状态。该张紧方式无需额外主动控制,结构简单、集成性好,能够有效提高传动系统的稳定性与可靠性。

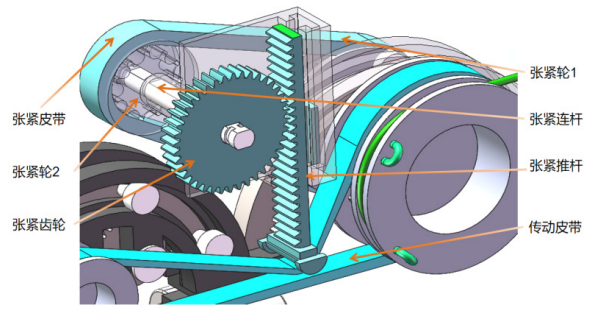


图8 基于绳轮中心距变化的动态自适应张紧机构示意图

4 机构样机及实验验证

为验证所提出弧形滑轨驱动手指康复机器人机构在工程实现性及运动一致性方面的有效性,基于前述机构设计方案制作了手指康复机器人样机,并开展了相关实验验证。实验重点围绕关节运动范围及机构与人手关节运动轨迹一致性展开。

依据前文提出的机构构型与传动方案,采用三维建模与3D打印工艺完成了手指康复机器人样机的制造与装配。样机整体结构紧凑,能够覆盖单指的掌指关节(MCP)与近端指间关节(PIP)屈伸运动需求。为降低穿戴负担并保证实验安全性,样机主体构件选用轻质材料制造。

实验平台主要由手指康复机器人样机、驱动与传动模块以及测量装置构成,通过对样机在屈伸运动过程中的运动状态进行记录,为后续机构运动性能验证提供数据支持。样机及实验平台如图9所示。



图9 样机实物及实验平台

为验证所设计机构对人体手指关节活动范围的适应能力,对样机在单指屈伸运动工况下的关节角度范围进行了测试。实验过程中,通过测量执行机构绳轮转角与外骨骼关节转角之间的对应关系,获取掌指关节(MCP)与近端指间关节(PIP)的屈伸角度范围。

实验结果表明,在样机驱动条件下,MCP关节屈伸角度范围为0°~29°,PIP关节屈伸角度范围为0°~44°。在复合运动工况下,各关节活动范围略有减小,但整体仍能够覆盖人体手指功能性抓握所需的主要运动区间。相关测试结果如图10和表3所示。其中,“复合运动”指MCP与

PIP 关节同时参与屈伸运动的工况。

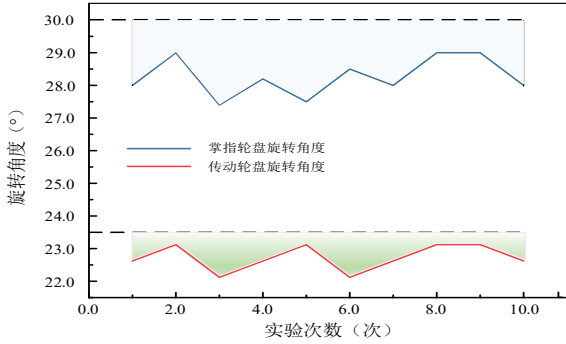


图 10 关节屈伸角度测试曲线图

表 3 手指关节屈伸角度范围表

| 测试方式 | 手指 | MCP 关节屈伸 /° | PIP 关节屈伸 /° |
|------|----|-------------|-------------|
| 单独运动 | 四指 | 0~29 | 0~44 |
| 复合运动 | | 1.3~27.5 | 2.7~43 |

将实验测得的关节活动范围与人体手指正常生理活动范围进行对比，结果表明两者误差控制在 5% 以内，说明所提出的弧形滑轨驱动机构在运动能力层面能够满足手指康复训练的基本需求。

在完成关节运动范围验证的基础上，进一步对所提出机构在运动一致性方面的性能进行验证。通过对样机驱动下外骨骼关节运动轨迹与人手自然抓握过程中关节运动轨迹进行对比分析，评估弧形滑轨约束对非定轴关节运动特性的复现能力。

实验中获取了佩戴手指康复机器人条件下的关节运动轨迹，并与前述基于视觉测量得到的人手抓握运动轨迹进行时序对齐与对比分析。结果如图 11 所示，可以看出，外骨骼关节在屈伸过程中能够较好地沿预期轨迹运动，其整体变化趋势与人手生理关节轨迹保持一致。

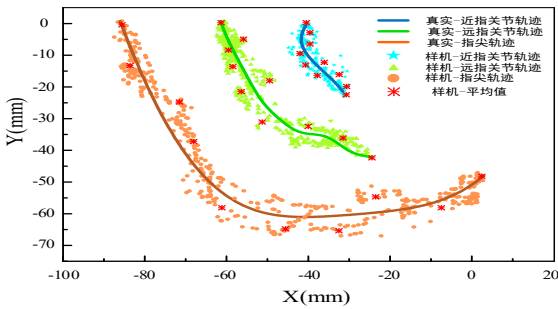


图 11 真实轨迹和穿戴机器人后的关节轨迹关联图

从工程角度定量评价外骨骼关节与人手关节运动趋势的一致性，引入相关性分析方法，对外骨骼关节屈曲角度与人手生理屈曲角度之间的关系进行统计分析。结果表明，在整个屈伸过程中，两者变化具有较高的相关性，误差分布稳定，未出现明显累积偏差，验证了所提出弧形滑轨驱动机构在复现人手非定轴关节运动特性方面的有效性。相关分析

结果如图 12 所示。

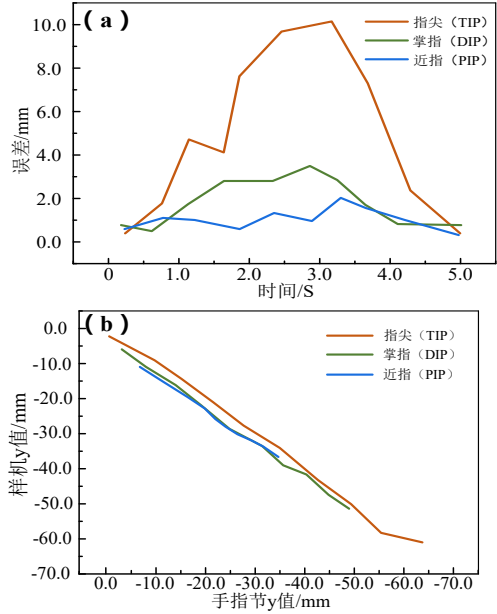


图 12 穿戴后康复机器人的指关节关联性分析

实验过程中机构运行平稳，未出现明显传动打滑或卡滞现象，验证了所设计张紧机构在实际工况下的有效性。

5 结论

本文基于视觉测量的人手抓握运动学分析，开展了手指康复机器人仿生机构设计研究。通过对抓握过程中多关节协同运动特性的定量分析，揭示了人手关节运动的非定轴特征，并据此提出了一种弧形滑轨驱动的手指康复机器人机构型，实现了机构运动路径与人体关节生理运动特性的良好匹配。针对同步带传动中因绳轮中心距动态变化而引起的张紧不稳定问题，建立了几何分析模型，并设计了一种动态自适应张紧机构，提高了传动系统的工程可实现性与运行稳定性。实验结果表明，所提出的弧形滑轨驱动手指康复机器人机构不仅在结构上具备良好的工程可实现性，而且在关节运动范围及运动轨迹一致性方面均能够较好地匹配人手生理运动特性，为后续康复训练应用提供了可靠的机构基础。

研究表明，从人手真实运动学规律出发，将生物运动特性转化为可实现的机械约束形式，有助于提升手指康复机器人在运动一致性、结构合理性及系统可靠性等方面的综合性能。相关研究可为手指康复机器人机构型设计及传动系统优化提供一种可行的机械设计思路。本文提出的设计思路对以功能性抓握为目标的手部康复机器人机构设计及传动系统优化具有一定工程参考价值。

参考文献

[1] 《中国脑卒中防治报告 2021》编写组. 《中国脑卒中防治报告 2021》概要[J]. 中国脑血管病杂志, 2023, 58(11): 783-793.
 [2] 王拥军, 李子孝, 谷鸿秋, 等. 中国卒中报告 2020 (中文版) [J]. 中国卒中杂志, 2022, 17(5): 433-447.

- [3] Du Plessis T, Djouani K, Oosthuizen C. A review of active hand exoskeletons for rehabilitation and assistance[J]. *Robotics*, 2021, 10(1): 40.
- [4] Zhang Y, Li X, Wang H, Chen Z. Control of newly designed wearable robotic hand exoskeleton based on EMG[J]. *Frontiers in NeuroRobotics*, 2021, 15: 711047.
- [5] Schabowsky C N, Godfrey S B, Holley R J, et al. Development and pilot testing of HEXORR: hand exoskeleton rehabilitation robot[J]. *Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation*, 2010, 7: 36.
- [6] 王杰, 管声启, 夏齐霄. 手指康复外骨骼机器人的结构优化设计[J]. *中国机械工程*, 2018, 29 (02): 224-229.
- [7] 姚玉峰, 杨云龙, 郭军龙, 裴硕, 孙立宁. 膝关节术后康复训练机器人研究综述[J]. *机械工程学报*, 2021, 57(5): 1-18
- [8] 荆泓玮, 朱延河, 赵思恺, 等. 外肢体机器人研究现状及发展趋势[J]. *机械工程学报*, 2020, 56 (07): 1-9.
- [9] She Y, Liu S Q, Yu P, et al. Exoskeleton-covered soft finger with vision-based proprioception and tactile sensing[J]. *arXiv preprint arXiv:1910.01287*, 2019.
- [10] Cempini M, De Rossi S M M, Lenzi T, et al. Kinematics and design of a portable and wearable exoskeleton for hand rehabilitation[C]// *Proceedings of the IEEE International Conference on Rehabilitation Robotics*. Seattle: IEEE, 2013: 1-8.
- [11] Zhang F, Fu Y, Zhang Q, Wang S. Experiments and kinematics analysis of a hand rehabilitation exoskeleton with circuitous joints[J]. *Biomedical Materials and Engineering*, 2015, 26(S1): S665-S672.
- [12] Li G, Cheng L, Sun N, Fang Y. Design, manipulability analysis and optimization of an index finger exoskeleton for stroke rehabilitation[J]. *Mechanism and Machine Theory*, 2022, 168: 104602.
- [13] 田宇, 王洪波, 刘颖, 等. 一种食指康复外骨骼机器人设计与分析[J]. *机械工程学报*, 2023, 59 (09): 40-50.
- [14] Kong B, Meng Q, Xiang S, et al. Design and motion performance analysis of rehabilitation exoskeleton manipulator based on flexible bionic joint[J]. 2023.