本文引用格式：张爱民,冯嘉枢,周仁义,等.绳驱动模块化仿人多指手的结构设计与系统集成[J].自动化与信息工程,2026,47(1):37-43.

ZHANG Aimin, FENG Jiashu, ZHOU Renyi, et al. Structural design and system integration of tendon-driven modular humanoid multi-fingered hand[J]. Automation & Information Engineering, 2026,47(1):37-43.

绳驱动模块化仿人多指手的结构设计与系统集成*

张爱民[1]　冯嘉枢[2]　周仁义[1,2]　罗力[2]　吴桥文[2]

（1.广汽集团汽车工程研究院，广东 广州 511434

2.广东工业大学机电工程学院仿生与智能机器人实验室，广东 广州 510006）

摘要：针对当前仿人服务机器人多指手存在的结构复杂、价格高昂、功能有限等问题，提出一种结构简单、成本低廉、功能丰富的绳驱动模块化仿人多指手。基于人手动作中各关节呈现运动耦合的特性，采用单电机驱动单指的方案，通过腱绳传动同步驱动手指的多个关节；采用模块化设计理念，将食指、中指、无名指与尾指设计为结构相同的模块，大拇指则单独设计为另一功能模块。各手指主体均采用一体化 3D 打印成型，并安装在手掌上构成完整的多指手系统，其控制系统硬件高度集成于手掌内部。经手势动作、抓握与抓握力实验验证，该多指手以较少的驱动单元和简化的传动结构，实现多样化的手势表达及对 25 种物品的稳定抓握，抓握力达 13.29 N，满足仿人服务机器人在典型抓取任务与服务场景中的功能需求。

关键词：绳驱动；仿人多指手；模块化；结构设计；抓握能力；系统集成

中图分类号：TP242　　**文献标志码：**A　　**文章编号：**1674-2605(2026)01-0004-07

DOI：10.12475/aie.20260104　　开放获取

Structural Design and System Integration of Tendon-driven Modular Humanoid Multi-fingered Hand

ZHANG Aimin[1]　FENG Jiashu[2]　ZHOU Renyi[1,2]　LUO Li[2]　WU Qiaowen[2]

(1.R&D Center, Guangzhou Automobile Group, Guangzhou 511434, China

2.Biomimetics and Intelligent Robotics Lab, School of Mechanical and Electrical Engineering, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, China

Abstract: In response to current issues in humanoid service robot multi-fingered hands—such as complex structures, high cost, and limited functionality—a tendon-driven modular humanoid multi-fingered hand with a simple structure, low cost, and rich functionality is proposed. Based on the motion coupling characteristics of human hand joints during action, a single-motor-driven single-finger scheme is adopted, using tendon transmission to synchronously drive multiple joints of the finger. Embracing a modular design philosophy, the index, middle, ring, and little fingers are designed as structurally identical modules, while the thumb is separately designed as another functional module. The main body of each finger is formed through integrated 3D printing and assembled on the palm to construct a complete multi-fingered hand system, with the control system hardware highly integrated inside the palm. Experimental validation through gesture motion tests, grasping experiments, and grip force tests demonstrates that this multi-fingered hand, with fewer driving units and a simplified transmission structure, achieves diverse gesture expressions and stable grasping of 25 types of objects, with a grip force of up to 13.29 N, meeting the functional requirements of humanoid service robots in typical grasping tasks and service scenarios.

Keywords: tendon-driven; humanoid multi-fingered hand; modular design; structural design; grasping capability; system integration

* 基金项目：广东省“扬帆计划”引进创新创业团队项目（2017YT05G026）

AUTOMATION & INFORMATION ENGINEERING

0 引言

机器人是制造业实现数字化、智能化和信息化的重要载体[1]。随着机器人技术的发展，仿人服务机器人不断涌现，其操作末端为仿人多指手。仿人多指手通常具有 3 个及以上手指，用于模仿人手动作。根据自由度与驱动源数量的不同，仿人多指手可分为全驱动和欠驱动 2 种类型。其中，全驱动仿人多指手的驱动源数量与其自由度数量相等[2]，每个关节均由独立的驱动器驱动，可实现精确的主动控制，但驱动源数量较多，导致手掌体积增大、安装困难、操作复杂；欠驱动仿人多指手的驱动源数量少于其自由度数量[3]，没有独立驱动源的关节通过耦合实现随动控制[4-5]，具有结构简单、可靠性高等特点，在灵巧手领域应用广泛[6-7]，并已成功应用于航空航天[8]、深海探测[9]、康复医疗[10]及远程助残服务等领域。

近年来，工业界、学术界针对仿人多指手开展了大量研究。文献[11]开发了全驱动与欠驱动结合的仿人机械手，具有 5 个手指、20 个关节，由 9 个伺服电机驱动，通过机械耦合执行各种抓握操作和手势，具有结构简单、响应快、驱动力大、刚度高等特点，主要应用于服务机器人和教学教具领域；但该仿人机械手采用全刚性结构，在碰撞时存在易损风险，限制了其应用场景。文献[12]研发的五指气动软指手的最大抓握力可达 18 N，指尖内置了水凝胶-弹性体混合结构的柔性压力传感器，并集成了电触觉系统，具有触觉压力等外部感知信息的神经反馈功能，可实现气动软指手与神经系统的双向闭环控制，在假肢领域展现出良好的应用潜力；但该气动软指手依赖额外的气泵作为动力源，不仅增加了系统的复杂性和体积，限制了其使用便捷性，还受限于气动驱动特性，提拉负载质量相对有限，制约了其应用场景。文献[13]开发的仿人多指手具有 5 个手指，每个手指有 2 节指节，共有 11 个关节、6 个自由度（大拇指有 2 个，其余手指各有 1 个），指节动作由微型伺服电缸通过连杆机构驱动，整体结构简洁、高效，最大抓握力可达 10 N，主要应用于服务机器人领域；但该多指手的手指位置排布略显单一，导致其抓握能力受限，难以对特定形状或尺寸的物体实现有效抓握。

为提升仿人多指手的精确抓握能力，本文对第一代绳驱动多指手进行改进，采用模块化设计方法，研制一款低成本、可 3D 打印的绳驱动模块化仿人多指手（简称绳驱动仿人多指手）。

1 结构设计

绳驱动仿人多指手主要面向服务机器人领域，旨在提升机器人在实际应用场景中的操作适应性和人机交互能力。其设计目标如下：1） 模仿人手的外形尺寸与结构，以及运动与抓握功能；2） 采用模块化设计，以确保制造、装配与维护的简便性及可靠性；3） 实现系统集成，将驱动、传感等关键硬件集成在手掌内部。

1.1 绳驱动仿人多指手构型

绳驱动仿人多指手参照人手构型设计，在手掌上安装 4 个手指（食指、中指、无名指、尾指）模块和 1 个大拇指模块。其中，4 个手指各具有 2 个自由度，大拇指具有 3 个自由度，共 11 个自由度。绳驱动仿人多指手构型的三维设计示意图如图 1 所示。

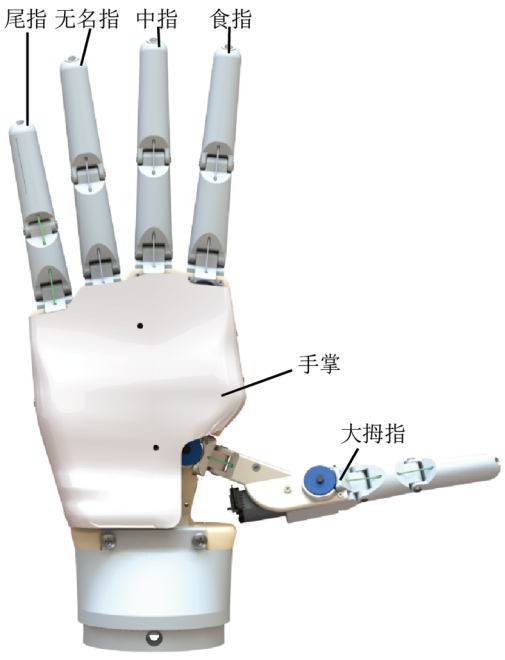


图 1 绳驱动仿人多指手构型的三维设计示意图

AUTOMATION & INFORMATION ENGINEERING

绳驱动仿人多指手的外形尺寸参照人手设计，长度≤190 mm，宽度≤80 mm；配备手指和手掌（3D 打印的橡胶材料），用于模拟人类手指和手掌的软组织，以增大摩擦力，帮助抓握不同形状的物体；执行抓握动作时，大拇指可同时与食指、中指的指尖接触，实现类似人手的捏抓动作；手掌内部的硬件控制板集成了驱动、传感等模块，手掌底部设有与操作臂连接的接口；通过腱绳传动方式实现运动和力的传输，将驱动电机与关节分离，减小末端惯量；驱动电机与手指均采用模块化结构，便于维护与更换。

1.2 手指模块结构

绳驱动仿人多指手的4个手指模块均由预紧机构、远端指节、近端指节、绕绳轮、直流减速电机、手指装配座等组成。其中，指节尺寸比例参照成人中指设计，远端指节长约 45 mm，近端指节长约 35 mm，手指总长约 75 mm。手指模块结构的三维示意图如图 2 所示。

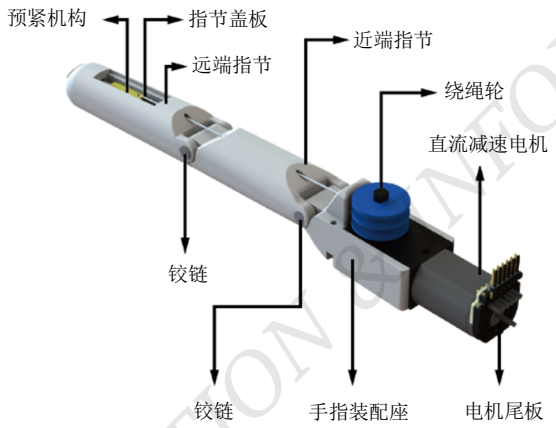


图 2 手指模块结构的三维示意图

绳驱动仿人多指手的远端指节与近端指节，以及近端指节与直流减速电机之间的连接均采用圆柱销作为旋转轴，既保证了连接的稳固性，又简化了整体结构；指尖端设有沉头孔，便于安装螺栓，螺栓与带螺纹的滑块紧密配合，构成预紧机构；预紧机构可对腱绳进行精细的预紧调节，以确保腱绳始终保持张紧状态，从而保障指节动作流畅且精准；远端指节的正面与背面均设置了预紧机构的滑槽，以确保预紧机构的滑块能够顺畅滑动；手指装配座将直流减速电机固定在手掌上，手指的弯曲、展开动作均依靠直流减速电机带动绕绳轮转动，通过腱绳一个方向拉紧另一个方向释放来实现。远端指节与近端指节可实现 0°~155°的弯曲角度，而近端指节相对于手掌可实现−5°~98°的弯曲角度。

1.3 腱绳双向传动结构设计

绳驱动仿人多指手的腱绳传动方式主要有两种：一种是单驱动器控制单根腱绳实现手指弯曲动作，依靠弹性元件或弹性材料的回弹实现手指展开动作；另一种是每个手指配置 2 个驱动器以控制 2 根腱绳分别实现弯曲、展开动作。然而，第一种方式的弹性元件或弹性材料寿命难以保证；第二种方式的驱动器数量较多，导致系统较为复杂。为此，本文设计了一种腱绳双向传动结构，仅使用单电机与单根腱绳即可实现手指的弯曲与展开动作。

腱绳双向传动结构主要包括预紧机构、绕绳轮、指腹腱绳和指背腱绳等，其结构三维示意图如图 3 所示。

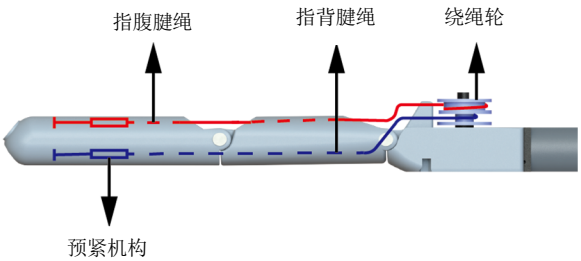


图 3 腱绳双向传动结构三维示意图

绕绳轮安装在直流减速电机的输出轴上；一根腱绳的两端分别以顺时针、逆时针方向缠绕在绕绳轮的上层、下层，并分别穿过指腹面、指背面与预紧机构的滑块连接；通过调节预紧机构的滑块移动到不同位置，即可实现腱绳张紧。腱绳双向传动过程如下：

1） 当直流减速电机顺时针旋转时，电机输出轴带动绕绳轮顺时针转动，绕绳轮上层的腱绳收缩，拉动指腹腱绳使指节弯曲；同时，绕绳轮下层的腱绳放松，指节拉动指背腱绳，使指腹、指背腱绳同时保持

AUTOMATION & INFORMATION ENGINEERING

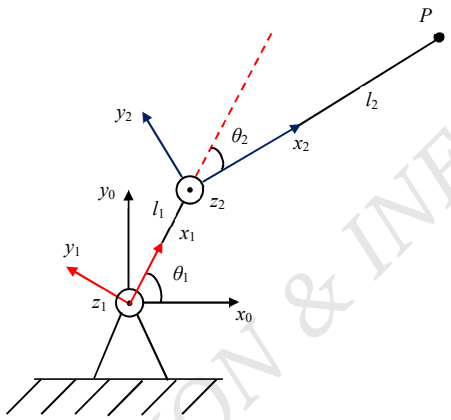
张紧状态，实现手指弯曲动作；

2） 当直流减速电机逆时针旋转时，电机输出轴带动绕绳轮逆时针转动，绕绳轮下层的腱绳收缩，拉动指背腱绳使指节展开；同时，绕绳轮上层的腱绳放松，指节拉动指腹腱绳，使指腹、指背腱绳同时保持张紧状态，实现手指展开动作。

1.4 手指运动学分析

由于直流减速电机的输出轴到远端指节指腹面和指背面预紧机构滑块的路径、预紧的锚定点位置以及远端指节与近端指节的长度均不同，需对腱绳运动建模，并对绕绳轮进行变径处理。腱绳运动建模过程参见文献[15]。

以手指模块为例，采用 D-H 参数法对其进行运动学分析。手指模块中的 2 个指节被视作连杆，旋转关节被视为旋转轴，形成两连杆的开链机构。手指各关节坐标系简图如图 4 所示。



l_i—连杆长度，即两个相邻关节轴线间公垂线的长度；

θ_i—关节 i 的转角，即两条公垂线l_i与l_{i-1}之间的夹角。

图 4 手指各关节坐标系简图

按照设计要求，手指弯曲/展开关节角θ_1的范围为−5°~98°，关节角θ_2的范围为0°~155°。

手指连杆的 D-H 参数如表 1 所示。其中，d_i为两条公垂线l_i与l_{i-1}之间的距离，在z_{i-1}轴上可量得；α_{i-1}连杆扭角，即两个相邻关节轴线间的夹角。

表 1 手指连杆的 D-H 参数

i	l_i/mm	d_i/mm	α_{i-1}/(°)	θ_i/(°)
1	$l_1 = 35$	0	0	θ_1
2	$l_2 = 45$	0	0	θ_2

根据手指连杆的 D-H 参数，可以得到手指各个坐标系的转换矩阵为

$$ {}_1^0\boldsymbol{T} = \begin{bmatrix} \cos\theta_1 & -\sin\theta_1 & 0 & l_1\cos\theta_1 \\ \sin\theta_1 & \cos\theta_1 & 0 & l_1\sin\theta_1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{1} $$

$$ {}_2^1\boldsymbol{T} = \begin{bmatrix} \cos\theta_2 & -\sin\theta_1 & 0 & l_2\cos\theta_2 \\ \sin\theta_2 & \cos\theta_2 & 0 & l_2\sin\theta_2 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{2} $$

$$ {}_2^0\boldsymbol{T} = {}_1^0\boldsymbol{T}\,{}_2^1\boldsymbol{T} = \begin{bmatrix} c_{12} & -s_{12} & 0 & l_1c_1 + l_2c_{12} \\ s_{12} & c_{12} & 0 & l_1s_1 + l_2s_{12} \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{3} $$

式中：$s_{12} = \sin(\theta_1 + \theta_2)$，$c_{12} = \cos(\theta_1 + \theta_2)$，$s_1 = \sin(\theta_1)$，$c_1 = \cos(\theta_1)$。

通过基坐标系到末端坐标系的矩阵变换，可得到手指末端的坐标(x, y, z)为

$$ \begin{cases} x = l_1c_1 + l_2c_{12} \\ y = l_1s_1 + l_2s_{12} \\ z = 0 \end{cases} \tag{4} $$

手指的运动空间决定了其抓握范围，通过正运动学方程，可以分析手指各关节运动对整体抓握能力的影响。本文采用蒙特卡洛法[16]估算手指在不同关节角度下的潜在运动空间。通过在 MATLAB 环境中进行上述数值分析，利用公式(4)确定关节角度与位置坐标之间的定量关系；结合表 1 的参数计算各关节对应的运动空间位置点；运动空间位置点的集合构成手指运动空间如图 5 所示。

AUTOMATION & INFORMATION ENGINEERING

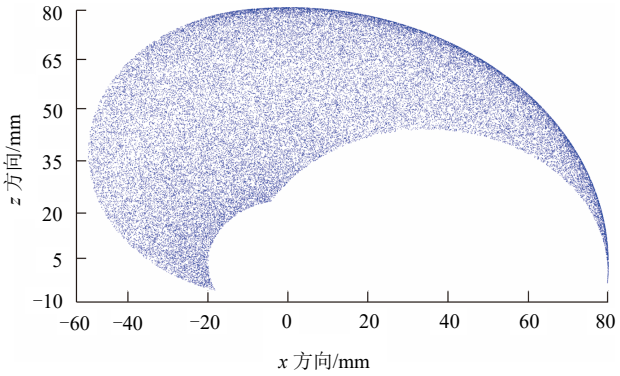


图 5　手指运动空间图（*x*-*z* 平面投影视图）

2　系统集成

为简化维护流程，绳驱动仿人多指手的硬件控制系统（含驱动、传感等模块）高度集成于手掌内。由于手掌内部空间有限，硬件组件需尽可能小巧。硬件控制板资源图如图 6 所示。

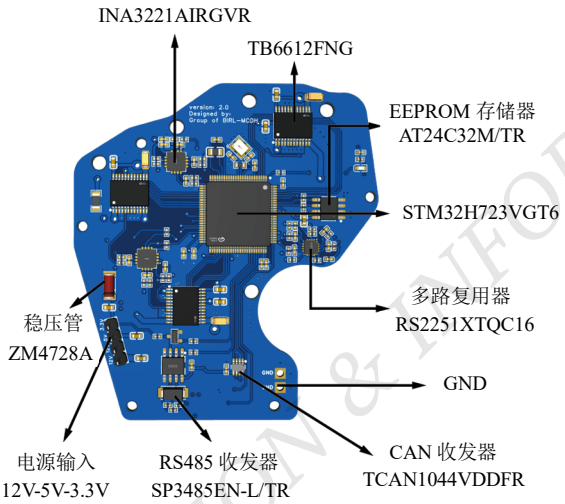


图 6　硬件控制板资源图

绳驱动仿人多指手硬件控制系统的微型控制器选用 STM32H723VGT6；多级降级电源满足 12 V 转 5 V、5 V 转 3.3 V 的供电需求；驱动模块选用高集成电机驱动芯片 TB6612FNG，可提供不超过 12 V 的驱动电压和不低于 1 A 的驱动电流，以满足直流减速电机正反转动、调速的驱动需求；传感模块通过在直流减速电机转子上安装磁环和霍尔传感器芯片，实现位置检测，进而计算其转速，实现转速检测，通过电流检测芯片 INA3221AIRGVR 实现电流检测。

另外，本文设计了绳驱动仿人多指手的控制系统，对底层硬件进行上层控制。其中，PC 上位机作为指令源，通过 CAN 总线向微型控制器发送运动控制指令，并实时接收其反馈信息，构成闭环控制回路。绳驱动仿人多指手控制系统框图如图 7 所示。

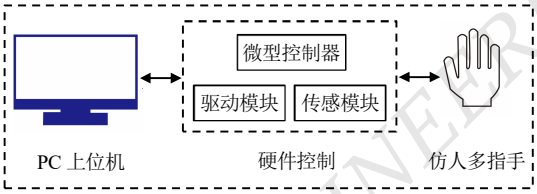


图 7　绳驱动仿人多指手控制系统框图

微型控制器接收到 PC 上位机的指令后，先进行指令解析与数据处理，再计算各手指对应的目标角度，并通过 PID（比例−积分−微分）控制算法驱动各关节的直流减速电机，实现高精度的角度跟踪控制。该 PID 控制算法通过比较直流减速电机的实时反馈角度（由编码器获取）与目标角度，生成相应的控制量驱动直流减速电机，以减小跟踪误差，确保绳驱动仿人多指手运动平滑、准确。

3　实验分析

为评估绳驱动仿人多指手的性能，本文开展手势动作实验、抓握实验与抓握力实验。绳驱动仿人多指手样机尺寸为77 mm × 224 mm，总质量约为 290 g。

3.1　手势动作实验

手势动作实验通过 PC 上位机控制各手指协同运动，实现数字 1~9 等典型手势，以及四指弯钩、提拉、OK 等复杂手势。实验结果如图 8 所示。

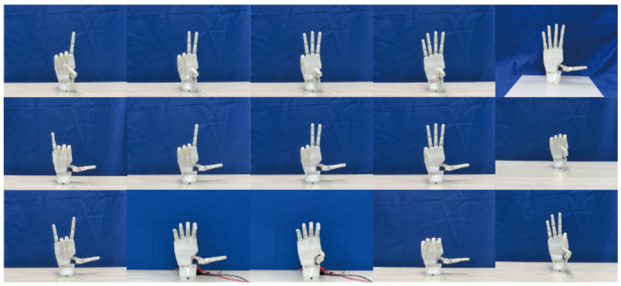


图 8　绳驱动仿人多指手手势动作实验图

AUTOMATION & INFORMATION ENGINEERING

由图 8 可知，绳驱动仿人多指手成功实现数字 1~9 等典型手势，以及四指弯钩、提拉、OK 等复杂手势，表明其具有运动灵活性与手势复现能力。

3.2 抓握实验

抓握实验通过绳驱动仿人多指手对笔、毛巾、香蕉、气球、纸张等 25 种物品进行抓取，验证其抓握能力。实验结果如图 9 所示。

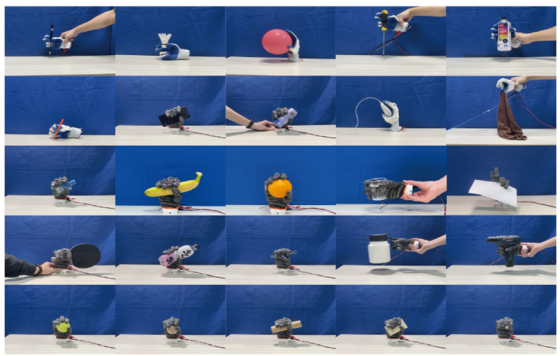


图 9 绳驱动仿人多指手抓握实验图

由图 9 可知，无论是柔软易变形物品还是刚性不规则物品，绳驱动仿人多指手均能成功抓取，表明该多指手能够通过腱绳传动实现稳定的自适应抓握。

3.3 抓握力实验

为验证绳驱动仿人多指手的抓握力性能，将拉压力计安装在 2 个半圆柱体外壳内，该多指手握住圆柱体，拉压力计读取压力值，结果如图 10 所示。

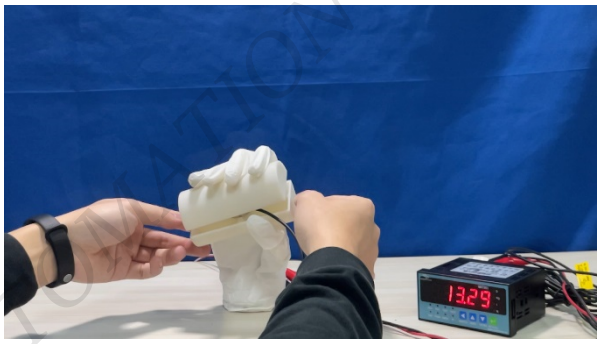


图 10 绳驱动仿人多指手抓握力实验图

如图 10 所示，在多次连续抓握力测试中，绳驱动仿人多指手的最大抓握力为 13.29 N，表明该多指手在保持绳驱动结构良好适应性的同时，还能提供较大的抓握力，从而为胜任多样化的抓取任务提供支持。

4 结论

本文提出一种电机驱动绕绳轮的腱绳双向传动结构，并研制一款高集成度、结构简单、质量轻、成本低的 11 自由度绳驱动仿人多指手。通过手势动作实验、抓握实验与抓握力实验，验证了该多指手的实用可行性，且抓握力可达 13.29 N。后续研究将在多指手上集成触觉传感器，使多指手拥有更多的感知能力，从而更真实地模拟人手各项功能。

©The author(s) 2024. This is an open access article under the CC BY-NC-ND 4.0 License (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/)

参考文献

[1] 杨睿毅,唐莉丽.人形机器人发展思路探讨[J].上海信息化,2023(12):30-32.

[2] WEI G, DAI J, WANG S, et al. Kinematic analysis and prototype of a metamorphic anthropomorphic hand with a reconfigurable palm[J]. International Journal of Humanoid Robotics, 2011,8(3):459-479.

[3] XU Z, TODOROV E. Design of a highly biomimetic anthropomorphic robotic hand towards artificial limb regeneration[C]. IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), Stockholm, 2016:3485-3492.

[4] WANG D, XIONG Y, ZI B, et al. Design, analysis and experiment of a passively adaptive underactuated robotic hand with linkage-slider and rack-pinion mechanisms[J]. Mechanism and Machine Theory, 2021,155:104092.

[5] WANG X, ZHAO Y, XIAO Y, et al. Design of a underactuated robotic hand with three articulated fingers[C]. IEEE 3rd Advanced Information Technology, Electronic and Automation Control Conference. 2018: 2562-2566.

[6] 刘今越,赵睿,贾晓辉,等.手指关节可独立控制的欠驱动灵巧手[J].机械工程学报,2020,56(3):47-55.

[7] 胡俊,李仲萱,齐佳明,等.机器人操纵的触觉感知技术综述[J].自动化与信息工程,2025,46(5):1-15.

[8] WANG B, ZHANG T, CHEN J, et al. A modular cable-driven humanoid arm with anti-parallelogram mechanisms and Bowden cables[J]. Front. Mech. Eng, 2023,18:6.

[9] LIU J, FENG J, XU J, et al, Mechanism design of a multi-rod and wireline-coring drill tool for seafloor sediment-sampling

AUTOMATION & INFORMATION ENGINEERING

robots [C]. International Conference on Advanced Robotics and Mechatronics. Sanya(ICARM), China, 2023:715-720.
[10] 马寻君,蔚俊,刘海涛,等.手术机器人关键技术综述与优化探讨[J].中国医疗器械杂志,2024,48(5):505-511.
[11] RUEHL S W, PARLITZ C, HEPPNER G, et al. Experimental evaluation of the schunk 5-finger gripping hand for grasping tasks[C]. IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO), Bali, Indonesia, 2014: 2465-2470.
[12] GU G, ZHANG N, XU H, et al. A soft neuroprosthetic hand providing simultaneous myoelectric control and tactile feedback[J]. Nature Biomedical. Engineering, 2023,7(4):589-598.
[13] 'Inspire-Robots'. 仿人五指灵巧手[EB/OL].(2023-9)[2023-12-02]. https://www.inspire-robots.com.
[14] KAMAKURA N, MATSUO M, ISHII H, et al. Patterns of static prehension in normal hands[J]. The American Journal of Occupational Therapy,1980,34(7):437-445.
[15] FENG J, ZHOU R, LUO L, et al. Development and modeling of modular cable-driven anthropomorphic multi-fingered hands[C]. International Conference on Intelligent Robotics and Applications. Singapore: Springer Nature Singapore, 2024: 181-193.
[16] 苑丹丹,邓三鹏,王仲民.基于蒙特卡洛法的模块化机器人工作空间分析[J].机床与液压,2017,45(11):9-12.
[17] 王建生,智常建,谭运杰,等.车载空调码垛机器人的运动学与工作空间分析[J].机电工程技术,2025,54(8):81-86.

作者简介：

张爱民，男，1978 年生，博士研究生，工程师，主要研究方向：人形机器人结构设计和柔顺控制。E-mail: zhangaimin1@gacmd.com

冯嘉枢，男，1998 年生，硕士研究生，主要研究方向：仿人多指手的结构设计及控制系统集成。E-mail: kentafeng@163.com

周仁义，男，1993 年生，博士研究生，工程师，主要研究方向：人形机器人结构设计和柔顺控制。E-mail: 752381147@qq.com

罗力，男，2000 年生，硕士研究生，主要研究方向：仿人机器人新型机构。E-mail: 1075741044@qq.com

吴桥文，男，1999 年生，硕士研究生，主要研究方向：仿人服务机器人多模态行为协调。E-mail: 1293551559@qq.com

《自动化与信息工程》期刊荣获 2025 年度“学术影响力进步期刊”奖

在 2025 年度维普资讯期刊评选中，《自动化与信息工程》期刊荣获“学术影响力进步期刊”奖项！

本次获奖，不仅是对我刊学术实力与行业影响力的高度肯定，更是对期刊主办单位、编委会、全体编辑人员专业坚守、严谨求实、不懈耕耘精神的最佳褒奖。它见证了期刊在传播先进科研成果、引领学科发展、服务学者读者方面所取得的扎实进步！



AUTOMATION & INFORMATION ENGINEERING