

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2514632

一种刚柔耦合结构的欠驱动灵巧手设计与控制研究*

郭皓宇, 刘康恒, 张 军, 宋爱国

(东南大学仪器科学与工程学院 南京 210096)

摘 要:针对全驱动灵巧手结构复杂、驱动单元冗余及柔顺性不足等问题,提出了一种基于刚柔耦合结构的欠驱动灵巧手。依据人手运动特性,采用 3 个电机驱动五指,实现柔顺耦合弯曲及多指协同控制。手指由刚性骨架与柔性关节复合构成,通过绳索模拟肌腱牵引,并在关节处引入扭簧-销结构模拟软组织弹性,使其在抓取过程中可被动适应目标外形并完成顺应回弹。指端及掌面集成阵列触觉传感器,结合电机编码器构建力-位置联合感知系统,实现接触状态、抓取力及关节姿态的实时检测,有效提升环境感知能力与抓握稳定性。整手质量仅为 482 g 且在 16 类代表性抓取任务中,力量型抓取成功率为 82.2%,精确抓取成功率为 46.7%,表现出较强的任务适应能力,并可作为末端执行器完成抓取、搬运与堆叠等操作任务,实现多场景交互。在多物体触觉特征识别实验中,通过阵列数据构建分类模型,对 6 类目标物体实现平均 96.5% 的识别精度,证明其触觉感知的有效性。在恒力抓握及扰动补偿实验中,抓取力波动范围保持在 ± 0.3 N,并可在负载突变后快速恢复稳态,表明控制策略具备良好的稳定性与鲁棒性。研究表明,该灵巧手兼具结构简化、柔顺抓取和多模态感知能力,可满足人机交互与移动作业场景需求,为多模态人机交互及智能抓取系统提供有效方案。

关键词: 刚柔耦合; 欠驱动; 灵巧手; 力-位置联合感知系统

中图分类号: TH13 TP242 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460.40

Design and control of an underactuated dexterous hand with a rigid-flexible coupled structure

Guo Haoyu, Liu Kangheng, Zhang Jun, Song Aiguo

(School of Instrument Science and Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China)

Abstract: To address the structural complexity, actuation redundancy, and insufficient compliance of fully actuated dexterous hands, an underactuated dexterous hand based on a rigid-flexible coupled structure is proposed. According to the motion characteristics of the human hand, three motors are employed to drive five fingers, achieving compliant coupled bending and multi-finger coordinated control. Each finger consists of a composite structure of a rigid skeleton and flexible joints, with cable used to imitate tendon traction, and torsion spring-pin structures introduced at the joints to emulate the elasticity of soft tissues, enabling passive adaptation to the target shape and compliant rebound during grasping. Tactile sensor arrays are integrated on the fingertips and palm, which, together with motor encoders, form a combined force-position perception system capable of real-time detection of contact state, grasping force and joint posture, thereby effectively enhancing environmental perception and grasp stability. The hand weighs only 482 g and demonstrates strong task adaptability, achieving 82.2% success in power grasps and 46.7% in precision grasps across 16 representative tasks, and it can serve as an end-effector to perform grasping, transportation, and stacking operations, enabling interaction in multiple scenarios. In multi-object tactile recognition experiments, the proposed sensing approach achieves an average accuracy of 96.5% for six target objects, validating its effectiveness in tactile perception. During constant-force grasping and disturbance compensation tests, force fluctuation remains within ± 0.3 N and the system rapidly restores stability after sudden load changes, indicating robust and stable control performance. Overall, the proposed dexterous hand achieves simplified structure, compliant grasping, and multimodal sensing capabilities, making it suitable for human-robot interaction and mobile manipulation applications.

Keywords: rigid-flexible coupled; underactuated; dexterous hand; force-position fusion perception system

收稿日期: 2025-10-29 Received Date: 2025-10-29

* 基金项目: 国家自然科学基金项目(62173090)资助

0 引言

在人机协作、康复辅助、服务机器人及精密操作等领域中,仿生灵巧手一直是机器人学的重要研究方向之一^[1]。其中,基于刚性结构的灵巧手发展已经较为成熟^[2]。例如,Ren等^[3]提出的HERI II手采用多连杆刚性结构与差动绳索驱动,实现了稳定的抓取与高负载能力。徐昱琳等^[4]提出的SHU-II五指仿人灵巧手通过肌腱驱动的轻量化设计,实现了高精度抓取与灵巧操作。Min等^[5]提出的基于绳索驱动与刚性连杆耦合的灵巧手,实现了多自由度协调控制与力传递。这些刚性灵巧手在结构可靠性、操作稳定性和控制精度方面均取得了显著成果。然而,刚度特性带来的顺应性不足,使其在与未知或柔性物体抓取时易导致失败^[6]。

为提升环境适应性与交互安全性,近年来研究者引入柔性材料与结构以增强顺应性^[7]。例如,王志恒等^[8]提出的ZJUT hand气动灵巧手实现了轻量化和穿戴性。Zhou等^[9]提出的3D打印柔性灵巧手在结构中嵌入柔性传感,实现了手势间的平滑过渡与抓取质量提升。虽然柔性手在柔软性和轻便性方面具有显著优势,但常受限于驱动与供能系统复杂、体积较大等约束,难以满足便携场景需求。为兼顾结构柔顺性与稳定性,研究者在灵巧手设计中引入刚柔耦合理念^[10]。通过在刚性骨架中嵌入柔性关节或弹性元件^[11],使灵巧手在保持整体承载能力的同时具备局部顺应性,从而在与复杂环境交互时展现出更好的自适应特性。

在灵巧手驱动方式上,传统的全驱动手由于驱动冗余度大、结构复杂以及制造成本高没有被广泛使用^[12]。相比之下,研究者更倾向于采用欠驱动方案,通过减少驱动单元数量来提高结构的紧凑性与可靠性。尤其是将轻质材料与肌腱传动机制^[13]相结合的欠驱动设计,已成为当前功能性灵巧手结构设计的主流方向^[14]。

另一方面,灵巧手不仅需要具备抓握与操作能力,还应具备感知能力以实现环境交互^[15]。人手依托丰富的触觉感知,能够感知接触力与物体姿态,从而完成操作任务^[16]。目前常见的仿生触觉系统常采用电容式、压电式与压阻式传感器^[17],并以阵列化部署在指端或掌面以获取接触力分布与接触质心等信息。为进一步提升感知的可靠性与实时性,研究者提出了力-位置联合感知方案^[18],将触觉传感器与位置传感器相结合,实现对手指接触状态与抓握姿态的动态监测,从而为抓握力控制、柔顺交互及多任务操作提供有效支撑。

综上,本文提出并设计了一种基于刚柔耦合结构的欠驱动灵巧手。该灵巧手将刚性与柔性元件相结合,采用绳索传动模拟肌腱,通过扭簧-销复合关节实现关节软

组织的弹性特性,兼具柔顺弯曲与被动回位功能。指端与掌面集成阵列式薄膜传感器,并与电机编码器的位姿信息融合,构建了力-位置感知系统,实现接触力与姿态的实时检测与反馈控制。通过多类型抓取、末端操作、物体识别及恒力抓握控制实验验证了系统性能。结果表明,该灵巧手在欠驱动结构下能够实现多姿态抓取,具备良好的抓握能力、操作灵活性与稳定性。

1 灵巧手结构设计

1.1 手指结构设计

手部的骨架和关节结构是人手进行多自由度运动的基础,肌腱和韧带结构则是将骨连接在一起的坚韧束带组织,为手部骨架关节提供保护的同时,也带动手部完成各种复杂的动作^[19]。

在前期工作的基础上^[20],本研究设计了基于人手结构的灵巧手指机构。每根手指由3段指节组成,对应掌指关节(metacarpophalangeal joint, MCP)、近侧指间关节(proximal interphalangeal joint, PIP)和远侧指间关节(distal interphalangeal joint, DIP)。采用绳索驱动模拟肌腱牵引,绳索贯穿各指节连接至手背绕盘,实现关节联动弯曲。相邻指节由刚性节段与柔性关节连接,柔性关节由轴承、扭簧和销构成,既保证旋转顺滑,又提供弹性回复力,使手指在外力释放后可自动回位,实现被动伸展。图1展示了所设计灵巧手中食指与拇指的结构。

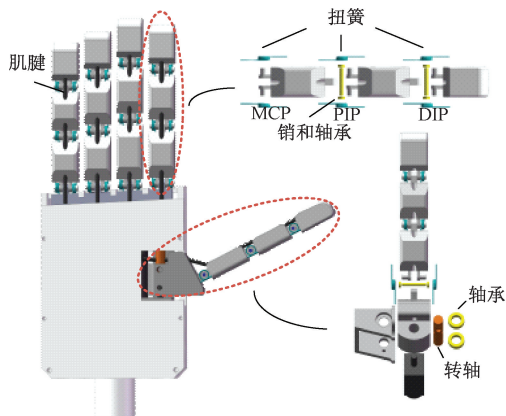


图1 欠驱动灵巧手

Fig. 1 Underactuated dexterous hand

拇指在抓握中承担约50%的运动,对稳定抓取和精细操控具有关键作用^[21]。拇指结构除具备与其他手指相同的基本构成外,还额外引入了一个旋转自由度,用于实现拇指的对掌与环绕动作。其底座通过转轴和轴承与电机出轴相连,轴承结构既保证了动力传递的稳定性,有效减少了摩擦与磨损,使拇指能够实现 $0^{\circ} \sim 90^{\circ}$ 范围运动,从而复现人手中对立特性与空间灵活性。

1.2 整手结构设计

灵巧手共有 16 个关节,其中每个手指包含 3 个串联关节,拇指额外具有 1 个用于旋转自由度。整手由 3 个直流电机驱动,形成一种欠驱动结构,如图 1 所示。手指的 3 个关节由同一条肌腱贯穿连接,使得关节间的运动呈现出耦合特性,从而实现人手的协调弯曲。

除拇指外,其余四指由同一电机驱动,其弯曲运动通过肌腱传动实现。由于各关节间设置有扭簧,关节具有一定弹性,使手指在抓握过程中能够被动适应物体形状,从而形成自适应的手部姿态。手指肌腱自指尖起,依次穿过各关节并经由掌内导向滑轮布置^[22],最终固定于手背处电机-1 的绕盘-1 上。拇指弯曲驱动方式与其他手指类似,其肌腱绕过相应指节与滑轮固定在电机-2 的绕盘-2 上;而拇指的旋转运动则由电机-3 驱动实现对掌运动。灵巧手手掌内部结构如图 2 所示。

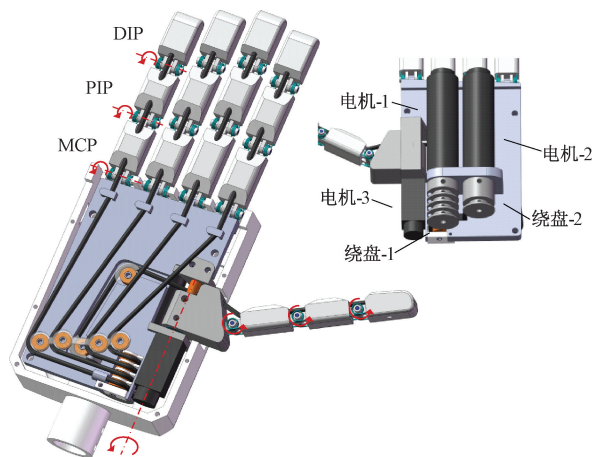


图 2 手掌内部结构

Fig. 2 Internal structure of palm

除绕盘机构采用金属加工外,整手其余结构均采用 3D 打印制造,主要材料为 PETG 与 TPU。PETG 材料用于手指与掌部的刚性骨架结构,保证整体强度与形变稳定性;TPU 材料则应用于柔性关节及缓冲部位,以提升手部的顺应性和抓握过程中的柔顺接触性能。肌腱采用直径为 2 mm 的尼龙绳,确保力传递稳定。整手总重量约为 482 g,在保证结构强度的同时实现了轻量化设计。为验证绕盘机构及指尖柔性关节的受力性能,对其进行了应力学仿真分析,结果如图 3 所示。

2 灵巧手运动学分析

2.1 灵巧手运动学模型

在手指结构设计的基础上,为进一步分析该驱动机制下手指的运动特性,并描述关节角度与指尖末端位姿

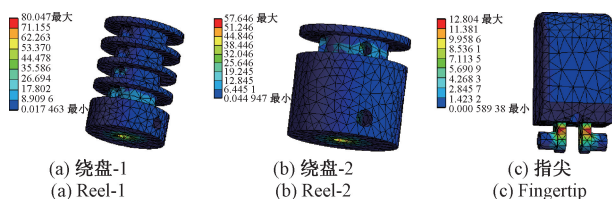


图 3 关键部件应力学测试

Fig. 3 Mechanical stress test of key components

的映射关系,对其运动学进行分析。图 4 展示了单个手指弯曲运动示意图以及几何关系。图 4 中 $L_1 \sim L_3$ 分别表示各个关节的长度, X 表示手指完全伸展时关节间隙的长度, S 表示手指弯曲后关节间隙的弧长, $\theta_1 \sim \theta_3$ 表示各关节间的弯曲角度, ΔL 表示肌腱变化量。关节间的放大图中可以看到, a 是旋转接头和关节边缘处的距离, b 是旋转接头和肌腱间的距离, n 是关节数量。假设各关节转角相等,则单个关节角度 θ_i 可以计算得到,即:

$$\begin{cases} S = X - \frac{\Delta L}{n} \\ S = \theta_i \times \left[\frac{a}{\tan(\theta_i/2)} - b \right] \end{cases} \quad (1)$$

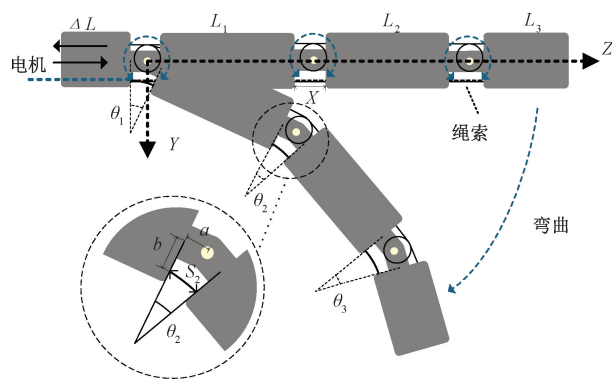


图 4 食指运动学分析

Fig. 4 Kinematic analysis of the index finger

在该驱动下,关节在弯曲过程中呈近似均匀转动特性。基于图 4 中建立的坐标系,指尖末端的位姿表示为:

$$\begin{cases} y_i = \sum_{i=1}^n \left[L_i \times \sin \left(\sum_{j=1}^{j \leq i} \theta_j \right) \right] \\ z_i = \sum_{i=1}^n \left[L_i \times \cos \left(\sum_{j=1}^{j \leq i} \theta_j \right) \right] \end{cases} \quad (2)$$

由此,可推导出末端位姿与关节角度的映射关系。以食指结构弯曲为例,图 5 中展示了各关节在设定坐标系下的分布情况。

在完成手指运动学建模后定义灵巧手坐标系,如图 6 所示。

选取手掌和拇指基座连接处作为基座坐标系 $\{O\}$,并

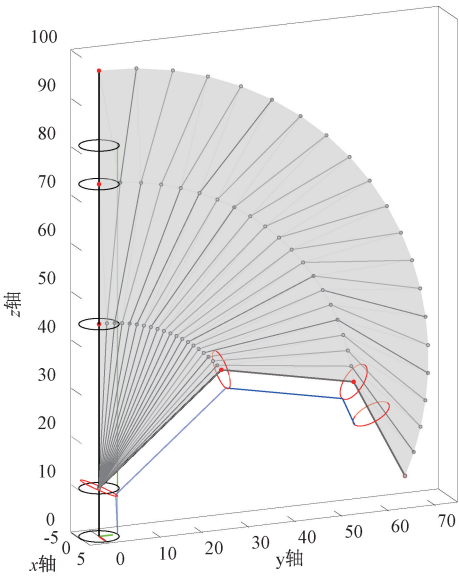


图 5 食指运动轨迹

Fig. 5 Index finger motion trajectory

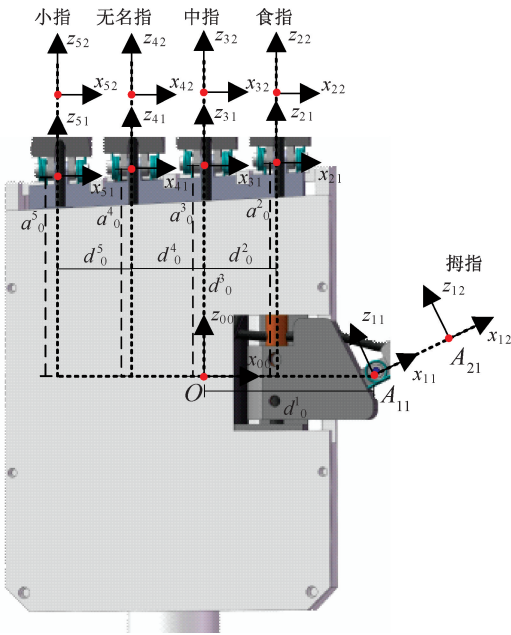


图 6 灵巧手坐标系

Fig. 6 Coordinate system of dexterous hand

在每一指节的末端建立局部坐标系 $\{A_{ij}\}$ (其中 i 表示第 i 根手指, j 表示该手指的第 j 指节末端), 通过建立关节角与位姿之间的齐次变换关系, 可将任意指节末端坐标表示为相对于基座坐标系的齐次坐标, 即:

$${}^0T_i = {}^0T_1T_1^1T_2^1\cdots T_{i-1}^{i-1}T_i^{i-1}T_i^i \quad (3)$$

式中: T_i^{i-1} 为第 i 根手指中第 k 个关节的齐次变换矩阵, 即:

$$T_j^{j-1} = \begin{bmatrix} R_i(\theta_i) & p_i \\ 0_{1 \times 3} & 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中: $R_i(\theta_i)$ 由第 i 关节的角度决定; 位移项 p_i 为由结构几何参数给定的平移向量, 由水平偏移量 d_0^i 与竖直偏移量 a_j^i 组成。

2.2 灵巧手的运动学仿真

根据齐次变换模型, 计算灵巧手各手指指节末端运动点相对于手掌坐标系的位置坐标, 从而进一步获得手指的运动范围与指尖轨迹。表 1 给出了五指的各指节长度参数。各手指的关节转动范围均为 $0^\circ \sim 90^\circ$, 拇指的旋转关节也在同一角度范围, 实现对掌控制。

表 1 手指指节参数

Table 1 Finger joint parameters (mm)

手指	a_0^i	a_1^i	a_2^i	a_3^i	d_0^i
拇指	0	27	25	23.0	36
食指	43	29	28	23.5	13
中指	42	34	29	23.5	0
无名指	41	30	29	23.5	13
小指	40	27	25	23.0	13

在三维空间中绘制了整只手的运动轨迹, 如图 7 所示。为进一步分析拇指与其他手指之间的对掌运动特性, 将整体运动轨迹投影到 YOZ 平面, 以直观展示对掌运动空间。

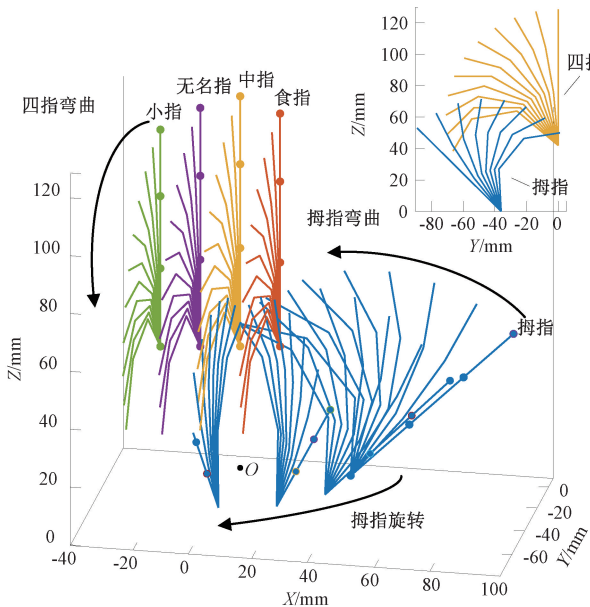


图 7 灵巧手空间运动轨迹

Fig. 7 Spatial movement trajectory of dexterous hand

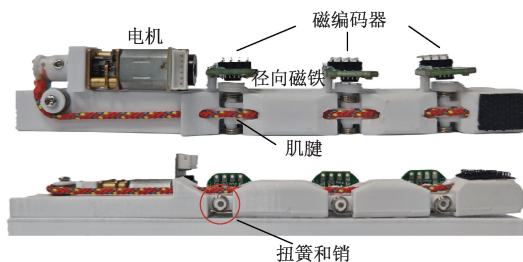
为实现对灵巧手关节角度的位置检测, 建立电机编码器值与关节实际转角之间的对应关系。因此对单指结构进行了改进设计, 在每个关节连接销的上方安装了

一个径向磁铁,该磁铁会随关节转动而同步旋转磁铁上方布置了与其中心轴线对齐的磁编码器,通过检测磁铁的旋转角度可获得关节的实际转角,如图8(a)所示。结合编码器输出与驱动机构的几何关系,可进一步计算出肌腱的拉伸与收缩量,从而实现关节角度的实时测量与标定。建立了编码器输出和肌腱变化量的关系,即:

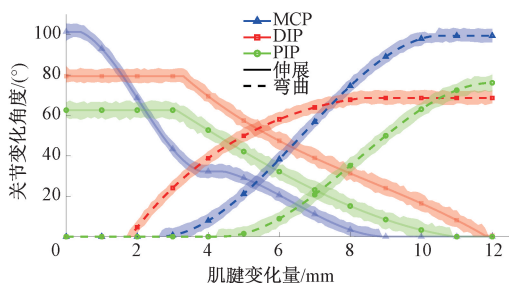
$$\Delta L = r \times \theta(E, N) \quad (5)$$

式中: ΔL 表示肌腱变化量; r 为绕盘半径; θ 由编码器输出脉冲数 E 以及每转对应的脉冲数 N 决定。

如图8(b)所示,绘制了手指在弯曲与伸展过程中的关节角度与肌腱变化量对应曲线。可建立肌腱变化量与关节角度之间的关系,为灵巧手关节的位置控制提供了数据支撑。其中3个关节的角度变化范围为:MCP: $0^\circ \sim 102^\circ$,DIP: $0^\circ \sim 87^\circ$,PIP: $0^\circ \sim 67^\circ$ 。



(a) 测试机构
(a) Testing institution



(b) 关节角度与肌腱变化量关系
(b) Relationship between joint angles and tendon changes

图8 关节角度与肌腱位移实验

Fig. 8 Joint angle-tendon displacement experiment.

为验证手指结构的耐久性,对单指进行了200次连续拉伸-弯曲测试,并同步采集编码器输出与实际角度,以两者的差值作为评估指标。弯曲结构误差始终保持在 $\pm 1.0^\circ$ 的范围,且未出现明显的累计偏差,验证结构在重复运动下具有良好的稳定性。

3 力与位置感知系统设计

3.1 阵列式触觉传感器原理及设计

力触觉是人手在抓取与操作物体过程中至关重要的感知形式,具备良好的力触觉是实现稳定抓取与柔顺控制的基本条件^[23]。为模拟人手的触觉特性,在前期研究

的基础上^[24],基于压阻导电材料设计了一种多层柔性阵列式触觉传感器。其结构自上而下包括保护层、连接层、传导层和感应层:保护层采用聚酰亚胺材料,具备优异的机械与耐热性能;传导层由沿 X 、 Y 方向正交排布的不锈钢纤维电极组成,实现信号传输;感应层为压敏导电材料,在受力时微观导电通道形变,引起电阻变化并产生压阻效应。

为实现阵列触觉信号的有序采集与测量,传感系统采用行列片选方式进行阵列控制,如图9所示。上下电极按矩阵形式排列,经模拟开关依次选通行、列节点,实现各感测单元的电压读取。

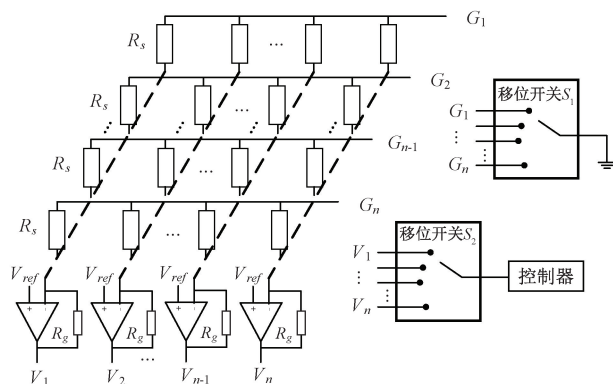
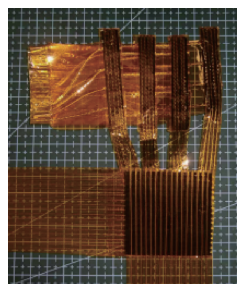


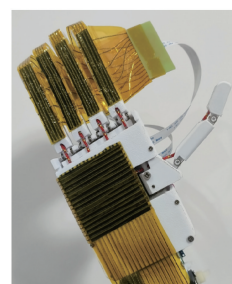
图9 传感器阵列测量电路

Fig. 9 Sensor array measurement circuit

在力触觉灵巧手的集成设计中,食指、中指、无名指及小指的3个指节处分别布设 4×4 电极阵列,用于感知指端和指节的接触力分布,并在灵巧手掌心处布设有 16×16 电极阵列,可检测大面积接触力并计算力中心。图10展示了具有力触觉的灵巧手。



(a) 阵列式传感器
(a) Array sensor



(b) 力触觉灵巧手
(b) Tactile dexterous hand

图10 具有力触觉的灵巧手

Fig. 10 A dexterous hand with sense of touch

为建立触觉传感器输出电压与接触压力之间的映射关系,对阵列式力触觉传感器进行了静态标定实验。实验装置如图11(a)所示,采用压力校准平台逐级加载不同大小的力,并同步记录阵列各单元的电压信号。由于

触点的受力区域为 2×2 的阵列单元,在数据分析中对该区域进行可视化处理。根据采集的数据绘制压力分布热图,如图 11(b)所示。实验表明,该传感器在 $0 \sim 10 \text{ N}$ 范围输出稳定,响应线性良好,能够建立输出电压与接触力之间的映射。

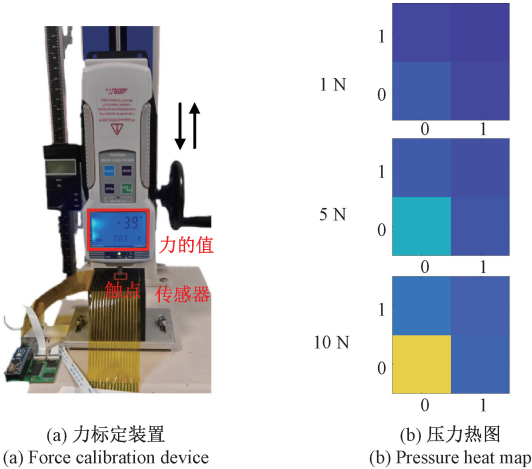


图 11 不同力对应的压力热图

Fig. 11 Pressure heat maps corresponding to different forces

3.2 力-位置联合控制方案

为实现抓取过程的稳定性与柔顺性,设计了基于力与位置信息融合的控制方案,如图 12 所示。系统通过电机编码器实时获取关节角度用于位置控制,并利用触觉阵列传感器检测指尖与物体的接触压力,从而实现抓取力的实时感知与调节。

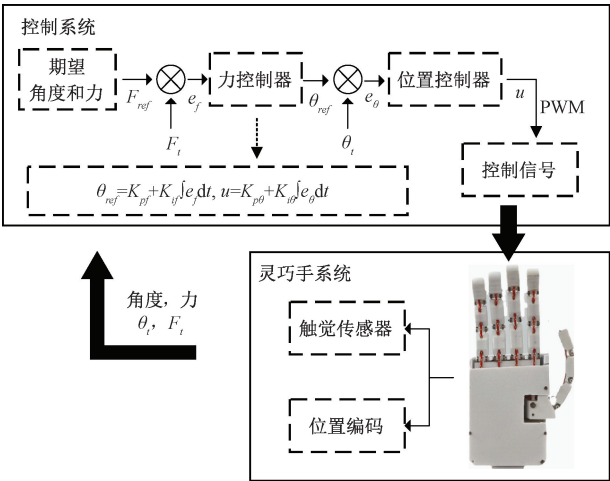


图 12 力-位置控制方案

Fig. 12 Force-position control scheme

控制系统采用双闭环 PI 控制策略,其中外环为力控制环,根据期望力 F_{ref} 与实际接触力 F_t 的误差 e_f ,经力控制器输出期望位置指令 θ_{ref} ,从而实现对手指接触压力的

调节;内环为位置控制环,以期望位置 θ_{ref} 与实际关节位置 θ_i 的误差 e_θ 为输入,通过位置控制器输出驱动信号,实现位置跟踪与力反馈。当检测到接触力超过设定阈值时,力控制环减小 θ_{ref} 以降低驱动力,实现手指的柔顺调节;而当接触力不足时,系统则增加 θ_{ref} ,以增强抓取力并保持稳定持物。通过力与位置信息的协同调节,可以实现对抓取力与姿态的动态控制,为灵巧手抓取提供了有效控制策略。

为保证力-位置控制策略在抓取过程中的稳定性,本研究对控制器进行整定。首先在无接触状态下,通过阶跃角度调节位置环增益,使其获得快速且稳定的跟踪性能。随后在位置环参数固定的基础上,在实际接触条件下进行阶跃力测试,通过调整外环增益改善力控制的响应速度和稳态误差。控制器参数及其动态性能指标如表 2 所示。

表 2 控制器参数与性能指标

Table 2 Controller parameters and performance indicators

控制环路	控制器参数		性能指标	
	参数	数值	指标	数值
位置环 (内环)	$K_{p\theta}$	0.85	稳定时间/s	0.12
	$K_{i\theta}$	12.00	稳态误差/(°)	± 0.30
力环 (内环)	K_{pf}	0.65	稳定时间/s	0.18
	K_{if}	9.50	稳态误差/N	± 0.12

4 实验研究

4.1 多类型物体抓取实验

为评估所提出的灵巧手在执行典型抓取动作的能力,采用 Cutkosky 分类法^[25]对手势类型进行分析。该方法是公认的抓取模式划分标准,将 16 种代表性的人类抓取方式分为力量抓取与精确抓取。图 13 展示了系统在不同抓取任务下的手势分类结果。结果表明,灵巧手能够完成多种类型的抓取动作,并在不同物体尺寸与形状条件下表现出较好的适应性。这主要得益于其欠驱动指结构与弹性元件柔顺设计,使手指能够自适应地抓取目标物体,从而提升稳定性。

为衡量该机构的抓取性能,对同一物体重复抓取的成功率进行了统计分析。每种物体的抓取实验重复 5 次,其结果如图 14 所示。灵巧手在力量型抓取任务中表现稳定,平均成功率为 82.2%;而在精确抓取任务中,由于四指共用单电机驱动的欠驱动结构限制了独立调节能力,成功率为 46.7%。但是尽管驱动单元数量有限,所设计灵巧手结构仍能够覆盖大多数日常抓取任务需求。

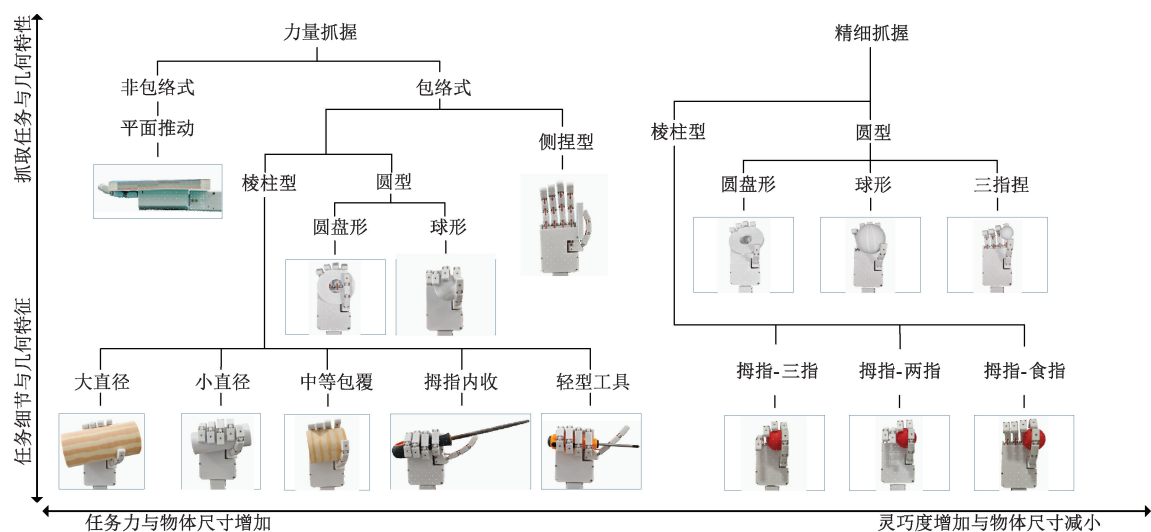


图 13 不同抓取任务的手势分类

Fig. 13 Gesture classification for different grasping tasks

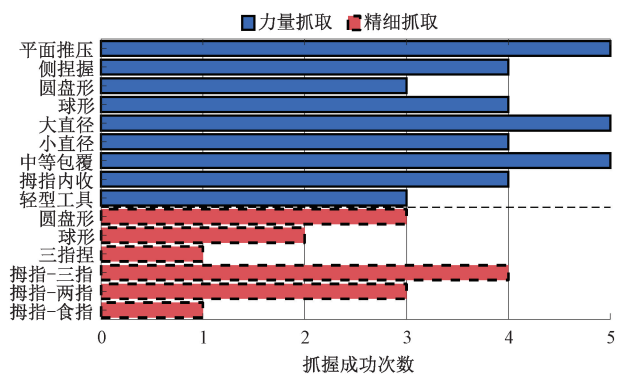


图 14 抓握成功次数统计

Fig. 14 Statistics of successful grabs

为进一步说明欠驱动设计在驱动规模与精细操作能力间的差异,表 3 中将本结构与典型灵巧手进行了对比。当多指由较少的驱动单元共同驱动时,耦合运动会限制单指的调节能力,从而导致精细抓握成功率较低,但这类结构在力量型抓取中仍保持良好的稳定性,同时具有整体重量更轻、驱动链简化的优势。

表 3 不同灵巧手性能参数对比

Table 3 Comparison of performance parameters among different dexterous hands

研究对象	重量/g	驱动	力量/精细抓握	力精度/N
本文	482	3	82.2%/46.7%	0.300
文献[4]	478	3	最大力为 31 N	—
文献[14]	~500	1	80%/<40%	—
文献[26]	546	6	>90%/63.3%	—
文献[27]	1 000	6	抓取重量 340 g	—
文献[28]	693	10	—	0.300
文献[29]	390	3	—	0.455
文献[30]	490	6	—	0.200

此外,为验证灵巧手在操作任务中的综合能力,设计了不同末端执行任务。实验包括抓取、放置与堆叠等典型操作任务,用以评估灵巧手在任务下姿态保持与操作稳定性。灵巧手作为执行器安装于机械手臂末端,机械手臂通过关节角度控制,使灵巧手末端移动至目标物体上方或侧方位置。随后,通过对灵巧手各关节角度的控制,以实现不同类型操作任务。操作过程如图 15 所示,对应任务为:

1) 图 15(a)灵巧手抓取半径为 2 cm 的圆柱形物体,沿水平方向抬升后将其放回原位;

2) 图 15(b)灵巧手抓取边长 3 cm 的立方体并将其移动放入纸杯中;

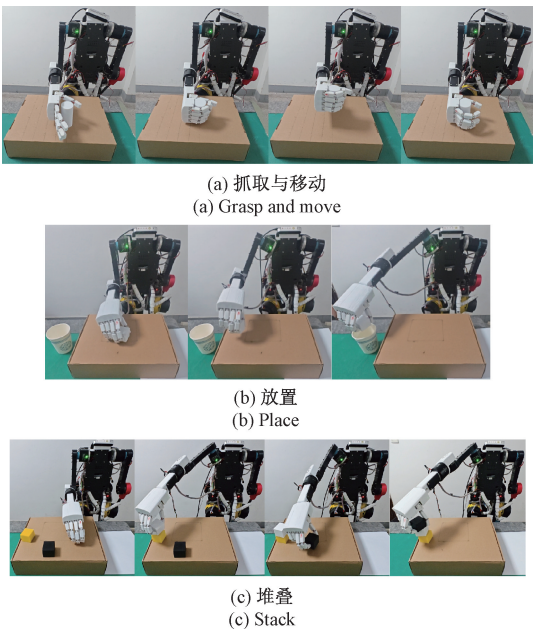


图 15 灵巧手末端操作任务

Fig. 15 Manipulation task performed by the dexterous hand

3)图 15(c)灵巧手依次抓取 3 个边长 3 cm 彩色立方体块,并按照预定顺序在指定区域完成稳定堆叠。结果表明,所设计灵巧手能够完成不同末端任务,在抓取、搬运与堆叠实验中均表现出良好的操作能力。

4.2 物体特征识别实验

在完成抓取与操作任务验证后,进一步为评估力触觉传感器在不同接触情形下的响应特性,开展了多物体抓取触觉采集实验。实验选取了 6 种常见物体,包括塑料瓶、保温杯、易拉罐、卷纸、网球和长方体物件,它们在几何外形、表面摩擦特性及材料刚度方面具有显著差异,能够代表典型的生活抓取场景,表 4 中展示了不同物体对应特征。

通过对比不同物体的触觉分布特征,反映灵巧手在不同物体交互中对物体形状的感知能力。为提高结果的

表 4 不同物体对应特征			
Table 4 Characteristics of different objects			
物体	形状	质地	重量/g
塑料瓶	圆柱	较硬	60
保温杯	圆柱	硬	450
易拉罐	圆柱	硬	330
卷纸	圆柱	较软	80
长方体	立方体	硬	200
网球	球形	较硬	55

可靠性,每种物体进行了 5 次抓取实验,并对各次实验的输出结果平均以获得最终分布图。图 16 展示了灵巧手抓取 6 种不同物体时力触觉阵列的分布结果。

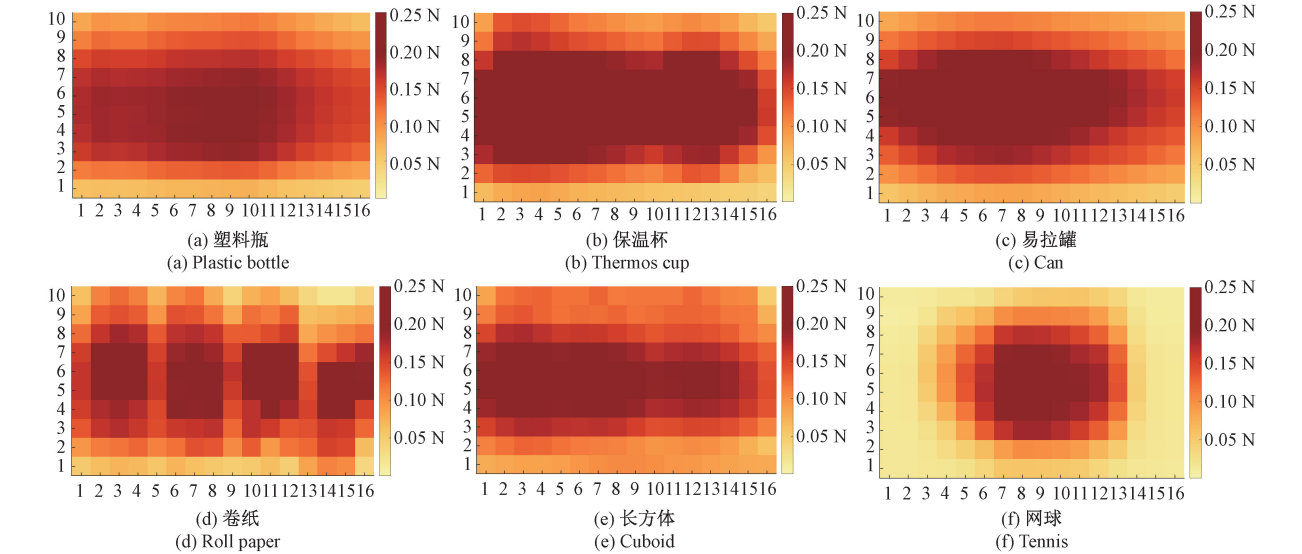


图 16 抓握不同物体时产生的力触觉阵列

Fig. 16 Tactile array distribution during grasping different objects

实验结果表明,触觉阵列在不同物体抓取过程中有差异化的响应特征。对于圆柱形物体,阵列输出集中且随物体重量幅值较大;而柔性物体在抓取过程中,由于四指同时与物体接触,阵列上呈现出明显的四指按压痕迹;而对于球形物体,触觉阵列输出呈环形分布。

为评估阵列式触觉传感器在物体识别中的判别能力,设计了基于力分布图的分类实验。针对 6 种物体在不同按压程度下进行触觉数据采集,每种物体共采集 25 次抓取测试,共获得 150 组数据样本。数据集按照 8:2 的比例划分为训练集与测试集。采用支持向量机 (support vector machine, SVM) 模型对热力图特征进行分类识别,并通过数据增强与 5 折交叉验证评估模型性能。结果表明,模型在不同数据划分下保持较高的分类率,平均分类准确率为 96.5%,其分类结果的混淆矩阵如图 17

所示,验证了阵列式触觉传感数据在物体识别任务中的有效性。

4.3 恒定力抓握实验

为进一步评估灵巧手在不同力条件下的协调感知能力,设计了恒定指尖抓握力实验。实验分别设定恒定抓握力为 2、5 和 10 N,通过调节控制信号实现力闭环控制。选用纸杯为实验对象,以便观察抓取过程中的接触变化。每个手指端部均集成 4×4 阵列式力触觉传感器单元,用于实时检测接触压力分布。由于实际受力区域主要集中在传感阵列中央区域,为避免边界单元未受力造成的数据干扰,数据处理时选取有效接触区域 3×3 矩阵单元,并对其输出电压信号进行平均处理,以获得该手指的等效指尖力。图 18 展示了不同握力条件下的抓取姿态以及纸杯形变状态。

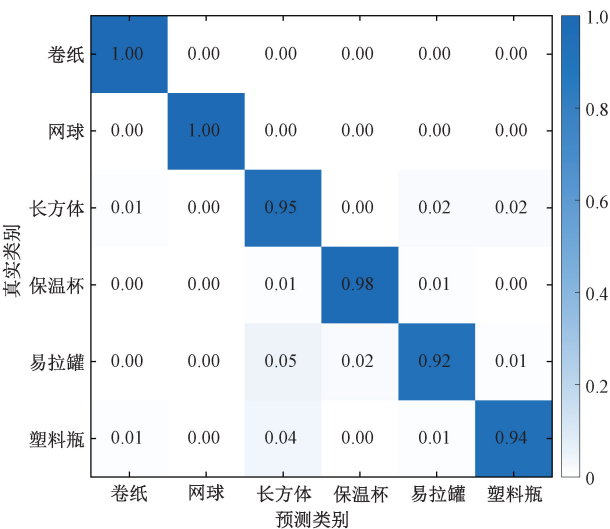


图 17 分类结果的混淆矩阵

Fig. 17 Confusion matrix for classification results

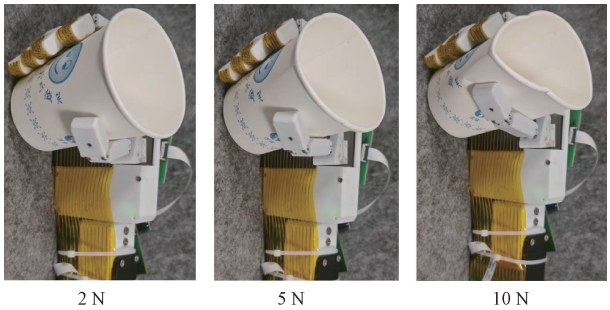


图 18 不同抓握下灵巧手姿态

Fig. 18 Dexterous hand postures under different grasping forces

当手指首次达到设定的抓握力后,将该力保持一段时间,并记录其在稳定施力条件下的运动状态。图 19 展示了不同目标抓握力下手指握力与关节角度的随时间变化曲线,其中误差带表示多次实验中抓握力的变化范围。可以看出,尽管触觉传感器的输出随时间存在一定波动,但误差带波动均 $<\pm 0.3\text{ N}$,整体抓握力仍稳定维持在预设值附近。结果表明,所设计的控制策略能够实现恒定抓握力的稳定调节。

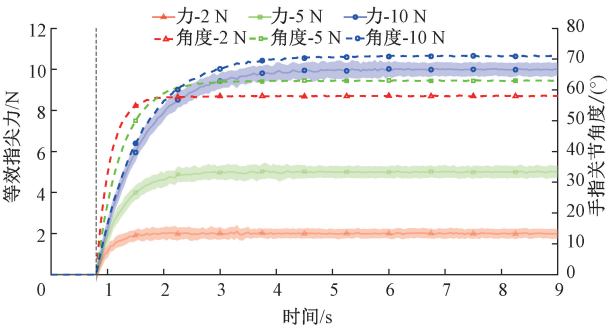


图 19 抓握力以及关节角度的变化曲线

Fig. 19 The variation curves of grasping forces and joint angles

为进一步验证恒力抓握控制在不同负载及外界扰动下的鲁棒性,在纸杯恒力抓取的基础上引入载荷突增扰动。在恒力为 5 N 的情况下进行实验,在不同时间段($t_1=2\text{ s}, t_2=5\text{ s}$)分别向纸杯中放入 100 g 和 200 g 的砝码,图 20(a)展示了不同载荷下的灵巧手姿态,且纸杯均未发生明显滑移或掉落。图 20(b)展示了在加入砝码前后灵巧手抓握力和姿态的变化,在 t_1 和 t_2 时刻增加砝码后,抓取力均出现短暂的向下突变,随后在约 0.5 s 内重新回到 5 N 附近的稳态区间。两次载荷突增后,关节弯曲角度均表现出增加,并在新的负载水平下保持相对稳定。说明控制器通过驱动手指闭合来补偿载荷变化并恢复目标抓握力。结果表明,在不同负载及外界扰动情况下,系统能够抑制力的瞬时波动并重新建立稳定抓取。

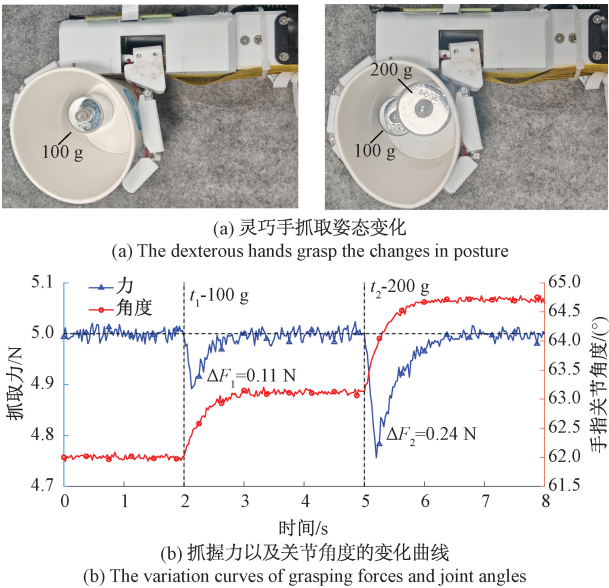


图 20 扰动下的抓取变化

Fig. 20 Grasping changes under disturbance

5 结 论

本文提出了一种基于刚柔耦合结构的欠驱动灵巧手,并完成了从结构设计、感知系统构建到实验验证的研究。该灵巧手共含 16 个关节,其中拇指 4 个关节,其余四指各 3 个关节,采用刚柔耦合的欠驱动结构设计。通过在关节处引入扭簧-销机构,使灵巧手在有限驱动条件下具备较强的顺应性与自适应能力。系统集成阵列式压阻触觉传感器与编码器,构建力-位置感知与反馈控制系统。通过多类型抓取与操作实验验证,灵巧手在多姿态抓取、物体识别及力控调节中表现出良好的稳定性与柔顺性,能够执行多种操作任务。

然而,受限于四指共用单驱动单元的欠驱动结构,灵巧手在高精度抓取场景中的成功率相对较低。后续研究中结合人手的自然控制特征,对驱动系统进行了分组设计,将不同手指组合由独立驱动单元控制,以在保持系统紧凑性与轻量化的同时,部分恢复指间的独立控制能力,从而提高精细抓取的精度。本研究为欠驱动灵巧手的结构简化与功能集成提供了一种有效设计思路,为人机交互、服务机器人及多模态操作等领域的灵巧操作系统研发提供了新的技术路径与实验依据。

参考文献

- [1] YANG B CH, JIANG L, BAO G J, et al. Co-optimization of robotic design and skill inspired by human hand evolution[J]. *Bioinspiration & Biomimetics*, 2022, 18(1): 016002.
- [2] ZHANG R, NING M, WANG Y Q, et al. Design and dimension optimization of rigid-soft hand function rehabilitation robots[J]. *Machines*, 2025, 13(4): 311.
- [3] REN Z Y, KASHIRI N, ZHOU CH X, et al. HERI II: A robust and flexible robotic hand based on modular finger design and under actuation principles[C]. *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, 2018: 1449-1455.
- [4] 徐昱琳, 徐粟轩, 徐逍, 等. SHU-II 五指仿人灵巧手的运动学及抓取分析[J]. *仪器仪表学报*, 2018, 39(9): 30-39.
XU Y L, XU S X, XU X, et al. Kinematics and grasping analysis of SHU-II five fingers humanoid dexterous hand[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2018, 39(9): 30-39.
- [5] MIN S, YI S. Development of cable-driven anthropomorphic robot hand[J]. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 2021, 6(2): 1176-1183.
- [6] WANG T L, JIAO W H, SUN ZH X, et al. Design and gesture optimization of a soft-rigid robotic hand for adaptive grasping[J]. *Soft Robotics*, 2023, 10(3): 580-589.
- [7] 刘伟, 肖钊, 瞿寅朋, 等. 机器人灵巧手研究综述[J]. *机械传动*, 2024, 48(9): 167-176.
LIU W, XIAO ZH, QU Y P, et al. A review of research on robotic dexterous hands[J]. *Journal of Mechanical Transmission*, 2024, 48(9): 167-176.
- [8] 王志恒, 钱少明, 杨庆华, 等. 气动机器人多指灵巧手——ZJUT Hand[J]. *机器人*, 2012, 34(2): 223-230.
WANG ZH H, QIAN SH M, YANG Q H, et al. Pneumatic robot multi-fingered dexterous hand-ZJUT Hand[J]. *Robot*, 2012, 34(2): 223-230.
- [9] ZHOU H, TAWK C, ALICI G. A 3D printed soft robotic hand with embedded soft sensors for direct transition between hand gestures and improved grasping quality and diversity[J]. *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*, 2022, 30: 550-558.
- [10] ZHOU P W, ZHANG N B, GU G Y. A biomimetic soft-rigid hybrid finger with autonomous lateral stiffness enhancement[J]. *Advanced Intelligent Systems*, 2022, 4(12): 2200170.
- [11] 周敬淞, 张军, 肖毅, 等. 基于仿蟹刚柔耦合机构的搜救机器人设计[J]. *仪器仪表学报*, 2023, 44(6): 11-20.
ZHOU J S, ZHANG J, XIAO Y, et al. Design of a search and rescue robot with crab-inspired rigid-flexible coupling mechanisms[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2023, 44(6): 11-20.
- [12] MARTIN J, GROSSARD M. Design of a fully modular and backdrivable dexterous hand[J]. *The International Journal of Robotics Research*, 2014, 33(5): 783-798.
- [13] 齐飞, 张恒, 孙杰, 等. 考虑驱动耦合的绳驱动外肢体机器人运动建模及控制研究[J]. *仪器仪表学报*, 2023, 44(6): 21-34.
QI F, ZHANG H, SUN J, et al. Modeling and control of cable-driven supernumerary robotic limbs considering drive coupling[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2023, 44(6): 21-34.
- [14] LI H R, FORD C J, BIANCHI M, et al. BRL/Pisa/IIT SoftHand: A low-cost, 3D-printed, underactuated, tendon-driven hand with soft and adaptive synergies[J]. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 2022, 7(4): 8745-8751.
- [15] 李泳耀, 江磊, 刘宇飞, 等. 仿人灵巧手的稳定抓取方法研究综述[J]. *兵工学报*, 2023, 44(11): 3237-3252.
LI Y Y, JIANG L, LIU Y F, et al. A review of stable grasping methods for humanoid dexterous hands[J]. *Acta Armamentarii*, 2023, 44(11): 3237-3252.
- [16] 孙世政, 何江, 秦鸿宇, 等. 基于 FBG 的机器手指尖触觉感知研究[J]. *仪器仪表学报*, 2024, 45(5): 72-81.
SUN SH ZH, HE J, QIN H Y, et al. Research on tactile perception of machine fingertip based on FBG[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2024, 45(5): 72-81.
- [17] 宋爱国. 机器人触觉传感器发展概述[J]. *测控技术*, 2020, 39(5): 2-8.
SONG AI G. Overview of the development of robot tactile sensor[J]. *Measurement & Control Technology*, 2020,

- 39(5): 2-8.
- [18] HU H D, XIE Z W, LIU Y W, et al. Force sensing strategy for the antagonistic variable stiffness hand[J]. IEEE Sensors Journal, 2024, 24(21): 34100-34106.
- [19] XU ZH, TODOROV E. Design of a highly biomimetic anthropomorphic robotic hand towards artificial limb regeneration[C]. IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2016: 3485-3492.
- [20] LIU Q, ZHANG J, LI X Y, et al. A rigid and flexible structures coupled underactuated hand[C]. IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics, 2022: 1587-1592.
- [21] FICUCIELLO F. Synergy-based control of underactuated anthropomorphic hands[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2018, 15(2): 1144-1152.
- [22] LIU H, XU K, SICILIANO B, et al. The MERO hand: A mechanically robust anthropomorphic prosthetic hand using novel compliant rolling contact joint[C]. IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics, 2019: 126-132.
- [23] 周聪, 刘嘉瑞, 孙亚强, 等. 基于触觉传感器阵列的机械手抓取分类方法研究[J]. 机电工程技术, 2023, 52(7): 34-38.
- ZHOU C, LIU J R, SUN Y Q, et al. Research on classification method of manipulator grasp based on tactile sensor array[J]. Mechanical & Electrical Engineering Technology, 2023, 52(7): 34-38.
- [24] LIU K H, NIU Z R, HE J W, et al. Tactile perception and object grasping of a dexterous hand in a humanoid robot[C]. 2025 5th International Conference on Robotics and Control Engineering, 2025: 36-43.
- [25] FEIX T, ROMERO J, SCHMIEDMAYER H B, et al. The GRASP taxonomy of human grasp types[J]. IEEE Transactions on Human-Machine Systems, 2015, 46(1): 66-77.
- [26] LIOW L, CLARK A B, ROJAS N. OLYMPIC: A modular, tendon-driven prosthetic hand with novel finger and wrist coupling mechanisms[J]. IEEE Robotics and Automation Letters, 2019, 5(2): 299-306.
- [27] CONTROZZI M, CLEMENTE F, BARONE D, et al. The SSSA-MyHand: A dexterous lightweight myoelectric hand prosthesis[J]. IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering, 2016, 25(5): 459-468.
- [28] WU L H, WU Q C. An adaptive grasping multi-degree-

of-freedom prosthetic hand with a rigid-flexible coupling Structure[J]. Sensors, 2025, 25(19): 6034.

- [29] KIM H B, HAM B I, KIM K S. A miniature high-resolution tension sensor based on a photo-reflector for robotic hands and grippers[J]. IEEE Sensors Journal, 2025, 25(20): 38916-38924.
- [30] CHENG M, JIANG L, FAN SH W, et al. Development of a multisensory underactuated prosthetic hand with fully integrated electronics[J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2022, 28(2): 1187-1198.

作者简介



郭皓宇, 2023 年于江南大学获得学士学位, 现为东南大学硕士研究生, 主要研究方向为康复机器人。

E-mail: sa. yang@ seu. edu. cn

Guo Haoyu received his B. Sc. degree from Jiangnan University in 2023. He is currently a master student at Southeast University. His main research interest is bio-inspired robotics.



张军 (通信作者), 2008 年于南京理工大学获得学士学位, 2013 年于东南大学获得博士学位, 现为东南大学教授, 主要研究方向为仿生机器人、康复机器人、深空探测机器人和医疗机器人。

E-mail: j. zhang@ seu. edu. cn

Zhang Jun (Corresponding author) received his B. Sc. degree from Nanjing University of Science and Technology in 2008, and his Ph. D. degree from Southeast University in 2013. He is currently a professor at Southeast University. His main research interests include bio-inspired robotics, rehabilitation robotics, space robotics, and medical robotics.



宋爱国, 分别在 1990 年和 1993 年于南京航空航天大学获得学士学位和硕士学位, 1996 年于东南大学获得博士学位, 现为东南大学教授、博士生导师, 主要研究方向为机器人传感与控制技术、信号处理、遥操作技术。

E-mail: a. g. song@ seu. edu. cn

Song Aiguo received his B. Sc. and M. Sc. degrees both from Nanjing University of Aeronautics and Astronautics in 1990 and 1993, respectively, and his Ph. D. degree from Southeast University in 1996. He is currently a professor and a Ph. D. advisor at Southeast University. His main research interests include robotic sensor and control, signal processing, teleoperation.