

DOI:10.11784/tdxbz202502012

变刚度仿人灵巧手的设计与建模

康荣杰^{1,2}, 傅云龙^{1,3}, 杨尚奎¹, 李晨宁¹, 李 岩¹

(1. 天津大学机械工程学院, 天津 300350; 2. 天津大学机构理论与装备设计教育部重点实验室, 天津 300350;

3. 沈阳飞机工业(集团)有限公司, 沈阳 110850)

摘要: 本文提出了一种具有触觉传感的变刚度灵巧手, 旨在提升灵巧手在复杂操作中的适应性和精度。灵巧手采用的刚柔混合设计结合了传统刚性和新型柔性的优点, 主要体现在刚性手掌和连续体手指上, 变刚度设计采用悬臂梁支点变化的变刚度单元来实现灵巧手在不同任务中的刚度调节, 并在指尖加入了触觉传感系统。其次, 进行了理论建模, 具体包括手指运动学模型、手掌运动学模型以及变刚度单元到连续体手指的刚度映射模型, 为灵巧手的运动控制和刚度调节提供了理论支持。然后, 根据手指和手掌的运动学模型绘制了灵巧手的工作空间, 计算出了灵巧手的弯曲角度范围和侧摆角度范围, 与人手形成对比, 并进行了刚度映射模型的仿真, 分析了影响手指刚度的几个因素。最后, 基于以上的设计与分析, 搭建了灵巧手样机, 并通过实验测试样机的变刚度驱动器性能、手指运动学性能、触觉传感器功能以及刚度映射模型的有效性, 从而验证了灵巧手在复杂任务中的运动灵活性和刚度适应性。研究结果表明: 该灵巧手具有刚性和柔性的优点, 能够通过触觉传感系统提供力反馈, 变刚度功能也显著提高了其在不同任务场景下的操作能力, 所提出的刚度映射模型能够精准控制手指的刚度, 对灵巧手的环境适应性和人机交互安全性具有重要意义。

关键词: 灵巧手; 刚柔混合设计; 变刚度; 触觉传感

中图分类号: TH128

文献标志码: A

文章编号: 0493-2137(2026)07-0677-12

Design and Modeling of Variable Stiffness Humanoid Dexterous Hand

Kang Rongjie^{1,2}, Fu Yunlong^{1,3}, Yang Shangkuai¹, Li Chenning¹, Li Yan¹

(1. School of Mechanical Engineering, Tianjin University, Tianjin 300350, China;

2. Key Laboratory of Mechanism Theory and Equipment Design of Ministry of Education, Tianjin University,

Tianjin 300350, China; 3. Shenyang Aircraft Corporation, Shenyang 110850, China)

Abstract: A variable stiffness dexterous hand with tactile sensing was proposed to enhance operational adaptability and accuracy in complex tasks. Adopting a rigid-flexible hybrid design (specifically a rigid palm and continuous finger), the dexterous hand combined the benefits of traditional rigidity and modern flexibility. The variable stiffness design employed a cantilever beam fulcrum unit to actively adjust the stiffness of the hand for diverse tasks. Additionally, a tactile sensing system was integrated into the fingertip. Theoretical models, including finger kinematics, palm kinematics and stiffness mapping models, were developed, connecting the variable stiffness unit to the continuum finger. This offered the theoretical support for motion control and stiffness adjustment. Next, the workspace of the hand was defined based on the finger and palm kinematic models, after which the ranges of its bending and side swing angles were calculated. Further, the stiffness mapping model was simulated, compared with the human hand, to analyze several factors affecting finger stiffness. Finally, a prototype hand was built based on the above design and analysis, and the performances of the variable stiffness actuator, finger kinematics, tactile sensor-function, and stiffness mapping models of this prototype were experimentally evaluated, ultimately verifying the

收稿日期: 2025-02-15; 修回日期: 2025-06-23.

作者简介: 康荣杰 (1981—), 男, 博士, 教授.

通信作者: 康荣杰, rjkang@tju.edu.cn.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (52375023).

Supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 52375023).

flexibility and stiffness adaptabilities of the hand in complex tasks. The results confirmed that the dexterous hand exhibited rigidity and flexibility advantages and could provide force feedback through its tactile sensing system. Further, its variable stiffness function significantly improved its operation ability in diverse task scenarios. Overall, the proposed stiffness mapping model accurately controlled finger stiffness, which was crucial for the environmental adaptability and human-computer interaction safety of dexterous hands.

Keywords: dexterous hand; rigid-flexible hybrid design; variable stiffness; tactile sensing

随着机器人技术的快速发展,灵巧手作为实现人机交互和复杂任务操作的关键器件,得到了广泛关注^[1]. 在各种应用场景中,灵巧手的性能直接影响机器人系统的灵活性和智能化水平. 目前,灵巧手的研究主要分为刚性灵巧手和柔性灵巧手两大类.

刚性灵巧手^[2-3]通常采用高强度材料和复杂机械结构,具有较高的抓取力和精准的运动控制能力. 这类灵巧手在工业制造、自动化装配等场景中得到了广泛应用. 然而,刚性灵巧手也存在一些显著不足,例如结构复杂、成本较高以及在接触柔软物体或非结构化环境时适应性较差,容易对物体表面造成损伤. 此外,刚性灵巧手通常依赖外部传感器进行力反馈,缺乏对环境的柔性感知能力.

相比之下,柔性灵巧手^[4-5]采用柔性材料与结构设计,能够在复杂、未知的环境中表现出更强的适应能力,同时对物体表面友好,降低了损伤风险. 这种灵巧手在服务机器人、医疗康复等领域展现出了巨大的潜力. 然而,柔性灵巧手的运动精度和抓取力较低,在完成高精度任务时存在明显局限性^[6]. 此外,由于柔性材料的非线性特性,其运动控制和力反馈的精确建模较为困难.

针对刚性灵巧手与柔性灵巧手各自的优缺点,刚柔混合灵巧手逐渐成为研究热点. 通过结合刚性和柔性结构的优点,刚柔混合灵巧手不仅具备较高的抓取力和运动精度,还能在复杂环境中实现良好的柔性适应性,满足多样化的操作需求.

在灵巧手的研究中,刚度的可调节性尤为重要. 刚度调节能力使灵巧手能够在不同任务中实现抓取力和适应性的动态平衡^[7]. 例如,在处理易碎物体时需要较低的刚度,而在执行强力抓取任务时则需要较高的刚度. 近年来,变刚度技术得到了快速发展,包括通过材料本构特性^[8]、可控结构设计等^[9]方式实现刚度调节. 这些技术为灵巧手在多任务、多场景中的应用提供了新的解决方案.

除此之外,灵巧手感知的研究能够提高灵巧手对环境的感知和理解能力,以实现更智能、自主和适应性强的机器人系统^[10]. 传统的机器人系统通常依赖于预先设定的规则和程序,对环境的感知和理解能力

有限^[11]. 而引入先进的感知技术^[12-14]可以使机器人能够主动地感知和解释环境中的信息,从而更好地适应复杂和变化的任务需求. 虽然传统的机器人视觉系统可以提供物体的外观信息,但对于物体的形状、质地和几何信息等细节了解有限. 而引入触觉感知技术可以弥补这一不足,为机器人赋予更强大的交互和操作能力,提高其在复杂环境中的感知和控制能力^[15]. 机器人的触觉感知技术已经运用在多种领域,如物体感知和识别^[16]、人机交互和合作^[17]、智能决策^[18]和行为规划等^[19]. 因此,分析和研究获取、处理和利用触觉信息,对增强灵巧手的感知力,提高灵巧手智能交互水平具有重要的意义.

基于以上背景,本文提出了一种具有触觉传感的变刚度刚柔混合灵巧手,融合刚性手掌和柔性手指的优点,借助变刚度技术实现操作任务中的手指刚度动态调节,并通过触觉传感系统提升操作的精度和适应性. 通过本研究,期望能够为灵巧手的设计、控制与应用提供新的思路和方法,推动其在实际应用中的发展与普及.

1 变刚度灵巧手的原理及结构组成

1.1 刚柔混合原理及手指手掌的结构组成

根据人手的解剖图,手的灵巧性操作主要靠手指指骨和手掌掌骨的运动,如图 1 所示. 手指总共有 14 个自由度,手掌有 5 个自由度. 人手的手指主要执行的是弯曲运动,手掌主要是外展运动来配合手指的弯曲. 要实现机器人灵巧手具有同样的灵巧操作这就要求机器人灵巧手的手指具有同样的弯曲动作和手掌的外展动作.

为解决大量驱动源会造成基体结构复杂问题,故采用柔性连续体(1 个弯曲自由度)作为手指和刚性连杆(2 个自由度)作为手掌的刚柔混合的方式来设计灵巧手. 该方式能很好地模拟人手手指的多自由度弯曲动作和人手手掌的外展配合手指运动的动作,并且连续体手指在抓取物体时有很好的适应性,因此能够实现较少驱动源(7 个自由度)模仿人手 19 个自由度的操作.

每根手指由约束盘、两根镍钛合金杆及钢丝绳组成, 如图 2(a) 所示. 设计的核心问题是连续体手指能否很好地模仿手指的弯曲运动. 基于连续体常曲率弯曲运动假设将连续体手指进行弯曲运动, 如图 2(b) 所示, 同时将人手指进行弯曲运动, 通过对比发现设计的连续体手指能够很好地模仿人手指的弯

曲运动. 连续体手指因其特有的柔性特性只需 1 个驱动源就能实现手指的弯曲运动, 因此减少了一根手指需要 3 个驱动源的需求. 钢丝绳一端固定在指尖上, 另一端与位置电机 M_2 滑动连接, 最终固定在变刚度驱动器的弹性杆的一端.

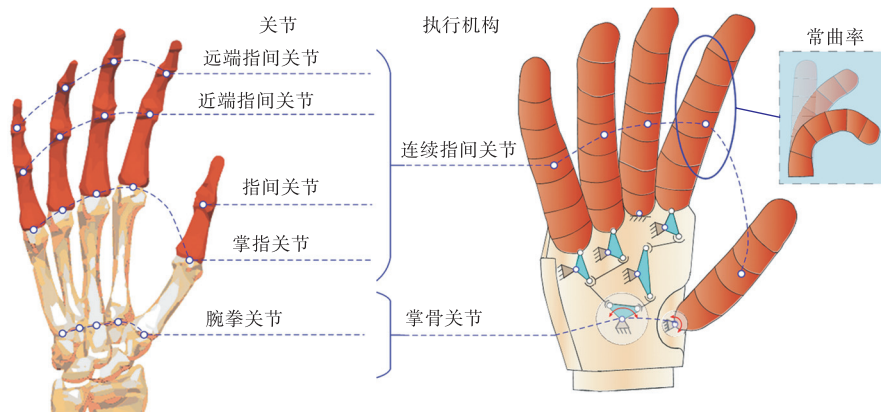
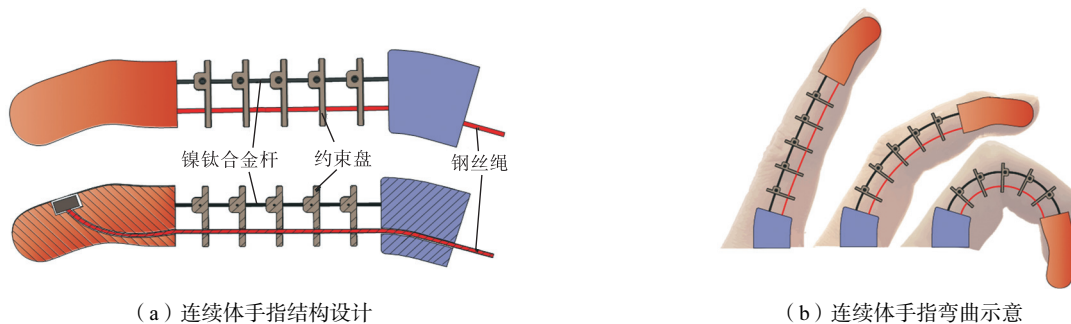


图 1 刚柔混合灵巧手的设计原理

Fig.1 Design principle of the rigid-flexible hybrid dexterous hand



(a) 连续体手指结构设计

(b) 连续体手指弯曲示意

图 2 连续体手指运动原理

Fig.2 Principle of continuous finger movement

手掌的外形与人手的手掌相似, 如图 3 所示. 其中包含 3 个舵机: 舵机 1 连接 6 个刚性连杆, 控制四指侧摆运动, 自由度为 1; 舵机 2 控制拇指侧摆运动,

自由度为 1; 舵机 3 控制拇指弯曲运动, 自由度为 1.

1.2 变刚度单元的原理及结构

灵巧手的变刚度原理如图 4 所示. 灵巧手的每根连续体手指由钢丝绳驱动, 钢丝绳首先与位置电机滑动连接, 钢丝绳的末端连接在变刚度执行器上. 通过位置电机 M_2 调节手指的弯曲运动, 刚度电机 M_1 调节手指的刚度变化, 同时采用的滑动连接实现了位置和刚度调节的运动解耦. 当位置电机 M_2 不变时, 给手指一个如图 4 所示方向的力, 手指会产生一个柔性位移, 此位移大小与变刚度单元有关.

变刚度单元采用模块化设计, 其中包括变刚度驱动器和手指弯曲驱动器, 其三维模型如图 5 所示. 变刚度驱动器采取悬臂梁结构, 刚度电机 M_1 控制支点在悬臂梁上水平运动, 此时悬臂梁有效长度发生变化, 变刚度驱动器的刚度也发生变化, 而控制手指弯曲的钢丝绳末端连接在弹性杆末端, 因此变刚度驱动器的刚度变化会导致手指刚度发生变化. 手指弯曲

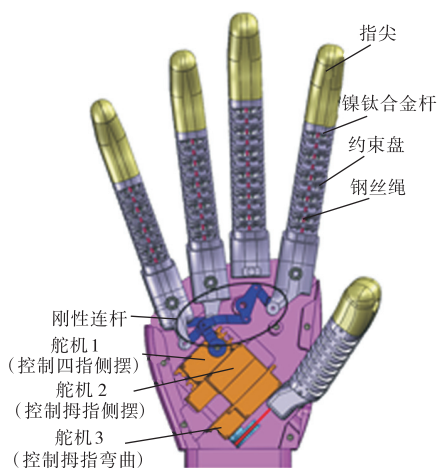


图 3 手指和手掌结构示意图

Fig.3 Finger and palm structure diagram

驱动器中包括位置电机和弯曲驱动件,弯曲驱动件连接在位置电机上,钢丝绳贴附在弯曲驱动件的轴承上,当位置电机旋转后,弯曲驱动件跟着旋转,其上贴附的钢丝绳长度发生变化,从而改变手指弯曲角度。

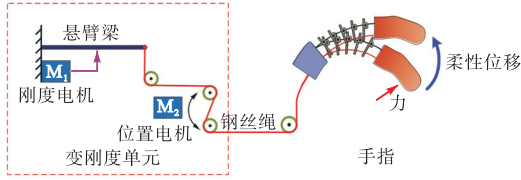


图 4 变刚度灵巧手工作原理

Fig.4 Working principle of variable stiffness dexterous hand

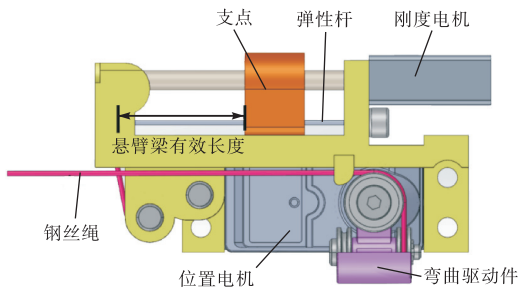


图 5 变刚度单元三维模型

Fig.5 Three-dimensional model of the variable stiffness element

2 理论建模

2.1 手指运动学模型

分析连续体手指弯曲运动时,对其采用常曲率假设。图 6 为简化的数学模型, AB 为镍钛合金杆 (L 即为手指实际弯曲长度), BC 和 CD 为手指末端, D 为指尖,红色为拉动手指弯曲的钢丝绳,并在 A 、 B 、 D 点分别建立近端指间坐标系、远端指间坐标系和指尖坐标系。当手指弯曲 α 角度时, AB 长度不变且曲率半径为 r , $A'B'$ 长度为 $L - \Delta L$ 且曲率半径为 $r - d_0$,根据弧长公式,即

$$L = \alpha r \quad (1)$$

$$L - \Delta L = \alpha(r - d_0) \quad (2)$$

式中 d_0 为镍钛合金杆和钢丝绳在 x 方向上的距离。联立式(1)和(2)得

$$\frac{\Delta L}{L} = \frac{d_0}{r} \quad (3)$$

将式(1)代入式(3)得

$$\alpha = \frac{\Delta L}{d_0} \quad (4)$$

由此可知,手指参数不变时,手指弯曲角度 α 只与 ΔL 有关。

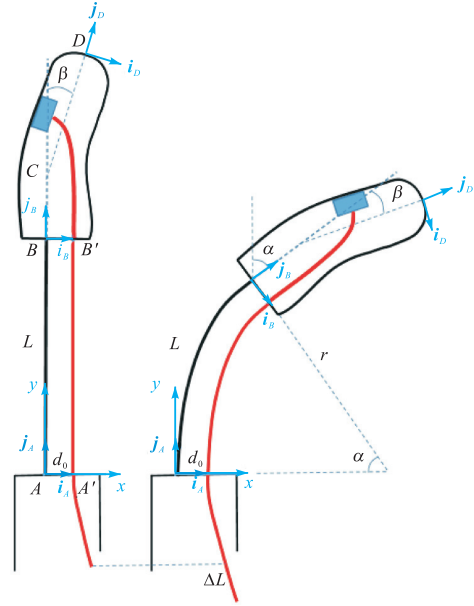


图 6 手指运动学模型

Fig.6 Finger kinematics model

此时远端指间坐标系 $\{B\}$ 相对于近端指间坐标系 $\{A\}$ 的齐次变换矩阵为

$${}^A_B T = \begin{bmatrix} \cos \alpha & \sin \alpha & 0 & \frac{L}{\alpha}(1 - \cos \alpha) \\ -\sin \alpha & \cos \alpha & 0 & \frac{L}{\alpha} \sin \alpha \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

若 $BC = c$, $CD = d$, 则指尖坐标系 $\{D\}$ 相对于远端指间坐标系 $\{B\}$ 的齐次变换矩阵为

$${}^B_D T = \begin{bmatrix} \cos \beta & \sin \beta & 0 & d \sin \beta \\ -\sin \beta & \cos \beta & 0 & c + d \cos \beta \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

式中 β 为指尖坐标系相对于远端指间坐标系在 i 方向上的偏角。因此指尖坐标系 $\{D\}$ 相对于近端指间坐标系 $\{A\}$ 的齐次变换矩阵为

$${}^A_D T = {}^A_B T {}^B_D T \quad (5)$$

以 $i = 1, 2, 3, 4, 5$ 分别代表小指、无名指、中指、食指、拇指,不同手指对应不同的齐次变换矩阵,远端指间坐标系 $\{B_i\}$ 相对于近端指间坐标系 $\{A_i\}$ 的齐次变换矩阵为

$${}^{A_i}_{B_i} T = \begin{bmatrix} \cos \alpha_i & \sin \alpha_i & 0 & \frac{L_i}{\alpha_i}(1 - \cos \alpha_i) \\ -\sin \alpha_i & \cos \alpha_i & 0 & \frac{L_i}{\alpha_i} \sin \alpha_i \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

指尖坐标系 $\{D_i\}$ 相对于远端指间坐标系 $\{B_i\}$ 的齐次变换矩阵为

$${}_{B_i}^{D_i}T = \begin{bmatrix} \cos \beta_i & \sin \beta_i & 0 & d_i \sin \beta_i \\ -\sin \beta_i & \cos \beta_i & 0 & c_i + d_i \cos \beta_i \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

指尖坐标系 $\{D_i\}$ 相对于近端指间坐标系 $\{A_i\}$ 的齐次变换矩阵为

$${}_{A_i}^{D_i}T = {}_{B_i}^{A_i}T {}_{D_i}^{B_i}T \quad (6)$$

2.2 手掌运动学模型

手掌中的连杆机构可以控制四指发生侧摆运动, 该机构主要由舵机 1 控制的 6 个刚性连杆组成, 其简化数学模型如图 7 所示, 在 O 处建立手掌坐标系. 刚性连杆长度不变, 两两之间通过转动副连接, 其中 θ_1 和 θ_2 保持不变, 舵机 1 直接连接 OK 控制其转动, 角度表示为 θ . O 、 U 、 P 、 Q 、 V 位置固定, PL 和 PE 为小指根部, 与小指侧摆角度相关, QG 和 VH 分别是无名指根部和食指根部, 分别与无名指和小指侧摆角度相关.

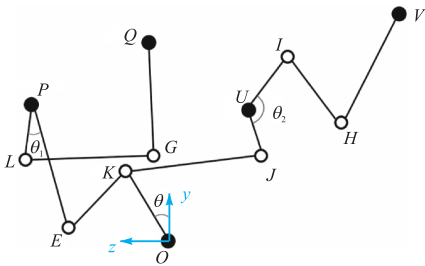


图 7 连杆机构数学模型

Fig.7 Mathematical model of the linkage mechanism

将连杆机构分为 4 个四连杆机构进行分析. 这 4 个机构都是四连杆机构(图 8(b) ~ (e)), 因此对四连杆机构进行通用性分析, 以图 8(a) 为例, l_4 为机架, $l_1 \sim l_4$ 长度已知, l_5 不断变化. 几何上满足

$$\begin{cases} l_1 \cos \varphi_1 + l_2 \cos \varphi_2 + l_3 \cos \varphi_3 = l_4 \cos \varphi_4 \\ l_1 \sin \varphi_1 + l_2 \sin \varphi_2 + l_3 \sin \varphi_3 = l_4 \sin \varphi_4 \end{cases} \quad (7)$$

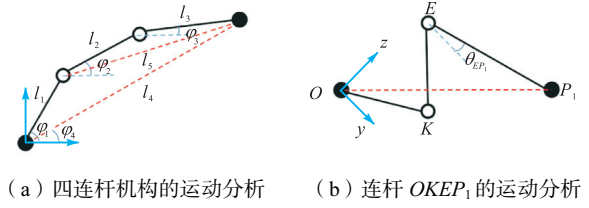
此外, 以 l_5 为公共边的 2 个三角形分别列出余弦定理, 即

$$\begin{cases} l_5^2 = l_1^2 + l_4^2 - 2l_1l_4 \cos(\varphi_1 - \varphi_4) \\ l_5^2 = l_2^2 + l_3^2 - 2l_2l_3 \cos(\pi + \varphi_3 - \varphi_2) \end{cases} \quad (8)$$

4 个四连杆机构除满足上述通用性公式外, 因 θ_1 和 θ_2 保持不变, 彼此之间还满足

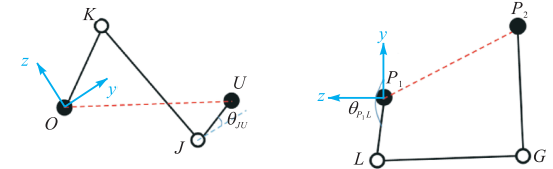
$$\begin{cases} \pi - \theta_{PL} + \theta_{EP_1} = \theta_1 \\ \pi - \theta_{JU} + \theta_{UB} = \theta_2 \end{cases} \quad (9)$$

在手指轴承处建立手指坐标系 $\{P_i\}$, 此坐标系与



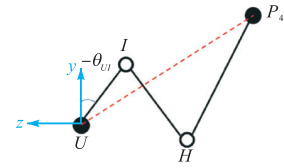
(a) 四连杆机构的运动分析

(b) 连杆 $OKEP_1$ 的运动分析



(a) 连杆 $OKJU$ 的运动分析

(b) 连杆 P_1LGP_2 的运动分析



(d) 连杆 $UIHP_4$ 的运动分析

图 8 四连杆机构数学模型

Fig.8 Mathematical model of the four-bar linkage mechanism

近端指间坐标系 $\{A_i\}$ 方向相同, 只有原点位置上的差异. 通过式 (7) ~ (9) 可以求解出所有刚性连杆和手指根部的角度与舵机 1 旋转角度的关系, 从而得出手指侧摆的角度 γ_i , 此角度具体含义为手掌坐标系 $\{O\}$ 中的 xy 平面绕 Ox 轴逆时针旋转 γ_i 角度与手指坐标系 $\{P_i\}$ 中的 x_iy_i 平面重合或平行. P_i 在手掌坐标系 $\{O\}$ 中的坐标为 $(0, p_i, q_i)$, A_i 在手指坐标系 $\{P_i\}$ 中的坐标为 $(0, a_i, 0)$, 因此, 手指坐标系 $\{P_i\}$ 相对于手掌坐标系 $\{O\}$ 的齐次变换矩阵为

$${}_{P_i}^{O}T = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \gamma_i & -\sin \gamma_i & p_i \\ 0 & \sin \gamma_i & \cos \gamma_i & q_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

特殊地, $\{P_5\}$ 相对于 $\{O\}$ 的齐次变换矩阵为

$${}_{P_5}^{O}T = \begin{bmatrix} 0 & \sin \gamma_5 & -\cos \gamma_5 & 0 \\ \frac{\sqrt{2}}{2} & \frac{\sqrt{2}}{2} \cos \gamma_5 & \frac{\sqrt{2}}{2} \sin \gamma_5 & p_5 \\ \frac{\sqrt{2}}{2} & -\frac{\sqrt{2}}{2} \cos \gamma_5 & -\frac{\sqrt{2}}{2} \sin \gamma_5 & q_5 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

近端指间坐标系 $\{A_i\}$ 相对于手指坐标系 $\{P_i\}$ 的齐次变换矩阵为

$${}_{A_i}^{P_i}T = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & a_i \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

指尖坐标系 $\{D_i\}$ 相对于手掌坐标系 $\{O\}$ 的齐次变换矩阵为

$${}^O_{D_i}T = {}^O_{P_i}T {}^{P_i}_{A_i}T {}^{A_i}_{B_i}T {}^{B_i}_{D_i}T \quad (10)$$

2.3 刚度映射模型

变刚度单元可等效为悬臂梁结构,通过调整悬臂梁有效长度来达到改变刚度的目的.如图 9 所示,悬臂梁一端固定,另一端为作用点,其上有一垂直作用力 F_P ,刚度电机 M_1 作用点可以沿悬臂梁方向移动,从而改变悬臂梁有效长度 l_0 ,不同有效长度 l_0 产生不同的最大挠度 $w_{\max}$.

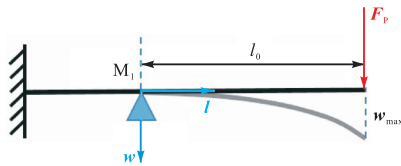


图 9 变刚度单元数学模型

Fig.9 Mathematical model of the variable stiffness element

假设 F_P 始终沿着 w 轴方向,悬臂梁在 $l-w$ 平面内发生小变形弯曲,则此时满足欧拉-伯努利挠曲线方程

$$E_0 I_0 w''(l) = -M(l) = F_P(l_0 - l) \quad (11)$$

方程两边同时对 x 取二次积分并代入初始条件得

$$\begin{cases} E_0 I_0 w(0) = \frac{1}{6} F_P L^3 + C_2 = 0 \\ E_0 I_0 w'(0) = -\frac{1}{2} F_P L^2 + C_1 = 0 \end{cases} \quad (12)$$

解得

$$w(x) = \frac{F_P x^2}{6 E_0 I_0} (3l_0 - l) \quad (13)$$

从而可得最大挠度为

$$w_{\max} = w(l_0) = \frac{F_P l_0^3}{3 E_0 I_0} \quad (14)$$

式中: l_0 为悬臂梁的有效长度; E_0 为悬臂梁的弹性模量; I_0 为梁的截面惯性矩. 对于圆柱形的梁, I_0 与其截面圆的直径 d_0 有关, 即

$$I_0 = \frac{\pi d_0^4}{64} \quad (15)$$

因此,悬臂梁末端作用点的输出刚度 K_0 可表示为

$$K_0 = \frac{F_P}{w_{\max}} = \frac{3 E_0 I_0}{l_0^3} = \frac{3 \pi E_0 d_0^4}{64 l_0^3} \quad (16)$$

从变刚度单元到连续体手指的刚度映射模型如图 10 所示.

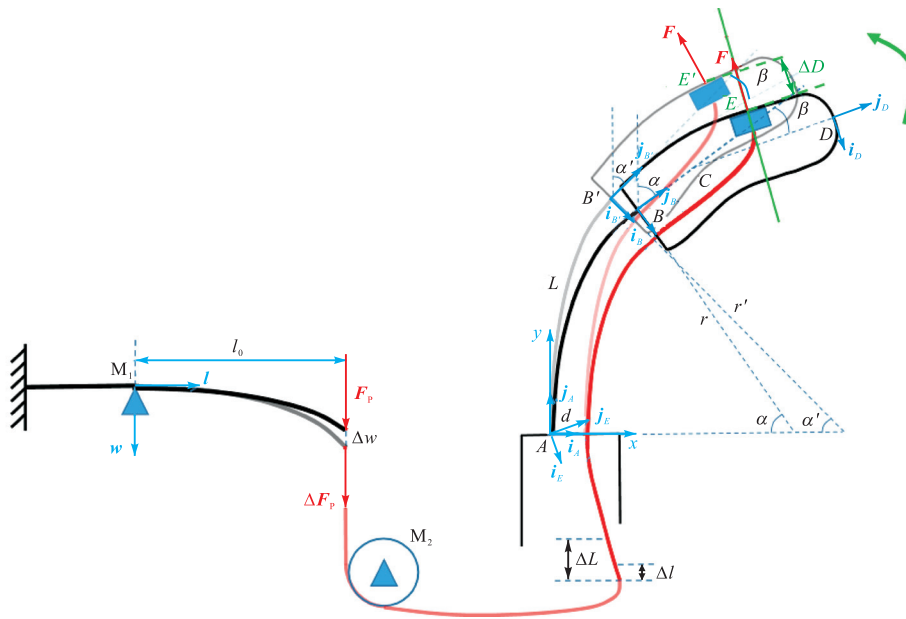


图 10 刚度映射模型

Fig.10 Stiffness mapping model

手指在变刚度单元和位置电机 M_2 的共同作用下弯曲角度并保持平衡,此时在 E 点给手指一个垂直 CD 向上的力 F ,手指会发生柔性位移 ΔD , ΔD 为 E 点在 F 方向上发生的位移. 弹性绳在位置电机 M_2 处为滑动连接, 因此有

$$\Delta l = \Delta w \quad (17)$$

且手指在新位置保持平衡

$$F = \Delta F_P \quad (18)$$

若手指此时弯曲角度为 α' , 根据式 (4) 可知

$$\alpha' = \frac{\Delta L - \Delta l}{d} \quad (19)$$

联立式 (4) 和 (19) 可得在外力 F 作用下手指发生弯

曲的角度差为

$$\alpha - \alpha' = \Delta l / d_0 \quad (20)$$

式中 Δl 为悬臂梁在 w 方向上的位移。

在 A 处建立坐标系 $\{E\}$, 且其与 $\{A\}$ 的齐次变换矩阵为

$${}^A_E T = \begin{bmatrix} \cos(\alpha + \beta) & \sin(\alpha + \beta) & 0 & 0 \\ -\sin(\alpha + \beta) & \cos(\alpha + \beta) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

ΔD 即为 E 和 E' 在 i_E 方向上投影之差。

设 E 在 $\{B\}$ 中的位置矢量为 $e|_B = [e_1, e_2, 0, 1]^T$, 同样地, E' 在 $\{B'\}$ 中的位置矢量为 $e'|_{B'} = [e_1, e_2, 0, 1]^T$, E 和 E' 在 $\{E\}$ 中的位置矢量为 $e|_E$ 和 $e'|_{E'}$, 因此有

$$\begin{cases} {}^A_B T \cdot e|_B = {}^A_E T \cdot e|_E \\ {}^A_{B'} T \cdot e'|_{B'} = {}^A_E T \cdot e'|_{E'} \end{cases} \quad (21)$$

定义手指刚度 K_S 为

$$K_S = F / \Delta D \quad (22)$$

为简化分析, 令

$$\begin{cases} \sin \beta = \sin(\beta + \alpha - \alpha') \\ \cos \beta = \cos(\beta + \alpha - \alpha') \end{cases} \quad (23)$$

综合式 (16) ~ (23), 得到手指刚度 K_S 与变刚度单元的输出刚度 K_0 的关系为

$$K_S = \frac{d\alpha^2}{L[\cos \beta - \cos(\alpha + \beta)]} K_0 \quad (24)$$

3 灵巧手样机与仿真

3.1 灵巧手样机介绍

基于本文提出的刚柔混合灵巧手和变刚度单元的原理及设计, 提出了具有触觉传感的变刚度刚柔混合灵巧手样机, 如图 11 所示。灵巧手手指、手掌外壳、基座外壳和变刚度单元基座均采用 3D 打印制造, 其中手指弯曲部分采用尼龙材料, 其余部分采用树脂材料。灵巧手由 7.4 V 电池供电, 手掌内 3 个舵机和基座内的 4 个位置电机 M_2 连接到过渡区内的舵机控制板上, 用上位机控制; 基座内 4 个调刚电机 M_1 连接到电机控制板上, 用电脑串口发送指令; 每根手指指尖上装有一个触觉传感器用于测试手指受到的外力, 传感器的感应区均有软材料, 使得检测时更稳定, 5 个触觉传感器连接到数据采集板上, 在其上可以显示压力数据, 还可以显示实时压力曲线并将读取的数据传输至电脑上, 方便后续数据处理。

3.2 灵巧手工作空间

手指弯曲时弹性绳长度变化 ΔL 与位置电机 M_2

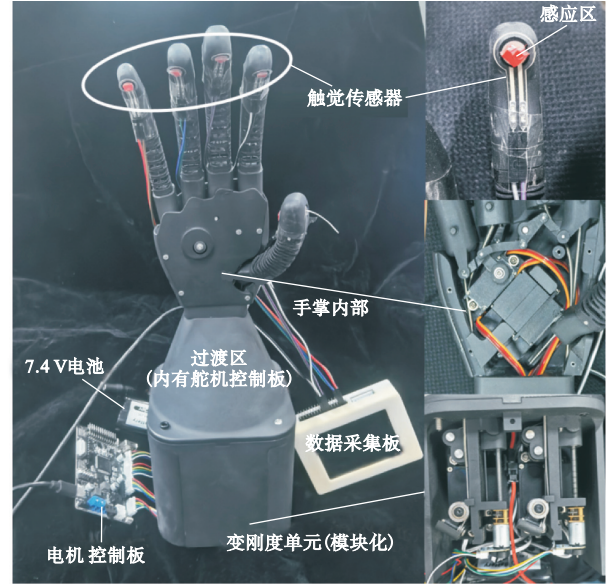


图 11 灵巧手样机

Fig.11 Prototype of the dexterous hand

的转动角度 δ 和手指刚度有关, M_2 输出端连接的驱动件上的 2 个轴承半径均为 R , 有

$$\Delta L = 2\delta R - w_{\max} \quad (25)$$

在不考虑手指刚度变化的影响下, 即变刚度单元刚度最大时, 有

$$\Delta L = 2\delta R \quad (26)$$

因此, 根据式 (4) 和 (26) 可以得出位置电机 M_2 的角度 δ 和手指弯曲角度 α 的关系为

$$\alpha = \frac{2R}{d_0} \delta \quad (27)$$

灵巧手指节长度及角度对灵巧手抓取操作具有很大的影响。较长的指节能够触及更远的物体, 并能包络更大尺寸的物体, 但指节尺寸过大与仿人灵巧手的初衷背道而驰, 且控制精度更低; 连续体手指的指尖关节角度固定不变, 在抓取过程中起到支撑作用。因此, 在初始设计时, 以人手尺寸为依据, 得到灵巧手的初始参数, 此外, 拇指弯曲舵机旋转角度为 $65^\circ \sim 150^\circ$, 其余四指弯曲舵机旋转角度为 $15^\circ \sim 150^\circ$, 拇指侧摆舵机旋转角度为 $70^\circ \sim 180^\circ$, 四指侧摆舵机弯曲角度为 $15^\circ \sim 45^\circ$ 。当手指初始弯曲角度为 10° 时, 将参数代入式 (10) 和 (27) 中, 并在 MATLAB 中绘制出手指指尖 D_i 在手掌坐标系 $\{O\}$ 中的运动轨迹, 即为灵巧手的工作空间, 如图 12 所示。图中的空间区域即为手指末端可以到的位置, 改变指节长度及角度, 保证小指、无名指、中指、食指的工作空间分别与拇指的工作空间都有交叉的部分, 因此拇指可以碰到其他四指, 可以完成捏合的操作。此时灵巧手的部分参数如表 1 所示。

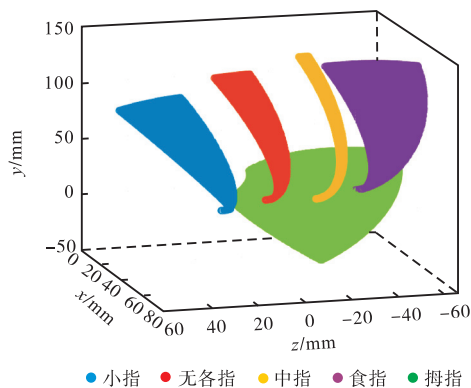


图 12 灵巧手的工作空间

Fig.12 Workspace of the dexterous hand

经计算,拇指弯曲角度范围为 $10.0^{\circ} \sim 120.5^{\circ}$, 其余四指弯曲角度范围为 $10.0^{\circ} \sim 126.2^{\circ}$, 拇指侧摆角度范围为 $20.0^{\circ} \sim 90.0^{\circ}$, 食指侧摆角度范围为 $-18.0^{\circ} \sim 5.2^{\circ}$, 无名指侧摆角度范围为 $1.7^{\circ} \sim 10.4^{\circ}$, 小指侧摆角度范围为 $9.0^{\circ} \sim 26.4^{\circ}$, 中指不发生侧摆. 人手的弯曲角度可至近似 180.0° , 灵巧手弯曲角度可达人手的 70% 以上, 灵巧手侧摆角度可以完成基本的夹取操作.

3.3 刚度映射模型仿真

根据式 (24) 在 MATLAB 中绘制出单根手指刚度 K_S 与 K_0 和 α 的关系, 如图 13 所示.

表 1 灵巧手机参数

Tab.1 Parameters of the prototype dexterous hand

手指参数	指节长度及角度				手指固有参数/mm		
	弯曲段 AB 长度 L_i /mm	非弯曲段 BC 长度 c_i /mm	非弯曲段 CD 长度 d_i /mm	BC 与 CD 夹角 β_i /($^{\circ}$)	指根 P_i 在 $\{O\}$ 中的坐标 ($0, p_i, q_i$)	近端指节 A_i 在 $\{P_i\}$ 中的 坐标 ($0, a_i, 0$)	AB 和 A'B' 在 x 方向上的距离 d_0
小指	40	16.18	26.20	18.54	(0, 20.27, 20.26)	(0, 20.72, 0)	7.00
无名指	50	16.04	25.16	19.27	(0, 29.47, 2.76)	(0, 20.65, 0)	7.00
中指	60	17.73	25.71	19.44	(0, 34.27, -15.74)	(0, 20.34, 0)	7.00
食指	50	16.04	25.16	19.27	(0, 33.27, -35.74)	(0, 20.27, 0)	7.00
拇指	40	6.29	19.49	13.14	(0, 30.00, -30.00)	(0, 19.60, 0)	6.88

单个图中表明, 对同一根手指而言, 手指弯曲角度 α 不变时, 手指刚度 K_S 随变刚度单元的输出刚度 K_0 增大而增大; 变刚度单元的输出刚度 K_0 不变时, 手指弯曲角度 α 越大, 手指刚度 K_S 越大. 对比图

13(a) ~ (c) 来看, 当手指弯曲角度 α 和变刚度单元的输出刚度 K_0 均不变时, 手指实际弯曲长度 L 越大, 手指刚度 K_S 越低.

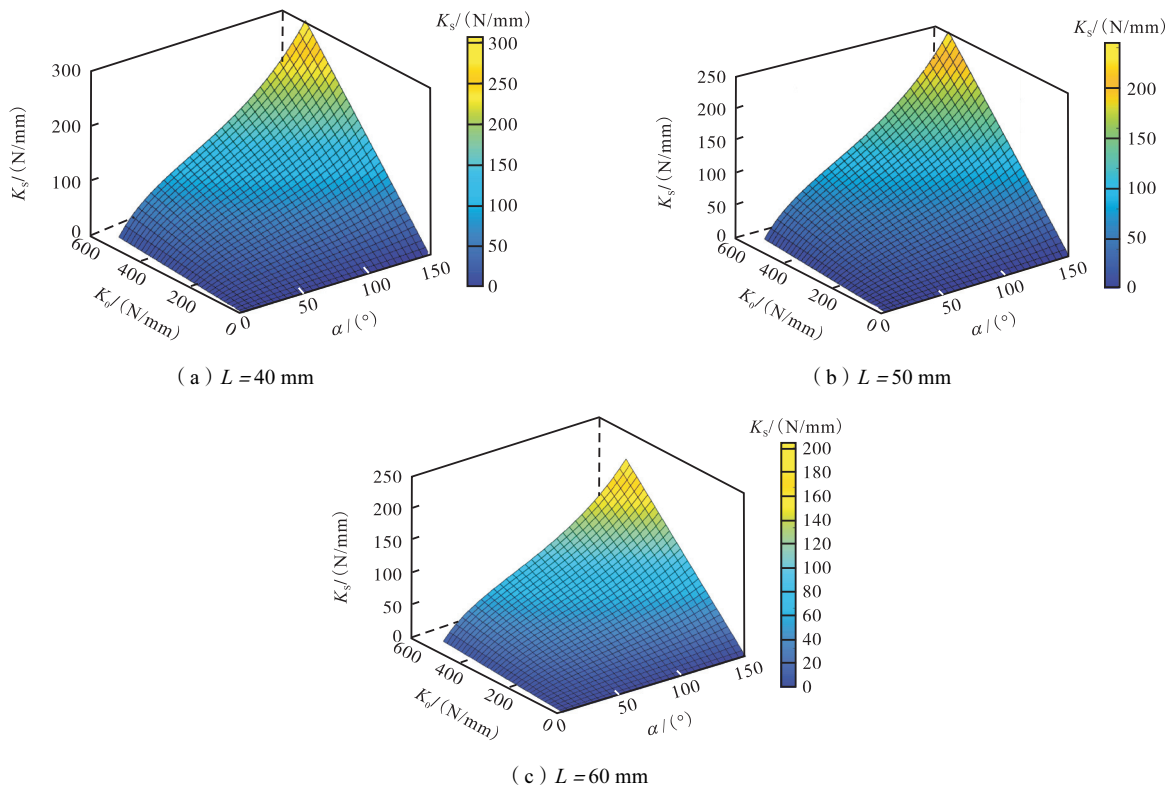


图 13 单根手指刚度 K_S 与 K_0 和 α 的关系

Fig.13 Relationship between single finger stiffness K_S , K_0 and α

4 实验验证

基于灵巧手样机, 本节对其变刚度驱动器性能、手指运动学性能、触觉传感器和刚度映射模型的可行性进行了测试, 以验证灵巧手的运动灵活性和刚度适应性。

4.1 变刚度驱动器性能研究

变刚度驱动器的性能直接影响了灵巧手的变刚度性能。式(16)表明在弹性杆弯曲性能已知后, 变刚度驱动器的输出刚度只与弹性杆的有效长度有关。实验平台如图 14 所示, 拉力计安装在可升降平台上, 可随其上升、下降, 示数可读取, 变刚度驱动器始终固定, 刚度电机 M_1 改变支点位置, 从而调节弹性杆的有效长度, 拉力计连接弹性杆末端, 沿垂直向下方向拉动弹性杆。

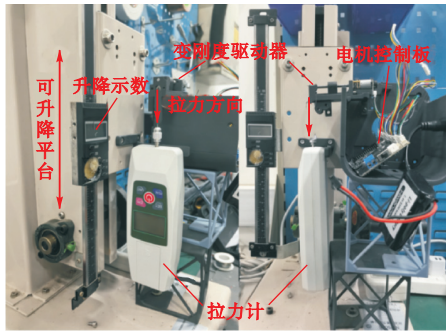


图 14 变刚度驱动器性能研究实验平台

Fig.14 Experimental platform for evaluating the performance of the variable stiffness actuator

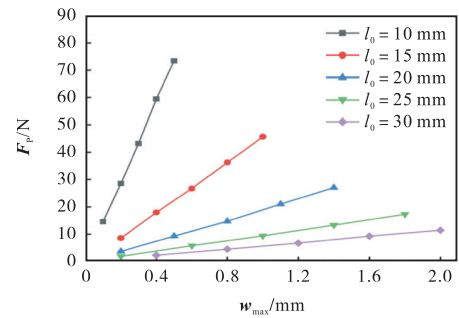
调节支点位置, 保证弹性杆有效长度分别为 10 mm、15 mm、20 mm、25 mm 和 30 mm。用拉力计垂直向下拉弹性杆末端, 调节可升降平台至拉力计有示数, 读出初始的拉力值和升降示数, 继续下降平台, 使得拉力变大弹性杆挠度变大, 计算此时拉力和平台升降示数与初始时的差值, 即为一组拉力和挠度, 改变平台高度, 会产生一组新的拉力 F_P 和挠度 $w_{\max}$ 。在每个有效长度的有效范围内进行 5 次测试, 共进行 5 组测试, 绘制 $F_P-w_{\max}$ 曲线, 如图 15(a) 所示。

可以看出, 相同的弹性杆有效长度下, F_P 随着 $w_{\max}$ 是近线性变化的, 由式(16)可知, 斜率即为变刚度单元的输出刚度。将变刚度单元的输出刚度与弹性杆的有效长度的理论曲线绘制在图 15(b) 中, 并计算出 15(a) 中的 25 个实际输出刚度与理论刚度对比如表 2 所示。

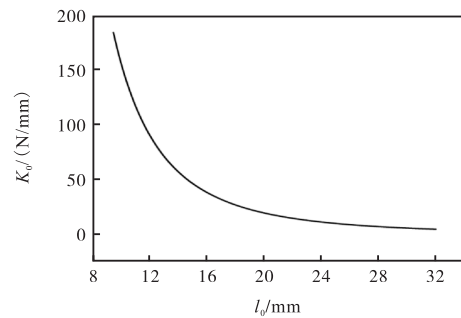
从图 15 和表 2 中可以看出, 弹性杆有效长度越大时, 输出刚度越低, 误差越小, 最大误差为 9.7%,

且实际的输出刚度均比理论计算的要低。这是因为在理论模型中, 直接将支点当作刚度无限大的物体, 认为支点处挠度为 0, 实际上的有效长度比调节的更大, 因此整体的输出刚度比计算的要低, 且这种影响在弹性杆有效长度低的时候更大。

实验证明, 变刚度驱动器的输出刚度随着弹性杆的有效长度增加而降低, 弹性杆有效长度最低可调至 5 mm, 此时输出刚度约为 1 260.0 N/mm, 因此, 输出刚度可变化范围在 5.6 ~ 1 260.0 N/mm。



(a) $F_P-w_{\max}$ 曲线



(b) K_0-l_0 理论曲线

图 15 变刚度驱动器实验曲线

Fig.15 Experimental curves of the variable stiffness actuator

表 2 实验得出的输出刚度及最大误差

Tab.2 Experimental output stiffness and maximum error

l_0/mm	$K_0/(\text{N/mm})$					最大误差/%
10	145.9	142.6	143.9	148.6	146.8	9.7
15	42.6	44.9	44.5	45.3	45.6	8.9
20	18.3	18.6	18.4	19.1	19.3	7.3
25	9.4	9.6	9.4	9.5	9.6	7.0
30	5.7	5.6	5.6	5.8	5.7	4.2

4.2 手指运动学性能研究

手指弯曲角度和弹性绳张力是反映手指运动学性能的重要指标。式(27)给出手指弯曲角度 α 与位置电机 M_2 的角度 δ 的关系, 本实验根据式(27), 搭建实验平台如图 16 所示, 调节 4 根手指的位置电机角度, 用角度测量仪器测出手指弯曲角度, 绘制 $\alpha-\delta$

关系,并在图中绘制出理论曲线进行对比,如图 17(a)所示.此外,放开对刚度的限制,测量弹性杆最大挠度,根据式(16)计算出此时钢丝绳所受张力,并绘制出 δ - F_p 关系,如图 17(b)所示.

结果表明,手指弯曲角度与手指长度无关,与位置电机角度线性相关.随着位置电机角度增大,手指弯曲角度增大,钢丝绳张力也逐渐增大.

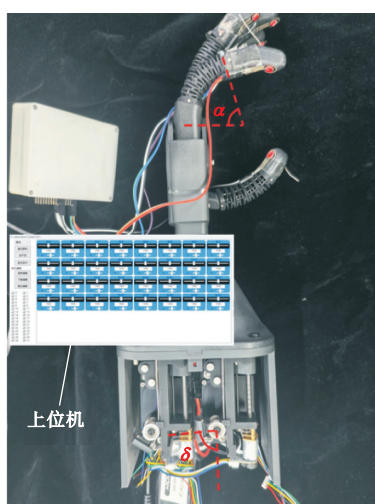
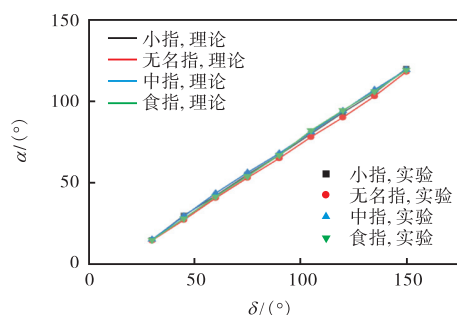
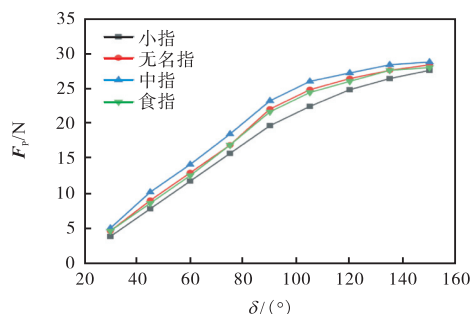


图 16 手指运动学性能研究实验平台

Fig.16 Experimental platform for verifying the performance of the finger kinematics model



(a) α - δ 曲线



(b) δ - F_p 曲线

图 17 手指弯曲相关曲线

Fig.17 Finger bending correlation curves

4.3 触觉传感器标定实验

指尖的触觉传感器可以测量灵巧手抓取物体时

的压力信号,同时在测试手指刚度过程中起重要作用.而传感器在使用过程中会产生误差或漂移,且每个传感器的性能不同,因此需要对传感器进行标定,以校准传感器的输出,使其能够准确测量和感知压力信号.

灵巧手样机上共使用了 5 个触觉传感器,通过标定实验可以得到数据采集板上的数据与压力的关系.标定实验如图 18 所示,对 5 个传感器依次命名为传感器 1~5,分别对应小指、无名指、中指、食指和拇指,并有 5 个不同质量的砝码:10 g、20 g、50 g、100 g、200 g,将传感器 1~5 连接在数据采集板上,将 5 个砝码依次放置在传感器 1 上,待其稳定后读取数据,重复 3 次取数据的平均值,并按此步骤完成传感器 2~5 的标定,实验结果如图 19 所示.

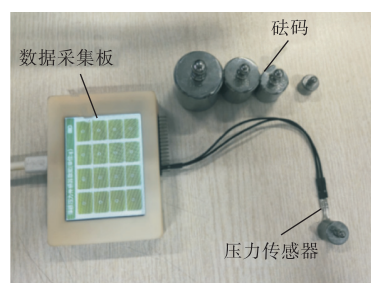


图 18 触觉传感器标定实验

Fig.18 Tactile sensor calibration experiment

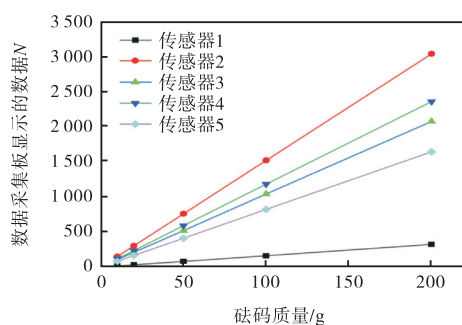


图 19 触觉传感器标定实验曲线

Fig.19 Experimental curves of tactile sensor calibration

结果表明,数据采集板显示的数据 N 与承受的压力呈正比,且一一对应,因此可以通过 N 来计算出压力 F_N ,有

$$N = k_i F_N \quad (28)$$

式中 k_i 为压力传感器的比例系数向量,其具体数值是 $k_i = [163.3 \ 1551.0 \ 1061.2 \ 1204.1 \ 836.7]^T$.

传感器的量程范围为 0.1 ~ 100.0 N,而数据采集板能显示的最大数值 $N_{\max}$ 为 100 000,此时根据式(28)计算出 5 个传感器显示的最大压力,其中最低的壓力值为传感器 2 的壓力值,其值为 64.5 N.因此,

综合传感器量程和数据采集板量程, 5 个传感器所测量的压力范围为 64.5 ~ 100.0 N.

4.4 刚度映射模型验证实验

第 2.3 节构建了刚度映射模型, 式 (24) 给出了手指刚度 K_S 的 3 个影响因素: 变刚度单元的输出刚度 K_0 、手指实际弯曲长度 L 和手指弯曲角度 α . 基于此, 本节通过两个实验验证刚度映射模型的有效性.

首先搭建实验平台, 如图 20 所示, 在触觉传感器上给一个稳定大小的外力 F , 通过式 (28) 计算出 F 的大小, 本实验手指位移较大, 因此, 可以用游标卡尺测出此时手指在 F 方向上的位移 ΔD , 通过式 (22) 计算出此时手指刚度 K_S . 驱动刚度电机 M_1 改变变刚度单元的输出刚度 K_0 , 驱动位置电机 M_2 改变手指弯曲角度 α , 不同手指有不同的手指实际弯曲长度 L .

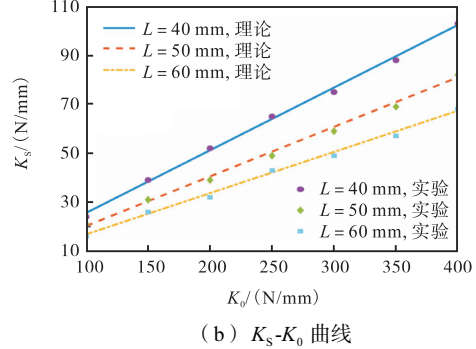
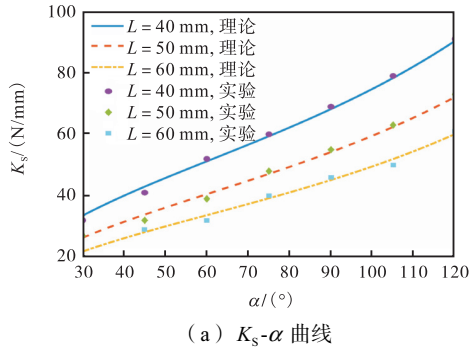


图 21 刚度映射模型验证实验曲线

Fig.21 Experimental curves of the stiffness mapping model

实验 2: 保证手指弯曲角度始终为 60° , 改变 3 根不同长度手指的变刚度单元的输出刚度 K_0 , 施加外力 F 通过传感器测出, 用游标卡尺测出 ΔD 并计算出手指刚度 K_S , 绘制 K_S - K_0 曲线, 并与理论曲线进行对比, 如图 21 (b) 所示.

实验结果表明, 手指刚度 K_S 与变刚度单元的输出刚度 K_0 呈正相关, 与手指实际弯曲长度 L 呈负相关, 与手指弯曲角度 α 呈正相关, 与理论曲线的趋势一致, 由游标卡尺测出的手指位移存在一定误差, 两个实验的最大误差均不超过 8%, 因此式 (24) 是可行的.

5 结 论

本文针对传统刚性灵巧手和柔性灵巧手在适应性和操作性能上的不足, 提出了一种具有触觉传感的变刚度刚柔混合灵巧手. 通过理论与实验验证, 本文从设计理念、模型建立、样机开发到性能测试, 系统性地研究了该灵巧手的关键技术, 主要结论如下.

(1) 设计理念与结构实现: 本文基于刚柔混合的

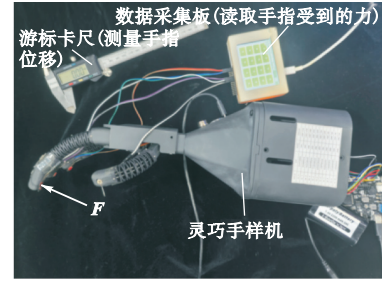


图 20 刚度映射模型验证实验平台

Fig.20 Experimental platform for verifying the stiffness mapping model

实验 1: 保证 K_0 始终为 200 N/mm, 改变 3 根不同长度手指的弯曲角度, 施加外力 F 通过传感器测出, 用游标卡尺测出 ΔD 并计算出手指刚度 K_S , 绘制 K_S - α 曲线, 并与理论曲线进行对比, 如图 21 (a) 所示.

原理, 设计了一种结合刚性和柔性特点的灵巧手, 通过可调节的变刚度单元实现不同任务场景下刚度的动态适应性. 其中变刚度单元可调节范围在 5.6 ~ 1 260.0 N/mm, 相比其他可变刚度灵巧手调节范围更广, 手指刚度范围根据手指长度和弯曲角度各有不同. 同时, 手指与手掌的设计充分考虑了结构的灵活性和功能性, 触觉传感系统的引入为操作精度提供了可靠保障, 触觉传感器最高可测压力达 64.5 ~ 100.0 N.

(2) 理论建模与刚度映射: 通过建立手指与手掌的运动学模型, 深入分析了灵巧手的运动能力, 为灵巧手工作空间绘制提供了理论基础; 并通过刚度映射模型探讨了变刚度单元的输出刚度到手指整体刚度的映射关系, 并指出受手指弯曲角度的影响.

(3) 样机开发与性能验证: 在样机开发的基础上, 本文绘制了灵巧手的工作空间, 灵巧手弯曲角度可达人手的 70% 以上, 可完成捏合的操作, 灵巧手侧摆角度可以完成基本的夹取操作, 并通过仿真和具体实验分析验证了刚度映射模型的准确性, 此外还进行了变刚度驱动器和手指运动学的性能测试实验. 实验结果表明, 所设计的灵巧手在运动灵活性、刚度调

节性能以及触觉反馈能力方面均达到了预期目标。

(4) 实际意义与发展前景: 本研究为灵巧手的设计、控制与应用提供了新的技术思路。连续体手指通过结构简化实现了低成本与可靠性, 能够实现人手的多种灵巧性操作, 如包络抓握、捏取和夹取等, 但在多自由度协同操作、环境适应性和精细触控等方面与人手存在显著差距。未来研究可以进一步优化控制算法, 并探索更高性能的材料和传感器技术, 以进一步提升灵巧手的智能化水平和应用范围。理论建模方面, 当前的刚度映射模型只是在手指内部, 还未涉及到手指刚度与物体刚度之间的关系, 未来可以在此方面展开研究。

综上所述, 本研究不仅为灵巧手技术的发展提供了重要参考, 也为多场景机器人操作任务的实现奠定了基础, 具有重要的理论意义和工程应用价值。

参考文献:

- [1] Wang T M, Tao Y, Liu H. Current researches and future development trend of intelligent robot: A review[J]. *International Journal of Automation and Computing*, 2018, 15(9): 525-546.
- [2] Jacobsen S, Iversen E, Knutti D, et al. Design of the Utah/MIT dextrous hand[C]//*IEEE International Conference on Robotics and Automation*. San Francisco, USA, 1986: 1520-1532.
- [3] Challoor R, Johnson J P, MaLauchlan R A, et al. Intelligent control of a Stanford JPL hand attached to a 4 DOF robot arm[C]//*IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics*. San Antonio, USA, 1994: 1274-1278.
- [4] Yang Y, Chen Y H, Li Y T, et al. Bioinspired robotic fingers based on pneumatic actuator and 3D printing of smart material[J]. *Soft Robotics*, 2017, 4(2): 147-162.
- [5] Manti M, Hassan T, Passetti G, et al. A bioinspired soft robotic gripper for adaptable and effective grasping[J]. *Soft Robotics*, 2015, 2(3): 107-116.
- [6] Rus D, Tolley M T. Design, fabrication and control of soft robots[J]. *Nature*, 2015, 521: 467-475.
- [7] He Z Y, Lian B B, Song Y M. Rigid-soft coupled robotic gripper for adaptable grasping[J]. *Journal of Bionic Engineering*, 2023, 20: 2601-2618.
- [8] Kang R J, Guo Y, Chen L S, et al. Design of a pneumatic muscle based continuum robot with embedded tendons[J]. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2017, 22(2): 751-761.
- [9] Liu Z X, Jin H Z, Liu Y B, et al. An online stiffness estimation approach for variable stiffness actuators using lever mechanism[J]. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 2022, 7(3): 6709-6717.
- [10] Su Q, Zou Q, Li Y, et al. A stretchable and strain-unperturbed pressure sensor for motion interference-free tactile monitoring on skins[J]. *Science Advances*, 2021, 7(48): eabi4563.
- [11] Park H, Kim D. An open-source anthropomorphic robot hand system: HRI hand[J]. *HardwareX*, 2020, 7(2): e00100.
- [12] Li G Z, Liu S Q, Wang L Q, et al. Skin-inspired quadruple tactile sensors integrated on a robot hand enable object recognition[J]. *Science Robotics*, 2020, 5(49): eabc8134.
- [13] Sarwar M S, Dobashi Y, Preston C, et al. Bend, stretch, and touch: Locating a finger on an actively deformed transparent sensor array[J]. *Science Advances*, 2017, 3(3): 1602200.
- [14] Wang H Y, Wang W Q, Kim J J, et al. An optical-based multipoint 3-axis pressure sensor with a flexible thin-film form[J]. *Science Advances*, 2023, 9(36): 2445.
- [15] Pacchierotti C, Prattichizzo D. Cutaneous/tactile haptic feedback in robotic teleoperation: Motivation, survey, and perspectives[J]. *IEEE Transactions on Robotics*, 2024, 40: 978-998.
- [16] Mao Q, Zhu R. Enhanced robotic tactile perception with spatiotemporal sensing and logical reasoning for robust object recognition[J]. *Applied Physics Reviews*, 2024, 11(2): 021424.
- [17] Kang M Y, Gang C G, Ryu S K, et al. Haptic interface with multimodal tactile sensing and feedback for human-robot interaction[J]. *Micro and Nano Systems Letters*, 2024, 12: 1-9.
- [18] Jiang Y, Fan L, Sun X L, et al. A multifunctional tactile sensory system for robotic intelligent identification and manipulation perception[J]. *Advanced Science*, 2024, 11(41): 2402705.
- [19] Liao J J, Xiong P W, Liu P X, et al. Enhancing robotic tactile exploration with multireceptive graph convolutional networks[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2024, 71(8): 9297-9308.

(责任编辑: 王晓燕)