



東南大學

本科毕业设计（论文）开题报告

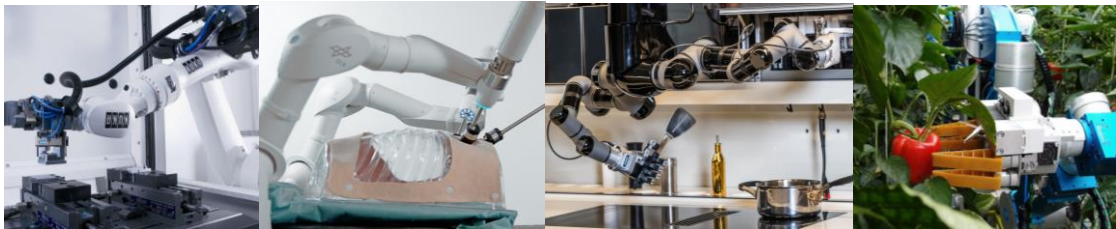
毕业设计	一种电机驱动的多自由度五指
（论文）题目	灵巧手设计与开发

学号：	02021105
姓名：	陈化扬
学院：	机械工程学院
专业：	机械工程
指导教师：	秦龙辉
开题日期：	2025/2/21

一、选题背景和意义：

1.1 选题背景：

随着机器人技术的迅速发展，尤其是在人机交互和智能制造领域，机器人手臂和机器人手的研究和应用越来越受到重视。五指灵巧手作为机械臂的重要组成部分，模拟人类手部的运动和操作能力，对于机器人完成复杂任务至关重要。现有的五指灵巧手多依赖于复杂的气动、液压或电机驱动系统，然而，电机驱动的灵巧手在多自由度控制、精确操作和稳定性方面具有较好的优势。在未来，多自由度电机驱动五指灵巧手，将应用在工业制造^[1]，医疗手术^[2]，家庭服务^[3]，农业生产^[4]等许多领域，如图 1 所示。



a. 工业制造

b. 医疗手术

c. 家庭服务

d. 农业生产

图 1 灵巧手的应用场景^[1-4]。

1.2 选题意义：

随着科技的飞速发展，机器人技术在众多领域的应用变得日益普遍，尤其在那些需要精细操作和高度灵活性的场景中。尽管如此，当前的机器人灵巧手在成本控制、灵活性提升以及应用场景拓展等方面仍然面临着一些挑战。因此，本课题的研究显得尤为重要，其意义主要体现在以下几个方面：

①增强灵巧手灵活性，实现多模态操作：多自由度的电机驱动五指灵巧手可以更好地模拟人类手部的灵活性和精准度，增强机器人在复杂任务中的执行能力，提高机器人在微操作、物体抓取和人机交互中的表现。

②削减成本，优化效率：通过电机驱动方式的创新设计，可以有效降低生产成本，同时，在多自由度控制和稳定性方面提高工作效率，为未来量产提供可行性。

③扩展应用领域，增强适应能力：灵巧手成本降低将有更多的使用可能，自由度较多可以适应更多的场景。例如灵巧手可以更好地适应家庭环境，执行更多多样化的任务，如烹饪、清洁等。

二、课题关键问题及难点：

2.1 关键问题：

在对该课题进行详尽的学术探究后，发现了几个核心问题，这些问题对于推动该研究领域的发展具有决定性意义：

①仿生手指的结构解析与三维设计：手指的设计需要包括指节的形状、关节的连接方式以及手指的驱动方式。关键是如何确保手指在执行各种任务时的灵活性和精确性，特别是在多自由度的情况下，如何平衡结构的强度和柔性。

②驱动系统的部署与集成优化：如何将驱动装置有效地集成到手内，以确保在不增加额外体积的情况下，实现灵巧手的运动和功能。这需要考虑到驱动器的选择、尺寸和手部各部分的空间分布。

③关节运动范围的限位与自由度的限制：由于手部设计涉及多个自由度，需要控制手指的运动范围，防止过度转动造成不必要的损坏或功能障碍。因此，限制各关节的转动幅度至关重要。

2.2 难点：

在对所提出方案进行详尽的分析和评估后，本研究课题可能面临若干挑战性问题。以下是可能存在的难点：

①手指结构的精密装配与运动优化：手指的装配是一个复杂且需要反复验证的过程。在装配过程中，不仅要确保各部件的精确对接，还要保证手指在运动时能够灵活自如地执行各种动作。如何使手指的装配既精准又灵活，是一个需要多次实践的关键问题。

②高自由度下的精确姿态控制：要实现整个灵巧手的精准手势控制，尤其是在高自由度的条件下，控制系统需要非常成熟。如何让控制系统精确地根据输入的手势命令来驱动手部动作，是一个巨大的挑战。

③传感系统的多敏感源件优化布置：传感器的布置需要在手部表面找到合适的位置，以实现抓取过程中的力感知和反馈。这不仅涉及传感器的选择，还需要考虑如何让传感器不影响手部的舒适性和灵活性，因此，精确的布置和集成方案非常关键。

三、文献综述（或调研报告）：

3.1 国内外灵巧手的研究现状

灵巧手的快速发展始于 20 世纪的 70 年代左右，在此之前虽然已经有了一些关于机器手的讨论，例如：在 1962 年，Tomovic 和 Boni 合作设计了一款给患者使用的 Belgrade 手^[5]。但是灵巧手相关的研究还处于萌芽状态。

经过了长达半个世纪的发展，国内外已经有许多不同种类的灵巧手被开发出来。如 Shadow 机械手^[6-7]、日本岐阜大学机械手(GIFU II)^[8-9]、哈尔滨工业大学(HIT)和德国宇航中心(DLR)联合研发的 HIT/DLR I 和 HIT/DLR II 机械手^[10-13]等。

随着灵巧手的功能不断升级，其系统复杂度和研发难度也随之增大。目前，灵巧手的研究重点和技术进步主要涉及以下几个核心方向：机械结构的创新、传感器系统的集成、运动学与动力学研究、控制算法的开发以及抓取策略的设计。

3.2 关键技术解析

机器人灵巧手作为机器人领域的一个重要研究方向，其研究和发展受到机械、电气等诸多方面的影响，其中的关键技术可以总结为如下几点：

3.2.1 驱动结构的设计：对于现有的灵巧手按照驱动的方式分为全驱动和欠驱动两种。欠驱动灵巧手原动机的数量少于被控制的灵巧手自由度，没有驱动源的关节则是进行耦合随动。全驱动灵巧手则是原动机数量与被控制灵巧手的自由度数量相等

欠驱动灵巧手优点在于易于控制，但拟人性不强，稳定性有所欠缺。由于耦合关节结构简单，所占空间小并具备可控性，如今大部分灵巧手都是欠驱动灵巧手。

相对于欠驱动灵巧手，全驱动灵巧手的手指更加灵活，省去了无驱动手指关节的耦合机构，但由于驱动器增多，导致体积变大、安装困难并且灵巧手的控制变得更加繁琐。

在此基础上，灵巧手又可以分为：（1）电机驱动；（2）液压驱动；（3）气压驱动；（4）形状记忆合金。传动方式也可分为：（1）连杆传动；（2）腱绳传动；（3）齿轮/蜗轮蜗杆传动。

- **全驱动的灵巧手：**

全驱动型机械手也称为电机直接驱动型机械手。这是一种直接将电机置于关节上，从而直接或使用齿轮、同步带轮等驱动关节的机械手^[14]。它可以实现与人类手指相似的每个关节自由度的单独驱动及控制，达到与人手相近的灵活度，然而由于需要集成大量驱动器和复杂的控制系统，使得其结构笨重并且难于控制。其典型代表为如图二所示的英国 shadow 灵巧手^[15]和美国的 MPLv2.0 机器人灵巧手^[16]。

MPLv2.0 灵巧手具有主动的 22 自由度，一共有 22 个活动关节，该手的每个手指都有一个电机驱动，用于手指的三个运动学耦合关节，这使得它能够模拟人手的自然运动和抓取动作，展现出高度的灵巧性，但是由于该手的大小和性能依赖于马达且成本较高，故仍有不足之处。

Shadow 灵巧手具有 24 个自由度，一共有 24 个活动关节，是一个使用腱绳传动的全驱动灵巧手，能够执行接近人手的复杂动作，气动肌肉使其具有安全的人机交互能力。但是，由于自由度过多，控制较为复杂，成本极高。



a. MPLv2.0 灵巧手的抓握场景 b. shadow 灵巧手的运动展示
图 2 全驱动灵巧手案例^[15-16]。

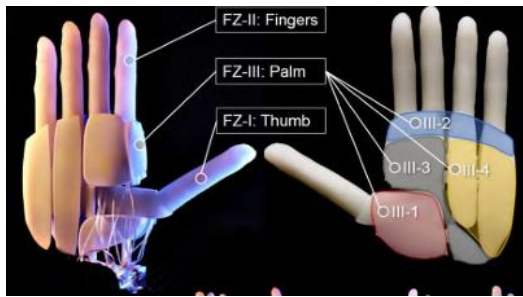
● 欠驱动的灵巧手：

与全驱动机械手相比，欠驱动机械手因其结构和控制上的简化而成为研究的焦点。这类机械手主要可以分为腱索驱动和连杆驱动两大类。

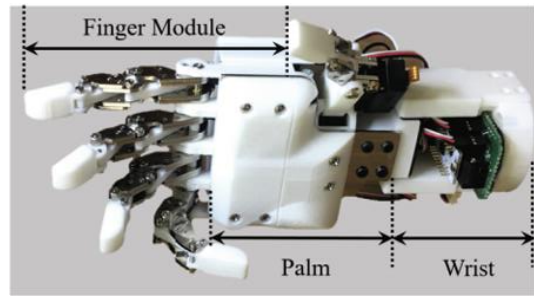
腱索驱动通过腱绳的张力来实现驱动，这种驱动方式与人类的肌肉驱动机制非常相似。它能够实现力的远距离传递，并且所需空间很小，有助于传动机构的合理布局。鉴于腱索驱动结构的简洁性，它成为了驱动方式的首选。

近几年研发的机械手也层出不穷。其中，香港大学开发的 BCL-26 灵巧手^[17]、韩国京熙大学开发的 HRI 手^[18]、华盛顿大学研发的 ACT 手^[19]以及首尔国立大学开

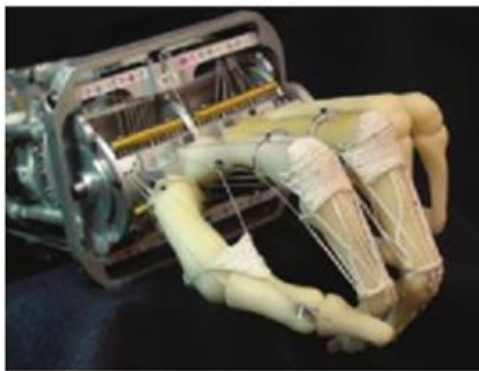
发的 FLLEX Finger^[20]等一系列机械手都是有肌腱驱动型机械手，如图 3 所示。



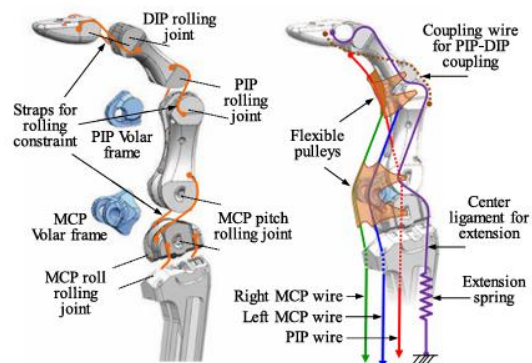
a. BCL-26 灵巧手结构图



b. HRI 整手结构展示



c. ACT 手的抓握实验照



d. FLLEX Finger 结构解析

图 3 不同的欠驱动灵巧手^[17-20]。

其中 BCL-26 手具有 26 个独立自由度 (DOF)，与人手关节一一对应。能够实现类似人类手的复杂运动。这种高度仿生的设计使其在功能和外观上更接近人类手。能胜任各种抓取任务，包括剪刀操作等复杂姿势。但是由于采用气动驱动，BCL-26 气动系统的响应速度和动力传输效率限制了手的动态性能且尽管 BCL-26 手的抓取力达到了 21.9N，但其负载能力仍然有限。这主要是由于软体材料的强度和气动系统的输出力有限。

另一种常见的欠驱动型机械手驱动方式是连杆驱动，它利用多连杆机构将动力从驱动器传输到各个关节，使关节能够朝预定的方向移动。

一个典型的例子是韩国渥太华大学开发的 ILDA 集成式连杆驱动仿人机械手^[21]，如图 4 所示。这款机械手的连杆驱动机构结合了并联和串联机构的设计。整个系统由并联机构产生的二自由度 MCP（掌指关节）运动和串联机构产生的单自由度 PIP（指间关节）组成。借助这种连杆驱动机构，研究人员成功研制出了一

款具有 15 个自由度、20 个关节、5 个手指的 ILDA 机械手。

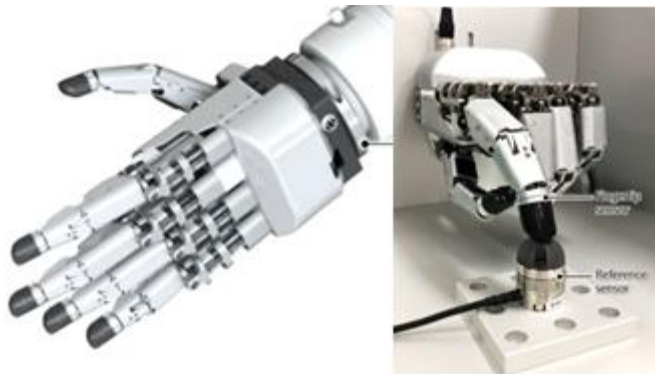


图 4 ILDA 手^[21]

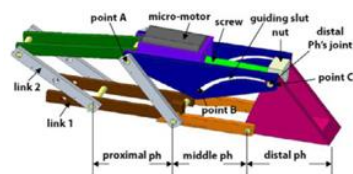
除此之外 S. Reza Kashef 等人列举了几种连杆手指的设计方案, 如图 5 所示, 回顾总结了连杆驱动手指机制的设计趋势, 指出在假肢手的设计中, 需要在人手相似性、复杂性、灵活性和用户舒适性之间进行权衡^[22]。



a. 堆叠双四杆机构手指



b. 齿轮连杆机构手



c. 空间四连杆机构手指



d. 欠驱动自适应手指

图 5 几种经典的连杆手指^[23-26]。

3.3.2 传感技术: 传感器对于机器人灵巧手来说至关重要, 它们确保了机械手能够稳定地抓取物体并执行各种需要技巧和精确度的任务。拥有多种传感器是机器人智能化的关键特征之一。多指灵巧手通常配备有如下类型的传感器: 力/力矩传感器、位置传感器、触觉传感器, 部分还集成了视觉、加速度和滑觉传感器^[27]。

触觉技术相较于视觉和听觉技术的发展较为滞后, 并且由于模拟人类皮肤极具挑战性, 其进展一直较为缓慢。随着触觉技术逐渐受到全球各研究实验室的关

注，在研究的早期阶段，常见的触觉传感器类型包括压阻式、压电式和电容式^[28]等。

以下是四种经典传感方案：

- **压阻式触觉传感器：**基于材料电阻率随压力变化的原理，如浙江大学开发的三轴力触觉传感器，适用于检测实时三轴接触力^[29]。
- **电容式触觉传感器：**利用压力变化影响电容值，具有高灵敏度和低功耗，如合肥大学的柔性三轴力传感器^[30]。
- **压电式触觉传感器：**基于压电效应，通过材料的振动频率检测压力，如 KHANS 等设计的 4*4 压电阵列传感器^[31]。
- **光学式触觉传感器：**通过光敏元器件检测力引起的光变化，如 ZHANG L 等人的光学复合材料传感器，具有高灵敏度和快速响应^[32]。

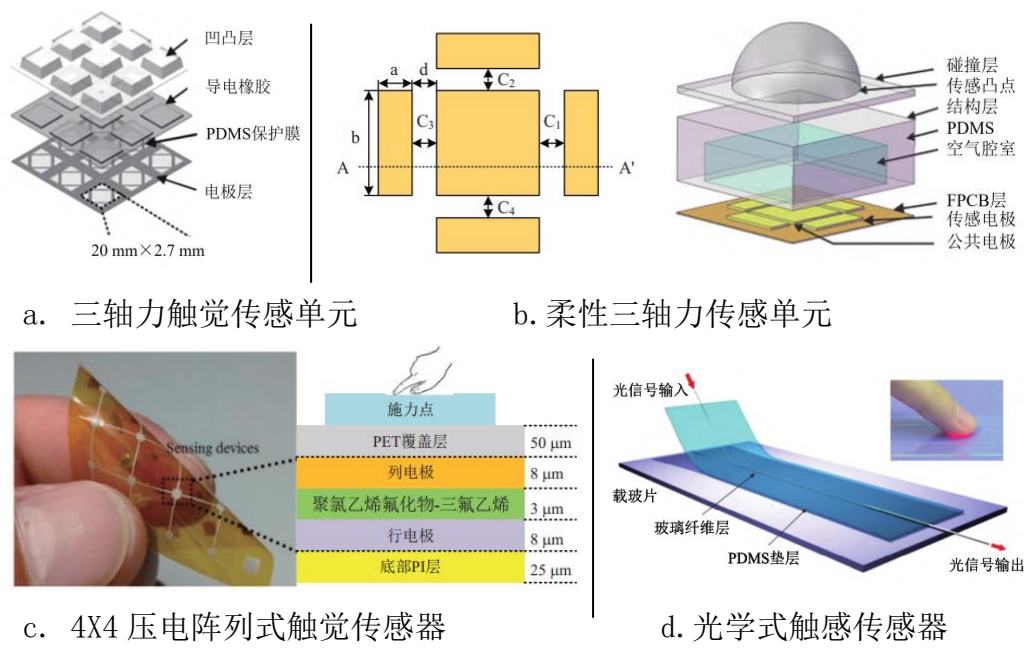


图 6 几种经典触觉传感的方案^[29-32]。

此外，也有一些新型传感方案，例如清华大学提出的四重触觉传感器方案^[33]，如图 7 所示，在多功能集成、高灵敏度和实际应用潜力方面表现出色，能够感知微小的变化，从而实现更精细的操作，显著提升机器人手的物体识别能力。

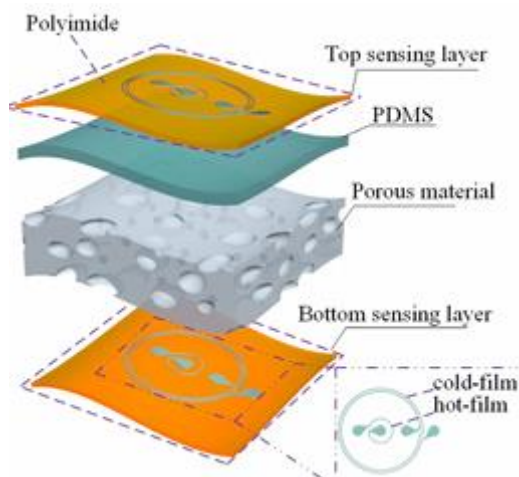


图 7 四重触觉传感器结构图^[33]

3.3.3 控制技术：为了确保机器人灵巧手能够执行精细的操作，不仅需要优秀的硬件，控制系统的设计同样关键。多指灵巧手可视为一个多机器人系统，其手指之间以及与操作对象之间存在一系列约束。在抓取和操作过程中，这些系统展现出闭环多环的特性，面临控制的多样性、力的相互对抗与合作、运动协调等挑战。

以下是一些经典的控制方案：

- **开环控制：**不需要反馈信息，直接根据预定的指令控制灵巧手的动作。
- **闭环控制：**利用传感器反馈（如位置、力、触觉等）来调整控制信号，确保动作的精确性。
- **自适应控制：**根据灵巧手与环境的交互情况动态调整控制参数。

除此之外，近期也有新兴的一些更加前沿的控制方案，如强化学习控制^[34]，深度学习神经解码的控制方案^[35]等，为精确控制提供了更多的可能。

参考文献

- [1] Deng H, Zhang Y, Duan X G. Wavelet transformation-based fuzzy reflex control for prosthetic hands to prevent slip[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2016, 64(5): 3718-3726.
- [2] Wang Y, Chen Z, Mei D, et al. Highly sensitive and flexible tactile sensor with truncated pyramid-shaped porous graphene/silicone rubber composites for human motion detection[J]. Composites Science and Technology, 2022, 217: 109078.
- [3] Kim M, Kang T, Song D, et al. Development of a small-sized intelligent home service robot[C]//2021 18th International Conference on Ubiquitous Robots (UR). IEEE, 2021: 565-570.

- [4] Jin T, Han X. Robotic arms in precision agriculture: A comprehensive review of the technologies, applications, challenges, and future prospects[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2024, 221: 108938.
- [5] Tomovic R, Boni G M. An Adaptive Artificial Hand[J]. Transactions on Automatic Control, 1962, 7(3): 3-10.
- [6] Shadow Robot Company Inc. Considered to be the most advanced Dextrous Hand in the world [EB/OL] (2007-02-13) [2020-11-21]. <http://www.shadowrobot.com/hand/overview.shtml>
- [7] Röhling F, Haschke R, Steil JJ, et al. Platform portable anthropomorphic grasping with the bielefeld 20-DOF shadow and 9-DOF TUM hand [C]//IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots & Systems. San Diego: IEEE, 2007. DOI: 10.1109/IROS.2007.4398963.
- [8] Mouri T, Kawasaki H, Yoshikawa K, et al. Anthropomorphic robot hand; Gifu Hand III [J]. Robotics Society of Japan, 2004, 22(1): 55-56.
- [9] Kawasaki H, Komatsu T, Uchiyama K. Dexterous anthropomorphic robot hand with distributed tactile sensor; Gifu Hand II [J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2002, 7(3): 296-303.
- [10] Gao X H, Jin M H, Jiang L, et al. The DLR/HIT dexterous hand; work in progress [C]//Proceedings of the 2003 IEEE International Conference on Robotics & Automation. New York: IEEE, 2003: 3164-3168.
- [11] 樊绍巍, 刘伊威, 金明河, 等. HIT/DLR Hand II 类人形五指灵巧手机构的研究 [J]. 哈尔滨工程大学学报, 2009, 30(2): 171-177.
- Fan Shaowei, Liu Yiwei, Jin Minghe, et al. Research on the mechanics of the HIT/DLR Hand II anthropomorphic five-finger dexterous hand [J]. Harbin Engineering University, 2009, 30(2): 171-177.
- [12] Wei R, Gao X H, Jin M H, et al. FPGA based hardware architecture for HIT/DLR Hand [C]//IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. New York: IEEE, 2005: 3233-3238.
- [13] Liu H, Meusel P, Seitz N, et al. The modular multisensory DLR-HIT-Hand [J]. Mechanism and Machine Theory, 2007, 42(5): 612-625.
- [14] Lee, D., Park, J., Park, S., Baeg, M. & Bae, J. KITECH-hand: a highly dexterous and modularized robotic hand. IEEE/ASME Trans. Mech. 22, 876-887 (2017).
- [15] Shadow Robot Company, Inc. Considered to be the most advanced Dextrous Hand in the world [EB/OL]. (2007-2-13). <http://www.shadowrobot.com/hand/overview.shtml>.
- [16] Johannes, M. S. et al. An overview of the developmental process for the modular prosthetic limb. J. Hopkins APL Tech. Dig. 30, 207-216 (2011).
- [17] Zhou J, Chen X, Chang U, et al. A soft-robotic approach to anthropomorphic robotic hand dexterity[J]. Ieee Access, 2019, 7: 101483-101495.
- [18] Park H, Kim D. An open-source anthropomorphic robot hand system: HRI hand[J]. HardwareX, 2020, 7: e00100.
- [19] Deshpande A D, Xu Z, Weghe M J V, et al. Mechanisms of the anatomically correct testbed hand[J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2013, 18(1): 238-250.
- [20] Kim Y J, Yoon J, Sim Y W. Fluid lubricated dexterous finger mechanism for human-like impact absorbing capability[J]. IEEE Robotics and Automation Letters,

2019, 4(4): 3971–3978.

[21] U. Kim et al., “Integrated linkage-driven dexterous anthropomorphic robotic hand,” *Nat Commun*, vol. 12, no. 15, p. 7177, Dec. 2021, doi: 10.1038/s41467-021-27261-0

[22] Jang G, Lee C, Lee H, et al. Robotic index finger prosthesis using stackable double 4-BAR mechanisms[J]. *Mechatronics*, 2013, 23(3): 318–325.

[23] Li X, Huang Q, Chen X, et al. A novel under-actuated bionic hand and its grasping stability analysis[J]. *Advances in Mechanical Engineering*, 2017, 9(2): 1687814016688859.

[24] Azlan N Z, Yamaura H. Anthropomorphic finger with optimized geometric parameters for pinching and grasping tasks[J]. *Mechanism and machine theory*, 2012, 49: 52–66.

[25] Gong D, Hao L, Yu J, et al. Bionic design of a dexterous anthropomorphic hand actuated by antagonistic PAMs[C]//2020 IEEE International Conference on Real-time Computing and Robotics (RCAR). IEEE, 2020: 493–498.

[26] Kashef S R, Amini S, Akbarzadeh A. Robotic hand: A review on linkage-driven finger mechanisms of prosthetic hands and evaluation of the performance criteria[J]. *Mechanism and Machine Theory*, 2020, 145: 103677.

[27] Wang Y, Hao T, Liu Y, et al. Anthropomorphic soft hand: Dexterity, sensing, and machine learning[C]//Actuators. MDPI, 2024, 13(3): 84.

[28] 王宏民, 梁靖斌, 李江源, 潘增喜, 邓辅秦. 机械手触觉技术研究发展综述[J]. *传感器世界*, 2021, 27(12): 1–9. DOI: 10.16204/j.cnki.sw.2021.12.012.

[29] WANG Y, XI K, MEI D, et al. Three-axis contact force measurement of a flexible tactile sensor array for hand grasping applications[M]//Wearable Sensors and Robots. Springer, Singapore, 2017: 67–79.

[30] HUANG Y, YUAN H, KAN W, et al. A flexible three-axial capacitive tactile sensor with multilayered dielectric for artificial skin applications[J]. *Microsystem Technologies*, 2017, 23(6): 1847–1852.

[31] KHAN S, DANG W, LORENZELLI L, et al. Flexible pressure sensors based on screen-printed (PVDF-TrFE) and (PVDF-TrFE)/MWCNTs[J]. *IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing*, 2015, 28(4): 486–493.

[32] ZHANG L, PAN J, ZHANG Z, et al. Ultrasensitive skinlike wearable optical sensors based on glass micro/nanofibers[J]. *Opto-Electronic Advances*, 2020, 3(3): 18–24.

[33] Li G, Liu S, Wang L, et al. Skin-inspired quadruple tactile sensors integrated on a robot hand enable object recognition[J]. *Science Robotics*, 2020, 5(49): eabc8134.

[34] Yu C, Wang P. Dexterous manipulation for multi-fingered robotic hands with reinforcement learning: A review[J]. *Frontiers in Neurorobotics*, 2022, 16: 861825.

[35] Liu K, Liu J, Hou F, et al. Dexterous robotic hand with humanoid finger structure and large coverage tactile sensing ability for Human-Robot Interactions[C]//2022 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO). IEEE, 2022: 531–536.

[36] Shi X, Wang Y, Qin L. Surface recognition with a bioinspired tactile fingertip[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2023, 23(16): 18842–18855.

四、方案（设计方案、或研究方案、研制方案）论证：

4.1 目标：

设计并制造一款**低成本**、具备**刚柔结合结构**并集成传感器的**多自由度灵巧手**，旨在有效仿真人体手部动作，能够实现**基本抓取功能及多种手势操作**。

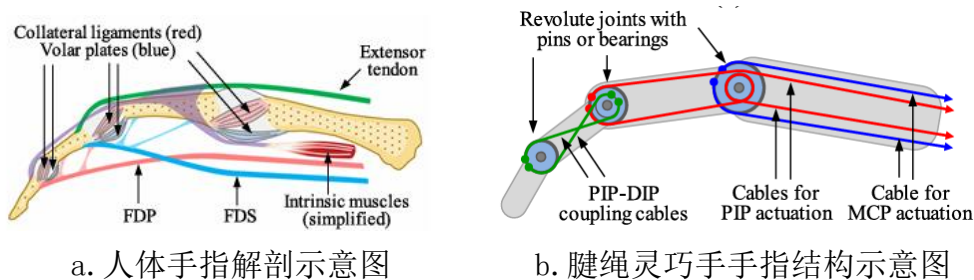
4.2 仿生结构分析：

在对于人体手指仿生结构进行详尽分析以后，可得人体仿生结构设计将围绕以下三个方面进行：

①**关节运动原理的解析**：如图 8 所示，手指由三个指节组成，关节间摩擦力较小，适合使用轴承来替代关节，从而减少摩擦并提高运动精度。

②**手指肌腱驱动原理**：手指的运动通过肌腱的拉力实现，属于欠驱动系统。因此，使用腱绳来模拟肌腱的作用，能够有效简化结构并控制手指的运动。

③**皮肤触觉感知实现**：手指表面拥有丰富的触觉感官，适合使用触觉传感器来模拟人体的触觉反馈，增强对外界物体的感知能力。



a. 人体手指解剖示意图

b. 腱绳灵巧手手指结构示意图

图 8 手指仿生设计示意^[20]。

4.3 方案内容：

通过对不同驱动形式，传动形式，传感器方案的对比，最终本课题确定以电机驱动，腱绳传动为组合方案，该方案的优势如下：

①**电机驱动精准快速**：提供高精度和快速的响应，适应多种控制策略，适合执行精细动作，确保准确控制。

②**腱绳传动简洁灵活**：如图 9 所示，模仿肌腱原理，结构简洁，能实现自然的手指弯曲，摇摆的灵活性。

③**刚柔混合性能强大**：结合电机和腱绳，提供强大驱动力同时保持手指的柔性和灵活性，可以很好抵抗外力破坏。

④**传感系统内置感知灵敏**：内置触觉传感器，能实时反馈手指与物体的接

触，增强感知能力和操作精度。

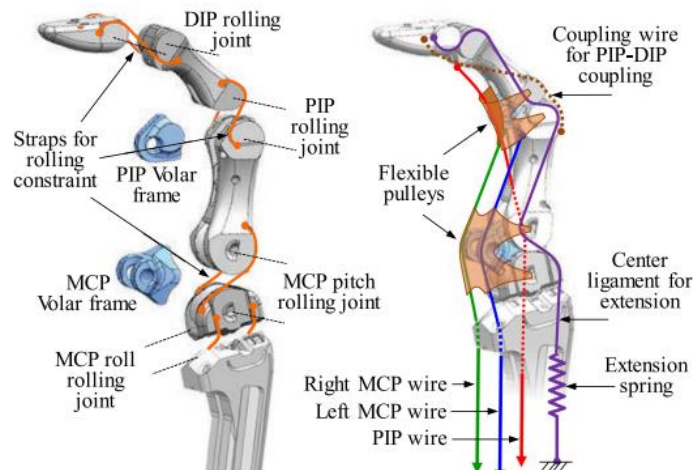


图 9 腱绳灵巧手指示意图^[20]

4.4 整手设计参考要点：

基于对人体手部的仿生结构详细分析，得到以下手部设计的关键要点：

①五指集成腱绳传动：五指均采用腱绳传动，模仿人手结构，如图 10 所示，增强灵活性与自然感。

②驱动系统的内部集成：驱动舵机集成在手掌部分，有助于减小整体体积，使结构更加紧凑，便于装配和优化空间利用。

③拇指的特殊结构设计：大拇指单独设计并增加额外的自由度，以提供更多抓握角度，增强手部功能和灵活性。

④控制线的布局优化：控制线模仿手部经络走向，从手腕延伸至手指，保持结构紧凑且灵活。

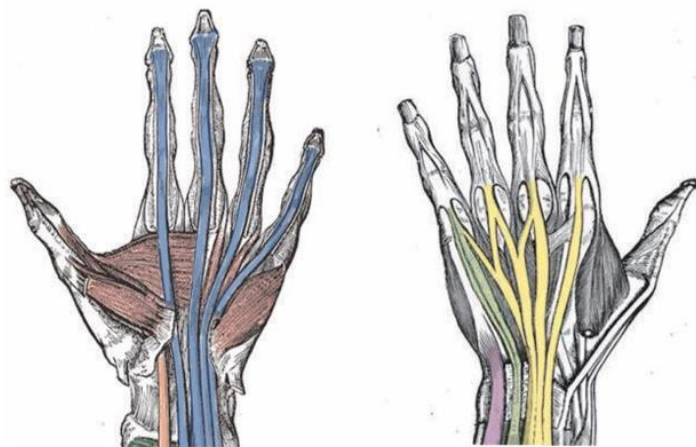


图 10 整手经脉图^[25]

4.5 控制利用 Arduino 控制板：

通过对比 Arduino，STM32，ARM 等一系列开发板后，得出 Arduino 开发板具有以下优点：

①**开发周期较短：**相比于 stm32，Arduino 控制板有更简化的开发环境，操作便捷，开发周期短。

②**集成函数库丰富：**Arduino 平台提供完善的舵机控制库，简化了舵机的角度控制过程。

③**控制板制作紧凑：**Arduino 控制板具有紧凑的体积，如图 11 所示，适合在空间有限的应用场景中使用。

④**C++模块化编程：**C++的面向对象特性使得代码结构更具模块化，便于管理和扩展，同时提供了较高的执行效率。

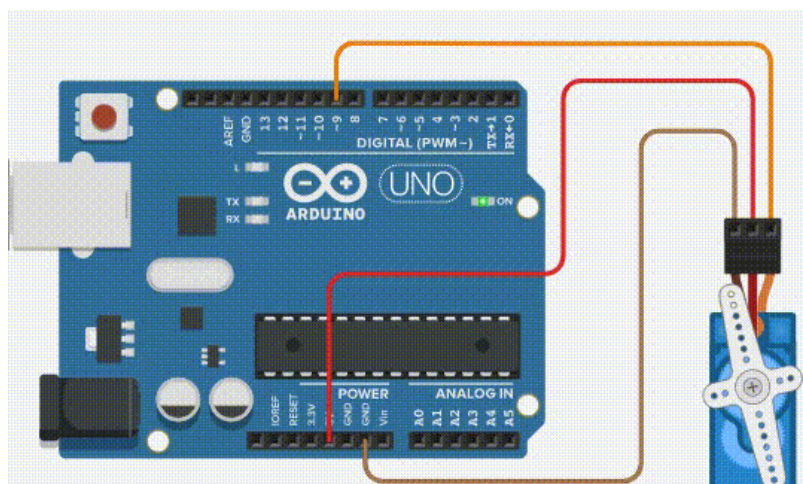


图 11 Arduino 控制舵机示意图

4.6 传感利用 PVDF 传感单元：

基于现有的成熟传感方案，本项目选择采用 PVDF 传感单元作为传感系统主体进行集成，该系统具有以下优点：

①**灵敏度高，响应速度快：**PVDF 材料具有优异的压电特性，能快速响应微小的形变和振动，适合捕捉灵巧手在操作中的细微触觉变化。

②**柔性和适应性强：**PVDF 薄膜柔软且轻薄，如图 12 所示，能够很好地贴合灵巧手的曲面结构。

③**操作功能性全面：**PVDF 传感器不仅能检测静态压力，还能测量动态振动信号，适用于多种操作任务，如抓握、滑动和纹理识别等。

④**低成本，易制造：**PVDF 传感器的制造过程相对简单，不需要复杂的设备或技术，成本较低。

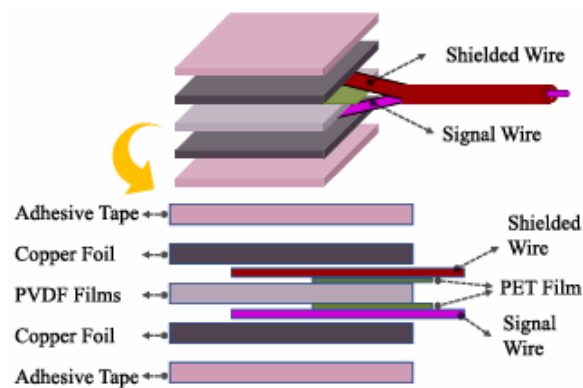


图 12 PVDF 传感结构图^[36]

4.7 实验方案：

①**手势测试实验：**基于 Arduino 控制平台，实现仿人机械手多自由度协同控制，完成典型手势动作的精确复现，如图 13 所示，包括握拳、数字比划等基础手势模式。



图 13 常见手势图

②**抓握传感实验：**控制机械手对于常见物品进行抓握实验，如图 14 所示，尝试布置传感器来采集抓取时获取的电信号。



图 14 机械手抓取物品示意图

五、进度安排：

第 1-3 周：深入阅读相关文献，完成整手结构设计与原理分析，确定运动学模型和控制策略。

第 4-6 周：选择并整合适当电机类型，完成电机与机械结构的集成，并进行初步组装。

第 7-9 周：进行运动调试，确保各关节动作的灵活性，完成简单手势的演示与测试。

第 10-12 周：设计并实现控制电路与算法，确保灵巧手的精确电控与自动化操作。

第 13-15 周：安装触觉传感器并进行信号采集测试，验证信号的准确性与可靠性。

第 16 周：进行系统的最终优化，解决可能存在的技术问题，完善系统的稳定性与性能。