

# 浙江大学

## 本科毕业生毕业论文（设计）



中文题目：仿人五指灵巧手设计与控制

英文题目：Design and Control of Five-finger Dexterous  
Anthropomorphic Hand

姓名 学号： 吴浩 3200102027

指导教师： 董会旭

年级与专业： 2020 级 机械工程

研究方向： 机器人灵巧手设计与控制

所在学院： 机械工程学院

2024 年 6 月 10 日



## 浙江大学本科生毕业论文（设计）诚信承诺书

- 本人郑重地承诺所呈交的毕业论文（设计），是在指导教师的指导下严格按照学校和学院有关规定完成的。
- 本人在毕业论文（设计）中引用他人的观点和参考资料均加以注释和说明。
- 本人承诺在毕业论文（设计）选题和研究内容过程中没有抄袭他人研究成果和伪造相关数据等行为。
- 在毕业论文（设计）中对侵犯任何方面知识产权的行为，由本人承担相应的法律责任。

毕业论文（设计）作者签名：



2024年6月10日



## 致 谢

春去秋来，四载如流。甲辰孟夏，得言十万将付梓；求是湖畔，百转始道是平常。

漫漫学涯十六度，书似青山过万舟。余拾道于海陵，而得业于武林。自识坐井才薄，唯效昌黎焚膏，朝乾夕惕，以告鸿鹄。

师者董公，德学无两；寄我以冀，授学以渔。与于聊谈，如春风沐；景行景止，不言成蹊。出我于幽壑之间，迁我向乔木之上，先生之风，山高水长。

余亲劬劳，不辍营役；年高天命，挂怀为衣。游子远而孤榻寒，韶华暮见鬓发长；南风吹心为谁吐，结草衔环以为报。

同砚同侪，有论微宏之才，怀凌青云之志，思兴遄飞，鸿轩凤翥。尝琢学问于竟日，话忧思在承烛。金兰之心不能忘，是以狭路化亨衢。

常有佳人在侧，思且伴我宽愁肠，车马慢，碾时光。春风要留星河路，天涯远则朝与暮。

文末搁笔，终是纸短。云程发轫，干霄凌云，莫叹路遥马疲，山后自有逢时。

吴浩

二〇二四年五月于求是书院



## 摘要

灵巧手是模仿人手复杂动作和功能而设计的机械手，具有高度的灵活性和操作性。作为系统末端执行的关键部件，灵巧手的结构直接影响到机器人的功能性和适应性。目前的灵巧手设计中，普遍存在着灵巧性和复杂度间的矛盾，因此，本设计结合机械、材料、驱动、传感等领域的知识和技术，深度模仿人手的结构构造和抓握方式，开发了一款结构紧凑、抓取模式多样的灵巧手。

本文在综合不同灵巧手设计方案的基础上，以杆件配合齿轮和蜗轮蜗杆为传动，只保留人手中重要的自由度，简化灵巧手结构和控制，将驱动器、传感器和传动机构都内置于手指或手掌内部，从而实现高自由度高集成化的灵巧手结构设计。此外，用运动学和静力学给出末端与关节空间下位置和力的理论计算，在合理的电子元器件和操作规划下开展灵巧手抓取和操作实验，主要完成的内容有：

(1) 综述灵巧手的研究现状和技术路线，针对灵巧手用腱和连杆传动中的不足，以人手的生理结构和运动方式为模仿对象，制定灵巧手的设计目标和思路。详细设计灵巧手自由度的配置、各个手指的结构外形和掌指间的空间布局，明确驱动、传动、感知各个模块的功能作用和实现方式。

(2) 基于灵巧手各手指的结构，用运动学和静力学的方法得到在笛卡尔空间、关节空间和驱动器空间下运动和力的传递关系，用蒙特卡洛方法可视化灵巧手的工作空间，为设计、控制和评价奠定理论基础。

(3) 搭建灵巧手机电系统，在完成机械结构制作和装配的同时，将电子元器件以合理的布局嵌入到灵巧手内部，用下位机实现在位置环和力环上的闭环控制，上位机则用串口收集数据和下发命令，从而完成硬件在环的实时控制。

(4) 在实验中全面衡量灵巧手的运动范围、有效负载、稳定性、抓握和操作的灵巧性等，用单个手指屈、伸、收、展的运动和手指间的协调运动实验证灵巧手丰富的运动能力；用单个手指和灵巧手能负载的最大重量估计其有效负载；让灵巧手以不同的功能模式抓握形状、大小和材质各异的物品，操作物体在手内改变其位置姿态，衡量其功能性和灵巧操作水平；将灵巧手与机械臂结合，测试其操纵工具完成目标任务的有效性。

**关键词：** 机器人灵巧手，结构设计，机电一体，抓取规划



## Abstract

Dexterous hands are manipulators designed to imitate the complex movements and functions of the human hand, with a high degree of dexterity and operability. As a key component of the system's end execution, the structure of the dexterous hand directly affects the functionality and adaptability of the robot. In the current dexterous hand design, there exists a common contradiction between dexterity and complexity. Therefore, this design combines the knowledge and technologies in the fields of machinery, materials, actuation and sensing, and deeply imitates the structure and grasping mode of human hands to develop a dexterous hand with compact structure and various grasping modes.

In this thesis, on the basis of the synthesis of different dexterous hand design solutions, we use rods with gears and worm gears as transmission. By retaining the important degrees of freedom in the human hand only, we simplify the structure and control of the dexterous hand and integrate the actuators, sensors and transmission mechanisms inside the fingers or palms, thereby achieving a high degree of freedom and highly integrated dexterous hand structure design. In addition, kinematics and statics are used to provide theoretical calculations of the position and force between the end space and joint space, and dexterous hand grasping and manipulation experiments are carried out under reasonable electronic components and operation planning. The main contents completed are as follows:

(1) Summarize the current research progress and technical routes of dexterous hands, and formulate the design goal and idea of dexterous hand by taking the physiological structure and movement patterns of human hands as the object of imitation in view of the deficiencies of dexterous hands with tendon and connecting rod transmission. Design the configuration of the degrees of freedom of the dexterous hand, the structural appearance of each finger and the spatial layout between the palm and fingers in detail. Make clear the functional roles and implementation methods of each module in drive, transmission, and perception.

(2) Based on the structure of each finger of the dexterous hand, the kinematics and statics methods are used to obtain the transfer relations of motion and force in Cartesian space, joint space and actuator space, and the Monte Carlo method is used to visualize the workspace of the dexterous hand, so as to lay a theoretical foundation for design, control and evaluation.

(3) Build the electrical system of the dexterous hand. While completing the fabrication and assembly of the mechanical structure, the electronic components are embedded into the dexterous hand in a reasonable layout. The lower computer is used to achieve closed-loop control on the position loop and force loop, while the upper computer collects data and issues the commands by using the serial port, so as to complete the hardware-in-the-loop real-time control.

(4) In the experiment, the range of motion, payload, stability, grasping and operation dexterity of the dexterous hand are comprehensively measured. Use the flexion, extension, adduction and abduction of a single finger and the coordinated movement between fingers to verify the rich movement abilities of the dexterous hand. Estimate the payload by the maximum weight that individual fingers and dexterous hand can load. The dexterous hand is allowed to grasp objects of different shapes, sizes and materials in different functional modes, and manipulate objects to change their position and posture in the hand, so as to measure the level of its functionality and dexterous manipulation. Finally, combine the dexterous hand with robotic arm to test the effectiveness in manipulating tools to complete target tasks.

**Keywords:** Dexterous robot hand, Structure design, Mechanical-electrical integration, Grasping planning.

# 目 录

摘要 .....	I
Abstract.....	II
第1章 绪论 .....	1
1.1 研究背景与意义 .....	1
1.2 人手的结构与运动特点 .....	1
1.3 国内外研究现状 .....	3
1.4 论文的主要研究内容.....	6
1.5 本章小结 .....	7
第2章 灵巧手结构设计 .....	8
2.1 引言 .....	8
2.2 设计目标和思路 .....	8
2.3 灵巧手总体结构设计.....	10
2.4 灵巧手手指模块化设计 .....	11
2.4.1 基关节结构 .....	12
2.4.2 手指结构.....	14
2.5 灵巧手拇指结构设计.....	15
2.6 手掌结构设计 .....	17
2.7 本章小结 .....	18
第3章 灵巧手运动学与静力学 .....	19
3.1 引言 .....	20
3.2 杆件传动机构运动学.....	20
3.3 四关节手指机构运动学 .....	24
3.3.1 正运动学.....	24
3.3.2 逆运动学.....	27
3.3.3 微分运动学 .....	28
3.4 灵巧手静力学 .....	29
3.5 灵巧手工作空间 .....	29
3.5.1 大拇指工作空间 .....	30

3.5.2 其余四指工作空间.....	30
3.5.3 整体工作空间 .....	31
3.6 本章小结 .....	32
第 4 章 灵巧手机电系统 .....	33
4.1 引言 .....	33
4.2 机械系统搭建.....	33
4.2.1 灵巧手手指装配 .....	33
4.2.2 灵巧手大拇指装配.....	34
4.2.3 手掌结构装配 .....	35
4.2.4 整手结构装配 .....	35
4.3 电子系统搭建.....	36
4.3.1 驱动器系统设计 .....	37
4.3.2 传感器系统设计 .....	38
4.3.3 控制器系统设计 .....	40
4.4 控制实现 .....	41
4.4.1 下位机程序实现 .....	41
4.4.2 上位机程序实现 .....	44
4.5 仿真模型搭建.....	44
4.6 本章小结 .....	45
第 5 章 灵巧手抓取和操作实验 .....	47
5.1 引言 .....	47
5.2 运动性能验证.....	47
5.3 负载性能验证.....	49
5.4 抓握物体能力验证 .....	50
5.5 手内操作能力验证 .....	53
5.6 工具操作能力验证 .....	54
5.7 本章小结 .....	58
第 6 章 总结与展望 .....	59
6.1 工作总结 .....	59
6.2 研究展望 .....	60
参考文献 .....	61

## 第1章 绪论

### 1.1 研究背景与意义

随着智能技术和现代制造技术的发展，机器人的应用从制造向非制造领域跨越，像宇宙探测<sup>[1]</sup>、能源开发、灾难救援、军事、服务等行业都开始出现机器人的身影。与制造业相比，这些行业在工作环境上的非结构化和不确定性因素要求机器人具有灵活的操作能力、对外感知能力及局部的自主规划能力。末端执行器作为与环境交互、操作物体和收集信息的重要媒介，其精确度、灵活性和功能性直接影响着机器人完成任务的质量和效率。然而，在实际的工业应用中，机器人末端执行器只能面向特定任务，通用性差，而且难以精确定位和操作，成为制约机器人精细操作和应用普及的瓶颈。在寻求解决途径的过程中，人类的双手启发可以在结构、外形、运动、感知、操作等方面进行模仿<sup>[2]</sup>，使其具有人手灵巧抓持和复杂操作的能力。

人手具有5个手指，21个自由度，其正常抓握功能有赖于手部骨和关节动力链的完整性、手内外在肌之间协同和拮抗的平衡关系以及手的各种感觉的正常输入<sup>[3]</sup>。因此，机器人灵巧手同样是集结构、材料、传动、感知、建模与控制的高度复杂和灵活的系统。与工业中传统的二指夹持器相比，仿人灵巧手可以面向不同材质、尺寸、重量和形状的物品进行抓取，而且可以完成精细的手内操作，从而大大提高其对复杂多样环境的适应能力、灵活性和通用性。灵巧手普遍设计为3~5指，各个手指有3个关节，这样灵巧手可以在抓取过程中与被操纵物体进行非单点接触，从而实现在指关节固定时能完全限制物体运动，在运动时能使物体产生任意运动<sup>[4]</sup>。在对灵巧手空间位置和力矩理论计算的基础上，规划各个手指的位置和布局，用指间的协同控制和操作规划实现给定物体的运动和作用力，从而让其能够稳定、可靠、高精度地抓握不同物体。灵巧手的产生是有其必要性的，一方面，其可以代替人类进入有毒、有害、高温或危险的环境从事高难度、高重复性及高精细度的工作<sup>[5]</sup>，另一方面，灵巧手逐渐融入人类生活，协助人工作甚至替换人缺失的上肢，帮助残障人士进行正常的活动<sup>[6]</sup>。灵巧手是机器人与操作对象之间必需的桥梁和纽带，发挥着重要的作用，其研制与开发具有现实意义。

### 1.2 人手的结构与运动特点

灵巧手以人手的结构和功能为模仿对象，其研究的最终目标也是期望能够像人手一样对形态各异的物体进行稳定灵活的抓取操作。因此，为了实现拟人化设计，对人体手部的结构进行研究。手部有 27 块骨头和 19 个关节，由 34 块肌肉牵引完成动作，被 48 条神经控制。手部骨骼分为 5 块掌骨、14 块指骨以及 8 块腕骨，指骨可以分为近节指骨、中节指骨和远节指骨。腕骨、掌骨和近节指节、中节指节、远节指节之间形成腕掌关节（CM）、掌指关节（MCP）、近端指间关节（PIP）和远端指间关节（DIP）。前端四指每个手指都有 4 个自由度，其中掌指关节是一个万向关节，具有两个轴线垂直相交的转动自由度；近端和远端指间关节则是简单的铰链关节，各有一个自由度，而且两关节具有线性耦合运动。与其他手指相比，大拇指具有独特的解剖结构，其腕掌关节为双凹的鞍状结构，只有两节指骨，但是可以弯曲向手掌中心旋转让拇指与其他四指相碰，三个关节和韧带在相应肌肉协同运动的配合下可以完成屈、伸、收、展、环转和对掌运动<sup>[7]</sup>，让人能够更好地使用工具。拇指的功能非常重要，手部功能的完成和发挥往往都需要拇指的配合。综合来看正常人手指的运动具有以下特点：各手指关节的屈曲/伸展运动被生理结构限制在一定的范围内<sup>[8]</sup>；四指远端指间关节和近端指间关节间有一定的约束关系，在没有外力的条件下，其屈曲/伸展运动相耦合。手的解剖结构和运动方式见图 1.1。

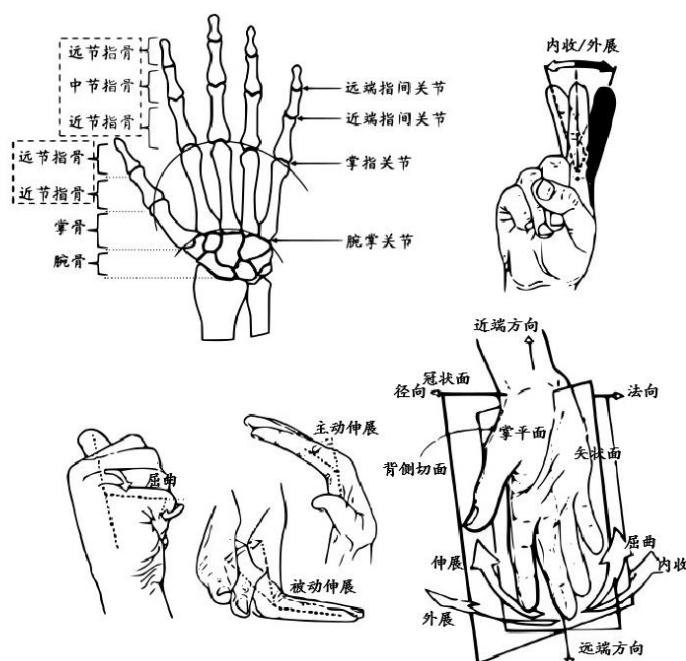


图 1.1 人手骨骼构造和运动方式

手的功能模式可以归纳为六种<sup>[9]</sup>，分别为圆柱抓握、指尖抓握、钩状抓握、掌心抓握、球形抓握及侧边捏握。其中，指尖抓握、掌心抓握及侧边捏握为精确抓握，通常

是在手桡侧部分参与下产生的精细的功能动作；圆柱抓握、钩状抓握及球形抓握则为强力抓握，是由拇指运动与手部尺侧的环指和小指用力屈曲相结合产生的动作，其示意图如图 1.2 所示。Feix 等人又按分类学的基本原理将手部运动的抓握类型分为细致的 33 种模式<sup>[10]</sup>。



图 1.2 人手抓握物体的方式

人手结构构造和抓握方式的研究对灵巧手的设计有重要的启示作用，由于人手高自由度、结构复杂紧凑的结构特征，机械手常常无法完美复刻人手的功能，因此其设计都是在特定场合和功能要求下的简化和权衡。

### 1.3 国内外研究现状

从灵巧手技术来看，其研究和发展总体可以分为三个阶段<sup>[11,12]</sup>：（1）20 世纪 70 年代—90 年代，灵巧手开始搭载电机、腱绳或其他传动部件，实现基本的抓持动作；（2）20 世纪末，得益于嵌入式硬件和微电机技术的发展，灵巧手具备更高的系统集成度和更加丰富的感知能力；（3）21 世纪以来，借助欠驱动、电机内置等方法，灵巧手的功能性、鲁棒性及灵巧操作水平都得到新的提升。

1974 年日本的 Okada 灵巧手<sup>[13]</sup>是早期灵巧手的典型代表，其 3 根手指分别模仿人的拇指、食指和中指，用电机驱动和肌腱传动的方法，实现 11 个自由度的运动。1983 年，Salisbury 从运动学的观点出发，在对灵巧手实现抓持和操作物体的理论研究的基础上，开发了 Stanford/JPL 手<sup>[14]</sup>，其用到 12 个直流伺服电机作为关节驱动元件，N+1 型腱传动系统传递运动和动力。Utah/MIT 灵巧手<sup>[15]</sup>的设计用模块化的思想设计出 4 个相同结构的手指，每个手指都有 4 个自由度，其用气动伺服缸作为手指关节的驱动元件，2N 型绳索（腱）和滑轮实现远距离运动和动力的传递。

灵巧手发展的第二阶段中，以德国宇航中心的 DLR-I 手、NASA 的 Robonaut 手为代表的灵巧手在构型、灵巧性和感知能力都得到提高。DLR-I 手<sup>[16]</sup>由 4 个完全相同的手指组成，每个手指有 4 个关节和 3 个自由度，末端两个关节与人手类似，存在机械耦合关系；其用微型直线驱动器作为驱动元件，从而将所有驱动器都嵌入到手指或手掌内部；而且其在每个手指上有 28 个传感器，具有丰富的感知能力。NASA Robonaut 手<sup>[17]</sup>则由 1 个用于安装电机和电路板的前臂、1 个手腕和 5 个手指组成，12 个无刷电机为驱动，共实现 14 个自由度的运动，其中，拇指、食指和中指各有 3 个自由度，组成操作部分；无名指和小指各有 1 个自由度，组成抓持部分；手掌有 1 个自由度，与小臂间组成 2 自由度手腕。

高度系统集成的灵巧手具有灵活性和功能性的优势，但是系统的复杂性会造成高额的制造成本，而且降低系统可靠性和维护性。因此，简化系统，提高鲁棒性是这十年来灵巧手设计的重要方向。英国 Shadow 公司开发的产品化灵巧手 Shadow 手<sup>[18]</sup>具有与成年人手相近的尺寸，有 5 个手指，其中拇指有 5 个自由度，其余 4 指各有 4 个自由度，手腕有 2 个自由度，其由安装在机器人前臂的“气动肌肉”实现关节的远距离柔性传动，而且 Shadow 手具有高精度的关节位置检测和触觉感知功能。基于连杆传动机构开发的灵巧手 ILDA<sup>[19]</sup>，每个手指模块化设计，共有 15 个自由度、20 个关节，每个手指上由旋转电机和滚珠丝杆组合产生三个线性位移，从而产生三自由度的运动和 34N 的高力输出。ILDA 手在掌内集成了驱动和传动需要的所有组件，尺寸紧凑，具有高度的灵活性，而且指尖具有触觉感知功能，能够操作日常工具完成实际的操作任务。此外，Gifu-III<sup>[20]</sup>、Metamorphic<sup>[21]</sup>、PISA/IIT<sup>[22]</sup>、Allegro 等灵巧手同样展现出优秀的灵巧操作水平和商用价值，图 1.3 简要概括了国外在灵巧手领域的研究历程。

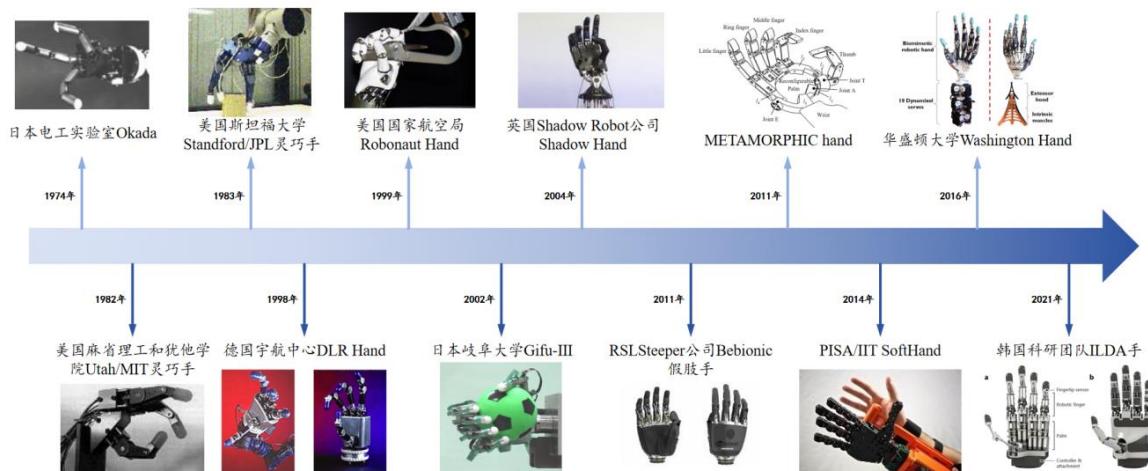


图 1.3 国外灵巧手发展历程

国内针对灵巧手的研究以北京航空航天大学和哈尔滨工业大学的成果最具有代表性。2001年，哈工大(HIT)联手德国宇航中心(DLR)共同研发一种以齿轮和连杆为传动的 HIT/DLR 灵巧手<sup>[23,24]</sup>，其由5个结构相同的模块化手指和1个独立手掌组成，具有15个自由度，手指末端两关节的运动用钢丝耦合机构实现，伞齿轮组成的差动机构耦合实现了基关节两自由度的运动。此外，DLR-HIT 灵巧手在设计上与人手外形结构相似，而且整手集成有6维传感器、关节力/位置传感器、加速度传感器和触觉传感器，所有驱动器和电路板都能集成到手指或手掌内部。2005年，北航机器人研究所学习 Stanford/JPL 灵巧手的设计，先后研制 BH-1、BH-2、BH-3、BH-4 四种型号的灵巧手。新一代的 BH-985 灵巧手<sup>[25]</sup>具有5个手指和1个手掌，外形尺寸约为人手的1.5倍，质量小于1.5kg，其用内置的 Maxon 直流伺服电机为驱动，用齿轮、连杆和钢丝传动。除了高校外，由科技公司开发的 DoraHand、Inspire、TRX-Hand 等灵巧手占据着主要的市场。

综合来看，灵巧手的主要传动方式有腱绳传动、连杆传动和齿轮/蜗轮蜗杆传动，其分类如图 1.4 所示。

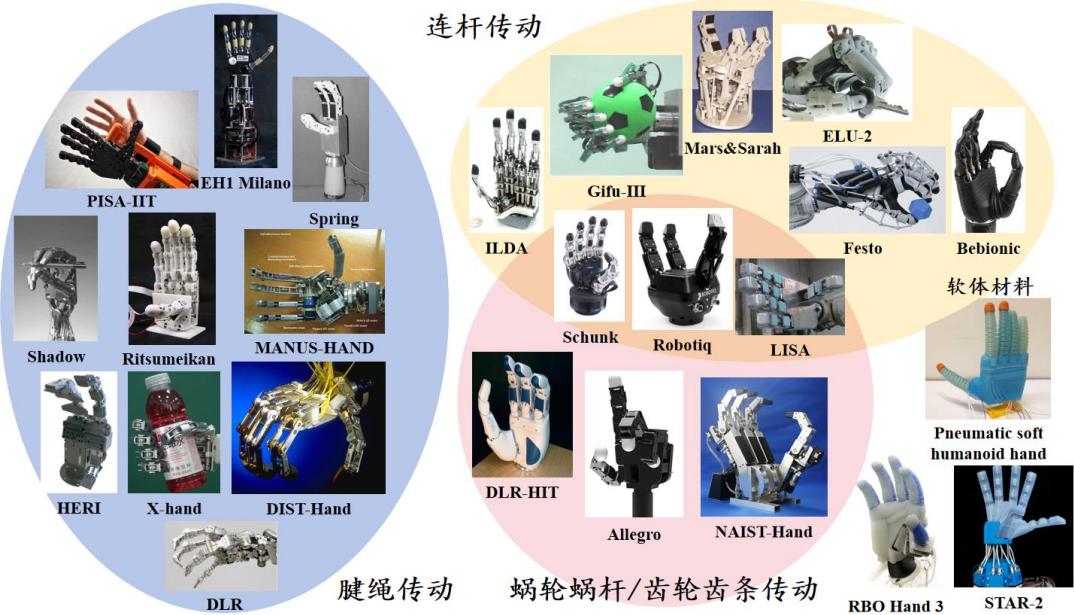


图 1.4 灵巧手传动方式分类

其中，腱传动由腱（钢丝绳、迪尼玛绳等）加上滑轮或软管实现传动，腱绳型手指的运动原理为：腱绳一端与指节固连，另一端与驱动器连接，由于腱绳的移动路径不通过各关节轴的中心，因此腱绳的张力能够产生让各指节弯曲的力矩，从而驱动其向装有腱的一侧弯曲<sup>[26]</sup>。腱一般具有高的抗拉强度，可以实现高自由度和远距离的动

力传输，节省空间和成本，但腱本身刚度有限，在不断变化的预紧力作用下位置精度不高，带载能力弱，而且腱的布局容易产生力矩和运动的耦合，从而增加控制难度和系统复杂性。连杆型手指一般用多个连杆串并联混合的形式，由电机拖动完成手指确定轨迹的运动<sup>[27,28]</sup>。连杆传动刚度好、负载能力强、精度高、加工制造简单，但其结构冗杂，抗冲击能力弱，对手内空间配置要求高。齿轮/蜗轮蜗杆传动是由驱动器带动齿轮/蜗轮蜗杆将电机的旋转转变为期望的运动，直接带动手指的动作，驱动灵活，可以实现结构自锁，但传程短，结构复杂，对精度要求高。

## 1.4 论文的主要研究内容

本文提出一种以平面和空间杆件机构、齿轮/蜗轮蜗杆为主要传动方式的灵巧手结构设计，设计目标是以人手的结构和运动特点为模仿对象，在保留人手中重要运动自由度的基础上简化灵巧手结构，将控制器、传感器、驱动器和传动部件全部集成到灵巧手内部，在有限的体积和重量下实现灵巧手的高度集成和深度仿生。为面向不同形状的物体，实现不同抓握模式，本文设计一种新型的灵巧手结构，对机械和电子系统位置布局，给出合理的操作规划和控制策略，论文主要包含以下几个方面的研究内容：

### （1）灵巧手结构设计

查阅相关文献，对比不同灵巧手的设计方案，总结其优缺点和性能，制定灵巧手总体设计要求和目标，确定灵巧手设计方案和思路。详细设计灵巧手自由度的配置、各个手指的结构外形及手指与手掌的空间布局，明确驱动、传动、感知各个模块的功能作用和实现方式，用 SolidWorks 绘制各个零部件，完成总体的装配。

### （2）灵巧手运动学和静力学分析

简化和抽象出灵巧手各个关节的结构，用运动学的方法计算各个关节转动量与末端指尖位置间的关系，得到正向和逆向运动学模型，用蒙特卡洛方法可视化每个手指的可达空间，进而描述整手的工作范围。此外，由于传动中常用到平面杆件机构，因此计算杆件机构各个角度间的运动关系，以得到驱动器空间和关节空间旋转角度间的关系，在理论模型的基础上优化和调整结构参数，以得到期望的运动轨迹。灵巧手静力学则负责描述各关节驱动力与末端作用力间的平衡关系，为在抓取中的力控制奠定理论基础。

### （3）灵巧手机电系统和仿真模型搭建

在完成灵巧手机械结构的制作和装配时，将电子元件集成到灵巧手内部，以 Arduino

为主控，设计 PCB 电路简化布线，搭建下位机机电系统，获取角度传感器、编码器和薄膜压力传感器的数据，带动电机和舵机旋转到目标角度，实现对灵巧手在位置环和力环上的闭环控制。以 MATLAB 为主要工具，完成下位机程序的编写、测试和运行以及上位机界面的实现，上、下位机间用串口实现信号的传递和指令的下发，从而实现硬件在环的实时控制。此外，在 Simscape 中构建灵巧手的物理模型，将灵巧手的关节运动以仿真方式可视化呈现，验证设计的合理性。

#### （4）灵巧手抓取和操作实验

搭建实验平台，衡量灵巧手的运动范围、有效负载、稳定性、抓握时的灵活性和可靠性等。首先测量单个手指和灵巧手的运动能力、范围及能负载的最大重量，然后将灵巧手位置固定，操纵灵巧手以不同的抓握方式对不同形状和类型的物体进行抓取和操作，评价其抓持的效果。将灵巧手与 UR5e 机械臂结合，用机械臂的大范围运动配合灵巧手的抓持操作能力完成特定的任务。

## 1.5 本章小结

本章主要阐述了仿人灵巧手研究的背景与意义，剖析人手的生理结构和运动特点，就国内外灵巧手的发展历程和研究现状详细介绍几款具有代表性灵巧手的结构特点和设计方案，在综合比较不同传动方式、不同自由度布局的优缺点后确定本设计的目标和方向。最后，从灵巧手结构设计、运动学与静力学、机电与仿真系统搭建以及灵巧手抓取和操作实验四个方面阐述本文的主要研究内容和思路。



## 第2章 灵巧手结构设计

### 2.1 引言

灵巧手的设计包含分析、综合和集成等活动，是一个复杂的迭代、选择和决策过程，每项活动都会对最终的设计产生重要的影响。灵巧手结构设计需要从其基本结构、质量尺寸、手指数量、自由度和运动学等方面综合考虑<sup>[29]</sup>，这样才能复刻人手的基本功能，包括抓取的适应性、稳定性和拟人化运动等。本设计旨在以连杆、齿轮/蜗轮蜗杆作为主要的传动方式，以欠驱动和耦合为设计思路，实现结构紧凑、模式多样的灵巧手结构设计。本章将从设计目标和思路、灵巧手总体结构设计、模块化手指机械结构及手掌结构布局等方面详细阐述。

### 2.2 设计目标和思路

目前，灵巧手普遍以腱绳为传动机构<sup>[30]</sup>，虽然腱模仿了人手肌腱的结构，能够将驱动部件远离手部，实现高自由度高灵活性的全驱运动和柔性稳定的抓握动作，但同样造成灵巧手控制复杂，传力效率低，抓重比小，而且由于腱线变形和预紧等问题，会造成运动传递滞后、动力传递刚性不足，在位置控制和力控制精度上有先天的不足。以连杆为传动的方式<sup>[31]</sup>则稳定性好，结构和控制简单，握力大，精度高，而且驱动器内置于手掌内部<sup>[32,33]</sup>，可以直接安装到机械臂或断肢上，有效避免腱传动的不足。由于灵巧手空间体积的限制，这种传动方式不能像腱传动一样实现全驱，只能用耦合或欠驱的方式<sup>[34]</sup>实现各个手指的运动，简化灵巧手结构，因此普遍自由度数低，只能实现有限的抓取和操作模式。针对腱传动和连杆传动中存在的普遍不足，本设计希望以平面和空间杆件配合齿轮/蜗轮蜗杆为主要的传动方式，将控制器、驱动器、传感器和传动机构都内置于手指或手掌内部，便于安装在机械臂上进行操作和控制，在自由度配置上，能深度模仿人手的运动特点，尤其是抓取时的形态模式，保留重要的、舍弃不必要的自由度，从而简化结构和控制，节省成本与空间，其详细的设计思路和目标如下：

(1) 实践证明，人手具有丰富的操作功能，能够在复杂变化的环境中完成各项任务，其结构是灵巧手设计的重要参照，因此在结构外形的设计上，以真实人手的外形为基础，刻画各个指节和手掌的外壳部分。

(2) 在手指结构设计上，由于人手除拇指外的其余四指在运动方式和结构上都十分相似，虽然各个手指的长度有所不同，但每个人手指长度的分布同样各不相同，对抓取和操作没有太大影响。因此，四指用模块化的思想，设计为相同结构，从而简化设计流程，降低制造难度和成本。

(3) 人手四指都有三节指骨，指骨之间为单轴关节，从机械原理上来看，可以将其抽象为仅有一个自由度的转动副，因此手指的基本结构就是具有三个指节和平行旋转轴。而且由于手指的肌腱贯穿多个关节，一根肌腱的收缩或放松会同时影响多个关节的运动，由神经控制的耦合机制会让手指能协调运动，这种耦合运动在近端指间关节和远端指间关节之间最为明显。当没有外力作用时，手指屈曲或伸展过程中，这两个关节会一同做屈曲或伸展运动，而且一般人不能直接控制远端指间关节的运动角度。因此，在手指设计中，将这两个关节的旋转运动耦合在一起，交叉四连杆机构<sup>[35]</sup>恰好可以满足设计要求，而且结构简单紧凑，灵活度高。

(4) 手指的侧摆运动是手指不离开所在平面的情况下，向内或向外的偏转运动，这种运动主要发生在指基关节，这个关节的结构允许手指进行一定程度的侧向偏转，进行灵活的运动。手指的侧摆运动在日常生活中有重要的作用，如在握住一个物体时，侧摆运动能让手指更好地围绕物体提供稳定的握力，在拧螺丝、写字等需要精细操作的任务中，侧摆运动可以更好地控制和协调各个手指的位置来操作物体。目前以杆件为传动的灵巧手普遍忽略四指的侧摆运动，这是由于要实现手指基关节位置侧摆和屈曲双自由度的运动，不仅需要额外的驱动器，而且对空间位置和传动结构有一定的要求。本设计中期望能在有限的空间下实现基关节处两自由度的运动，让手指不仅可以屈伸，而且可以左右侧摆。

(5) 由于人手在手指侧摆运动时，一组肌肉的收缩会导致其他肌肉相应放松，以及生活中的习惯影响，让手指的侧摆运动常常是同时进行的。在日常抓握或操作物体的过程中，手部的张开和闭拢常常是以中指为示指，食指、无名指和小拇指同时向示指靠近或远离的过程，因此，将手指的侧摆运动设计为三指耦合<sup>[36]</sup>，从而只以一个自由度就实现侧摆运动的主要功能。由于手指基关节屈曲运动的电机要固定在手掌内部，当其侧摆时，轴的相对位置会发生变化，因此要专门设计用于两自由度运动的机构。目前常用于实现基关节两自由度运动的方案有万向节机构、双锥齿轮差速机构<sup>[37,38]</sup>、差动齿轮机构<sup>[25]</sup>、球面四连杆机构<sup>[39,40]</sup>等，考虑到三指的耦合侧摆和有限的掌指空间，选择球面四

连杆机构将两个自由度方向上的运动解耦开，由于其中十字连杆的中心与两自由度旋转轴相交的点为同一点，因此侧摆和屈曲不会相互影响。

(6) 拇指是人手最灵活、最有力量的手指<sup>[41]</sup>，可以和其余手指对接形成稳定的抓握。拇指的结构和位置特殊，因此要与其余四指分开设计。人手的拇指只有两个露在外面的关节，其腕掌关节为双凹的鞍状关节，即第一掌骨底为前后凹、侧方凸的关节面<sup>[42]</sup>。人手手掌看似是一体的，但实际上其由五块掌骨组成，与五指一一对应，与大拇指相连的第一掌骨允许大拇指进行转动、弯曲等运动，满足不同的握持和操作要求，让手具有高度的灵活性和可重构能力。因此，为了保持大拇指与手掌间可重构的特性，将大拇指同样设计为三指节结构，用侧摆运动实现类似于手部掌弓的变化，屈曲运动则实现自然的抓握。为了简化结构，将屈曲运动的电机藏在基关节支座中，其余指节用交叉四杆机构实现耦合运动。

(7) 由于将用于拇指屈曲运动的电机装在基关节支座中，因此侧摆运动与屈曲运动天然不存在耦合关系，侧摆运动只需要简单的平面铰链杆组就可以实现。拇指基关节的侧摆运动实际上就是实现拇指掌侧的内收和外展，因此其旋转轴的位置与手掌平面有一定的角度，在空间中呈一球锥面运动。

(8) 在结构设计外，灵巧手需要具有丰富的本体感知和物体信息<sup>[43]</sup>，从而精确控制力度和位置，以完成精细的操作任务。因此，本设计希望灵巧手具备位置和力感知能力，手指末端力超过 5N，在合理的控制操作下实现位置和力封闭的抓取操作。

(9) 市面上的灵巧手价格普遍达到上万元甚至上百万元，因此，本设计希望在保证其灵活性、可靠性和丰富感知能力的同时，从材料、加工、驱动器件和感知元件等方面进行低成本设计<sup>[44,45]</sup>，在性能和成本间得到合理的平衡。

在明确设计目标和设计思路后，就可以具体实现灵巧手的设计和制作。

## 2.3 灵巧手总体结构设计

灵巧手由手掌和手指组成，其抓持和操作的能力不仅取决于单个手指的性能，还与各手指在手掌上的空间位置和布局有关。本设计中的灵巧手在结构、外形和功能上都模仿人手，整体尺寸与成年男性手相当，手长约 240mm，宽 165mm，厚 60mm，重量只有 520g，指尖输出力达到 5N。灵巧手每个手指的外形和运动范围都与人手类

似，其近节指节、中节指节和远节指节间的比例关系约为 1.5 : 1.3 : 1，最大运动空间由机械结构中的限位决定。灵巧手的总体设计方案如图 2.1 所示。

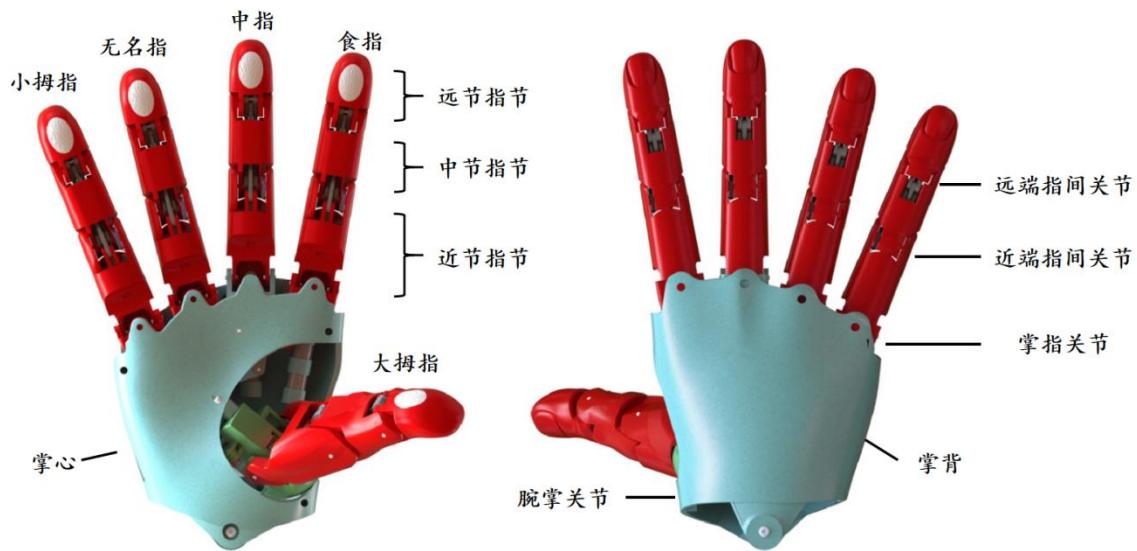


图 2.1 灵巧手总体设计方案

灵巧手共有 11 个主动自由度，19 个关节自由度，具体配置为：拇指 2 个自由度，其中腕掌关节 1 个屈曲自由度，1 个类似人手外张/收敛的自由度，掌指和指间关节的屈曲运动与腕掌关节耦合。其余四指为模块化设计，在结构上完全相同，除去侧摆自由度后每个手指各有 2 个自由度，分别在近端指间关节和掌指关节上，远端指间关节用交叉四杆机构实现与人手类似的耦合运动。由于人手手掌在张开和闭合时常常是食指、无名指和小拇指三指联动，因此只用 1 个自由度来实现以中指为示指，其余三指同时靠近和远离示指的侧摆运动。在设计时，将驱动系统、传动系统和传感器系统都集成在手指或手掌内部，走线不能妨碍手指的活动，保证结构的紧凑性和灵活性。

## 2.4 灵巧手手指模块化设计

由于人手中除了拇指外的四根手指都具有类似的结构，只是长度不同，因此将这四根手指设计为相同结构，但各个手指固定在手掌上的高度会有所不同，手指结构的模块化设计可以降低设计成本和复杂度。为了避免将掌指关节和近端指间关节运动的耦合，手指将微型空心杯电机固定到近节指节的内部，以蜗轮蜗杆和耦合杆件机构为传动，将电机出轴方向的运动转换到杆件旋转方向，用合理的机械布局将驱动机构、传动机构及传感及控制系统都集成到手指内部。

### 2.4.1 基关节结构

灵巧手四指的掌指关节要实现屈曲和侧摆两个自由度的关节运动，由于侧摆运动的加入，手指基关节支座与用于屈曲运动电机的出轴相对位置会发生变化，用伞齿轮或蜗轮蜗杆的方法就不能实现在不同侧摆位置的啮合传动，因此需要设计用于两自由度运动的机构。对于侧摆运动，由于人在手掌张开和闭拢时常常是食指、无名指和小拇指联动运动的，只用单个手指及中指侧向摆动来完成抓握的场景非常少，因此，为了简化结构和控制难度，用平面杆件结构实现只用一个自由度实现食指、无名指和小拇指同时远离和靠近中指的联动。侧摆运动的传动机构如图 2.2 所示，其是由手掌中的 KST X06 微型舵机带动，在无名指和小拇指一侧，舵机的一字舵盘与小拇指基关节支座用杆件相连，形成一个平面四杆机构，小拇指基关节又与无名指基关节用杆件相连，同样形成一个等效的平面四杆机构，从而让舵机的转动带动两指的侧摆；在食指一侧，由于食指的侧摆方向与其余两指相反，其基关节先由杆件与三角连杆相连，再由杆件连接到舵机的一字舵盘上，实际上是由两个平面四杆机构堆叠而成的五连杆结构。

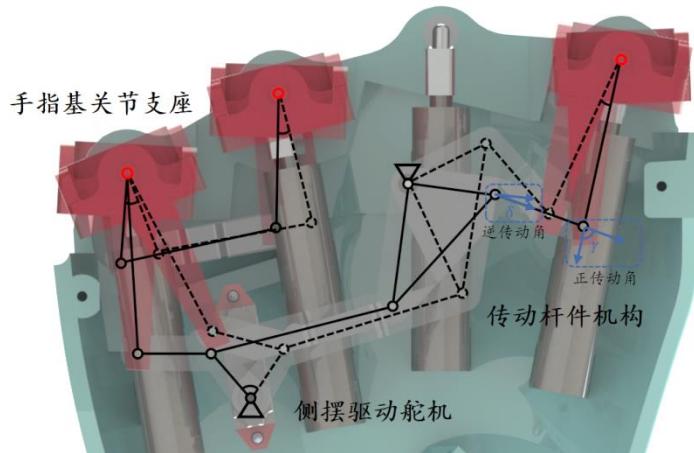


图 2.2 灵巧手三指联动侧摆机构

合理设计各个杆件的长度，让三指的联动侧摆运动与人手手掌的自然运动类似，当完全张开时，小拇指侧摆角度最大，约为  $25^\circ$ ，食指与无名指侧摆角度相似，约为  $15^\circ$ ，当完全闭拢时，三指几乎都与掌面平行向上。值得一提的是，食指的侧摆运动在抓握中起到固定和支撑的作用，为了增强食指在侧摆方向上的限位能力，在传动杆件设计中让食指侧摆在杆件间的死点位置附近，从而使得侧摆杆件的逆传动角  $\delta$  小，减小有效分力，而正传动角  $\gamma$  大，能有效传递力矩，实现“锁紧”的作用。

目前常用于实现基关节两自由度运动的方案有万向节机构、双锥齿轮差速机构、差动齿轮机构、半球齿轮和球面四连杆机构等。由于双锥齿轮差速和差动齿轮机构都需要完整的两个自由度，不能用三指联动的侧摆运动简化，而万向节和半球齿轮尺寸大，不能在狭小的空间内实现，因此，本设计中用球面四杆机构将侧摆与屈曲运动解耦开来，由 Maxon RE10 直流伺服行星减速电机和 KST X06 舵机分别实现运动范围在  $0^{\circ}\sim60^{\circ}$  的俯仰自由度以及运动范围  $0^{\circ}\sim20^{\circ}$  左右的侧摆自由度。球面四杆机构由拨块、十字块等组成，十字块可以看作是两个固联在一起呈固定夹角的圆柱轴，而拨块则是给电机转轴径向方向一个偏置，十字块的一端轴插入到拨块的孔中，而另一端则插入到近指节的孔上，电机转动带动拨块运动，十字块会在孔内旋转来改变自身倾斜角度，从而带动近指节一起旋转，实现屈曲和伸展运动。在运动中十字块只有相对于孔的旋转，而不产生轴向运动，因此在设计时，将孔与轴设计为间隙配合，在孔内涂抹润滑脂来减小旋转产生的摩擦，此外，在十字块与近端指节的一端加上挡圈，拨块与十字轴轴向限位，从而保证其不会轴向窜动甚至脱落，其结构图如图 2.3 所示。可以看出，这种结构能在狭小的掌指空间内实现运动的传递，而且由于孔轴间的间隙配合，近节指节有一定的自顺应性，在受到外力后能在小范围空间内保持具有弹性，超出一定范围则刚度明显变大，这与弹簧被动机构类似。两自由度运动的旋转轴垂直且交于一点，即十字块的中心点，因此在运动时中心点位置始终不变，两自由度上的运动不会相互影响，当侧摆时拨块与十字轴的位置不会发生变化，屈曲时不会带动基关节左右摆动，从而将两个运动解耦开，带动运动的电机和舵机都可以固定在手掌内部而不需要与手指一同运动，减小运动惯量。

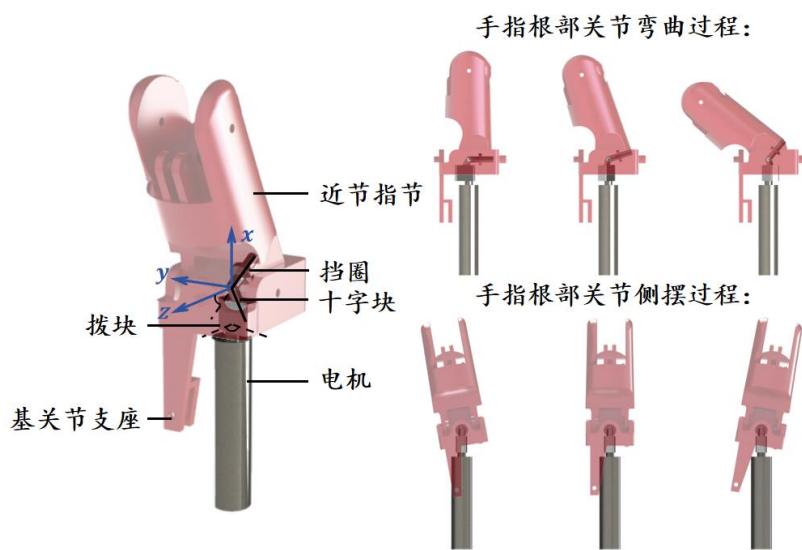


图 2.3 灵巧手两自由度基关节设计

在设计时，十字块的夹角为  $120^\circ$ ，无论旋转到何位置，十字块的夹角不变，因而从图 2.4 (a) 其运动简图可以得到输入角度  $\varphi_s$ ，即电机旋转的角度与输出角度  $\beta_s$ ，即近节指节的屈曲角度间的关系为：

$$-\sin\left(\frac{\pi}{6}\right)\cos(\varphi_s)\cos(\beta_s) - \cos\left(\frac{\pi}{6}\right)\sin(\beta_s) = \cos\left(\frac{2\pi}{3}\right) \quad (2-1)$$

用 MATLAB 计算得到在各个角度位置上两者的关系曲线，从图 2.4 (b) 中可以观察到手指根部关节的屈曲角度随着电机转角的增加而增加，最大转角约为  $60^\circ$ ，传动比则呈现先增加后减小的趋势。值得注意的是，电机向任意一边转动相同角度产生的屈曲效果是一样的，但是当手指基关节相对于电机方向有向一侧的侧摆时，这一侧基关节的空间会变小，而另一侧变大，因此最好将电机转动方向设定为与侧摆方向相反的一侧，以充分完成手指的屈曲动作。

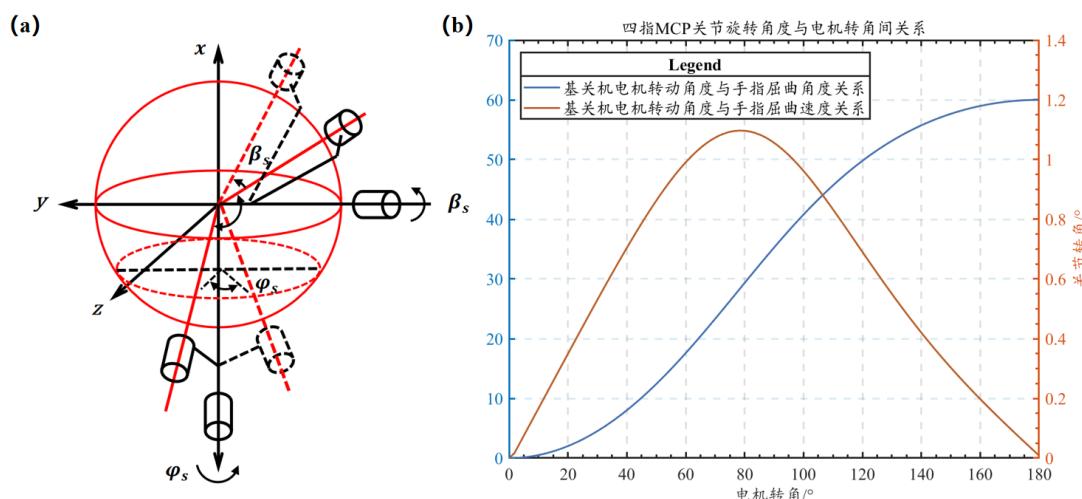


图 2.4 球面四杆机构结构简图和关节与电机旋转角间关系

### 2.4.2 手指结构

灵巧手的手指由三个指节组成，为了让其能够适应被抓握物体的形状，加快手指包络的效率，在四指的设计中，用欠驱动和耦合原理设计出手指的传动机构。由于人手指在弯曲时，近端指间和远端指间关节常常一起运动，因此，在设计中用交叉四连杆机构实现两指节间近似于  $6:5$  的耦合运动，加快对物体的包络。为了避免杆件间的干涉，将杆件设计为有一定弧度的线条，保证在运动中既不与指节又不与其他杆件碰撞。在杆件的设计中，由于各个杆件不能位于同一平面，因此将杆件分三层而且对

称设计。如果掌指关节和近端指间关节的运动存在耦合关系，由运动学计算可以发现会产生非线性解，难以直接解耦开，加大控制难度，同时为充分利用指内空间，将6mm空心杯电机安装到近节指节内部实现驱动，其带动减速齿轮箱和蜗轮蜗杆旋转，减速比分别为699.5：1和20：1。蜗杆安装在减速箱的出轴上，用胶接的方式与其固定，而蜗轮则用过盈配合的方式与传动杆件紧固联接，带动指节一起旋转。在设计中，蜗轮蜗杆选用模数为0.3轴心距离5.2mm的标准件，这种传动方式不仅结构紧凑，传力效率高，而且蜗轮蜗杆的结构可以让末端两指节实现位置自锁，从而进行形封闭的抓握动作。此外，为方便角度传感器、压力传感器线路的布置，在指节合适的位置留出孔位，将线路藏到指节内部。灵巧手手指的结构如图2.5所示。

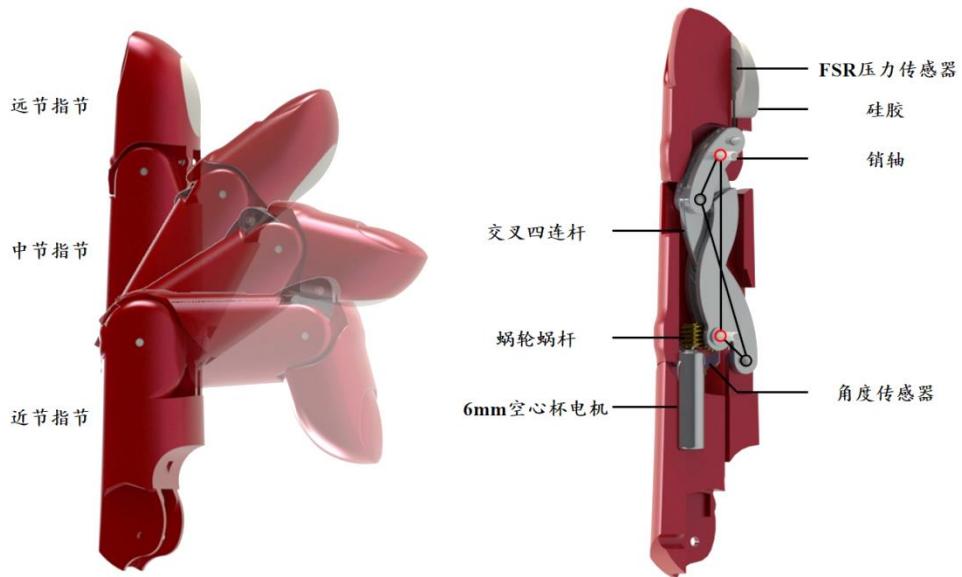


图2.5 灵巧手手指结构

## 2.5 灵巧手拇指结构设计

无论从外观和功能上，拇指都是人手的重要组成部分，在精确抓取、力量抓握、捏拿等操作中，灵巧手都离不开拇指的参与，其结构和功能都直接影响着整手的性能。拇指相对于被抓物体的位置姿态会对抓取的稳定性产生影响，对被抓物体施加力的大小和方向则影响着抓取力的封闭性。在不同的条件和模式下，拇指要具有可重构的功能来满足不同的要求，由此可见，拇指的自由度分配、结构尺寸、安装位置及运动形式的设计都十分重要。

人手的拇指结构与其余四指有所不同，其位于掌心一侧，具有3个关节和5个自由度。其中，指间关节是具有一个自由度的铰链关节；掌指关节则是具有屈伸和侧摆两个自由度的髁状关节，二者的复合运动导致近节指骨的旋前和旋后；腕掌关节是具有两个自由度的鞍状关节，这两个自由度的轴线既不相交也不正交，轴线间偏角约为 $40^\circ$ <sup>[46]</sup>。大拇指结构复杂，难以完美复刻出其结构，同时也没有必要，因此在设计中，对其进行取舍和简化。

在本设计中，拇指按3个指节设计，这样可以让原本与手掌一体的拇指部分具有可重构的运动能力，扩大其运动范围。拇指掌骨、近节指节和远节指节都由双耦合连杆实现一起的运动，其实际就是由两个交叉四连杆机构堆叠而成的五连杆结构。为了避免杆件之间的干涉，部分杆件设计为具有一定弧度的曲线。因此，大拇指只需要1个主动自由度就可以带动三个关节的旋转，屈曲运动由1218-N20直流减速电机带动，减速比分别为1030:1。将电机安装在大拇指的基关节支座中，这样可以将大拇指的侧摆和屈曲运动解耦，不用向其余四指一样设计两自由度基关节。由于基关节支座的长度尺寸有限，而交叉四连杆机构在基关节处的两个旋转轴需要保持一定的距离才能实现顺畅拟人的耦合运动，因此在电机出轴用一级模数为0.4的啮合齿轮增加两旋转轴的距离。其中电机出轴与齿轮紧配配合，与之啮合的齿轮与传动杆件用紧固和胶接的方式配合在一起，传动比为16:18。侧摆运动的自由度则用来改变拇指与手掌平面的相对位置，由固定在手掌内部的KST X06舵机以平面铰链四连杆的传动方式实现，大拇指的结构如图2.6所示。

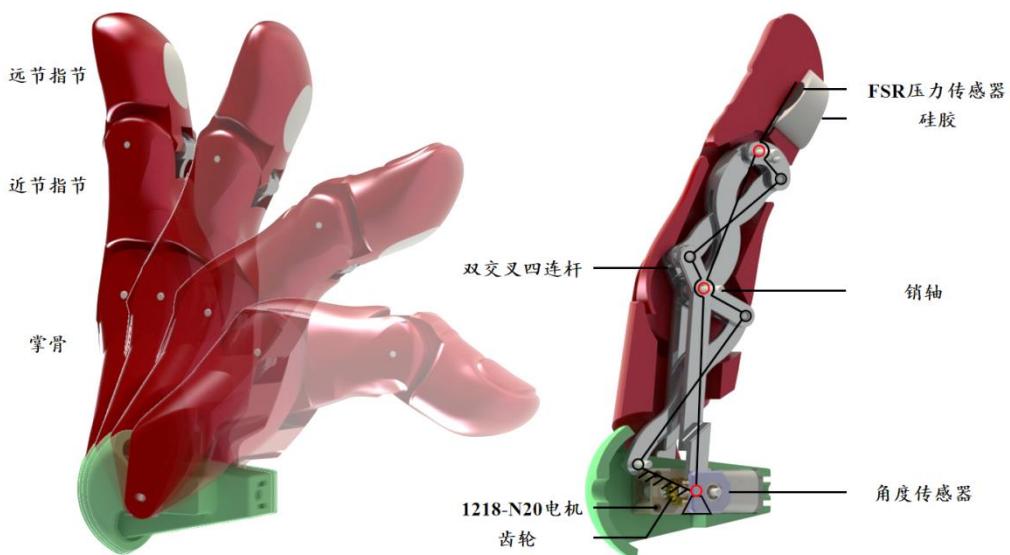


图2.6 灵巧手拇指结构

拇指的位置布置在一定程度上决定着拇指的外形和整个手掌的抓取能力，如果没有拇指，其余手指只能完成小直径的柱状物体的抓握，因此，要在拇指自由度设计的基础上布置拇指位置，让其能具有与人手相似的运动范围和抓握能力。在自然状态下，大拇指位于手掌的外侧，与手掌倾斜放置，两个自由度的轴线不相交也不正交，最重要的是大拇指能够对掌运动与其余四指相碰。因此，为了模仿这一特征，在设计时将大拇指的基关节轴倾斜于手掌平面放置，将腕掌关节处外展/并拢、内收/外放两个自由度组合，用一个侧摆自由度实现非单一方向的空间球锥面运动，确保拇指能够与其余四指对接，发挥其主要功能，实现人手在力量抓握、精确抓握、捏拿及握拳时的位置和姿态。

## 2.6 手掌结构设计

早期的机器人灵巧手手掌普遍只是简单的“平板”结构，为了让灵巧手具有拟人化和灵巧化特性，在抓取尺寸大的球形、椭球形和形状复杂的物体时，手掌和手指能够紧贴物体的外形，实现空间包络的牢固抓取，将灵巧手手掌设计为立体的具有与人的手掌相似外形的结构<sup>[47]</sup>。从解剖学的角度，人类手掌由于掌心和掌骨的存在让手掌呈现中间凹陷的状态，手掌的主要作用有：一方面，固定五个手指，其中由于中指不会侧摆，基关节支座与手掌一体，食指、无名指和小拇指的基关节前后凸出的轴则以间隙配合固定在手掌的孔位中，可以在舵机的带动下左右侧摆运动，手掌留出拇指基关节的位置，拇指的基关节轴倾斜于手掌布置，让其运动轨迹为一空间球锥面，这样的设计让拇指具备一定的手掌重构功能，而且留出一定的空间方便安装和调整手掌内部零部件的位置。与人手各个手指的比例类似，这四个手指伸出的长度不齐，其中中指最长，与食指、无名指和小拇指的长度差分别为 1.68mm、7.5mm、21mm，与人手比例相似。另一方面，手掌内部为电机和舵机的安装制造空间，可以将驱动器和传动部件都集成内置于手掌内部，然后通过法兰盘将灵巧手固定到机械臂末端，便于实验操作。灵巧手手掌的结构不仅在外形上实现拟人化设计，而且对抓握的包络能力有所提升，其结构如图 2.7 所示。

要实现驱动器内置于手指或手掌内部，就需要充分利用好手内空间。手掌内部的空间明显大于手指内部空间，因此将用于四指 MCP 关节屈曲运动的电机和侧摆运动的舵机、大拇指侧摆运动的舵机都固定到手掌内部，其中，各个手指的侧摆运动都是

以平面铰链杆件机构实现，而手指掌指关节的屈曲运动则是由球面四杆机构传动。其内部传动机构如图 2.8 所示。

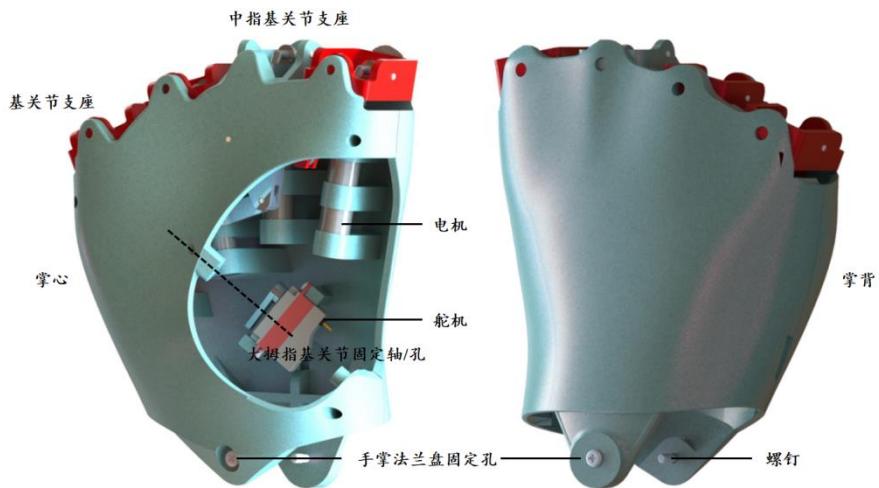


图 2.7 灵巧手拟人化手掌结构

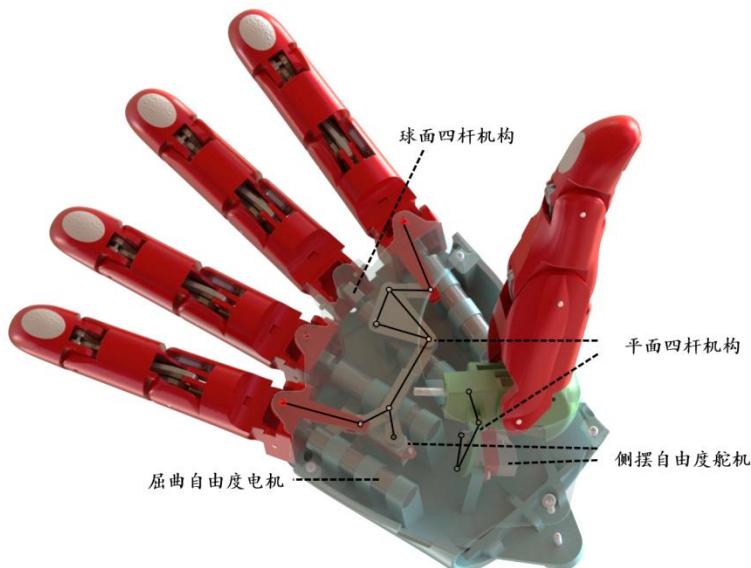


图 2.8 灵巧手手掌内部传动机构

## 2.7 本章小结

在人手结构和运动特点的启发下，设计出一种模块化、可重构的灵巧手，其外形与人手相似，共有 5 个手指，19 个活动关节和 11 个主动自由度。本章首先以人手为引，介绍设计目标和思路的缘由，然后从灵巧手总体结构布局、各个手指机构设计及手掌结构出发，介绍了以连杆机构和齿轮/蜗轮蜗杆为主要传动机构，欠驱动和耦合原理为设

计思路的手指结构设计以及手指两自由度基关节的实现方法。灵巧手用模块化的设计理念，在紧凑的空间内实现活动灵活可靠的手指结构，电机全部内置于手的内部，从而克服腱传动重量尺寸大，刚度传递不足及控制精度不高的问题，优化连杆传动自由度低，灵活性差的不足。在合理的手掌结构布局下，其拇指能沿空间的球锥面实现抓握，运动范围广，能与其他手指的配合完成对复杂物体的自适应抓取。在手指与手掌装配后即实现了灵巧手的总体结构设计。

## 第3章 灵巧手运动学与静力学

### 3.1 引言

灵巧手的运动学和静力学是设计和控制的理论基础，既可以作为指标评价灵巧手设计中的各项综合性能，又可以为结构参数的优化和调整提供理论上的指导。灵巧手运动学忽略物体本身的物理性质和加在物体上的力，单从几何的角度对物体运动进行研究，描述的是手指末端姿态、位置和速度与各个关节转动角度和速度之间的关系。运动学的确立和求解是灵巧手机构学的基本问题，其包括正运动学和逆运动学。其中，正运动学是在已知各个关节运动量的条件下，计算手指末端在笛卡尔坐标系下的位姿；逆运动学则是由给定的满足工作要求的末端位姿，求解各个关节的运动参数。静力学关注灵巧手在静止状态下的受力和平衡关系，可以描述各关节的驱动力矩与末端作用力之间的关系。只有以合理的姿态对物体施加充足且适当的抓取力，灵巧手才能不损坏脆弱的物体又能实现稳定可靠的抓取。

### 3.2 杆件传动机机构运动学

在灵巧手结构设计中，广泛用到杆件机构作为传动，其中，四指中指节和远指节的耦合运动是由交叉四杆机构实现的，大拇指三个指节的屈曲运动实质上由两个交叉四杆机构堆叠而成，此外，各个手指基关节的侧摆运动也是由平面杆件机构实现传动。连杆构件形状简单，传动可靠，可以合理设计杆件的长度和位置来满足运动轨迹的要求。

食指的结构可以简化为如图 3.1 所示。

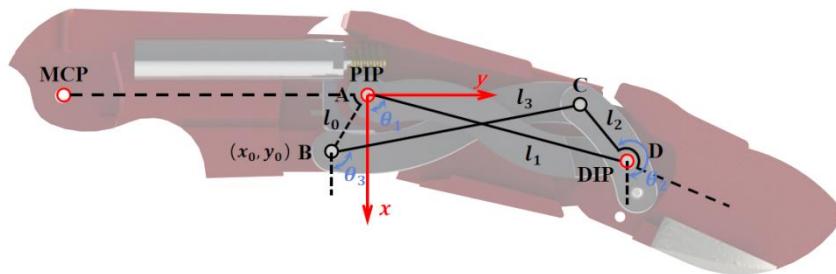


图 3.1 食指屈曲耦合四连杆机构简图

其中， $l_0$  为机架， $l_1$  为主动杆件， $l_2$  为中间传动杆件， $l_3$  为从动杆件。在传动的过程

中，第二指节主动杆会带动第三指节耦合运动，主动旋转角为 $\theta_1$ ，被动旋转角为 $\theta_2$ 。从 A 点出发，两个方向的矢量同时到达 C 点，即

$$\vec{l}_1 + \vec{l}_2 = \vec{l}_0 + \vec{l}_3 \quad (3-1)$$

由两边在  $x$  轴和  $y$  轴方向的分量相等，可以得到：

$$\begin{cases} x_0 + l_3 \cos \theta_3 = l_1 \cos \theta_1 + l_2 \cos \theta_2 \\ y_0 + l_3 \sin \theta_3 = l_1 \sin \theta_1 + l_2 \sin \theta_2 \end{cases} \quad (3-2)$$

整理后得到关于  $\theta_2$ 、 $\theta_3$  的二元一次方程组，为：

$$\begin{cases} l_2 \cos \theta_2 - l_3 \cos \theta_3 = x_0 - l_1 \cos \theta_1 \\ l_2 \sin \theta_2 - l_3 \sin \theta_3 = y_0 - l_1 \sin \theta_1 \end{cases} \quad (3-3)$$

两边平方相加消去  $\theta_3$ ，得到

$$\frac{x_0 c_1 + y_0 s_1}{l_2} + \frac{x_0 c_2 + y_0 s_2}{l_1} = \frac{x_0^2 + y_0^2 + l_1^2 + l_2^2 - l_3^2}{2l_1 l_2} + \cos(\theta_1 - \theta_2) \quad (3-4)$$

用 MATLAB 可以求得方程的数值解。此外，利用 CD 连杆的长度不变性，可以表示出解析解的形式。

对式 (3-4) 两边微分就可以整理得到两关节角速度之间的关系为：

$$\dot{\theta}_2 = \frac{l_1 l_2 \sin(\theta_1 - \theta_2) - x_0 l_1 s_1 + y_0 l_1 c_1}{l_1 l_2 \sin(\theta_1 - \theta_2) + x_0 l_2 s_2 - y_0 l_2 c_2} \dot{\theta}_1 \quad (3-5)$$

观察人手手指在弯曲时中指节和远指节的运动关系，可以发现两者呈现类似于线性传动关系，为了模仿人手的结构尺寸和运动特点，在耦合四连杆设计的过程中，可以首先确定  $l_1$ 、 $l_2$ 、 $l_4$  的长度，以  $\dot{\theta}_2 = \frac{5}{6} \dot{\theta}_1$  的耦合关系为设计目标，计算确定其余连杆的位置和长度，达到理想的运动效果。除此之外，四连杆机构要保证在两个极限位置的角度，即手指完全伸展时，四指与手掌在一个平面上，手指成一条直线；手指完全屈曲时，中节指节和远节指节都成约  $90^\circ$  角闭合。

为了实现只用 1 个自由度带动灵巧手大拇指三个关节的屈曲/伸展运动，用到双耦合杆件机构，即将两个交叉四连杆机构堆叠而成，其结构可以简化为如图 3.2 所示。在传动过程中，第一指节主动杆带动第二指节一起进行耦合运动，主动旋转角为  $\theta_1$ ，被动旋转角为  $\theta_2$ ，第二指节又会带动第三指节耦合运动，旋转角为  $\theta_4$ ，从而实现 1 个主动自由度带动 3 个指节的同时屈曲运动。

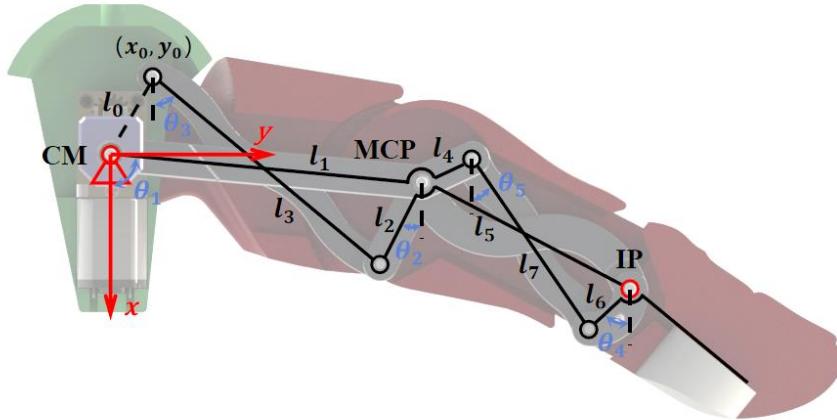


图 3.2 大拇指屈曲双耦合四连杆机构简图

同样地，可以由向量的闭环原理得到方程：

$$\vec{l}_1 + \vec{l}_2 = \vec{l}_0 + \vec{l}_3 \quad (3-6)$$

$$\vec{l}_5 + \vec{l}_6 = \vec{l}_4 + \vec{l}_7 \quad (3-7)$$

式 (3-6) 即

$$\begin{cases} l_2 \cos(\theta_2) - l_3 \cos(\theta_3) = x_0 - l_1 \cos(\theta_1) \\ -l_2 \sin(\theta_2) - l_3 \sin(\theta_3) = y_0 - l_1 \sin(\theta_1) \end{cases} \quad (3-8)$$

可以计算得到 MCP 关节转角  $\theta_2$  和辅助计算的  $\theta_3$  的值。在用 MATLAB 求解方程的数值解时，常常会出现多解的情况，此时需要观察拇指运动时，各个变量的范围，只采纳范围内的解。在得到  $\theta_2$  后可以进一步用方程计算到 IP 关节的转角，即

$$\begin{cases} l_5 \cos\left(\frac{\pi}{2} - \theta_2\right) + l_6 \cos(\theta_4) = l_7 \cos(\theta_5) + l_4 \cos\left(\frac{\pi}{6} + \theta_1\right) \\ l_5 \sin\left(\frac{\pi}{2} - \theta_2\right) - l_6 \sin(\theta_4) = l_7 \sin(\theta_5) + l_4 \sin\left(\frac{\pi}{6} + \theta_1\right) \end{cases} \quad (3-9)$$

由式 (3-9) 可以计算到远指关节转过的角度，从而得到在给定连杆长度下各个关节的耦合关系。

手掌的张开和闭拢是由食指、无名指和小拇指三指的同时侧摆运动实现的，小拇指的侧摆运动是由舵机通过平面四连杆机构带动其基关节支座转动，无名指与小拇指基关节通过连杆相连，同样相当于一组平面四连杆，从而让小拇指在侧摆时带动无名指一同侧摆运动。食指则与无名指和小拇指侧摆的方向相反，因此，食指的侧摆运动由舵机带动两个II级杆组构成，当舵机转动时，先由铰链四杆机构带动三角连杆转动，然后三角形连杆再由四杆机构带动食指基关节转动，其结构可以简化为图 3.3。

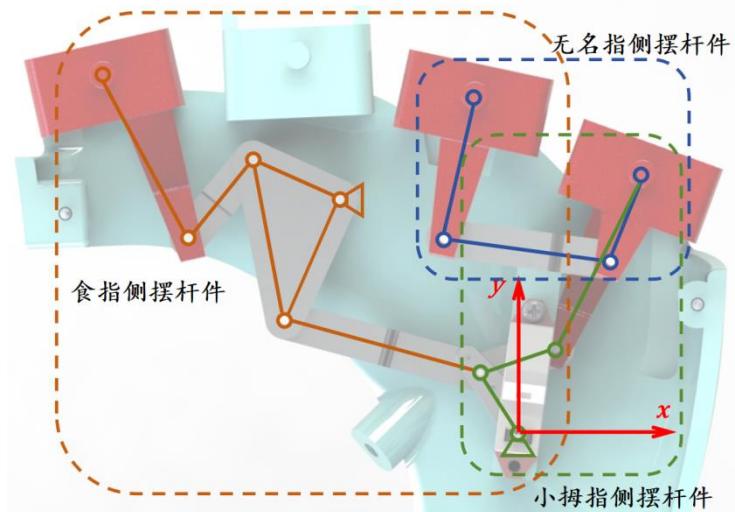


图 3.3 三指侧摆四连杆机构简图

侧摆运动实际上就是由平面铰链四杆机构组成，同样由各个杆组间的闭环关系就可以得到舵机角度与侧摆角度之间的关系。

大拇指的侧摆运动则是由简单的平面四连杆机构带动，其结构可以简化如图 3.4 所示，由矢量关系  $\vec{l}_1 + \vec{l}_2 + \vec{l}_3 = \vec{l}_0$ ，可以用 MATLAB 计算到主动件转角与大拇指侧摆角间的关系。从设计好的杆件长度来看，其类似于平行四边形机构，因此转角间约为 1:1 的线性比例。

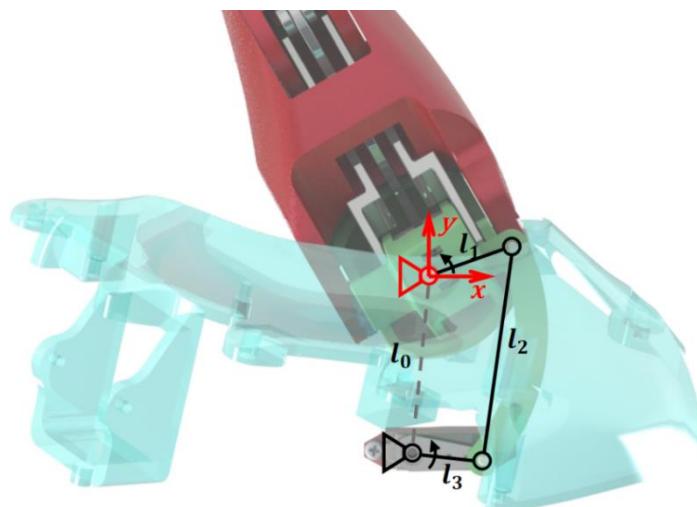


图 3.4 大拇指侧摆四连杆机构简图

在设计好各个杆件机构的长度和位置后，可以用 MATLAB 计算得到杆件运动与实际指节屈曲或指间侧摆间的关系，即电机或舵机转动角度到手指运动的传递关系。计算结果如图 3.5 所示，其中，3.5 (a) 为食指屈曲运动中电机转动角度与 PIP、DIP 关节转角的关系，3.5 (b) 为大拇指屈曲运动中电机转动角度与 CM、MCP、IP 关节转角的关

系，3.5 (c) 为食指、无名指和小拇指耦合侧摆运动中舵机转角与各个手指偏转角间的关系，3.5 (d) 为大拇指侧摆运动中舵机转角与大拇指偏转角间的关系。

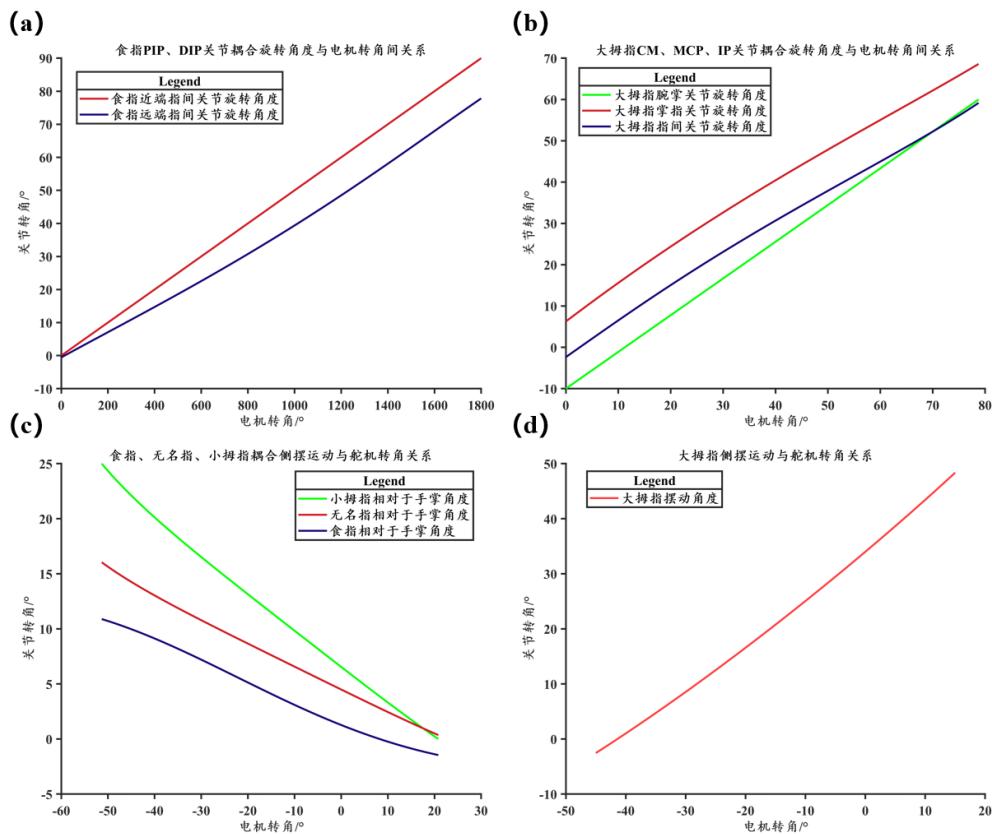


图 3.5 电机/舵机转角与关节转角间的数值关系

由数值解的结果可以实现从驱动器空间到关节空间运动关系的换算，从计算结果来看，食指和大拇指各个指节间的耦合运动都呈现类似于线性关系，而且传动比合理，在两个极限位置处与人手自然屈曲角度类似。三个手指的侧摆运动与人手自然张开和闭合的角度相似，在完全闭拢时三个手指几乎都能竖直向上，大拇指的侧摆运动角度范围大，能满足灵巧手对拇指运动空间的要求。

### 3.3 四关节手指机构运动学

#### 3.3.1 正运动学

灵巧手手指以人手四关节手指的结构和运动特点<sup>[48]</sup>为参考，其关节 1、2 的轴线相互垂直，垂线相交于一点，模拟人手掌指关节，从而实现近节指节的侧摆和屈曲运动。关节 3、4 分别实现中节指节和远节指节的屈曲，且 2、3、4 的轴线相互平行<sup>[49]</sup>。为了

描述手指的运动，可以用 D-H 方法在各个旋转关节处建立坐标系来表示杆件之间的相互位姿关系，从而得到手指关节空间位姿到手指末端笛卡尔空间的映射关系，其具体的步骤如下：

- (1) 简化手指结构，按照标准 D-H 方法确立各个关节的坐标系，如图 3.6 所示，然后确定相应的 D-H 参数；
- (2) 计算出各个关节坐标系间的齐次坐标变换矩阵，按变换矩阵的传递关系计算出末端相对于基坐标系的齐次坐标变换矩阵；
- (3) 求出末端位置相对于关节转角或偏置的关系方程，得到正运动学模型。

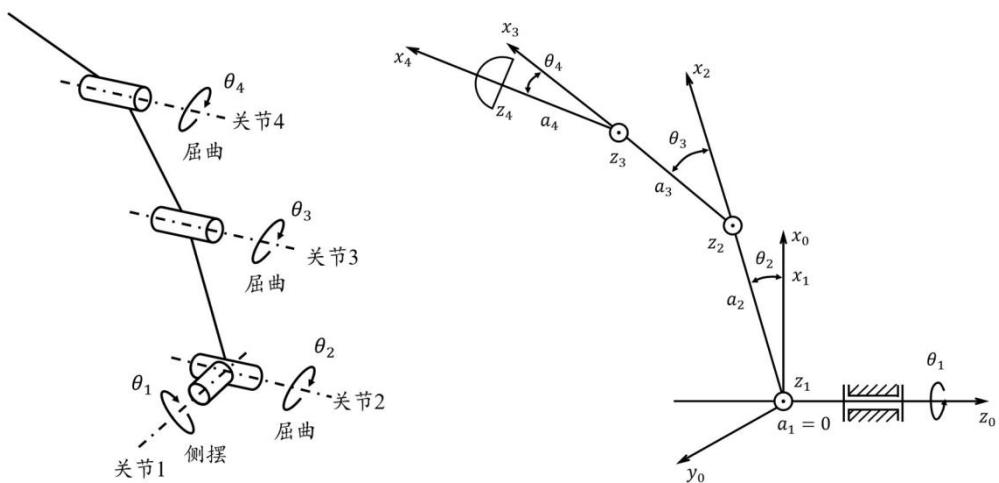


图 3.6 手指运动简图及坐标系

可以得到手指机构 D-H 参数，如表 3.1 所示。

表 3.1 灵巧手手指 D-H 参数表

$i$	$\alpha_i/^\circ$	$a_i/mm$	$d_i/mm$	$\theta_i/^\circ$
1	0	$a_1 = 0$	0	$\theta_1$
2	90	$a_2$	0	$\theta_2$
3	0	$a_3$	0	$\theta_3$
4	0	$a_4$	0	$\theta_4$

其中， $i$  表示第  $i$  个关节， $\theta_i$  表示关节转角， $d_i$  表示偏置距离， $a_i$  表示关节连杆长度， $\alpha_i$  表示连杆扭角。

相邻指节坐标系间的变换矩阵为：

$${}_{i-1}^i A = Rot(z_{i-1}, \theta_i) Trans(z_{i-1}, d_i) Trans(x_i, a_i) Rot(x_i, \alpha_i) = \begin{bmatrix} c\theta_i & -s\theta_i c\alpha_i & s\theta_i s\alpha_i & a_i c\theta_i \\ s\theta_i & c\theta_i c\alpha_i & -c\theta_i s\alpha_i & a_i s\theta_i \\ 0 & s\alpha_i & c\alpha_i & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3-10)$$

由 (3-10) 可以计算各个关节坐标系间的齐次坐标变换矩阵:

$$\begin{aligned} {}_1^0 A &= \begin{bmatrix} c_1 & 0 & -s_1 & 0 \\ s_1 & 0 & c_1 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\ {}_2^1 A &= \begin{bmatrix} c_2 & -s_2 & 0 & a_2 c_2 \\ s_2 & c_2 & 0 & a_2 s_2 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\ {}_3^2 A &= \begin{bmatrix} c_3 & -s_3 & 0 & a_3 c_3 \\ s_3 & c_3 & 0 & a_3 s_3 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\ {}_4^3 A &= \begin{bmatrix} c_4 & -s_4 & 0 & a_4 c_4 \\ s_4 & c_4 & 0 & a_4 s_4 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\ {}_4^0 A &= {}_1^0 A_2^1 A_3^2 A_4^3 A = \begin{bmatrix} c_1 c_{234} & -c_1 s_{234} & s_1 & (a_4 c_{234} + a_3 c_{23} + a_2 c_2) c_1 \\ s_1 c_{234} & -s_1 s_{234} & -c_1 & (a_4 c_{234} + a_3 c_{23} + a_2 c_2) s_1 \\ s_{234} & c_{234} & 0 & -(a_4 s_{234} + a_3 s_{23} + a_2 s_2) \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3-11) \end{aligned}$$

式中,  $s_i = \sin \theta_i$ ,  $c_i = \cos \theta_i$ ,  $s_{ij} = \sin(\theta_i + \theta_j)$ ,  $c_{ij} = \cos(\theta_i + \theta_j)$ ,  $s_{ijk} = \sin(\theta_i + \theta_j + \theta_k)$ ,  $c_{ijk} = \cos(\theta_i + \theta_j + \theta_k)$ ,  $i, j, k = 1, 2, 3, 4$ 。

由 (3-11) 可以表达出灵巧手指尖在笛卡尔空间下的坐标位置  $(x, y, z)$ , 因而有:

$$x = (a_4 c_{234} + a_3 c_{23} + a_2 c_2) c_1 = f_1(\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4) \quad (3-12)$$

$$y = (a_4 c_{234} + a_3 c_{23} + a_2 c_2) s_1 = f_2(\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4) \quad (3-13)$$

$$z = -(a_4 s_{234} + a_3 s_{23} + a_2 s_2) = f_3(\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4) \quad (3-14)$$

### 3.3.2 逆运动学

手指的逆运动学可以在已知手指指尖位姿的条件下计算出各个关节的角度，由式(3-12)、(3-13)得：

$$\theta_1 = \arctan \frac{y}{x} \quad (3-15)$$

$$a_4 c_{234} + a_3 c_{23} + a_2 c_2 = \frac{x}{c_1} = \frac{y}{s_1} \quad (3-16)$$

令

$$p_{xy} = \frac{x}{c_1} = \frac{y}{s_1} \quad (3-17)$$

将式(3-14)和式(3-16)两边平方相加，整理后得到：

$$\frac{1}{a_2} \cos \theta_4 + \frac{1}{a_3} \cos(\theta_3 + \theta_4) + \frac{1}{a_4} \cos \theta_3 = \frac{p_{xy} + z^2 - a_2^2 - a_3^2 - a_4^2}{2a_2 a_3 a_4} \quad (3-18)$$

由于式(3-12)、式(3-13)、式(3-14)为关于转角 $\theta_1$ 、 $\theta_2$ 、 $\theta_3$ 、 $\theta_4$ 的非线性方程，没有解析解，又关节3、4间有运动耦合关系，因此将 $\theta_4$ 近似地用 $\theta_3$ 的线性方程替换：

$$\theta_4 = k\theta_3 \quad (3-19)$$

则式(3-18)可以表示为只关于 $\theta_3$ 的方程：

$$\frac{1}{a_2} \cos k\theta_3 + \frac{1}{a_3} \cos(\theta_3 + k\theta_3) + \frac{1}{a_4} \cos \theta_3 = \frac{p_{xy} + z^2 - a_2^2 - a_3^2 - a_4^2}{2a_2 a_3 a_4} \quad (3-20)$$

用数值方法求解方程就可以计算出 $\theta_3$ 的值，之后由式(3-14)得：

$$(a_4 s_{34} + a_3 s_3) c_2 + (a_3 s_{34} + a_3 c_3 + a_2) s_2 = -z \quad (3-21)$$

$$\text{令 } A = a_4 s_{34} + a_3 s_3, \quad B = a_3 s_{34} + a_3 c_3 + a_2, \quad C = -z$$

则有

$$Ac_2 + Bs_2 = C \quad (3-22)$$

解得：

$$\theta_2 = \arctan \frac{C}{\pm \sqrt{A^2 + B^2 - C^2}} - \arctan \frac{A}{B} \quad (3-23)$$

由式(3-15)、式(3-19)、式(3-20)和式(3-23)可以计算得到在给定笛卡尔位置下各个关节的角度。

### 3.3.3 微分运动学

手指的微分运动学主要关注的是指尖坐标系原点相对于指基坐标系的微分运动及关节微分运动之间的关系，可以将灵巧手操作空间 $x$ 和关节空间 $q$ 间的变换关系表示为 $x = x(q)$ ，在等式两边对时间微分，可以得到 $x$ 与 $q$ 的微分关系为：

$$\dot{x} = J(q)\dot{q} \quad (3-24)$$

其中， $\dot{x}$ 为末端笛卡尔速度矢量， $\dot{q}$ 为手指关节空间速度矢量， $J(q)$ 为雅可比矩阵。

手指的线速度 $v$ 和角速度 $\omega$ 与关节速度 $\dot{q}$ 有关，对于转动关节*i*，有：

$$\begin{bmatrix} v \\ \omega \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} z_i \times {}^0 P_{(n,i)} \\ z_i \end{bmatrix} \dot{q}_i \quad (3-25)$$

$$J_i = \begin{bmatrix} z_i \times {}^0 P_{(n,i)} \\ z_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} z_i \times ({}^0 R^i P_n) \\ z_i \end{bmatrix} \quad (3-26)$$

其中， ${}^0 P_{(n,i)}$ 为手指末端的坐标原点相对于*i*坐标系的位置矢量在基坐标系下的表示， $z_i$ 是坐标系的 $z$ 轴单位矢量在基坐标系中的表示， $\dot{q}_i$ 表示第*i*个关节速度。

时变的线性变换雅可比矩阵是函数一阶偏导数组成的矩阵，用于描述函数的局部变化。对笛卡尔空间下末端位置( $x, y, z$ )求关于关节转角的偏微分，就可以得到末端速度与关节速度间的关系，即：

$$\begin{cases} \delta x = \frac{\partial f_1}{\partial \theta_1} \delta \theta_1 + \frac{\partial f_1}{\partial \theta_2} \delta \theta_2 + \frac{\partial f_1}{\partial \theta_3} \delta \theta_3 + \frac{\partial f_1}{\partial \theta_4} \delta \theta_4 \\ \delta y = \frac{\partial f_2}{\partial \theta_1} \delta \theta_1 + \frac{\partial f_2}{\partial \theta_2} \delta \theta_2 + \frac{\partial f_2}{\partial \theta_3} \delta \theta_3 + \frac{\partial f_2}{\partial \theta_4} \delta \theta_4 \\ \delta z = \frac{\partial f_3}{\partial \theta_1} \delta \theta_1 + \frac{\partial f_3}{\partial \theta_2} \delta \theta_2 + \frac{\partial f_3}{\partial \theta_3} \delta \theta_3 + \frac{\partial f_3}{\partial \theta_4} \delta \theta_4 \end{cases} \quad (3-27)$$

计算后用矩阵的形式表示为：

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{z} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -s_1(a_4c_{234} + a_3c_{23} + a_2c_2) & c_1(-a_4s_{234} - a_3s_{23} - a_2s_2) & c_1(-a_4s_{234} - a_3s_{23}) & c_1(-a_4s_{234}) \\ c_1(a_4c_{234} + a_3c_{23} + a_2c_2) & s_1(-a_4s_{234} - a_3s_{23} - a_2s_2) & s_1(-a_4s_{234} - a_3s_{23}) & s_1(-a_4s_{234}) \\ 0 & -(a_4c_{234} + a_3c_{23} + a_2c_2) & -(a_4c_{234} + a_3c_{23}) & -a_4c_{234} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\theta}_1 \\ \dot{\theta}_2 \\ \dot{\theta}_3 \\ \dot{\theta}_4 \end{bmatrix} \quad (3-28)$$

### 3.4 灵巧手静力学

灵巧手实现物体抓持的基本条件是让物体保持力平衡，即作用于物体上的合力为零。要确定某个抓持需要多大的接触力，以及接触力对应的指关节力矩，就需要用静力学描述手指末端受力与各个关节输出力矩之间的关系。

灵巧手静力学关注的是在平衡位置下力和力矩的分布关系，因此可以由虚功原理，从能量角度得到在关节空间下关节旋转做的功与末端指尖在笛卡尔空间下做的功相等，即：

$$F^T \cdot \delta x = \tau^T \cdot \delta \theta \quad (3-29)$$

其中， $F$  为灵巧手手指末端受到的三维空间力矢量， $T$  为手指各个关节输入的四维转矩矢量， $\delta x$  表示手指末端无穷小的位移矢量， $\delta \theta$  表示无穷小的关节旋转矢量。

由雅可比矩阵得到

$$\delta x = J(\theta) \delta \theta \quad (3-30)$$

将其代入式 (3-29)，得：

$$\tau = J^T(\theta) F \quad (3-31)$$

微分运动学与静力学间存在对偶关系，雅可比的转置将作用于末端的笛卡尔力映射成等效的关节力矩<sup>[50]</sup>，因此，灵巧手手指的静力学模型可以表示为：

$$\begin{bmatrix} \tau_1 \\ \tau_2 \\ \tau_3 \\ \tau_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -s_1(a_4c_{234} + a_3c_{23} + a_2c_2) & c_1(a_4c_{234} + a_3c_{23} + a_2c_2) & 0 \\ c_1(-a_4s_{234} - a_3s_{23} - a_2s_2) & s_1(-a_4s_{234} - a_3s_{23} - a_2s_2) & -(a_4c_{234} + a_3c_{23} + a_2c_2) \\ c_1(-a_4s_{234} - a_3s_{23}) & s_1(-a_4s_{234} - a_3s_{23}) & -(a_4c_{234} + a_3c_{23}) \\ c_1(-a_4s_{234}) & s_1(-a_4s_{234}) & -a_4c_{234} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_x \\ f_y \\ f_z \end{bmatrix} \quad (3-32)$$

在手指伸直的情况下，可以由式 (3-32) 将关节力矩和指端法向力的关系简化为  $\tau = Fl$ ，其中， $\tau$  为关节力矩， $F$  为指端法向力， $l$  为关节到指端的距离。将电动机的额定力矩和指节的长度代入，就可以粗略计算到指端法向力的大小，约为 7N，但由于传动的损耗、摩擦及指节重量的影响，实际能输出的法向力远小于 7N。

### 3.5 灵巧手工作空间

灵巧手的工作空间代表其活动范围特性，是衡量其灵巧性及结构合理性的重要指

标<sup>[51]</sup>。由于灵巧手各个手指的屈曲运动都相互独立，可以先将每个手指视为独立的运动系统，确定其工作空间，然后在一个全局坐标系下合并，得到整个灵巧手的工作空间，以此来解决灵巧手可操作性、抓持规划等问题。

灵巧手在进行灵巧操作时，往往用指尖与物体进行接触，因此，可以将对末端指节活动范围的求解近似为灵巧手单个手指的工作空间。利用蒙特卡洛方法，在关节运动角度范围内随机选择  $N$  组随机点，只要选择点的数量足够大，其能覆盖整个工作空间的概率大，就可以近似得到灵巧手的工作空间。

### 3.5.1 大拇指工作空间

大拇指有两个主动自由度  $\theta_1$ 、 $\theta_2$ ，由其运动耦合关系可以计算近指关节和远指关节的转动角度  $\theta_3$ 、 $\theta_4$ ，其主动关节的运动范围为  $0^\circ \leq \theta_1 \leq 45^\circ$ ， $-10^\circ \leq \theta_2 \leq 60^\circ$ 。在 MATLAB 中计算和绘制出指尖运动空间，如图 3.7 所示。

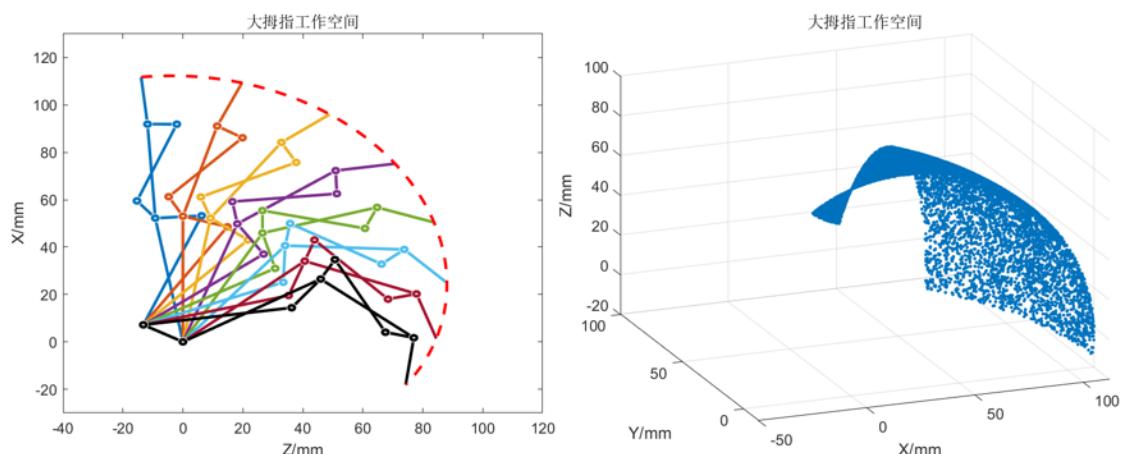


图 3.7 灵巧手大拇指工作空间

从其工作空间可以观察到拇指在 X 方向上的运动范围为 -17.9720~112.3368mm，Y 方向的运动范围为 -12.4929~79.2624mm，Z 方向的运动范围为 -13.8949~88.0436mm，总体呈现一个球弧面。

### 3.5.2 其余四指工作空间

如果知道手指各个关节角度  $\theta_1$ 、 $\theta_2$ 、 $\theta_3$ ，由运动耦合关系计算到  $\theta_4$  后就可以由运动学唯一确定指尖在手指基坐标系下的位置。除大拇指外，灵巧手其余四指的结构一

致，以食指为例，其三个主动关节的运动范围约为 $0^\circ \leq \theta_1 \leq 20^\circ$ ， $0^\circ \leq \theta_2 \leq 90^\circ$ ， $0^\circ \leq \theta_3 \leq 60^\circ$ 。在 MATLAB 中用蒙特卡洛方法绘制出指尖的运动空间如图 3.8 所示。

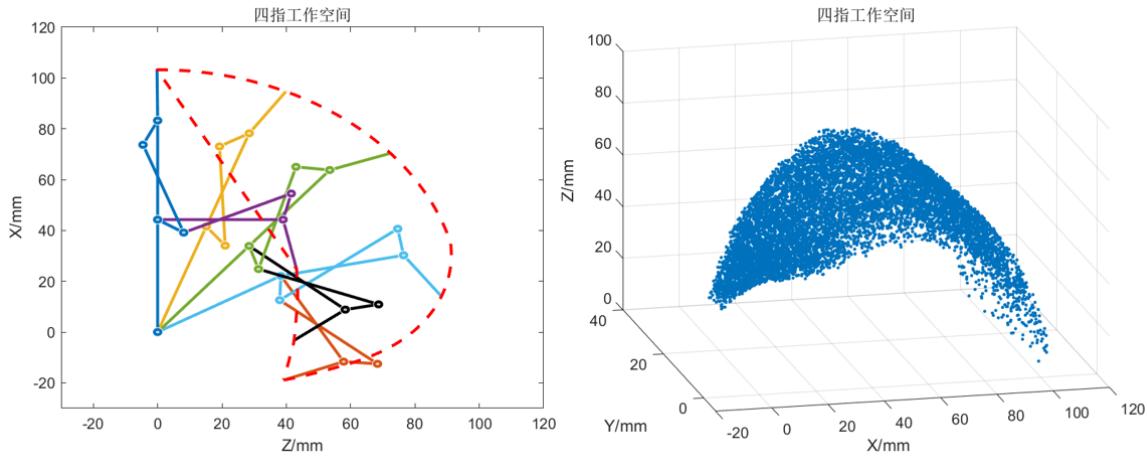


图 3.8 灵巧手四指工作空间

可以观察到食指在 X 方向上的运动范围为-18.7313~103.0914 mm，Y 方向的运动范围为-6.1469~34.7927mm，Z 方向的运动范围为 1.4701~91.2571mm。

### 3.5.3 整体工作空间

由食指工作空间的求解可以以同样的方法得出中指、无名指、小拇指的工作空间，四指在屈曲角度上范围相同，侧摆运动的范围有所区别。为了描述每个手指末端在同一坐标系下的位置姿态，以手掌法兰基座上一点为原点，定义其本体坐标系<sup>[52]</sup>，由各个手指基坐标系与本体坐标系的齐次坐标变换矩阵，可以将得到的手指基坐标下的工作空间都转换到本体坐标系下，从而观察出各个手指间协同运动的能力。四指基座标与本体坐标系间只有在原点位置上的平移，而大拇指的位置和旋转轴与手掌呈一定的夹角，为了得到两者间的齐次坐标变换矩阵，在 SolidWorks 用草图绘出大拇指基关节坐标系下各个坐标轴单位向量的位置，用测量工具测量在本体坐标系下，单位向量终点与起点间的位置关系，就可以得到旋转矩阵。将每个手指的工作空间统一到本体坐标系下，整手的工作空间如图 3.9 所示。

可以观察到大拇指的活动最为灵活，其工作空间与其余四指都有相交的区域，其余四指由于运动耦合的关系，在运动中不会相互干涉。因此，可以控制拇指和其余四指运动让大拇指指尖与其余手指指尖相碰，形成钳状的对掌运动，在实现侧向捏取、

球形抓握、圆柱抓握、指尖抓握等抓取和操作动作时，都能表现出灵活的运动能力和拟人化行为。

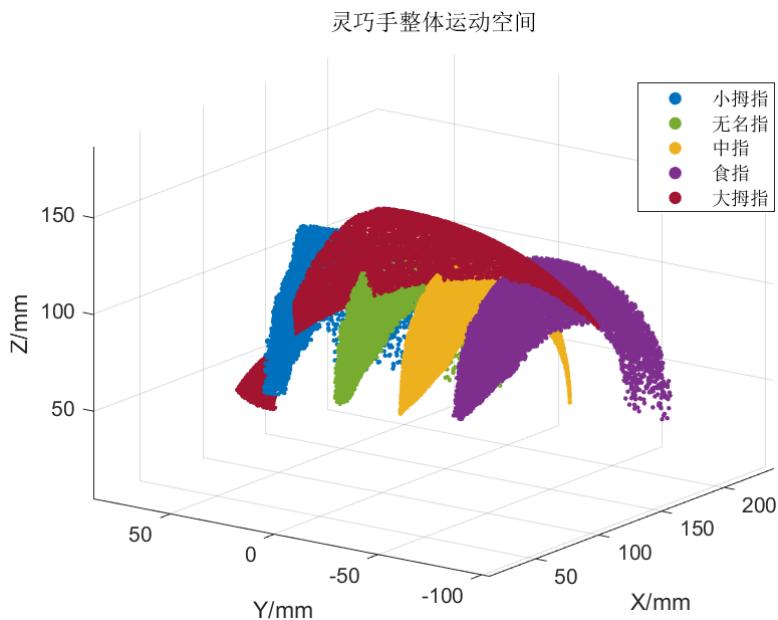


图 3.9 灵巧手工作空间

### 3.6 本章小结

本章在灵巧手结构设计的基础上，从运动学和静力学的角度对其进行了设计与计算，首先计算和优化了以杆件机构为主要传动方式的运动关系，由标准 D-H 方法确立手指的正运动学模型，用数值方法得到四关节手指的逆运动学方程解，从而可以得到灵巧手在笛卡尔空间中末端指尖位姿与关节角度间的相互关系。在运动学的理论基础上，用蒙特卡洛方法可视化灵巧手的工作空间，展现各个手指及整手的空间运动范围。此外，用虚功原理推导手指抓取的静力平衡方程，进而用雅可比矩阵表示出抓取力和关节力矩间的关系，为设计与控制奠定理论基础，同时验证设计的合理性。



## 第4章 灵巧手机电系统

### 4.1 引言

灵巧手是高度集成化、智能化的机电一体化系统，其正常工作和有效抓握有赖于传动机构、位置和力感知及控制系统的协同配合。其中，机械系统主要从材料、制造及机构装配等环节，验证运动和动力传递的合理性和可靠性；电子系统则主要以本体和环境感知及动力输出为基础，获取上位机指令，然后以运算、测量的结果协调关节运动，实现灵巧手的作业任务。

### 4.2 机械系统搭建

灵巧手机械系统由四指、拇指及手掌结构组成，各个零部件都选择3D打印技术制作。在材料选择上，外壳部分选择表面光滑、细节表现力好的树脂材料，用立体光固化成型法（SLA）制作；连杆等传动机构选择强度高、韧性好及耐高温的尼龙材料，用选择性激光烧结（SLS）技术制造得到。齿轮和蜗轮蜗杆由于模数小，3D打印精度和强度难以达到要求，因此直接选择标准件。在装配中，由于灵巧手结构高度集成，因此需要按照严格的装配顺序进行，在多次验证和迭代的基础上，本设计完成灵巧手样机的制作，在紧凑空间内实现运动和力的传递。

#### 4.2.1 灵巧手手指装配

灵巧手手指由远节指骨、中节指骨、近节指骨、蜗轮蜗杆及杆件机构组成，在组装时，各个旋转轴间用圆柱销作为连接。为了在实现销轴向固定的同时减小旋转时的摩擦力，将固定于销两端杆件或指节的孔设计为过渡配合，让孔轴间具有较好的对中性和同轴度，而且容易拆卸和装配；其余的孔设计为间隙配合，实现孔、轴间的活动联系。

由于蜗轮的转动要与中节、远节指节间的连杆一同运动，因此用销将齿轮和杆件过盈配合，让孔轴间不允许有相对运动，杆件的外侧孔与销间隙配合，保证杆件与指节在安装和运动时的同轴度。此外，将微型直流电机安装到近节指节内部，为了防止电机的轴向或径向窜动，在孔内涂抹UV胶固定，电机线从指节底部引出。在安装和固定好各个零部件后，就得到灵巧手的模块化手指，如图4.1所示。

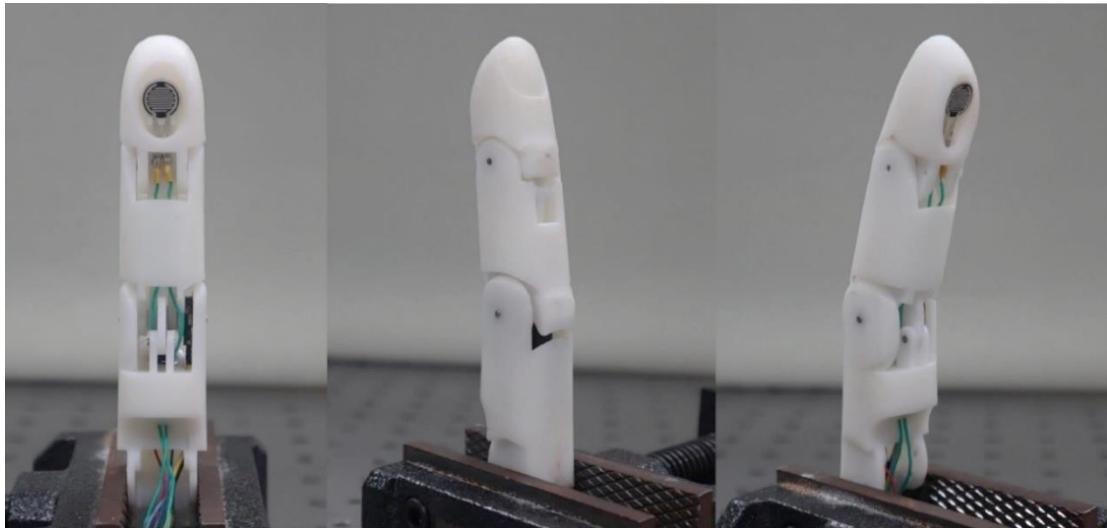


图 4.1 灵巧手模块化手指实物图

#### 4.2.2 灵巧手大拇指装配

灵巧手大拇指与其余手指具有相似的结构，在组装时用销确定各个杆件和指节的位置，实现用双交叉四连杆机构的传动。带动大拇指做屈曲运动的电机安装在其基关节上，其出轴与齿轮紧固联接，与之啮合的齿轮同样用紧配和胶接的方式与杆件紧固联接，从而让电机的旋转带动杆件的转动，实现大拇指的耦合屈曲运动。由于电机需要安装在基关节内部，因此将基关节分为两部分制造方便装配，装配完成后的大拇指如图 4.2 所示。



图 4.2 灵巧手大拇指实物图

为了实现大拇指和其余四指末端与物体的柔性接触，同时增加与物品表面的摩擦力，

在末端指节上贴一层 Ecoflex 00-30 硅胶，其制作过程如图 4.3 所示，将硅胶按 1A: 1B 的重量或体积混合比混合，真空箱抽出气泡后，将其从注射孔倒入到包含远端指骨形状的空腔模具中，合模后在室温下固化 4 小时，就得到柔韧的末端指节面。

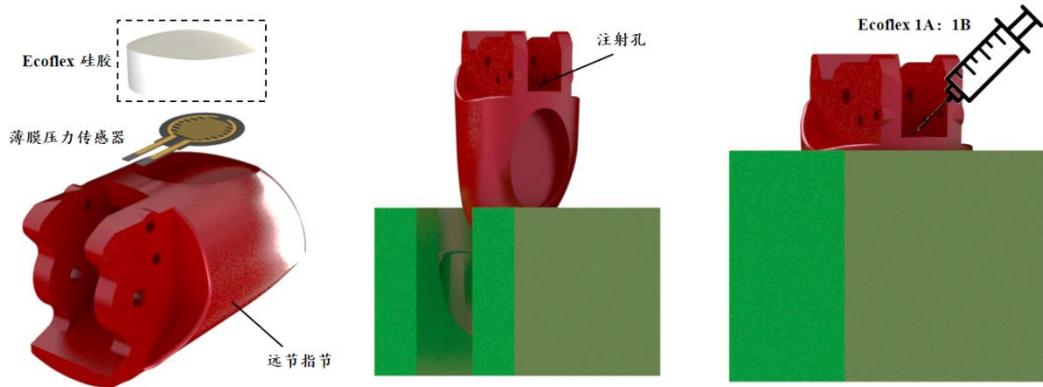


图 4.3 硅胶末端指节制作流程

#### 4.2.3 手掌结构装配

灵巧手的手掌模仿人手的外形结构，主要作用是固定各个手指和电机的位置，实现与机械臂间的联接和固定。在手掌的装配中，手指侧摆运动的杆件机构与大拇指和其余四指的基关节相连，另一端与舵机相连，舵机通过自攻螺丝固定到手掌内部。此外，四指中带动掌指关节屈曲运动的电机同样固定在手掌中，将电机固定件与掌背安放电机的位置用胶水和螺丝固定，防止其轴向和侧向窜动。掌心和掌背通过自攻螺丝固定在一起，为了将灵巧手安装在 UR5e 机械臂上，手掌先与固定法兰座用螺钉固定，再由螺栓将其安装到机械臂末端在 50mm 直径上分布的四个螺栓孔中。

#### 4.2.4 整手结构装配

灵巧手由手掌、拇指和其余手指共同组成，手掌与拇指间一侧用掌面上凸出的轴与拇指基座的孔固定，一侧用销轴安装到掌面和基关节支座的孔中，由掌内的舵机以四连杆机构带动实现拇指与手掌呈一定倾斜角度的运动；手掌与手指间则用基关节支座过渡，掌指关节屈曲和侧摆两个自由度运动的轴向正交于一点，侧摆运动是由基关节支座上凸出的轴与掌心掌背上的孔间隙配合，屈曲运动则以短销为轴，由球面四杆机构实现。灵巧手的总体装配效果如图 4.4 所示。

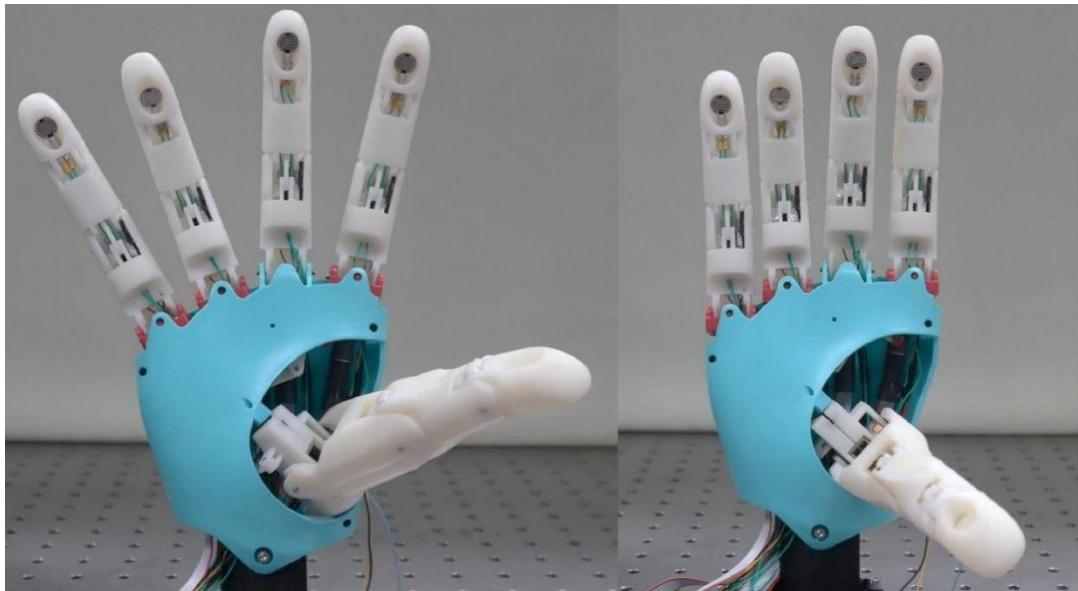


图 4.4 灵巧手总体装配实物图

### 4.3 电子系统搭建

灵巧手的电子系统主要由控制、驱动、传感以及通信、电源模块组成，共同实现电机的调速及转向的控制、舵机旋转角度的控制、角度传感器及编码器对关节旋转量的采集、压力传感器对指尖压力的测量以及灵巧手位置环和力环的封闭控制。在本设计中以 Arduino Mega 2560 PRO 为主控，将传感器信号上发给上位机，接收上位机传递的指令，输出 PWM 信号传递给驱动器来带动电机或舵机转到理想的位置，最终让灵巧手以期望的位姿完成对物体的抓取和操作，整个电子系统的原理图如图 4.5。

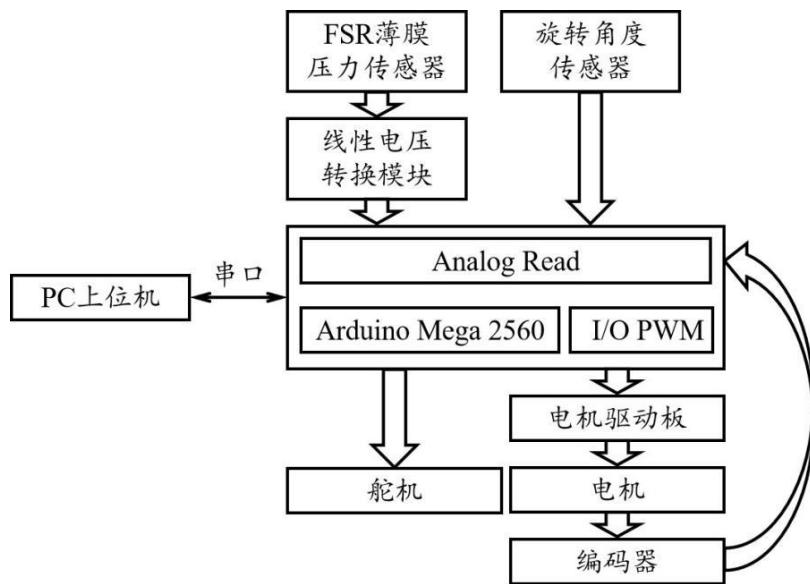


图 4.5 电子系统原理图

### 4.3.1 驱动器系统设计

灵巧手驱动系统设计面临的难题是在非常小的尺寸空间中实现高自由度，同时产生高力输出。在电机和舵机的选型上，一方面要满足空间尺寸要求，另一个方面要有合适的转速和转矩。综合两者，灵巧手四指近端指间关节的屈曲运动选择兆威 6mm 空心杯减速电机，掌指关节屈曲运动选择 Maxon RE10 伺服行星减速电机，大拇指腕掌关节屈曲运动选择 1218-N20 直流减速电机，侧摆运动选择 KST X06 微型舵机。各个电机的基本参数见表 4.1。

表 4.1 电动机单元选型表

	电机 1	电机 2	电机 3	舵机
型号	ZWPD006006-700	1218-N20	RE10 273119	KST X06
外径/尺寸 (mm)	6	12	10	20*7*16.6
额定转速 (rpm)	46	8	40	50
额定转矩 (mN · m)	17.65	30.89	119.04	40
减速比	699.55	1030	256	\
电机长 (mm)	21.05	33	45	\

舵机接收脉冲宽度调制 (PWM) 信号，这种信号与高低电平信号不同，其脉冲宽度可以改变，当信号进入内部电路后会产生一个偏置电压，从而触发电机运转，通过一个减速齿轮联动电位器。电位器的运动则会改变其两端电压，让偏置电压归零，然后停止转动，从而达到角度伺服的效果。因此，只需要向舵机发送特定的 PWM 信号，就能让其旋转到期望角度位置。一般来说，舵机接收的 PWM 信号频率为 50Hz，即 20ms 周期，其旋转角度范围在 -60°~60°，当高电平脉冲在 1.0ms~2.0ms 之间时，舵机就可以对应旋转到不同的角度。

电机则需要直流电机驱动电路控制其转速和方向，本设计中用 L9110 模块对 9 个电机实现驱动，其工作原理主要基于 PWM 信号控制和 H 桥驱动电路。L9110 将输入的 PWM 信号转换为相应的控制信号，可以调整 PWM 信号的占空比，即输出电平的平均电压来控制电机的旋转速度和方向。除了电源，L9110 需要两个引脚 INA、INB 控制一个电机，当 INA、INB 同时为低电平时，电机待机；同时为高电平时，电机刹车；INA 为高电平、INB 为低电平时，电机正转；INA 为低电平、INB 为高电平时，

电机反转。虽然可以由直流电机速度特性方程  $n = \frac{U - I_a R}{C_e \Phi}$  计算到电机的转速，但实际情况下转速与理论结果不能完全相符，因此就需要测量角度的传感器实现闭环控制。

### 4.3.2 传感器系统设计

丰富的感知能力能为灵巧手提供必要的信息支持，使其具有更好的自主抓握能力。在本设计中，用旋转角度传感器和编码器测量关节转角，FSR 薄膜压力传感器测量末端指尖力。

位置信号的测量是实现位置控制的基础，本设计中选用 SV01A103AEA01R00 旋转角度传感器测量四指近端指间关节和大拇指腕掌关节屈曲的旋转角度，四指掌指关节则用带有编码器的伺服行星减速电机实现转角和转速的控制与测量。

实际上，旋转角度传感器就是一个线性电位器，其电阻值会随着转子旋转角度而产生变化，因此，输出端电压的模拟量会与旋转角度呈线性关系变化，其有效旋转角度为 0~333.3°，线性度为 2%。在安装时，将旋转角度传感器固定在近节指节上，D 形贯通孔式转子与中节指节凸出的一段 D 形轴形成配合，当中节指节相对于近节指节有相对旋转时，角度传感器的转子也会相对旋转同样的角度，从而测量出关节处的转角，传感器的结构和装配如图 4.6 所示。

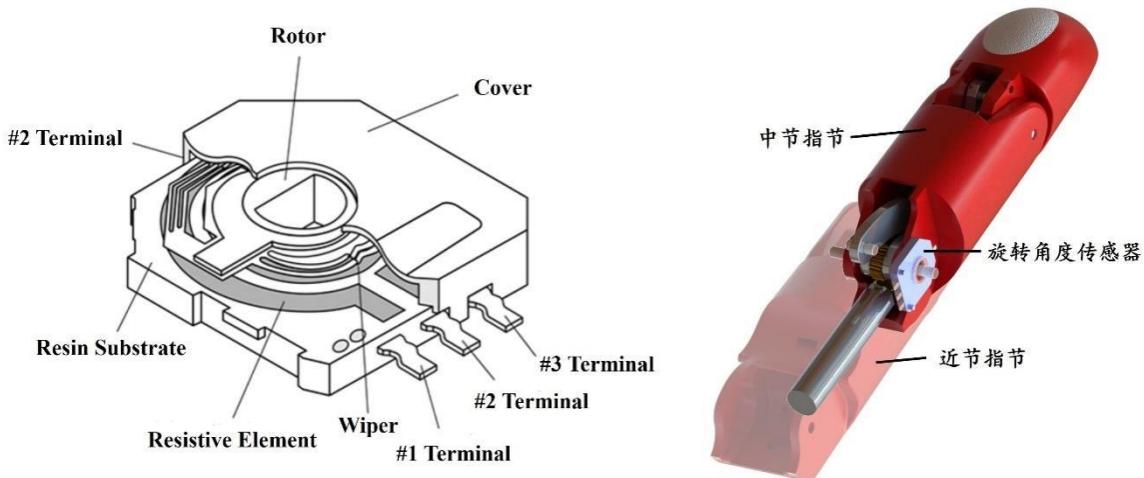


图 4.6 旋转角度传感器结构与装配位置

四指基关节处的电机输出轴上都有增量式编码器用于测量电机的速度，编码器输出的 A、B 两相脉冲信号间有 90°的固定相位差，因此在正转和反转时两路脉冲具有相反的超前滞后关系，由此可以判断电机的转动方向。由编码器输出频率与转速成正比关系的原理，就可以得到电机的转速，而要计算转动角度，就要在时域上对转速积

分。将编码器输出的 A 相信号接到 Arduino 的中断引脚上，B 相信号接到数字引脚上，设置中断函数，当检测到 A 路上升沿信号时触发，更新编码器计数，从而将旋转转换为周期性的电信号，再变为计数脉冲，利用时钟周期和输出脉冲数间的关系，就可以计算到电机的转速和相对角位移。

本设计中选用 RP-C 电阻式压敏传感器来测量指尖对物体施加的压力值，测量范围为 0~2kg，20g 时触发，其是由综合机械性能优异的聚酯薄膜、高导电材料和纳米级压力敏感材料组成<sup>[33]</sup>，顶层是柔性薄膜和复合在上面的压敏层，底层则是柔性薄膜和复合在上面的导电线路，两者用双面胶贴合及隔离感应区域。当感应区受到压力时，底层断开的线路会通过顶层的压敏层导通，其端口处的电阻输出值会随着感应区上压力的增大而减小，呈现幂函数关系的压阻特性曲线。柔性薄膜压力传感器在工作时相当于阻值由压力控制的双端口可变电阻，将其与基于运算放大器的信号转换模块相连，调节可变电阻到合适的阻值 ( $R_0 = \left(\frac{1}{3} \sim \frac{1}{2}\right) R_s$ ) 就可以让压力与输出电压在一定压力范围内呈现近似的线性关系，从而计算出大致的压力大小。

由于远节指节末端有一定的弧度，直接将薄膜压力传感器贴在表面受力不均匀，不能保证有效接触，因此在指节上开一个平整的椭圆孔，将薄膜压力传感器安装在末端指节内部，表面以一层硅胶覆盖，使手指与物体柔性接触<sup>[53,54]</sup>，由力的相互作用关系，外力会从硅胶传递到传感器上，其结构和装配爆炸图如图 4.7 所示。为了得到测量模拟量的值与真实力间的关系，用测力计对传感器进行标定，将测力计压在薄膜压力传感器上，记录施加的力的大小和传感器电阻，分别用幂函数和线性方程拟合电阻和电阻倒数与压力间的转换函数，要求拟合优度  $R^2 \geq 0.95$ ，得到如图 4.8 的输出特性曲线。

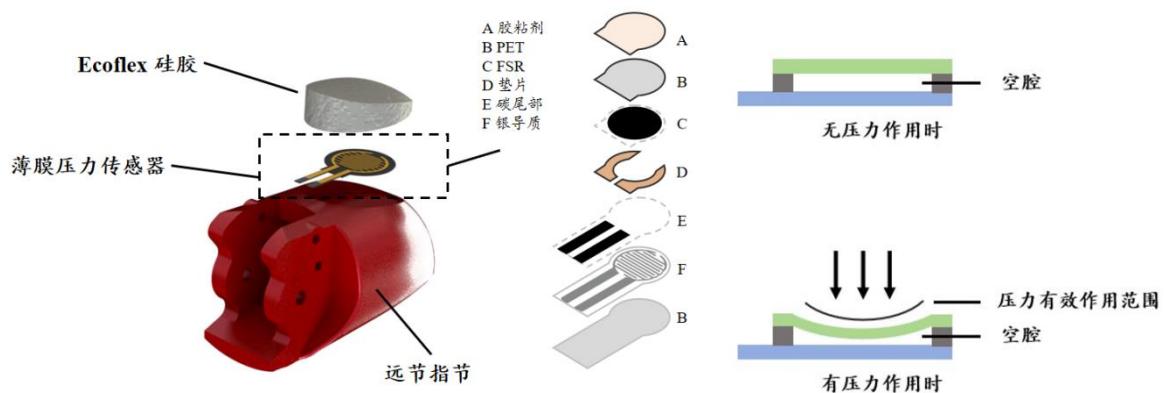


图 4.7 薄膜压力传感器结构原理与装配位置

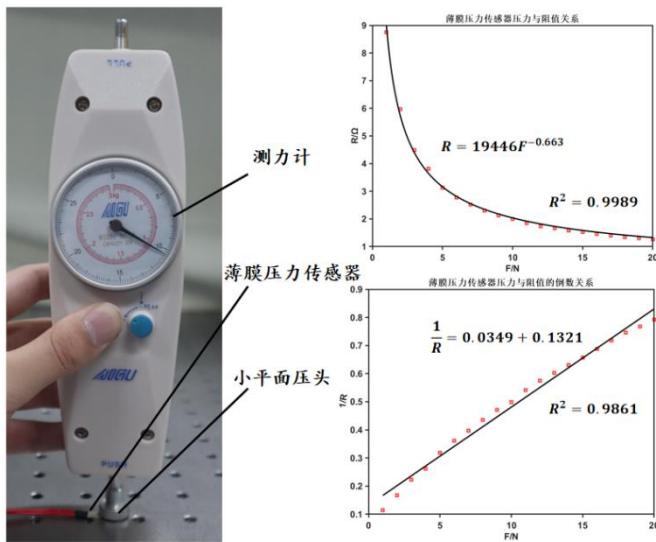


图 4.8 薄膜压力传感器标定和输出特性曲线

### 4.3.3 控制器系统设计

控制器的基本功能是实现传感数据的读入和驱动器的驱动，由于传感器和驱动器的数量众多，接线类型不一，而且常常需要独立的电源，因此线束复杂繁冗，为了简化线路，减小控制器的体积大小，从而将控制器嵌入到灵巧手手掌或法兰基座内部，以 Arduino Mega 2560 PRO 为主控，设计 PCB 板的电路结构，其原理图如图 4.9 (a) 所示。PCB 板的主要作用是辅助走线，便于将控制器的引脚与相应的传感器或驱动器以合适的端口相连，为了简化电路设计的难度，选用现成的 Arduino 最小系统板、压力传感器线性转换模块和电机驱动模块，让 PCB 以电气或物理连接的方式与这些模块相连，而本身不需要搭载元器件，在完成 PCB 的加工制作后可以装配得到控制系统的总体结构如图 4.9 (b) 所示。

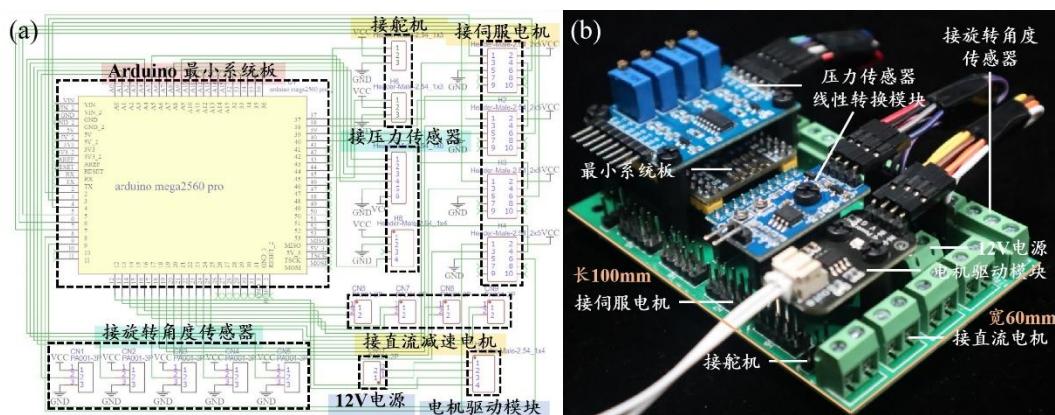


图 4.9 控制器 PCB 板原理图和总体结构

## 4.4 控制实现

灵巧手的控制可以分为上位机和下位机，其中，上位机是用于监测、控制和管理下位机的计算机系统，主要为用户提供可以操作的界面，以某种通信协议与下位机进行数据间的互换；而下位机则主要负责执行上位机发来的具体指令，在特定的硬件平台上运行。在本设计中，上位机主要的作用有：将下位机采集端设备的传感器数据以可视化的方式呈现给用户，实时了解灵巧手的位置姿态和末端力情况；用户可以在上位机上发送控制命令给下位机，实时控制灵巧手运动；完成数据的管理、存储和计算。而下位的主要职责为：实时响应上位机的命令，执行具体的操作，保证系统的实时性和可靠性；驱动各自由度执行器按照命令完成精确的动作；与传感器相连，实时收集关节运动角度、末端力等物理量；将自身运行状态及各种信息反馈给上位机。

本设计以 MATLAB 的 Simulink Support Package for Arduino Hardware 为平台，在 Simulink 环境中完成 Arduino 程序的编写、测试和运行以及上位机用户界面的实现，直观展示程序运行的逻辑，实现硬件在环的控制。以 MATLAB 为程序构建平台，一方面可以将上、下位机程序整合在一起，简洁地实现灵巧手的各项功能和数据传输，另一方面可以将理论计算交由 PC 处理，克服单片机算力不足等问题。

### 4.4.1 下位机程序实现

灵巧手下位机的基础功能是实现传感器的采集及电机舵机的驱动，在设计中用 Simulink 为平台，实现程序的编写、测试和运行，其程序结构图如图 4.10 所示。

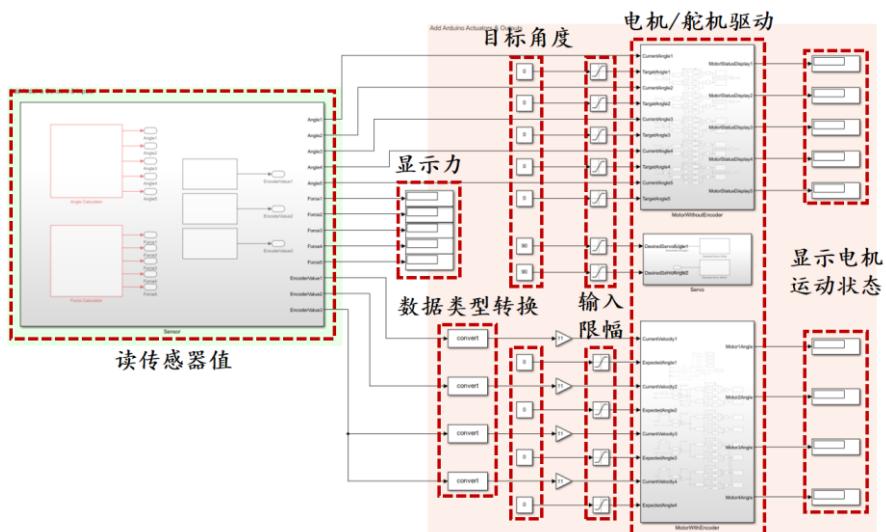


图 4.10 下位机程序框图

在此基础上，灵巧手下位机需要精确控制各个关节的运动，包括关节的角度、速度控制以及关节间的协调控制，此外，在执行抓取、操控等操作时，灵巧手需要感知外力信息，以此作为调整抓取力度和控制精度的依据。因此，这里主要介绍灵巧手在关节空间和笛卡尔空间的位置控制以及末端力控制的实现方法。

对于位置控制来说，任何操作空间的位置控制最后都会映射到驱动空间中，笛卡尔空间、关节空间和驱动空间具有一一映射关系，因此，驱动器空间下角度的跟踪控制是实现关节和笛卡尔空间下位置控制的基础。本设计中用抗积分饱和的 PID 算法实现驱动器空间下的角度跟踪，其控制器实现框图如图 4.11 所示。由于积分作用的累积效应，传统的 PID 控制器的输出可能会超出正常范围而进入饱和区，这会让控制器的输出持续增大。此时，当系统出现反向偏差时，需要先从饱和区退出，而不能快速响应外部控制量的变化。因此，为了缓解积分饱和的问题，引入抗积分饱和的 PID 算法<sup>[55]</sup>。其思路是增加一个信号环路  $U_e$ ， $U_e$  为计算的控制量与实际限幅输出值的差，反馈到积分器的输入端，当到达饱和区时，控制器通过外环的反馈可以迅速将输出量向  $U_e = 0$  的方向变化，从而在一定程度上解决积分饱和的现象。

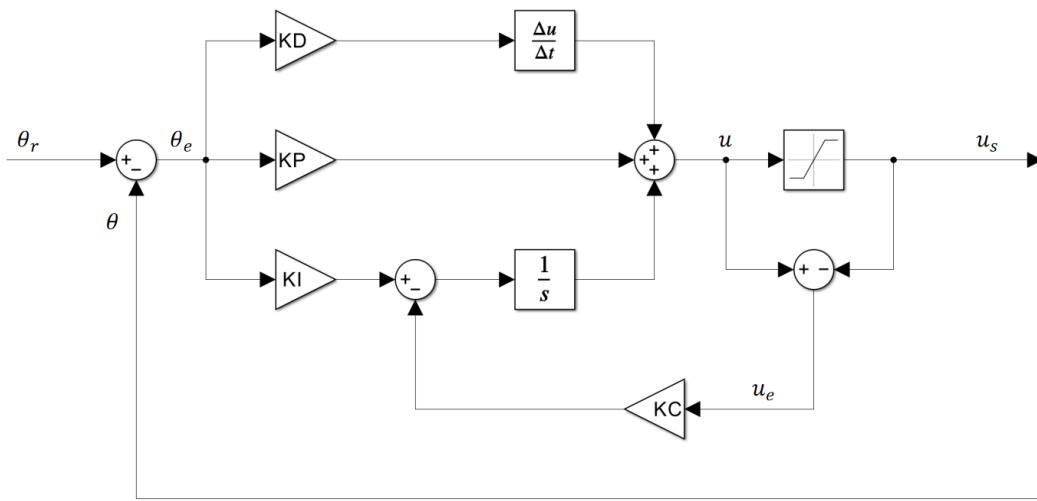


图 4.11 抗积分饱和控制器

由抗积分饱和控制器实现位置控制的方法，可以调节控制器参数，重点实现对灵巧手手指基关节俯仰自由度的关节空间位置跟踪。设定初始位置为  $\theta = 0^\circ$ ，第 1 秒运动到期望位置  $\theta = 90^\circ$ ，第 5 秒回到  $\theta = 0^\circ$  位置，未添加 PID 控制和添加 PID 控制器的效果如图 4.12 所示。

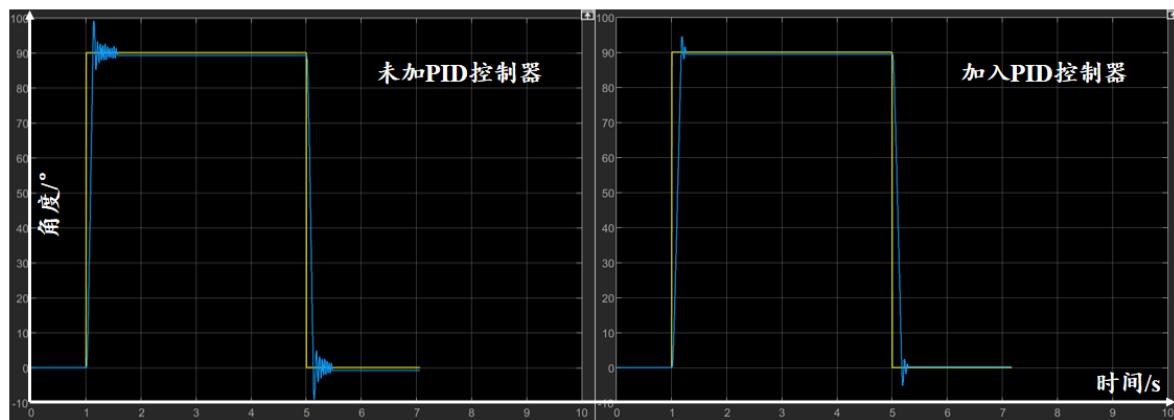


图 4.12 PID 控制器实现效果

可以观察到，在控制器下其轨迹跟踪具有良好的瞬态响应和稳态精度，超调量小，能满足在抓握中对位置控制的要求。在此基础上，可以实现灵巧手屈曲关节位置的角度跟踪控制和在笛卡尔空间下期望的运动轨迹<sup>[56]</sup>。当灵巧手操作物体在笛卡尔空间下完成期望的运动时，需要根据物体的期望运动轨迹和姿态，确定手指指尖的运动，在笛卡尔空间下得到目标位置的插值。由逆运动学可以将笛卡尔空间下坐标转换到关节空间下的角度，再由传动机构的逆运动学回溯到驱动器空间下的目标转角，在驱动器空间内规划和实现角度跟踪的控制。为了观测和跟踪，可以用编码器计算到的实际角度用正运动学得到在关节空间和笛卡尔空间下的实际位置，其逻辑框图如图 4.13 所示。

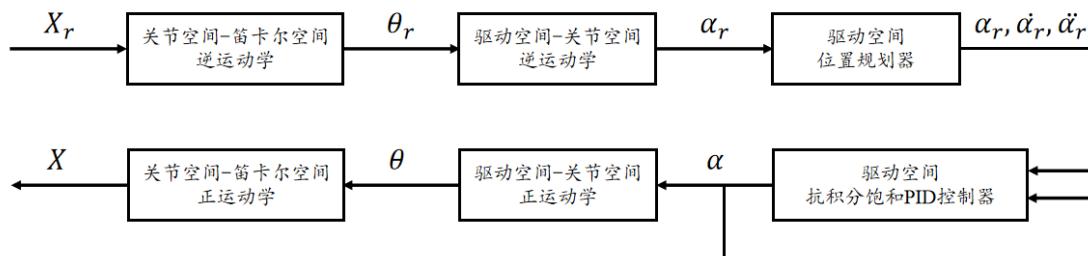


图 4.13 关节位置和笛卡尔位置控制实现逻辑图

在灵巧手操作物体的过程中，需要保持一定的接触力，如果接触力太小，则物体可能会脱落，接触力过大则可能损坏脆弱的物体，因此，指尖力的控制可以让接触力基本保持在恒定的范围内，在形封闭的基础上实现力封闭的抓握。由于指尖力传感器只能得到一个维度的指端法向方向力，因此灵巧手的力控制只需要在末端力小于期望值时控制关节屈曲，在末端力大于期望值时伸展即可实现简单的一维力控。

#### 4.4.2 上位机程序实现

在 Simulink 中可以实现硬件在环的控制，即上位机和下位机间用串口的方法实时下发命令和获取数据。因此，只需要将上位机中需要显示和控制的模块与下位机程序中对应的变量相连，在本设计中，上位机的面板主要由三部分组成，分别是测量到的关节角度和力的可视化显示、主动自由度关节的角度控制以及手指末端力的力控制，其界面如图 4.14 所示。用户可以从上位机界面了解各个电机实际的角度和末端指节的外力，而且可以实时改变关节目标角度去完成抓取动作。

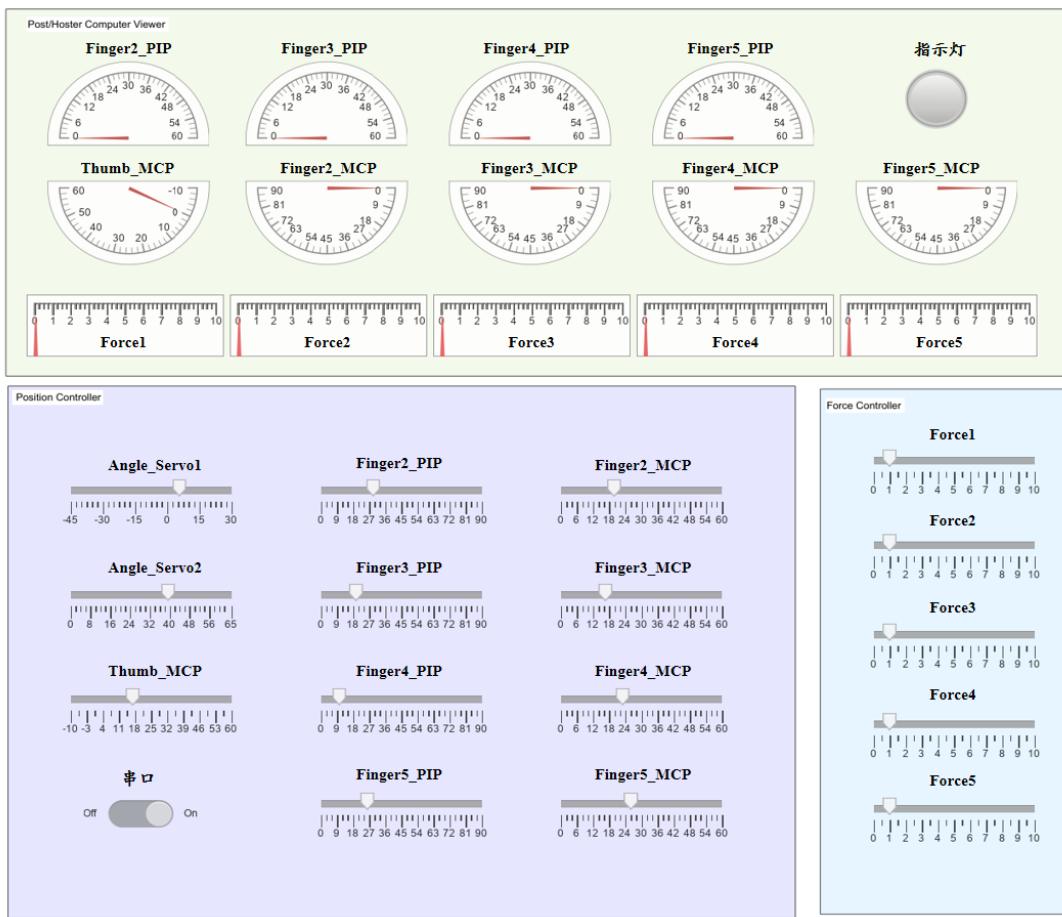


图 4.14 上位机控制界面

#### 4.5 仿真模型搭建

Simscape 是 MATLAB/Simulink 环境下的物理建模工具，可以实现从三维实体模型到机器人运动和受力特性的快速分析。本章用 Simscape 搭建出灵巧手的物理仿真模型，其基本流程为：在 Solidworks 中组装灵巧手的手掌和各节手指，添加旋转约束；

用 Simscape Multibody Link 工具导出模型的.xml 文件；在 MATLAB 中用 Simscape 打开.xml 文件，对模型做一定的预处理，就可以实现基本的模型仿真。其模型结构图如图 4.15 所示。

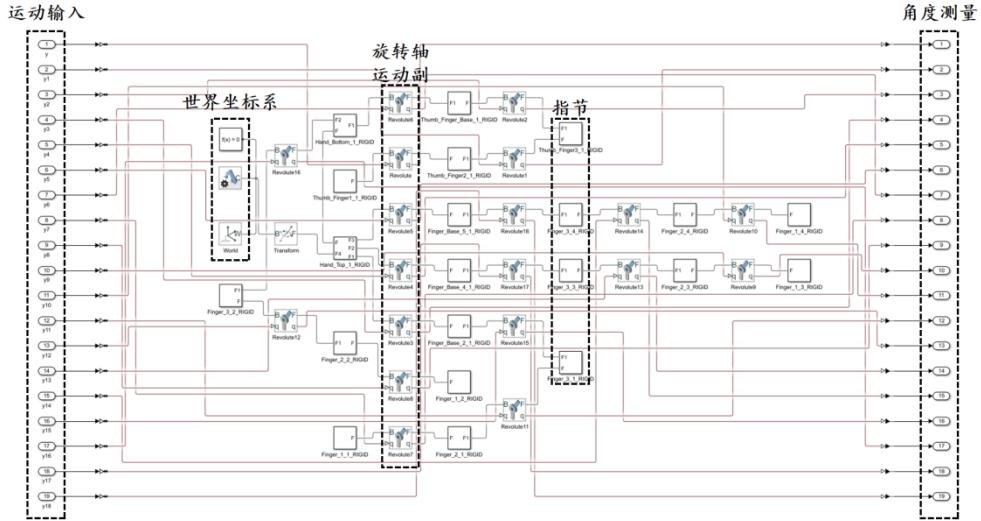


图 4.15 Simscape 仿真模型结构图

从仿真模型中灵巧手的运动可以验证灵巧手的设计，用规划好的期望轨迹为输入，实时反馈其关节角度，调节各个关节的角度，可以直观地观察到灵巧手的状态和运动情况，如图 4.16 所示，其与实物模型具有相同的特征，因此可以在仿真中规划好各个关节的转速和转角，再用于实物抓取中，减少预编程的时间和难度。

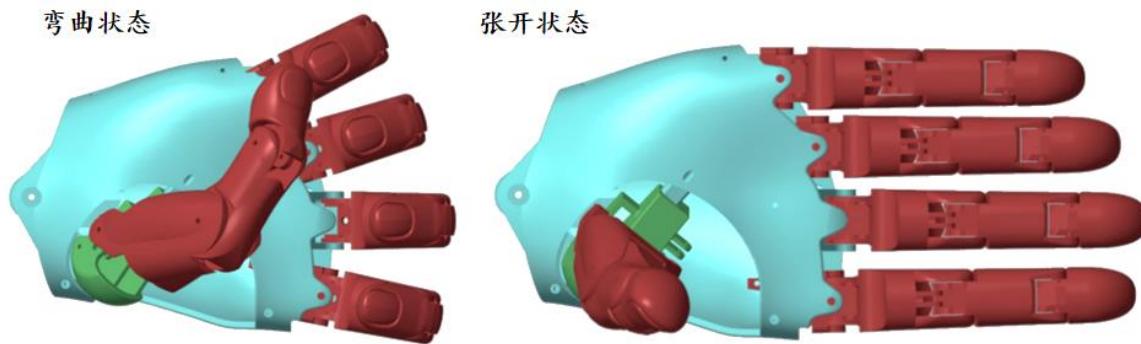


图 4.16 灵巧手 Simscape 仿真模型

## 4.6 本章小结

本章详细介绍了灵巧手样机机电系统的搭建过程，主要包括机械系统、电子系统和仿真模型的搭建。其中，机械系统主要包括有灵巧手各个手指和手掌内部结构的装配，详细阐述以蜗轮蜗杆和连杆机构实现运动和动力传递的方法。电子系统在硬件介

绍了各个电子元器件的选型、结构和安装位置以及控制器 PCB 电路的设计，在软件上阐述了上位机和下位机系统的逻辑和功能实现。除此以外，在 MATLAB 中搭建动态仿真模型，以用户友好的界面展现灵巧手的运动和抓握能力，验证灵巧手在结构和控制算法上的合理性。

## 第 5 章 灵巧手抓取和操作实验

### 5.1 引言

灵巧手实验是检验灵巧手实际抓持和操作物体性能的重要标准。实验主要衡量灵巧手的运动范围、有效负载、稳定性、抓握和操作时的灵活性、可靠性以及操纵工具完成目标任务的能力，本章将在展示灵巧手基本运动和有效负载能力的基础上，让灵巧手抓持和操作不同形状和类型的物体，然后将灵巧手与 UR5e 机械臂相结合，用机械臂控制灵巧手的空间位置，操作工具完成特定的工作。实验表明设计的灵巧手具有灵活的运动能力，有效的负载能力，能够展现与人手相似的抓取操作模式，对不同物体有一定的抓取适应性和手内操作能力。

### 5.2 运动性能验证

单个手指关节及指间的运动范围是衡量灵巧手运动能力的重要方面。文献<sup>[57]</sup>中给出了人手关节角的运动范围，测量和验证各个手指在屈、伸、收展、对掌运动中极限位置的角度，与人手对比，可以直观显示出灵巧手运动的工作空间大小。因此，首先就大拇指和其余四指的屈曲运动，将其固定在台钳上，控制电机带动指节屈曲或伸展，其运动状态分别如图 5.1 和图 5.2 所示。



图 5.1 大拇指屈曲运动状态图

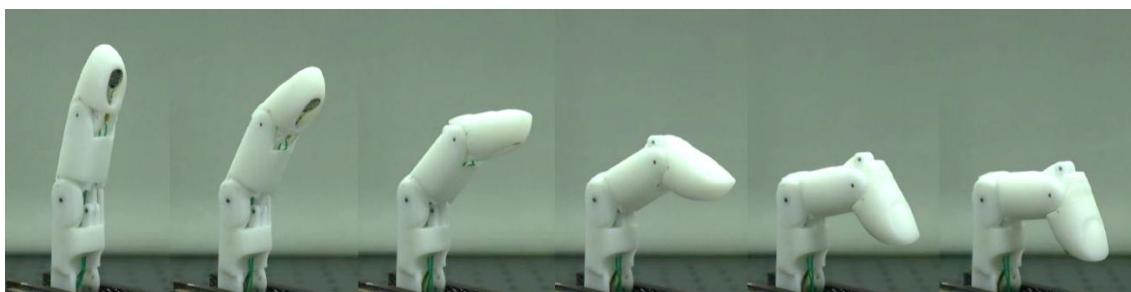


图 5.2 手指屈曲运动状态图

将手指安装到灵巧手手掌上后，可以控制各个手指间的侧摆和掌指关节的屈曲运动，其中，手指间和大拇指的侧摆运动是由手掌内的舵机带动连杆实现传动，其运动状态分别如图 5.3 和 5.4 所示，手指掌指关节的屈曲运动则由掌内电机带动球面四杆机构实现传动，其运动状态如图 5.5 所示。

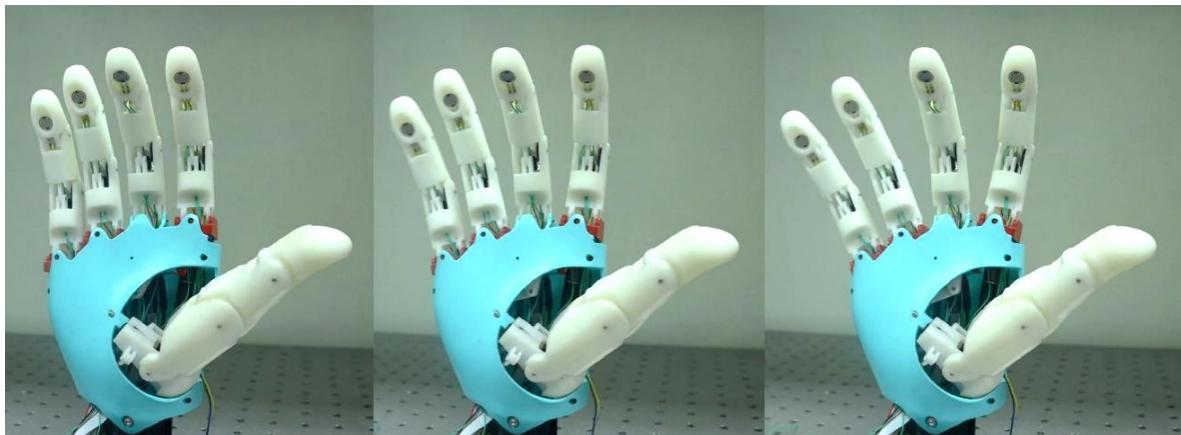


图 5.3 手指侧摆运动状态图

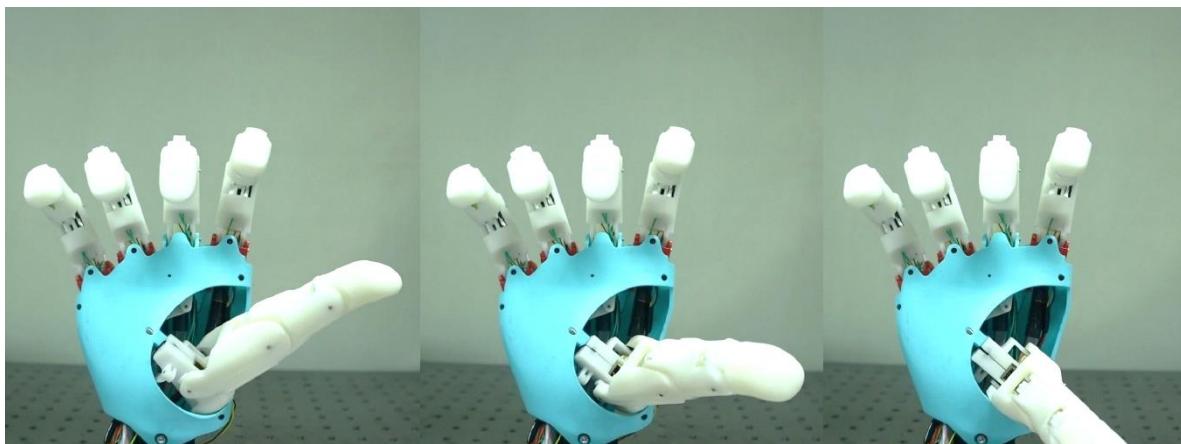


图 5.4 大拇指侧摆运动状态图

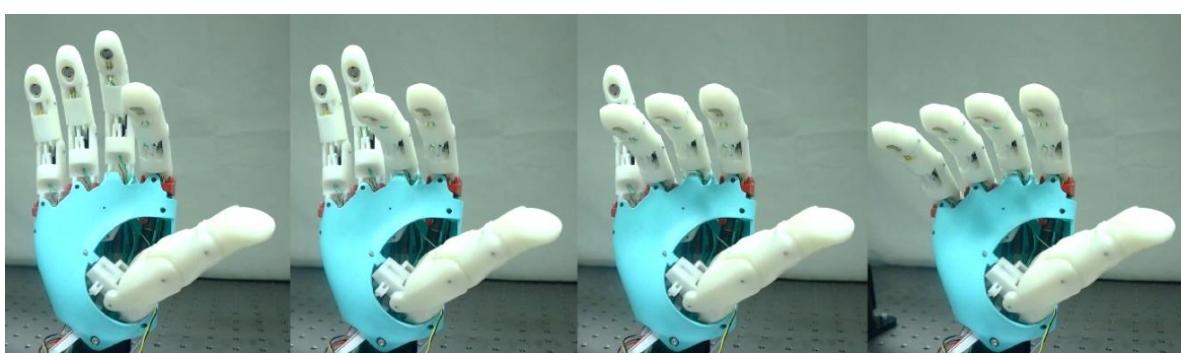


图 5.5 手指掌指关节屈曲运动状态图

观察和测量各个关节运动的角度范围，其结果与设计中相似，能够满足大部分抓取和操作要求。为了直观展示灵巧手的综合运动能力，控制灵巧手各个关节的位置，

让灵巧手比出如数字 1~5 的手势，这一过程中会用到灵巧手中所有的主动自由度，其结果如图 5.6 所示。

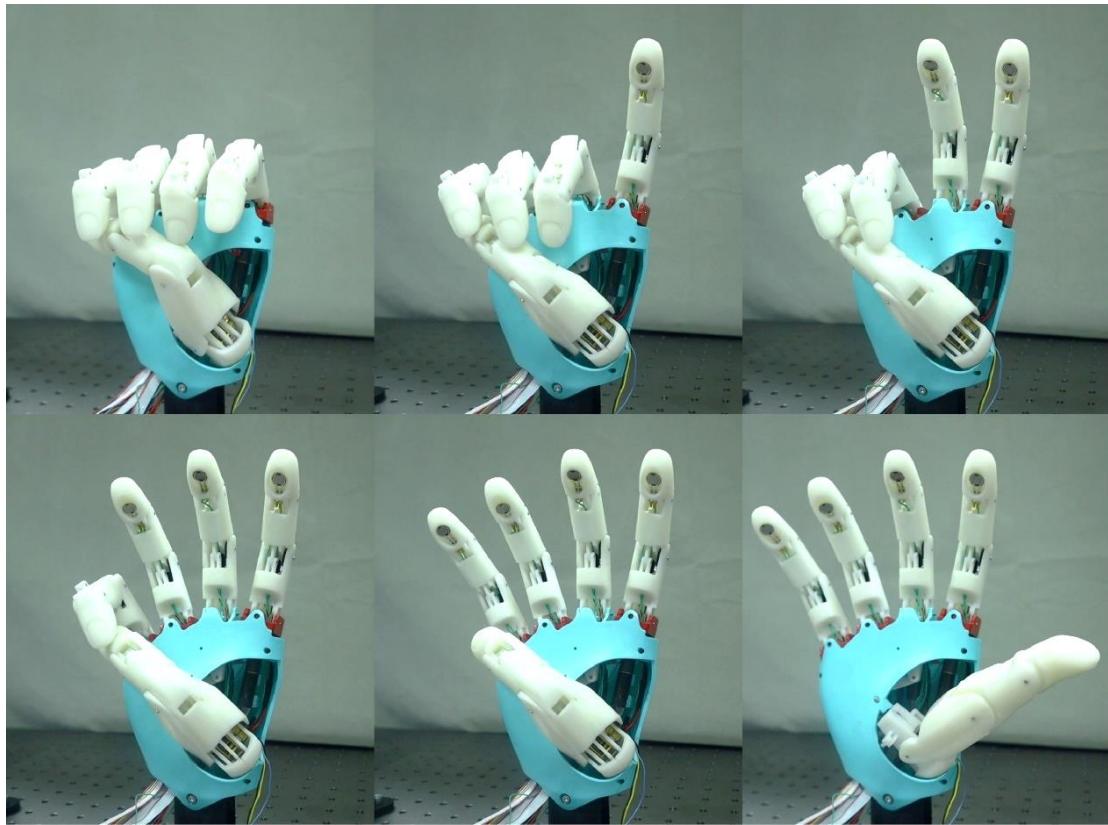


图 5.6 灵巧手比数字 1~5 手势图

实验表明，灵巧手 11 个主动自由度都独立可控，在运动时各个关节和模块不会有干涉的问题，在完成复杂动作的过程中，能在合理的操作规划下协调运动。

### 5.3 负载性能验证

为了验证灵巧手具有一定的有效负载，首先测量单个手指能够承受的最大重量。在实验中，将手指位置用台钳固定，在远节指节处绑上细线，细线穿过重物，控制手指屈曲到某一位置后，将重物放下，同时给电机一个驱动电压，让其短时堵转，此时远节指节能够保持弯曲姿态时负载的最大质量就是手指的负载能力。由于蜗轮蜗杆传动的方法具有自锁功能，在抓取中能实现形封闭，因此手指即便受到外力干扰也能维持稳定，而且不需要额外的能量维持包络动作。在实现形封闭后，灵巧手的极限负载能力实际上是蜗轮蜗杆结构的强度和电机堵转能施加力矩共同作用得到的，在一定程度上弥补微型直流电机输出力矩有限的问题。在粗略估计手指能负载的重量后，选择质量为 478.34g 的焊锡丝为重物，验证手指的负载能力，其结果如图 5.7 (a) 所示。

此外，灵巧手垂直提拉重物所能承受的最大重量是衡量灵巧手整手负载能力的重要标准，影响着灵巧手功能性、效率、操作安全性等方面。在实验中，将灵巧手固定在桌面边缘，用细线穿过哑铃，系好后放在灵巧手近节指节位置上，此时灵巧手能撑住哑铃保持位置时负载的最大重量就是灵巧手整手的负载能力。灵巧手近节指节的运动由球面四杆机构传动，而这种结构同样可以位置自锁，几乎无法让指节端的运动转化为电机的转动，因此，其负载的重量会由十字轴的弯曲应变承担，从而承受住电机几乎不可能直接带动的负载力。在粗略估计灵巧手能负载的重量后，选择质量为 2kg 的哑铃为重物，验证灵巧手的负载能力，其结果如图 5.7（b）所示。

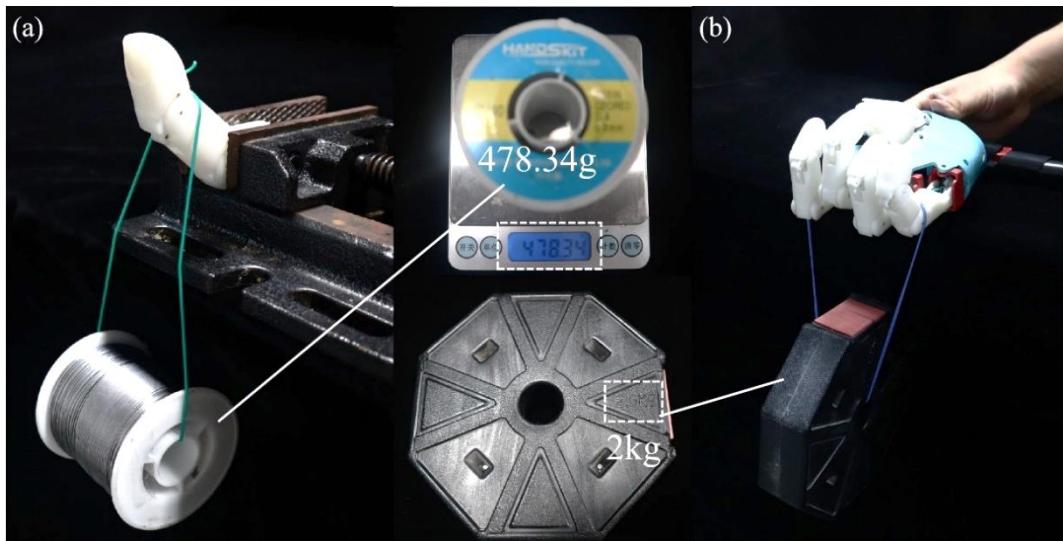


图 5.7 灵巧手负载能力实验

从实验结果可以看出，手指能够负载超过 500g 的重物、灵巧手能够负载超过 2kg 的重物而保持其位置不变，实际上极限负载会稍稍超出这个数值，但可以将其设定为安全负载。而实际上单个手指的重量不到 40g，微型直流电机只有 5g 的重量，整个灵巧手的重量才 520g，灵巧手的负载力远超出电机输出力矩能够承载的范围，验证了蜗轮蜗杆和球面四杆机构的自锁作用，用结构上的强度增加极限负载的大小。

## 5.4 抓握物体能力验证

灵巧手对不同形状、材质物体的抓取能力是衡量其功能的重要标准。人手常见的抓持可以粗略分为圆柱抓握、指尖抓握、钩状抓握、掌心抓握、球形抓握及侧边捏握，每种抓握模式都适用于不同类型的目标物体。由于具有与人手类似的布局和足够的主动自由度，灵巧手同样可以用不同模式适应不同形状、尺寸和材质的物体，在实验中将详细

展示灵巧手能实现的操作模式和面向不同物体的抓握效果。在实验中，为了体现实验的普遍性，选择生活中常见的各类物品为对象，如胶带、水瓶、笔、网球、饼干、毛绒娃娃、老虎钳、瓶盖、直尺、卡片、水果、螺丝刀等，对灵巧手操持效果进行测试和评价，这些物品在材质、大小、形状、重量、厚薄、软硬上都天差地别，其中最大有棱长 45mm 高 108mm 的六棱柱，最薄有 1mm 厚的卡片，具有代表性和广泛性。

首先，灵巧手四指的侧摆自由度可以模仿人手用食指和中指夹住圆珠笔或者撑开皮筋、水杯的动作，由于食指的“锁紧”功能，在夹住或撑开物体后能够完全限制物体的运动，其效果如图 5.8 所示。

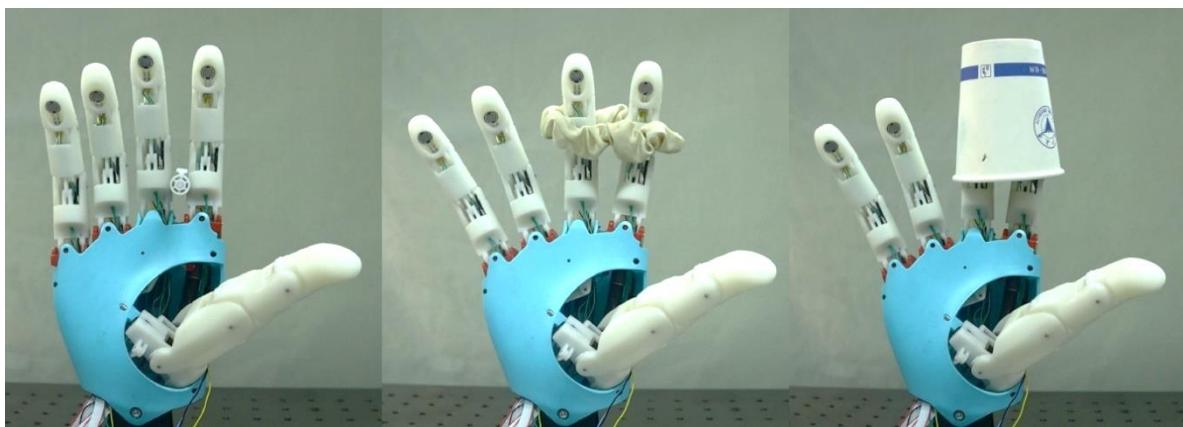


图 5.8 灵巧手两指夹握实验

其次，在生活中，人手会只用大拇指和手掌部分对物体进行简单的抓持，与圆柱抓握和球形抓握类似，只是这种抓握方式不用屈曲的四指而是掌心面为支撑，可靠性不高，但同样可以抓住直径和尺寸不大的物体。灵巧手可以用大拇指的耦合屈曲和掌心对掌抓持如胶带、水瓶、网球等物体，其效果如图 5.9 所示。

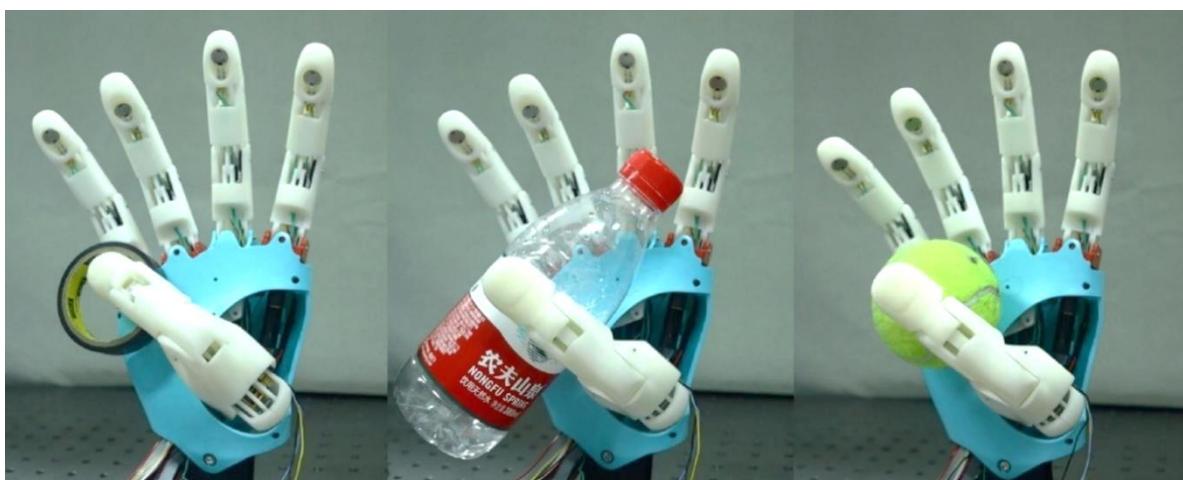


图 5.9 灵巧手对掌抓握实验

两指捏握通常用拇指和食指配合完成，在日常生活中可以用于完成精细的拾取和操作动作，如抓握和操作小物体（纽扣、珠子、螺丝、镊子等），还可以在运用钢笔等书写工具、在雕刻、折纸等活动中保持精准的控制，而且侧向捏握能够适应各种不同形状和大小的物体，允许处理易碎或柔软的物品。由于灵巧手大拇指和其余四指也能像人手一样触碰到，因此其可以用大拇指和食指或中指完成两指捏握的动作，来抓握如瓶盖、饼干、卡片等相对滑或脆或薄的物体，相比于食指，灵巧手中指和大拇指的接触会更多用到指端的法向力，其效果如图 5.10 所示。

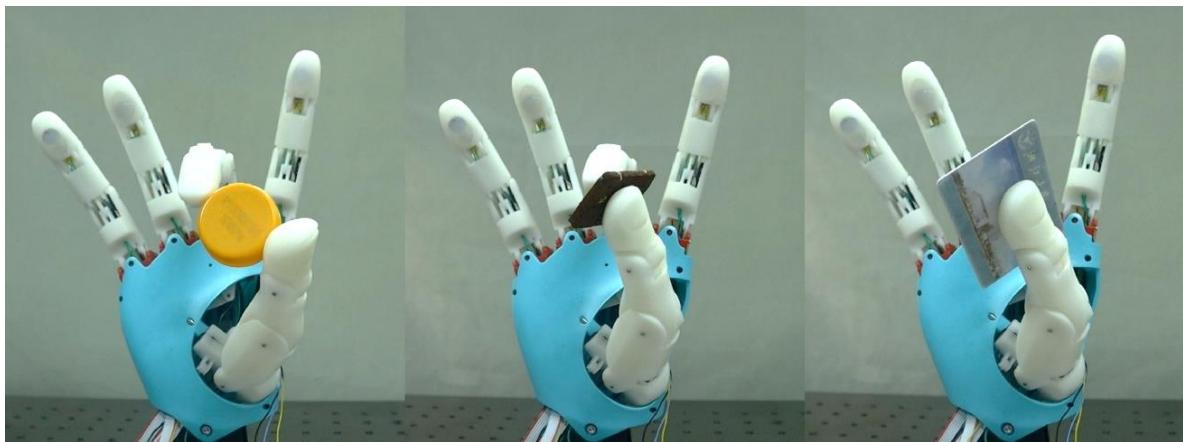


图 5.10 灵巧手两指捏握实验

侧边捏握与两指捏握有相似之处，其是用大拇指和食指的侧面来夹持物体的抓握方式，相比于两指捏握，侧边捏握运动空间小，常用于按压和固定，因此，用灵巧手大拇指和食指侧来夹取直尺、夹子和螺丝刀来展示其侧捏能力，其效果如图 5.11 所示。

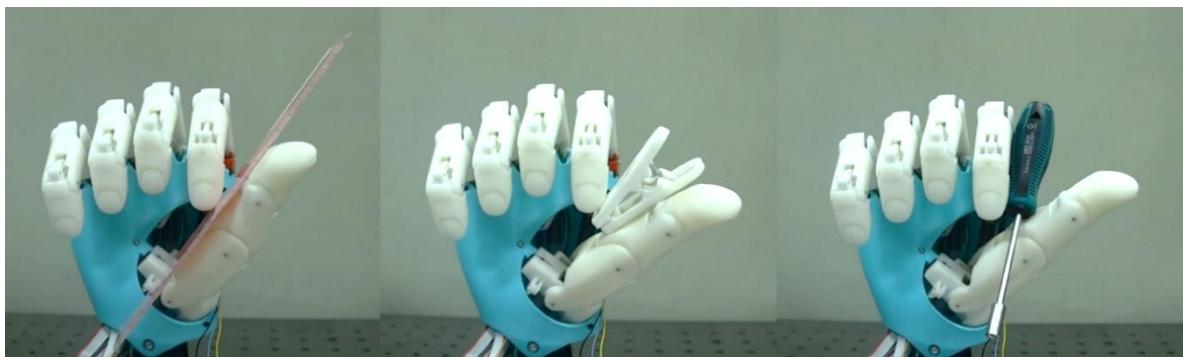


图 5.11 灵巧手侧边捏握实验

圆柱抓握是人手最基本的抓握方式，涉及手指和拇指的协同工作，来环绕和抓取圆柱形的物体。在生活中，操作哑铃、车把手、门把手、锤子等工具和抓持水杯、雨伞等物体时都会用到圆柱抓握，在实验中，协调控制灵巧手各个手指的运动，让其抓

握罐子、遥控器、老虎钳、六棱柱体等相对大直径、大体积、长条状物体，其效果如图 5.12 所示。

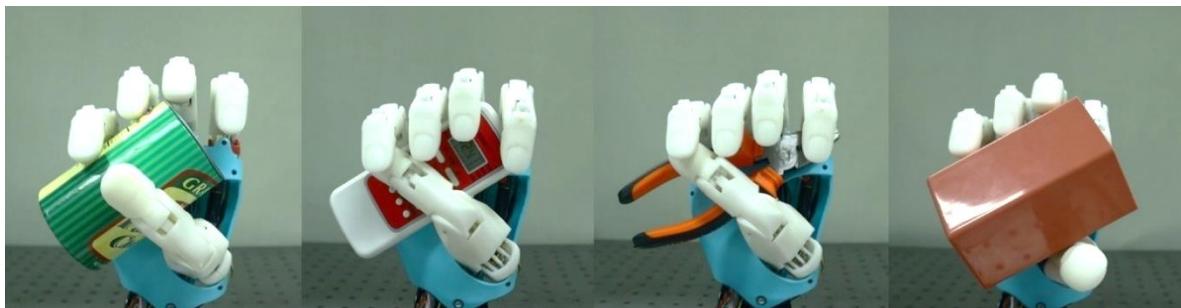


图 5.12 灵巧手圆柱抓握实验

球形抓握允许拇指与其他手指相对，形成一个球形空间，以适应和抓取球形或其他不规则形状的物体，在生活中球形抓握主要用于抓握如苹果、橙子等水果，篮球、网球等球类，石头、土豆等不规则物体等，因此，在实验中，控制灵巧手以球形空间包围抓取沃柑、鼠标、毛绒玩偶、游戏手柄等球形或不规则状物体，其效果如图 5.13 所示。

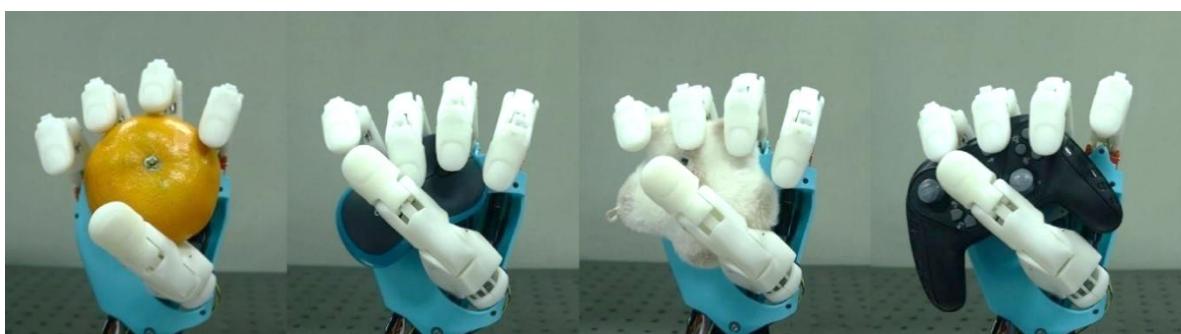


图 5.13 灵巧手球形抓握实验

从实验结果来看，灵巧手面对大部分物体都能实现稳定的抓握，而且能模仿出人手丰富的功能模式，具有不错的整体性能和前景。

## 5.5 手内操作能力验证

灵巧手手内操作是指在单个手中，借助手指、手掌等部位的协同运动来改变物体在手中的相对位置和姿态，在日常生活常常用到手内操作，如抓取某个工具或物品并在手中调整其位置和角度，从而实现更好的抓握、操作或放置。因此，这种能力能增强仿人灵巧手的操作技能，使其具有类人手的复杂操作技巧。为了展现本设计灵巧手的手内操作能力，将手内操作复杂的行为分解，用各个手指间的协同配合实现简单的操作动作。

让灵巧手模仿人手食指和中指夹住笔并进行旋转，改变笔相对于手指的位姿，这个过程实际上就是两指不断调整弯曲角度和夹角的过程，其实验效果如图 5.14 所示。

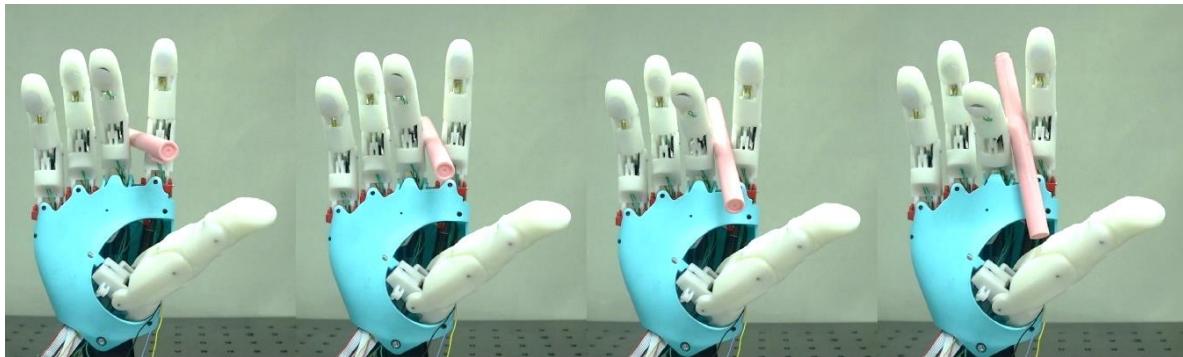


图 5.14 灵巧手两指操作水笔实验

此外，人手可以用拇指和食指或中指的指尖，用捻转或揉捻的动作对小物体进行旋转或捻动，如拧动螺丝或打开瓶盖，或对纸张进行翻页、折叠等动作，是人手手部功能的重要方面。在实验中，用灵巧手拇指和中指夹住胶带，在大拇指变换侧摆角时用中指的屈曲保持与物体的有效接触，在这过程中两指与物体的接触面位置会发生改变，从而改变胶带相对于灵巧手的姿态，其实验效果如图 5.15 所示。

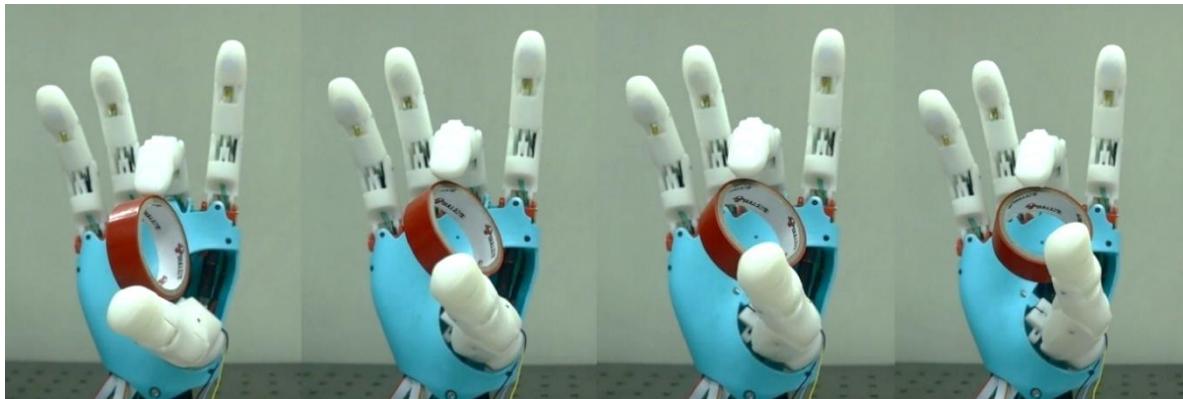


图 5.15 灵巧手两指操作胶带实验

从实验结果来看，在结构和自由度配置上灵巧手具备基本的手内操作能力，能在人眼和人脑的辅助控制下改变物体在手内的姿态向预定目标变换，但要实现类似人手高度灵活和复杂的手内操作，还需要全面的触觉感知和智能的自主操作能力。

## 5.6 工具操作能力验证

灵巧手可以用法兰盘安装到 UR5e 机械臂的末端，虽然机械臂不会影响灵巧手自身的抓取性能，但在实际应用中，机械臂能提供大范围的运动和定位，充分发挥灵巧手的

作用。UR5e 机械臂共有 6 个自由度，具有高度的灵活性，操作简单，能直接用示教器控制机械臂的位置，改变灵巧手整体的位置和姿态，从而以合适的姿态完成抓握和操作的动作，其组装效果如图 5.16 所示。

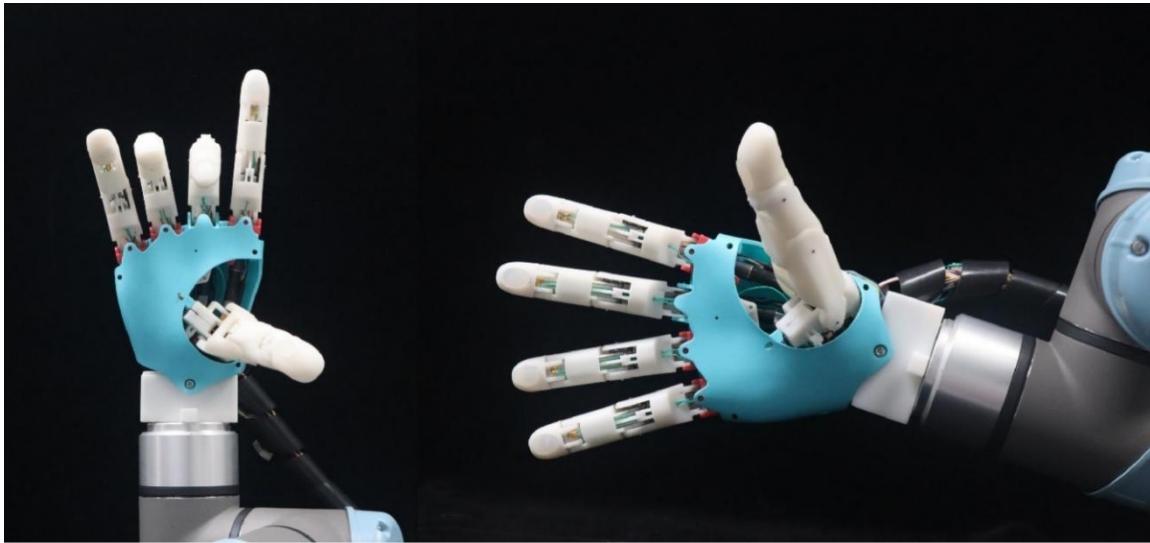


图 5.16 灵巧手与机械臂组装效果图

为了展示灵巧手与机械臂协作操作工具完成特定任务的能力，用灵巧手操作剪刀剪开纸片、操作钳子夹取螺丝、按压滴管吸取液体及拉开抽屉取出其中物品的实验，验证其丰富的运动能力和可控的抓取力度。

在操作剪刀剪开纸片的实验中，首先要让灵巧手稳定地握住剪刀的下半部分，手指环绕剪刀柄，拇指放在剪刀的一侧，食指放在另一侧以固定剪刀在手上的位置；之后，让食指和拇指伸展，带动剪刀刀柄张开，从而打开剪刀口；调整机械臂的末端位置，将剪刀的刀刃对准纸片上需要剪开的位置，闭合刀刃，让刀刃通过纸片；在完成一次剪切后，控制机械臂沿着预定的线条移动，将纸片完全剪开。在剪切过程中，可以控制剪刀的开合幅度，从而控制剪切的形状和长度，其实现效果如图 5.17 所示。

在操作钳子夹取螺丝的实验中，可以将人手操作钳子的过程分为夹持、开合、定位、夹紧四个阶段，其中夹持是用手指环绕老虎钳的手柄，拇指在手柄一侧，其余四指位于另一侧；开合是用手指和手掌的协调运动，控制钳子张开；定位则是用手腕或手臂的旋转让钳口运动到目标位置，确保钳口对准需要夹持的目标物体；夹紧是在对准物体后，用拇指和食指向内收力，让钳口闭合夹紧物体。在实验中，模仿人手的操作，首先用拇指和食指固定钳口，无名指和小拇指则交错夹住钳柄末端；然后让无名指和小拇指伸展，保持拇指、食指及中指对钳子的握持，带动钳柄的一端向上抬起，从而让钳口张开；在

钳口张开后，调整机械臂位置，让钳口对准需要抓取的螺丝；最后控制无名指和小拇指同时屈曲将钳口夹紧，从而将螺丝从桌面上夹起，其实现效果如图 5.18 所示。

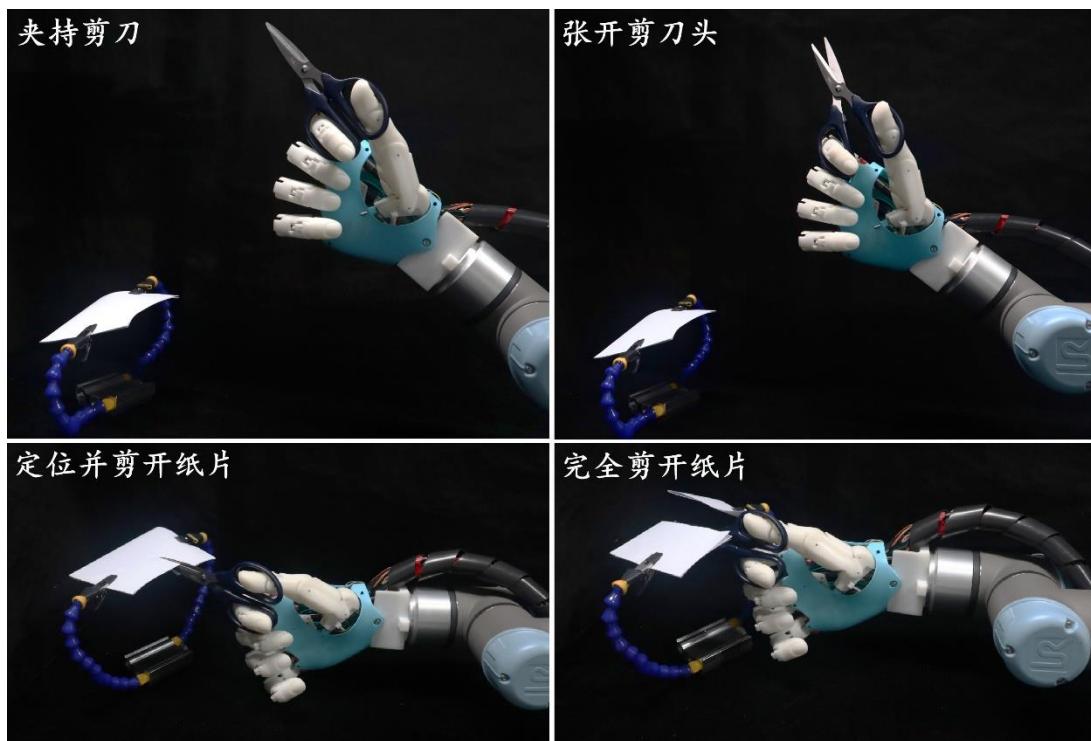


图 5.17 灵巧手操作剪刀剪纸实验

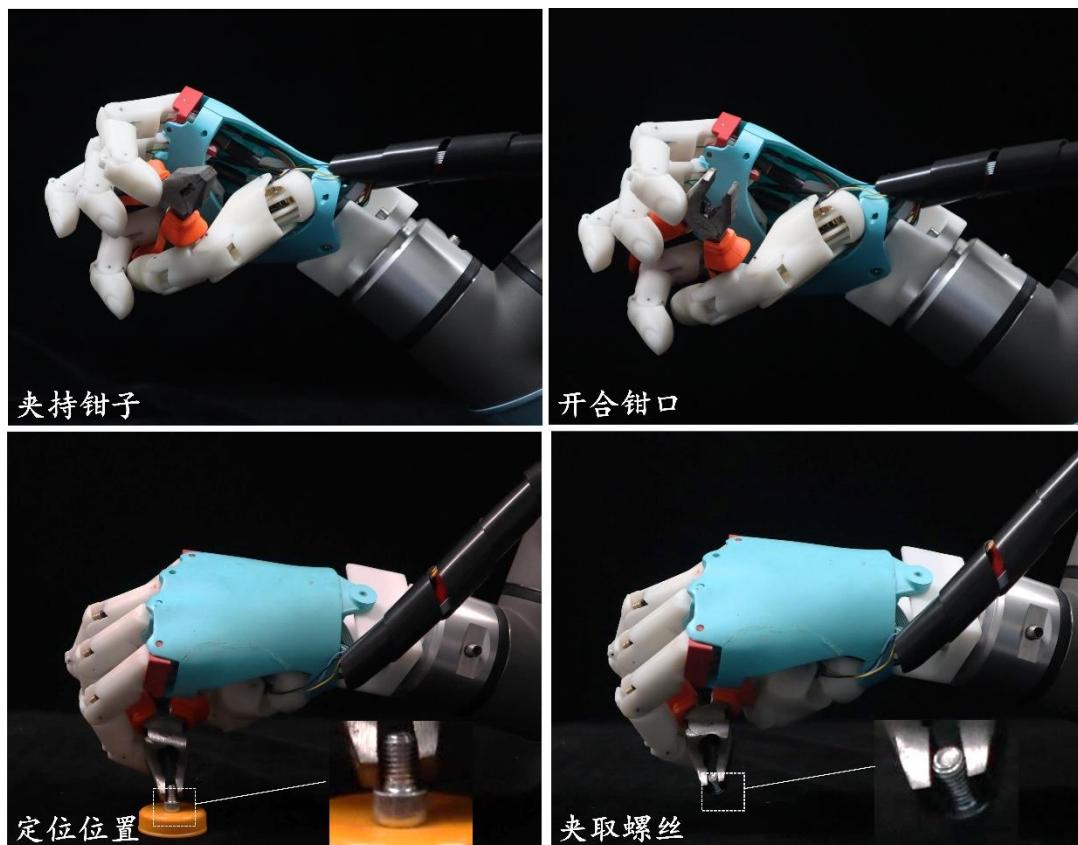


图 5.18 灵巧手操作钳子夹取实验

滴管是实验室中常用的工具，操作滴管时需要精确控制指尖的压力，这样才能精确吸取和转移液体。在按压滴管吸取液体的实验中，可以将这个过程分为定位位置、排出空气、吸取液体和转移液体，其中，可以用拇指和食指捏住滴管的上部，其余手指则自然垂下保持稳定；在吸取液体时，挤压滴管的上部，让其内部形成负压，当滴管内部空气被挤出后，松开手指，滴管会吸入液体，通过挤压和放松滴管的力度，可以控制吸取的液体量；在吸取足够的液体后，用轻柔的力度按压滴管上部，将其移动到目标容器中。在实验中，用大拇指和食指的侧面按压滴管来实现吸取和转移，从大拇指的力传感器数据可以看出在两个过程中需要的夹持力不同，在吸液时要用大的力量排出空气，而在转移时既要保持一定的抓持力不让滴管掉落，又要避免力量太大挤出其中的液体，其实验效果如图 5.18 所示。

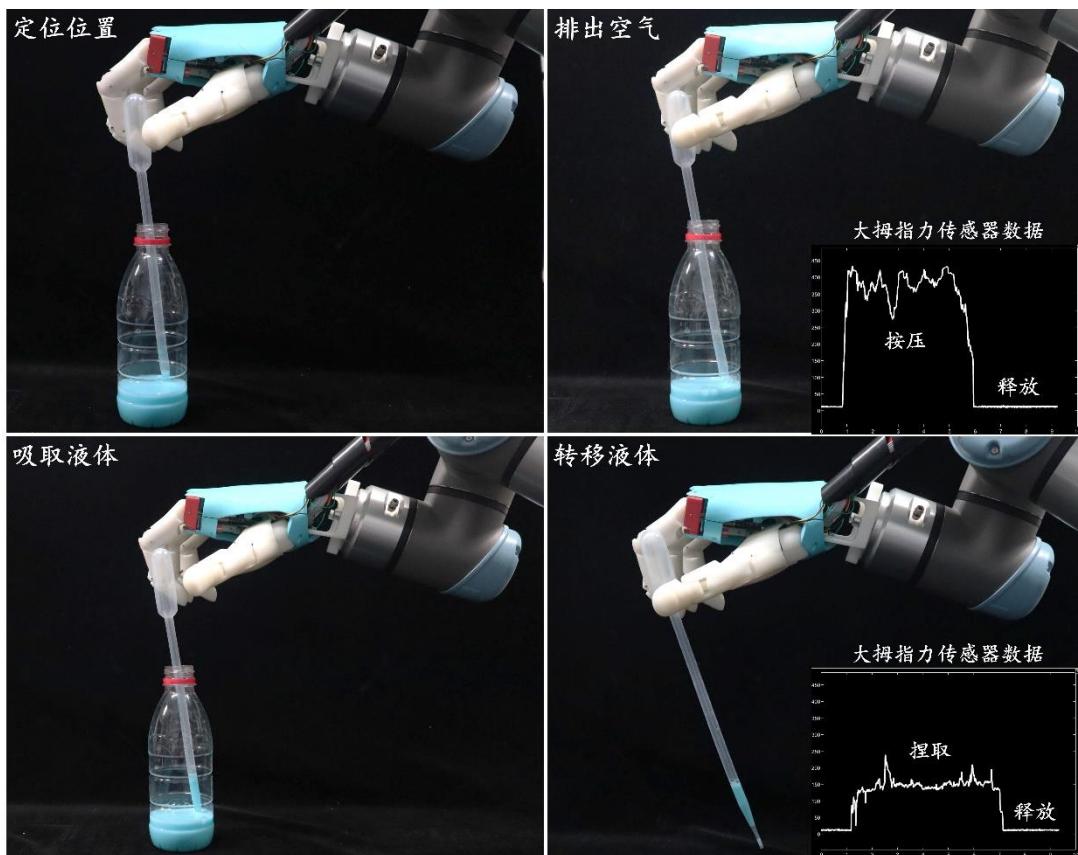


图 5.19 灵巧手操作滴管吸液实验

此外，灵巧手可以用钩型抓握的动作拉开抽屉，首先，让灵巧手靠近抽屉的边缘，手指弯曲形成一个钩状，便于抓住并拉动抽屉；让机械臂沿着抽屉拉开的方向运动就可以打开抽屉；随后将灵巧手运动到物体上方，用手指的包络动作将其抓起，其实验效果如图 5.20 所示。



图 5.20 灵巧手拉开抽屉取出物品实验

从灵巧手操作工具的实验中，可以验证灵巧手具有丰富的运动能力，可以完成复杂的手内操作从而操作工具的运动，而且能在一定范围内控制夹持力度，完成精确灵巧的操作动作。

## 5.7 本章小结

本章从灵巧手运动能力、负载大小和面对不同物体的自适应抓握和操作能力全面展示了灵巧手的整体性能，从实验结果来看，都达到了理想的效果，表明灵巧手的结构设计和抓取规划都合理可靠，能对形状、尺寸、厚薄、软硬不同的物体进行有效的抓持和简单的操作，在复杂环境中能操纵工具，完成特定的任务，具有功能性、可靠性和灵巧操作水平。

## 第 6 章 总结与展望

### 6.1 工作总结

灵巧手是高度集成化和智能化的机电一体系统，随着机器人技术的发展，未来灵巧手不仅可以用在人形机器人上，而且还可以在工业、医疗、军事、服务等领域发挥重要作用。本文在综合分析灵巧手研究现状的基础上，以模仿人手为设计目标，设计出一种高自由度高拟人化以及高集成度的灵巧手结构，具体研究工作总结如下：

(1) 总结了人手的骨骼结构、抓取模式、自由度配置以及运动中手指关节和指间的耦合关系，以人手的生理结构为模仿对象，制定灵巧手的设计目标和机构设计要点。

(2) 基于模块化的设计理念和深度仿生的设计思路，以平面和空间连杆、齿轮和蜗轮蜗杆为传动，将微型直流电机嵌入到手指或手掌内部，设计出具有拟人化外形结构，11 个主动自由度、19 个关节的灵巧手。其中，平面四杆机构用于实现指关节屈曲和指间侧摆的耦合运动，掌指关节处用“十字轴”式球面四杆机构实现两自由度关节设计，手掌具有拟人化外形和拇指处的可重构机构，指尖以柔性硅胶填充与物体接触，整手结构紧凑，重量轻巧，具有高度的灵活性和实用性。

(3) 对灵巧手各个手指和整手建立运动学和静力学的数学模型，得到笛卡尔空间下末端姿态及负载力与指关节空间下转角及驱动力矩之间的映射关系，借助 MATLAB 可视化各个手指及灵巧手的运动空间。此外，推导杆件机构传动中电机转角与各个关节转角间的运动关系，以人手的运动特点为主要参照，优化结构设计。

(4) 在完成灵巧手机械结构制作和装配的过程中，将旋转角度传感器、薄膜压力传感器等集成到手指内部，以 Arduino 为主控搭建相应的电子系统，合理规划指内和掌内空间，紧凑布局各零部件位置，从而实现位置和力的闭环控制。用 MATLAB 编写上位机和下位机程序，用户在上位机 UI 界面中以串口的方式下发命令，实现角度与压力的读取及电机与舵机的驱动。

(5) 在 Simscape 中搭建灵巧手的物理仿真模型，以验证灵巧手运动和抓握物体的能力，辅助规划各个关节转角用于实物实验。

(6) 设计实验以验证灵巧手的各项性能，以灵巧手单个手指的运动和全部自由度的协调运动验证其灵巧性和可操控性；以单个手指和整手能拉起的最大重量衡量其有效负载能力；让灵巧手以不同的功能模式抓握各种物体，操作物体在手内改变其位置姿态，

以衡量灵巧手适应性抓取和手内操作物体的水平；将灵巧手与 UR5e 机械臂组合搭建实验平台，测试其操纵工具完成目标任务的有效性和多模态操作能力。

## 6.2 研究展望

本文研制的五指仿人灵巧手，能够实现用不同的抓持模式抓取和操作各种不同形状的物体，发挥出以连杆、齿轮为传动机构，驱动器内置于手掌的结构优势，在抓持效果、负载能力和自由度数量上优于部分现有的灵巧手，而且结构紧凑、深度仿生。为进一步提高灵巧手的功能性、可靠性和灵巧操作水平，可以在以下方面进一步研究：

- (1) 优化机电系统结构布局，将控制、信号采集及驱动元件集成并合理布局到手掌内部空间中，以柔性电路（FPC）代替复杂密集的线束；
- (2) 优化结构方案，简化机械零件的设计，降低零部件在加工和装配上的难度；
- (3) 选用柔性材料为灵巧手与物体接触的表面，提高灵巧手的顺性和安全性；
- (4) 增加传感器数量，在手指或手掌表面放置柔性传感器，从而获得丰富的本体感知和物体信息，如手指姿态位置、物体的形状质地等；
- (5) 完善灵巧手手指的位置控制和力控制，在此基础上实现整手面向复杂任务的抓取规划和协调控制。

## 参考文献

- [1] 吕博瀚.空间机器人多自由度灵巧手关键技术研究[D].中国航天科技集团公司第一研究院,2018.
- [2] Xiong C H, Chen W R, Sun B Y, et al. Design and implementation of an anthropomorphic hand for replicating human grasping functions[J]. IEEE Transactions on Robotics, 2016, 32(3): 652-671.
- [3] 张玉茹, 李继婷, 李剑锋. 机器人灵巧手建模、规划与仿真 [M]. 北京: 机械工业出版社,2007.
- [4] Salisbury J K, Roth B. Kinematic and force analysis of articulated mechanical hands[J]. 1983.
- [5] 卜夺夺. 仿人机器人欠驱动灵巧手研究[D].杭州电子科技大学,2013.
- [6] Belter J T, Segil J L, SM B S. Mechanical design and performance specifications of anthropomorphic prosthetic hands: a review[J]. Journal of rehabilitation research and development, 2013, 50(5): 599.
- [7] Wang H, Fan S, Liu H. Thumb configuration and performance evaluation for dexterous robotic hand design[J]. Journal of Mechanical Design, 2017, 139(1): 012304.
- [8] Lin J, Wu Y, Huang T S. Modeling the constraints of human hand motion[C]//Proceedings workshop on human motion. IEEE, 2000: 121-126.
- [9] Cini F, Ortenzi V, Corke P, et al. On the choice of grasp type and location when handing over an object[J]. Science Robotics, 2019, 4(27): eaau9757.
- [10] 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.
- [11] 蔡世波,陶志成,万伟伟等.机器人多指灵巧手的研究现状、趋势与挑战[J]. 机械工程学报,2021,57(15):1-14.
- [12] 刘伟,肖钊,瞿寅朋,等.机器人灵巧手研究综述[J/OL].机械传动,1-10[2024-05-07].<http://kns.cnki.net/kcms/detail/41.1129.TH.20230914.0905.002.html>.
- [13] Okada T. Computer control of multijointed finger system for precise object-handling[J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, 1982, 12(3): 289-299.
- [14] Mason M T, Salisbury Jr J K. Robot hands and the mechanics of manipulation[J]. 1985.
- [15] Jacobsen S, Iversen E, Knutti D, et al. Design of the Utah/MIT dextrous hand[C]//Proceedings. 1986 IEEE International Conference on Robotics and Automation. IEEE, 1986, 3: 1520-1532.
- [16] Hirzinger G, Fischer M, Brunner B, et al. Advances in robotics: The DLR experience[J]. The International Journal of Robotics Research, 1999, 18(11): 1064-1087.
- [17] Lovchik C S, Diftler M A. The robonaut hand: A dexterous robot hand for space[C]//Proceedings 1999

- IEEE international conference on robotics and automation (Cat. No. 99CH36288C). IEEE, 1999, 2: 907-912.
- [18] Kochan A. Shadow delivers first hand[J]. Industrial robot: an international journal, 2005, 32(1): 15-16.
- [19] Kim U, Jung D, Jeong H, et al. Integrated linkage-driven dexterous anthropomorphic robotic hand[J]. Nature communications, 2021, 12(1): 1-13.
- [20] Mouri T, Endo T, Kawasaki H. Review of gifu hand and its application[J]. Mechanics based design of structures and machines, 2011, 39(2): 210-228.
- [21] Wei G, Dai J S, 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(03): 459-479.
- [22] Catalano M G, Grioli G, Farnioli E, et al. Adaptive synergies for the design and control of the Pisa/IIT SoftHand[J]. The International Journal of Robotics Research, 2014, 33(5): 768-782.
- [23] Liu H, Wu K, Meusel P, et al. Multisensory five-finger dexterous hand: The DLR/HIT Hand II[C]/2008 IEEE/RSJ international conference on intelligent robots and systems. IEEE, 2008: 3692-3697.
- [24] 刘伊威,金明河,樊绍巍,等.五指仿人机器人灵巧手DLR/HIT Hand II [J].机械工程学报,2009,45(1)1):10-17.
- [25] 李久振, 刘博, 张玉茹. 北航 BH-985 灵巧手结构设计[J]. 全国印刷, 包装机械凸轮, 连杆机构学术研讨会 (第 6 届全国凸轮机构学术年会) 论文集, 2005.
- [26] Sun B Y, Gong X, Liang J, et al. Design principle of a dual-actuated robotic hand with anthropomorphic self-adaptive grasping and dexterous manipulation abilities[J]. IEEE Transactions on Robotics, 2021, 38(4): 2322-2340.
- [27] Cheng M, Fan S, Yang D, et al. Design of an underactuated finger based on a novel nine-bar mechanism[J]. Journal of Mechanisms and Robotics, 2020, 12(6): 065001.
- [28] Park H, Kim D. An open-source anthropomorphic robot hand system: HRI hand[J]. HardwareX, 2020, 7: e00100.
- [29] 黄海. 新型仿人假手及其动态控制的研究[D].哈尔滨工业大学,2010.
- [30] Shirafuji S, Ikemoto S, Hosoda K. Development of a tendon-driven robotic finger for an anthropomorphic robotic hand[J]. The International Journal of Robotics Research, 2014, 33(5): 677-693.
- [31] 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.
- [32] Lee D H, Park J H, Park S W, et al. KITECH-hand: A highly dexterous and modularized robotic hand[J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2016, 22(2): 876-887.
- [33] Ke A, Huang J, Wang J, et al. Optimal design of dexterous prosthetic hand with five-joint thumb and fingertip tactile sensors based on novel precision grasp metric[J]. Mechanism and Machine Theory, 2022, 171: 104759.
- [34] Birglen L. Type synthesis of linkage-driven self-adaptive fingers[J]. 2009.
- [35] Wu L C, Carbone G, Ceccarelli M. Designing an underactuated mechanism for a 1 active DOF finger operation[J]. Mechanism and Machine Theory, 2009, 44(2): 336-348.
- [36] Abayasiri R A M, Abayasiri R S T, Gunawardhana R, et al. An under-actuated hand prosthesis with finger abduction and adduction for human like grasps[C]//2020 6th International Conference on Control, Automation and Robotics (ICCAR). IEEE, 2020: 574-580.
- [37] 陈大勇.五指仿人灵巧手的结构设计及其控制的研究[D].哈尔滨工业大学,2009.
- [38] 孙宁.仿人灵巧手的耦合与自适应机构设计[D].北京理工大学,2018.DOI:10.26948/d.cnki.gbjlu.2018.000582.
- [39] Li G, Liang X, Gao Y, et al. A linkage-driven underactuated robotic hand for adaptive grasping and in-hand manipulation[J]. IEEE Transactions on Automation Science and Engineering, 2023.
- [40] Lee S M, Lee K D, Min H K, et al. Kinematics of the Robomec robot hand with planar and spherical four bar linkages for power grasping[C]//2012 IEEE International Conference on Automation Science and Engineering (CASE). IEEE, 2012: 1120-1125.
- [41] Cotugno G, Althoefer K, Nanayakkara T. The role of the thumb: Study of finger motion in grasping and reachability space in human and robotic hands[J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems, 2016, 47(7): 1061-1070.
- [42] Konnaris C, Gavriel C, Thomik A A C, et al. Ethohand: A dexterous robotic hand with ball-joint thumb enables complex in-hand object manipulation[C]//2016 6th IEEE international conference on biomedical robotics and biomechatronics (BioRob). IEEE, 2016: 1154-1159.
- [43] Yousef H, Boukallel M, Althoefer K. Tactile sensing for dexterous in-hand manipulation in robotics—A review[J]. Sensors and Actuators A: physical, 2011, 167(2): 171-187.
- [44] Zhu H, Gupta A, Rajeswaran A, et al. Dexterous manipulation with deep reinforcement learning: Efficient, general, and low-cost[C]//2019 International Conference on Robotics and Automation

- (ICRA). IEEE, 2019: 3651-3657.
- [45] Xu Z, Kumar V, Todorov E. A low-cost and modular, 20-DOF anthropomorphic robotic hand: Design, actuation and modeling[C]//2013 13th IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots (Humanoids). IEEE, 2013: 368-375.
- [46] 王海荣.仿人型灵巧手拇指灵巧性设计方法的研究[D].哈尔滨工业大学,2012.
- [47] Wang H, Abu-Dakka F J, Le T N, et al. A novel soft robotic hand design with human-inspired soft palm: Achieving a great diversity of grasps[J]. IEEE Robotics & Automation Magazine, 2021, 28(2): 37-49.
- [48] Jau B M. Man-equivalent telepresence through four fingered human-like hand system[C]//Proceedings 1992 IEEE International Conference on Robotics and Automation. IEEE, 1992: 843-848.
- [49] 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.
- [50] Merat F. Introduction to robotics: Mechanics and control[J]. IEEE Journal on Robotics and Automation, 1987, 3(2): 123-126.
- [51] Dai J S, Wang D, Cui L. Orientation and workspace analysis of the multifingered metamorphic hand—Metahand[J]. IEEE Transactions on Robotics, 2009, 25(4): 942-947.
- [52] 陈世伟.灵巧机械手抓取动力学与柔顺控制研究[D].哈尔滨工业大学,2022.DOI:10.27061/d.cnki.g hgdu.2022.003392.
- [53] Kappassov Z, Corrales J A, Perdereau V. Tactile sensing in dexterous robot hands[J]. Robotics and Autonomous Systems, 2015, 74: 195-220.
- [54] She Y, Liu S Q, Yu P, et al. Exoskeleton-covered soft finger with vision-based proprioception and tactile sensing[C]//2020 ieee international conference on robotics and automation (icra). IEEE, 2020: 10075-10081.
- [55] 刘宏, 姜力. 仿人多指灵巧手及其操作控制 [M]. 北京: 科学出版社.2010.
- [56] 刘伊威,赵京东.DLR/HIT 机器人灵巧手手指位置控制的研究[J].机械与电子,2009,(10):45-47.
- [57] Reese N B, Bandy W D. Measurement of Range of Motion of the Wrist and Hand[J]. Joint range of motion and muscle length testing, 2010: 125-127.

## 作者简历

姓名：吴浩 性别：男 民族：汉 出生年月：2002-12-08 籍贯：江苏省泰州市

2017.09-2020.07 江苏省泰兴中学

2020.09-2024.07 浙江大学攻读学士学位



## 毕业论文（设计）考核

### 一、指导教师对毕业论文（设计）的评语

摘要需要按学术语言来写。

指导教师(签名) 张XX  
2024年5月13日

### 二、答辩小组对毕业论文（设计）的答辩评语及总评成绩

论文开展了仿人五指灵巧手结构设计、理论计算、控制实现和抓操实验等工作，选题对现有的灵巧手方案提出新的思路和方法，在人形机器人发展中具有实用价值和意义。论文的主要工作有：1) 以平面和空间杆件、齿轮和蜗轮蜗杆实现高自由度、高集成化的灵巧手结构设计；2) 在内置的传感和控制元件下实现位置和力的闭环控制；3) 模仿人手的抓操策略，实现多模态抓取和有效操作工具的能力。毕业设计工作量饱满，答辩过程中叙述清楚，回答问题正确，已达到本科毕业论文的要求。该生在本专业领域较好地掌握了基础理论、专门知识和基本技能，具有从事学术研究的初步能力。同意通过毕业论文答辩。

成绩比例	文献综述 占（10%）	开题报告 占（15%）	外文翻译 占（5%）	毕业论文（设计）质量及答辩 占（70%）	总评成绩
分值	10	14	5	66	95

答辩小组负责人（签名）张XX  
2024年6月7日

### 毕业论文（设计）的进度安排

毕业论文（设计）各阶段工作内容	工作进度周次安排															春夏学期								
	秋冬学期							春夏学期																
	1	2	3	4	5	6	7	8	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
1.文献阅读、文献翻译	■																							
2.完成开题报告、文献综述		■																						
3.完成灵巧手结构设计	■																							
4.完成电子器件的选型和测试		■																						
5.完成机械结构的装配			■																					
6.搭建和测试电路系统				■																				
7.编写和测试控制程序					■																			
8.设计实验测试灵巧手的各项性能						■																		
9.完善和优化							■																	
10.完成毕业论文								■																

指导教师签名：

日期：2024年5月24日

注：①本表由指导教师填写，各专业学科毕业设计负责人审核并签名。②各阶段工作内容应包括：查阅文献、文献综述、外文文献翻译、开题报告、调研、计算机仿真、设计绘图、实验、撰写毕业论文（设计）等，其中4-9栏由指导教师布置、填写。③工作进度周次安排中指导教师在相应周次里画横线表示。（假设24周，周次可以写为3-4周、8-9周等）。④导师应在检查各阶段工作进度完成情况后签名，此计划可根据实际情况作调整。

## 本科生毕业论文（设计）任务书

### 一、题目：仿人五指灵巧手设计与控制

### 二、指导教师对毕业论文（设计）的进度安排及任务要求

2023.10.15-2023.11.15: 查阅相关文献，阅读文献 30 篇以上，其中英文文献 15 篇以上，并对其中一篇文献进行翻译；

2023.11.15-2024.1.2: 撰写文献综述、开题报告，准备开题答辩

2024.1.3-2024.4.5: 构建机器人手，并准备中期答辩；

2024.4.6-2024.4.30: 建立机器人手抓取规划系统；

2024.5.1-2024.5.15: 开展机器人抓取实验，综合各个指节长度参数，建立静力学和运动学模型。开展毕业设计论文的撰写；

2024.5.16-2024.5.30: 完成本科毕业设计论文撰写与修改，准备论文送审并准备毕业设计答辩。

起迄日期 2023 年 10 月 15 日至 2024 年 6 月 10 日

指导教师（签名）李伟国 职称 天津大学 教授

### 三、系或研究所审核意见

同意

负责人（签名）杨伟新  
2023 年 12 月 8 日

# 浙江大学本科毕业生毕业论文（设计）存档资料检查表

（此表请装订在毕业论文（设计）末页）

检查内容		检查结果（打√、X）
毕业 设计	1. 装订（封面白色铜版纸，A4）	
	2. 毕业论文（设计）诚信承诺书(签名)	
	3. 任务书（题目、要求、工作进度表）	
	4. 中、英文摘要	
	5. 目录（要标注页码）	
	6. 正文	
	7. 附件 1：图纸、程序	
	8. 附件 2：毕业设计期间取得的成果	
	9. 参考文献	
	10. 毕业设计指导教师评语、答辩评语和成绩	
开题 报告	11. 装订（文献综述、开题报告、外文翻译、外文原稿）	
	12. 文献综述、开题报告的成绩、评语	
其它	13. 毕业论文（设计）专家评阅意见（1份）	
	14. 毕业论文（设计）答辩记录表（1份）	
	15. 毕业论文（设计）查重报告	

注：“毕业论文（设计）专家评阅意见”、“毕业论文（设计）答辩记录表”、“毕业论文（设计）查重报告”检查后装入“毕业设计档案袋”，直接归档，不装订。

检查人（签名）：

检查日期：2024年6月10日