

分类号: TH113

密 级: 公开

学校代码: 10363

学 号: 2220110131



安徽工程大学

Anhui Polytechnic University

硕士学位论文

题 目 绳驱动力感知柔性手爪设计与恒力
控制研究

论 文 作 者 朱祖浩

校 内 导 师 刘玉飞（副教授）

校 外 导 师 徐晗

专业学位类别 机械

研究方向（领域） 机器人智能作业系统

论文提交日期: 2025 年 5 月 20 日

分类号：TH113

学校代码：10363

密 级：公开

学 号：2220110131

安徽工程大学

绳驱动力感知柔性手爪设计与恒力控制 研究

DESIGN AND CONSTANT FORCE CONTROL OF ROPE-DRIVEN FORCE SENSING FLEXIBLE GRIPPER

学 生 姓 名：朱祖浩

指 导 教 师：刘玉飞（副教授）

专业学位类别：机械

研 究 方 向：机器人智能作业系统

答辩时间：2025 年 5 月 9 日

安徽工程大学学位论文原创性声明

本人郑重声明：我恪守学术道德，崇尚严谨学风。所呈交的学位论文，是本人在导师的指导下，独立进行研究工作所取得的成果。除文中已明确注明和引用的内容外，本论文不包含任何其他个人或集体已经发表或撰写过的作品及成果的内容。论文为本人亲自撰写，我对所写的内容负责，并完全意识到本声明的法律后果由本人承担。

学位论文作者签名：朱祖浩

日期：2025 年 5 月 18 日

安徽工程大学学位论文版权使用授权书

学位论文作者完全了解学校有关保留、使用学位论文的规定，同意学校保留并向国家有关部门或机构送交论文的复印件和电子版，允许论文被查阅或借阅。本人授权安徽工程大学可以将本学位论文的全部内容编入有关数据库进行检索，可以采用影印、缩印或扫描等复制手段保存和汇编本学位论文。

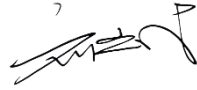
保密 ☐，在 _____ 年解密后适用本版权书。

本学位论文属于

不保密 ☒。

学位论文作者签名：朱祖浩

日期：2025 年 5 月 18 日

指导教师签名：

日期：2025 年 5 月 18 日

绳驱动力感知柔性手爪设计与恒力控制研究

摘 要

力感知功能是柔性手爪实现柔性抓取的关键，在机器人智能作业系统中具有重要应用。现有柔性手爪的力感知功能主要是通过使用力传感器或在柔性手爪中嵌入智能材料的方法实现，存在力传感器安装固定复杂、柔性手爪制造要求高、改变抓取接触面特性等问题。针对上述问题，本文设计研制一种基于绳驱动的力感知柔性手爪并进行恒力控制研究，实现绳驱动力感知柔性手爪的力感知和恒力控制功能。本文主要的研究内容如下：

（1） 柔性手爪建模分析及力感知策略。针对鱼鳍型柔性手爪，基于有限元理论设计柔性手爪力感知算法，实现柔性手爪抓取接触节点与抓取力的判定；通过有限元仿真对柔性手爪力感知算法进行验证，分析不同隔层、不同接触节点受力下的算法精度；设计基于视觉的柔性手爪力感知实验系统，通过视觉检测系统采集柔性手爪顶部和端部的坐标信息，实现柔性手爪抓取力的实时感知与伺服控制，验证柔性手爪力感知算法的有效性，为绳驱动柔性手爪的力感知提供算法基础。

（2） 绳驱动力感知柔性手爪设计研制。在鱼鳍型手爪结构的基础上，通过改进柔性手爪的手指部分隔层结构，基于利用绳索传递柔性手爪端部形变位移的思想，设计一种新型的绳驱动力感知柔性手爪；基于设计的柔性手爪抓取力感知策略，搭建绳驱动力感知柔性手爪控制系统，研制绳驱动力感知柔性手爪的实验样机，通过实验对绳驱动

力感知柔性手爪的力感知功能进行验证。

(3) 绳驱动力感知柔性手爪恒力控制。设计绳驱动力感知柔性手爪抓取力恒力控制策略,实现柔性手爪的恒力输出控制以及扰动自适应恒力控制功能;搭建绳驱动力感知柔性手爪恒力控制实验系统,对绳驱动力感知柔性手爪的恒力输出控制以及扰动自适应恒力控制性能进行验证。

(4) 绳驱动力感知柔性手爪实验研究。为测试验证本文设计研制的绳驱动力感知柔性手爪的功能特性,搭建机器人柔性抓取实验系统,完成绳驱动力感知柔性手爪对不同材质、不同形状、不同尺寸物体的抓取功能测试,验证绳驱动力感知柔性手爪的抓取应用性能和自适应恒力控制功能。

关键词: 柔性手爪, 力感知, 绳驱动, 恒力控制, 实验研究

RESEARCH ON DESIGN AND CONSTANT FORCE CONTROL OF ROPE-DRIVEN FORCE SENSING FLEXIBLE GRIPPER

ABSTRACT

The force sensing function is the key to realize the flexible grasping of the flexible gripper, which has an important application in the robot intelligent operation system. The force sensing function of the existing flexible gripper is mainly realized by using force sensors or embedding intelligent materials in the flexible gripper. However, there are problems such as complex installation and fixation of force sensors, high manufacturing requirements of the flexible gripper, and changing the characteristics of the grasping contact surface. In view of the above problems, this paper designs and develops a force sensing flexible gripper based on rope drive and conducts constant force control research, and realizes the force sensing and constant force control function of the rope-driven force sensing flexible gripper.

(1) Flexible gripper modeling analysis and force sensing strategy. For the fin-shaped flexible gripper, a force sensing algorithm for the flexible gripper is designed based on the finite element theory to realize the determination of the contact node and the grasping force of the flexible gripper. The force sensing algorithm of flexible gripper is verified by finite

element simulation, and the accuracy of the algorithm under different beams and different contact nodes is analyzed. The experimental system of flexible gripper force sensing based on vision is designed. The coordinate information of the top and terminal of the flexible gripper is collected by the visual inspection system, and the real-time sensing and servo control of the grasping force of the flexible gripper are realized. The effectiveness of the force sensing algorithm of the flexible gripper is verified, which provides the algorithm basis for the force sensing of the rope-driven flexible gripper

(2) Design and development of rope-driven force sensing flexible gripper. Based on the structure of fin-shaped gripper, by improving the beam structure of finger part of the flexible gripper, and based on the idea of using ropes to transmit the deformation and displacement of the terminal of the flexible gripper, a new type of rope-driven force sensing flexible gripper is designed. Based on the designed flexible gripper grasping force sensing strategy, the rope-driven force sensing flexible gripper control system is built, and the experimental prototype of the rope-driven force sensing flexible gripper is developed. The force sensing function of the rope-driven force sensing flexible gripper is verified through experiments.

(3) Constant control of rope-driven force sensing flexible gripper. The constant force control strategy of the rope-driven force sensing flexible gripper grasping force is designed to realize the constant force output

control and the disturbance adaptive constant force control function of the flexible gripper. The experimental system of constant force control of rope-driven force sensing flexible gripper is built to verify the performance of constant force output control and disturbance adaptive constant force control of rope-driven force sensing flexible gripper.

(4) Experimental study of rope-driven force sensing flexible gripper. In order to test and verify the functional characteristics of the rope-driven force sensing flexible gripper designed and developed in this paper, a robot flexible grasping experimental system is built to complete the grasping function test of the rope-driven force sensing flexible gripper for objects of different materials, different shapes and different sizes, and to verify the grasping application performance and adaptive constant force control function of the rope-driven force sensing flexible gripper.

KEY WORDS: Flexible gripper, Force sensing, Rope-driven, Constant force control, Experimental study

目 录

摘 要.....	I
ABSTRACT.....	III
第 1 章 绪论.....	1
1.1 课题来源.....	1
1.2 课题研究背景及意义.....	1
1.3 国内外研究现状.....	3
1.3.1 柔性手爪结构设计.....	3
1.3.2 柔性手爪力感知技术.....	6
1.3.3 绳驱动技术在机器人领域的应用.....	6
1.4 本文主要研究内容.....	11
1.5 本章小结.....	12
第 2 章 柔性手爪建模分析及力感知策略.....	13
2.1 引言.....	13
2.2 柔性手爪模型建立.....	13
2.2.1 手指部分结构.....	13
2.2.2 力-形状模型	14
2.2.3 力-位移模型	18
2.3 有限元仿真验证.....	19
2.3.1 模型验证.....	19
2.3.2 力学特性分析.....	22
2.4 基于视觉的柔性手爪力感知算法.....	23
2.4.1 算法设计.....	23
2.4.2 控制系统设计.....	28
2.4.3 实验验证.....	30
2.5 本章小结.....	40
第 3 章 绳驱动力感知柔性手爪设计研制.....	41
3.1 引言.....	41

3.2 结构设计.....	41
3.3 控制系统设计.....	42
3.4 样机研制.....	44
3.5 性能验证.....	44
3.5.1 实验系统搭建.....	44
3.5.2 硬件选型.....	45
3.5.3 软件设计.....	46
3.5.4 实验验证.....	47
3.6 本章小结.....	53
第 4 章 绳驱动力感知柔性手爪恒力控制.....	54
4.1 引言.....	54
4.2 绳驱动力感知柔性手爪恒力控制策略.....	54
4.2.1 恒力输出控制策略.....	54
4.2.2 扰动自适应恒力控制策略.....	55
4.3 实验验证.....	56
4.3.1 实验系统搭建.....	56
4.3.2 硬件选型.....	58
4.3.3 软件设计.....	58
4.3.4 恒力控制性能测试.....	59
4.3.5 扰动自适应恒力控制性能测试.....	62
4.4 本章小结.....	64
第五章 绳驱动力感知柔性手爪实验研究.....	65
5.1 引言.....	65
5.2 功能测试实验.....	65
5.2.1 实验系统搭建.....	65
5.2.2 硬件选型.....	66
5.2.3 实验验证.....	66
5.3 机器人抓取应用实验.....	69
5.3.1 实验系统搭建.....	69

5.3.2 硬件选型.....	69
5.3.3 软件设计.....	70
5.3.4 实验验证.....	71
5.4 本章小结.....	74
第六章 结论与展望.....	76
6.1 结论.....	76
6.2 展望.....	76
参考文献.....	78
攻读硕士学位期间的主要学术成果.....	85

第 1 章 绪论

1.1 课题来源

本课题来源于安徽省高校优秀青年科研项目“弹性薄壁构件机器人磨抛系统柔顺交互控制机理研究”（项目号：2023AH030018）和校企合作产学研项目“医疗康复机器人系统关键技术研发”（项目号：HX2024-06-084）中有关机器人力感知及柔顺控制的相关内容。

1.2 课题研究背景及意义

随着时代的不断发展，采用高效率的机器人代替人类完成各种繁杂、重复的机械式工作已经是迫在眉睫。在工业方面，在高端制造业中，需要机器人能够完成更加精细、复杂的操作，而传统的刚性手爪难以完成对微小、易碎或形状不规则物体的抓取，而柔性手爪可以通过自适应变形来精确抓取和操作这些精细部件，提高生产效率和产品质量。同时柔性手爪通常具备目标定位^[1]、抓取力感知^[2]、自适应规划^[3]、触觉感知^[4]等功能，能够有效弥补传统的人工抓取作业效率低、质量一致性差等问题。

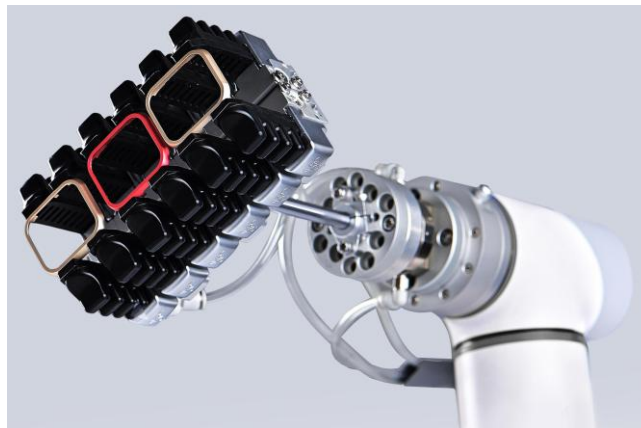


图 1-1 柔性手爪在工业中的应用：抓取智能手表框

例如，在农业方面，由于农业劳动力短缺问题日益严重，劳动力成本也在不断上升，传统的人工采摘需要大量的劳动力，且劳动强度大、效率低^[5,6]。而使用机器人可以在一定程度上缓解劳动力短缺的压力，降低生产成本^[7,8]。但传统的

刚性手爪在采摘时存在果实破损、影响美观的问题，而柔性手爪由于高灵活性、抓取自适应性，可以实现柔软水果的无损采摘^[9,10]。



图 1-2 柔性手爪在农业中的应用：采摘番茄

同时机器人柔性抓取的应用领域已经从传统的工业生产扩展到食品、服务等多个领域。在食品领域，由于柔性手爪可以轻柔的抓取柔软的物体，同时存在流水线工人逐渐减少以及重复的机械劳动对人体危害较大等问题，在食品加工到包装的过程，逐渐由机器人柔性抓取食品来替代。

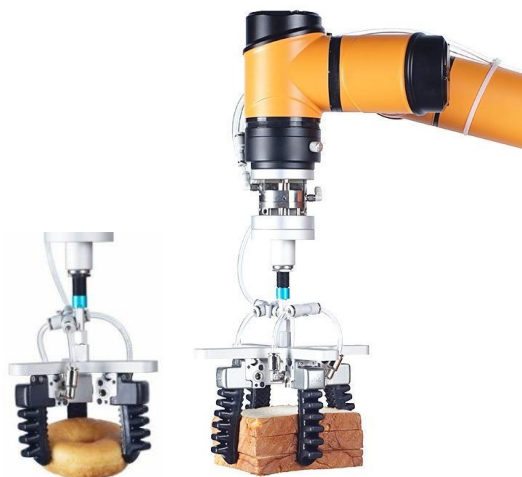


图 1-3 柔性手爪在食品业中的应用：抓取面包

在服务领域，由于柔性手爪具有抓取自适应功能，可以抓取多种不同形状、不同材质、不同尺寸的物体，同时在人机交互方面安全性良好，所以采用机器人柔性手爪抓取物体服务大众，逐渐出现在生活中的各个方面。



图 1-4 柔性手爪在服务业中的应用：制作咖啡

可以看出，机器人柔性抓取具有高效、安全、降低人力成本等优势^[11-14]，在工业、农业、食品和服务等领域有着广泛的应用^[15,16]，在这些特殊应用场景机器人柔性手爪的力感知功能是实现柔性抓取的关键^[17,18]。本文设计研制一种基于绳驱动的力感知柔性手爪并进行恒力控制研究，实现绳驱动力感知柔性手爪的力感知和恒力控制功能，具有重要的理论意义和实际应用价值。

1.3 国内外研究现状

1.3.1 柔性手爪结构设计

随着柔性手爪在各个领域中的应用场景不断增加，被抓取物体种类也在不断增加，机器人柔性抓取越来越重要^[17,19]。目前，科研人员采用了不同驱动方式、不同材料等多种结构来设计机器人柔性手爪。目前柔性手爪主要有鱼鳍型^[20]、腔体^[21,22]、仿生手^[23]、折纸^[24]、智能材料^[25,26]等多种结构。

(1) 鱼鳍型柔性手爪

鱼鳍型柔性手爪的设计灵感来源于鱼类的鳍状结构，具有强自适应性，高自由度等特点，可以抓取形状不同、尺寸不同以及材质不同的多种物体^[17,27]。鱼鳍型柔性手爪主要由手爪外壳和中间隔层组成，当其受力时，具有手爪末端朝着力相反方向运动形成包络的特点，常用于采摘、人机交互等多种场景^[28]。由于鱼鳍型柔性手爪的性能优越性，许多研究人员使用鱼鳍型柔性手爪进行各类抓取测试以及算法验证。如图 1-5 所示，XU 等设计了一种双指的鱼鳍型柔性手爪，采用聚氨酯材料，通过 3D 打印制作，在接触面处添加了条纹，增大摩擦力提高抓取

稳定性，同时柔性手爪中间有 11 个长度呈梯度变化的隔层，所有的隔层都被设计成中间厚、两侧薄的形状，使得柔性手爪在弯曲时具有支撑强度和灵活性^[29]。



图 1-5 鱼鳍型柔性手爪

(2) 腔体型柔性手爪

腔体型柔性手爪多采用气动或液压传动的方式驱动柔性手爪抓取物体，一般由硅胶、TPU 等弹性材料制作，内部有腔体，通过气压或液压使腔体膨胀或收缩，从而包裹或夹持物体，部分腔体型柔性手爪采用多层腔体叠加，通过分区域气压控制实现更复杂的变形^[30]。如图 1-6 (a) 所示，Ji 等和 Nie 等基于水液压驱动设计了三指柔性执行器，使用阀门控制高压水进出控制开合抓取，可以用于在海洋中的柔性抓取^[31,32]。如图 1-6 (b) 所示，Pi 等设计了一种柔性气室手指，可以通过充气 and 放气来驱动腔体型柔性手爪伸长、缩短和弯曲，可以用于苹果采摘，具有重量轻、缓冲性好、驱动气压低以及抓取力强等优点^[33]。

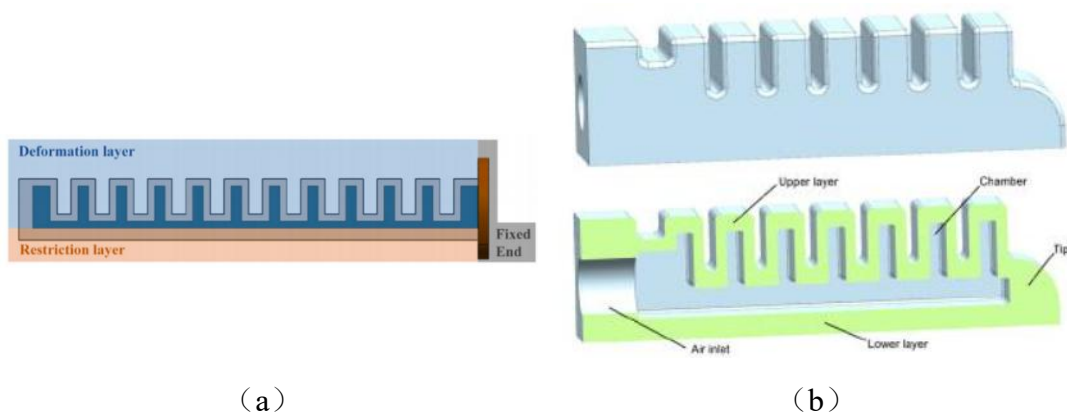


图 1-6 腔体型柔性手爪：(a) 液压驱动柔性手爪；(b) 气压驱动柔性手爪

（3） 仿生手型柔性手爪

仿生手型柔性手爪是一种模仿人类手部结构与运动机制的软体机器人末端执行器，具有接近人手的高灵巧性、自适应性和低损伤抓取能力^[22,34]。其设计不仅复现了人手的多自由度运动，还通过柔性结构降低对复杂控制算法的依赖，适用于非结构化环境中的多样化操作任务。**Wang** 等设计了一种基于动物爪子与人手指的软气动夹持器，克服了弯曲方向单一和抓取避障能力有限的缺点，提高了抓握的可靠性^[35]；如图 1-7 所示，**Yamaguchi** 等基于电共轭流体设计了一种新型的仿生手型柔性手爪，该柔性手爪主要由 ECF 射流发生器、柔性橡胶手指和 ECF 储液罐组成，集成了五指柔性手指，并演示了该机器人手可以在没有任何复杂控制器的情况下抓取各种形状的物体^[36]。

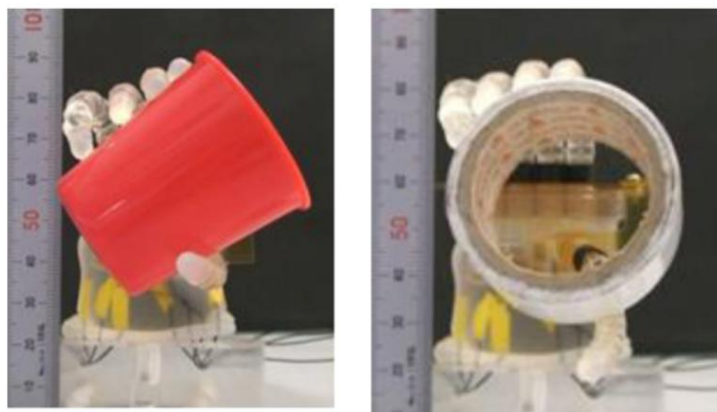


图 1-7 仿生手型柔性手爪

（4） 折纸型柔性手爪

折纸型柔性手爪是一种结合折纸艺术与柔性材料科学的仿生机器人末端执行器，其设计灵感源于折纸结构的可折叠性与力学特性。这类手爪能够以轻量化、低损伤的方式抓取脆弱或形状复杂的物体，在多个领域都有着非凡的表现。**Wang** 等采用厚板折纸设计了柔性夹持器，可以在受到外力扰动时完成抓取，但受自身材料影响，抓取负载受到限制^[37]；如图 1-8 所示，**Liu** 等基于折纸技术与非线性拓扑优化方法相结合，设计了一种基于折纸齿的柔性夹持器，可以夹持不同形状的物体^[38]；**Zhang** 等设计了一种混合驱动的柔性手爪，利用折纸手指结构，使其可以调节手指刚度和抓取范围，该柔性手爪通过气动和缆索驱动，从而能够精确控制折纸结构的收缩和伸展，进而通过调整缆索长度和输入压力来实现不同的手指长度和刚度^[39]。

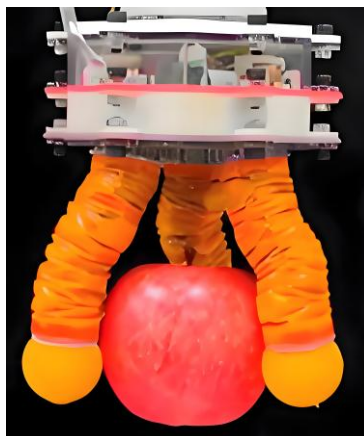


图 1-8 可变刚度折纸型柔性手爪

(5) 智能材料型柔性手爪

智能材料型柔性手爪是一种基于智能响应材料的柔性机器人末端执行器。其核心特点是利用材料自身在外界刺激（温度、电场、磁场、光等）下的主动形变特性，实现无复杂机械结构的自适应抓取^[40]。这类手爪在微型化、快速响应和精准控制方面具有显著优势^[41]。Fan 等基于石墨纸与 PI 膜制备柔性双层 ETAs，该柔性制动器可以在低压环境下实现有效的弯曲和驱动^[42]；如图 1-9 所示，Wang 等基于形状记忆合金（SMA）制作的软平面柔性手爪，可以抓取可变性物体，该柔性手爪由一个软手指组成，该手指是一个基于 SMA 的铰链式致动器，能够产生类似铰链的弯曲形变^[43]。

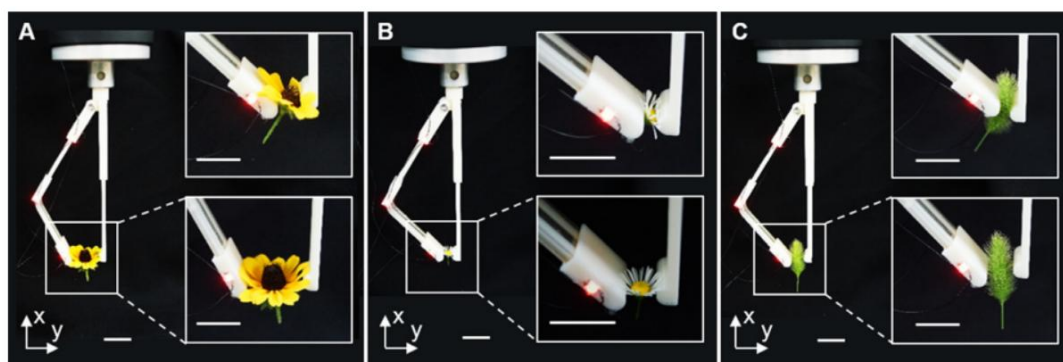


图 1-9 基于形状记忆合金的柔性手爪

1.3.2 柔性手爪力感知技术

由于被抓取物体种类的不断增加，为了更好的完成抓取作业，柔性手爪需要具备视觉感知和力感知等功能，具备各种感知功能有利于机器人在各种恶劣环境下，完成既定的任务^[3,4,44,45]。尤其是柔软、表面易破损的物体的抓取需要柔性手

爪具备力感知功能，实现柔性手爪的无损抓取^[46-48]。

目前，柔性手爪进行力感知主要有三种方法，分别是基于力传感器的力感知、基于智能材料的力感知以及基于算法的力感知^[49,50]。

（1）基于力传感器的力感知技术

通过力传感器进行力感知是大部分研究人员的首要选择^[51,52]。主要是由于通过力传感进行力感知具有反应快速、操作简单以及设计便捷等因素，研究人员将力传感器嵌入 3D 打印的柔性手爪中，或将力传感器放置于柔性手爪外表面进行力感知以实现抓取目的^[53-56]。但这种方法会对柔性手爪的柔顺性以及表面接触特性产生影响^[57-59]。Xie 等采用力传感器、弯曲传感器和视觉传感器协同搭建多传感器网络，使柔性手爪具有期望力感知功能，但这种方式只能在特定手爪上使用，结构较为复杂^[60,61]。如图 1-10 所示，Jin 等设计了一种基于鱼鳍型柔性手爪的两指夹持器，将压力传感器与弯曲传感器放置于每个柔性手爪的内外表面，同时将力敏电阻传感器粘贴在柔性手爪内表面，检测压力与变形，实现了对猕猴桃硬度的评估^[62]。

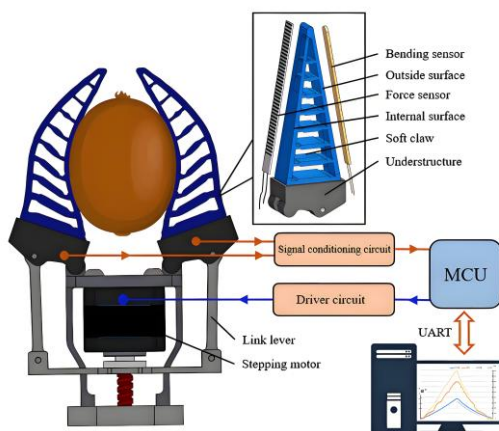


图 1-10 基于力传感器的柔性手爪力感知

（2）基于智能材料的力感知技术

通过智能材料制作柔性手爪进行力感知依赖于材料自身的传感特性，可以通过受力时的电荷量、电阻值、电容值的变化，对受力进行表征进而得到柔性手爪的抓取力，实现力感知^[63,64]。但采用智能材料进行柔性手爪力感知时，存在抓取力过小，无法抓取过重的物体的问题。如图 1-11 所示，Lan 等设计了一种柔性双指微夹持器，采用形状记忆合金金属丝分布式驱动，具有广泛的处理范围，可以通过力-电阻模型得到形状记忆合金的收缩力，进而达到柔性手爪力感知的目的。

[65]。

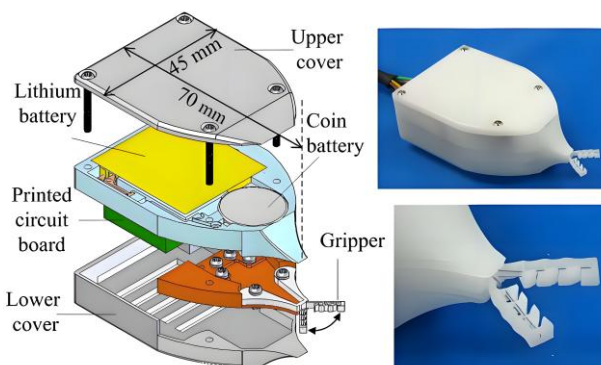


图 1-11 基于智能材料的柔性手爪力感知

(3) 基于算法的力感知技术

介于上述两种柔性手爪力感知方法都存在的问题,所以科研人员使用其他传感器采集柔性手爪在抓取过程中随抓取力变化的物理量,通过算法处理物理量,对柔性手爪的抓取力进行表征,实现柔性手爪的力感知。Zhang 等分析了末端执行器的力与扭转角的关系^[66]; MacDonald 等采用视觉检测鱼鳍型柔性手爪抓取时的形变,进行抓取力感知,但受外界影响大,实用性差^[67]; Shan 等对通用型的鱼鳍原理的柔性手爪,提出了基于有限元法与虚功原理的接触点力感知算法,但不能对柔性手爪抓取物体的接触点进行判断,计算时需要输入接触点位置,计算复杂^[68];如图 1-12 所示, Zhang 等将弯曲传感器贴在柔性手爪非接触面,通过测量柔性手爪抓取物体时的弯曲角度来实时测量抓取力,但不能对柔性手爪抓取物体的接触点进行判断,在计算时需要输入接触点的位置,同时当手指的弯曲角度在抓握过程中停止增加,会导致无法有效地感知力^[69];如图 1-13 所示, Xu 等对通用型的基于鱼鳍原理的柔性手爪,通过视觉检测柔性手爪受力时的节点位移,采用神经网络得到柔性手爪在不同受力下的节点位移数据,进而实现对柔性手爪抓取力的测量,但在使用时需要在垂直于手爪抓取的方向上安装一个相机,抗干扰性差且应用场景受到限制。可以看出采用算法进行力感知需要通过算法得到柔性手爪抓取物体的接触点,才能避免计算过程复杂以及不易使用的问题^[70]。

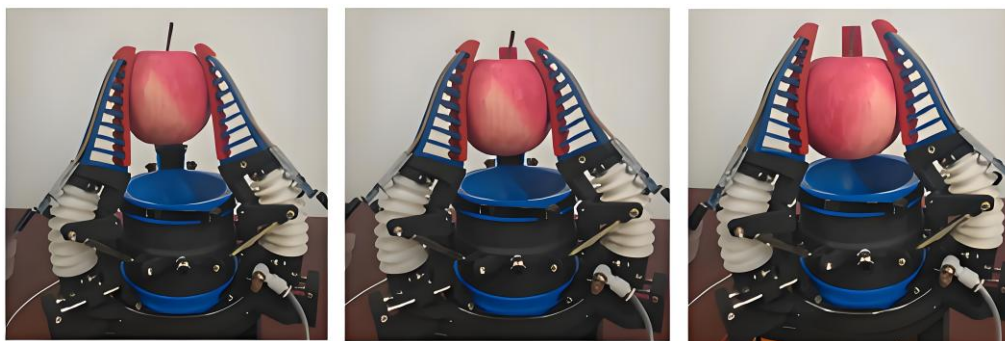


图 1-12 表面粘贴角度传感器的力感知柔性手爪



图 1-13 基于视觉相机的力感知柔性手爪

由于使用力传感器和智能材料进行力感知时，力感知的精度取决于柔性手爪的结构和制作材料，后续不易提高柔性手爪力感知的精度。但通过算法进行柔性手爪的抓取力感知，后续可以通过对算法的调整，提高对柔性手爪抓取力的感知精度，操作简单，所以本文通过算法进行柔性手爪力感知。

1.3.3 绳驱动技术在机器人领域的应用

绳驱动技术凭借其传动性能优越、轻量化等优势，在多个领域展现出广泛的应用潜力，绳驱动技术在多个领域都有应用^[71]。如图 1-14 所示，在机器人领域，齐飞等针对绳驱动外肢体机器人由于其布线形式及驱动耦合所造成的运动建模复杂及控制精度低等问题，研究了一种考虑驱动耦合的绳驱动外肢体机器人运动建模及控制方法^[72]。

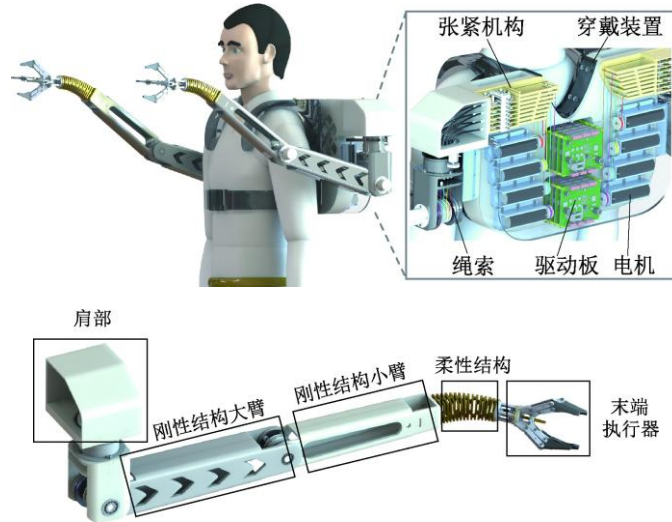


图 1-14 绳驱动外肢体机器人

在康复医疗领域，崔桢等设计了一种绳牵引上肢康复机器人，可以解决绳牵引上肢康复机器人在与人体交互时存在的动态稳定性问题，具有结构简单、灵活性好、运动惯性小和工作空间大等特点，被广泛应用于康复医疗领域^[73]。如图 1-15 所示，杨凯盛等提出了一种新型绳驱动变刚度踝关节康复机器人，基于柔性并联机构理论创新设计了一种结构简单紧凑、刚度—拉力线性度高的变刚度装置，以提高变刚度控制的范围和精度^[74]。

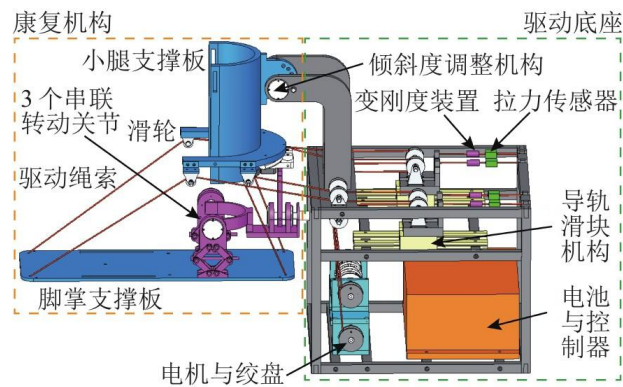


图 1-15 绳驱动变刚度踝关节康复机器人

在柔性手爪领域，如图 1-16 所示，曹旭东等设计了一种绳驱动苹果采摘柔性手爪，由夹持机构、支撑连机构和驱动传动机构组成。其中绳被驱动传动机构连接步进电机与附有橡胶柔性材料及压力传感器的手指，电机转动通过绳拉动手指实现柔性手爪开合运动^[75]。

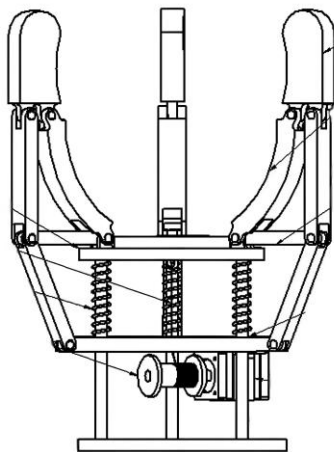


图 1-16 绳驱动苹果采摘柔性手爪

可以看出，现有的柔性手爪力感知使用力传感器、智能材料或算法的方法，但存在增加结构复杂性，改变接触面特性，传感器测试点与实际接触点存在偏差等不足。绳传动具有传动性能优越、轻量化等特点，采用绳传递柔性手爪抓取过程中的端部形变位移，从而实现对柔性手爪抓取力的感知，为柔性手爪的力感知提供一种新的思路。为此，本文设计了一种绳驱动力感知柔性手爪及其恒力控制系统，在柔性手爪抓取过程中通过绳带动位移检测单元，结合力感知算法，在不使用力传感器的情况下实现抓取接触节点和抓取力的感知功能，从而避免传统柔性手爪使用力传感器、智能材料以及算法进行力感知所存在的问题。

1.4 本文主要研究内容

本文设计研制一种基于绳驱动的力感知柔性手爪并进行恒力控制研究，实现绳驱动柔性手爪的力感知和恒力控制功能，主要内容如下：

第一章：结合机器人柔性抓取的力感知以及恒力控制方面存在的问题，介绍课题的研究背景及意义，分析柔性手爪结构设计、柔性手爪力感知技术以及绳驱动技术在机器人领域的应用方面的研究现状。

第二章：设计基于有限元法的柔性手爪力感知算法，实现柔性手爪抓取接触节点与抓取力的判定，采用有限元仿真分析验证柔性手爪模型精度并进行力学特性分析；搭建基于视觉的柔性手爪力感知实验系统，验证柔性手爪抓取力感知策略和力伺服控制功能。

第三章：根据功能需求，设计一种新型的基于绳驱动的力感知柔性手爪及力

感知策略，搭建柔性手爪力感知控制系统，搭建绳驱动力感知柔性手爪力感知实验系统，验证绳驱动力感知柔性手爪抓取不同节点、不同尺寸的物体的力感知功能。

第四章：在验证绳驱动力感知柔性手爪的力感知功能的基础上，设计绳驱动力感知柔性手爪的恒力输出控制以及扰动自适应恒力控制策略，搭建绳驱动力感知柔性手爪恒力控制实验系统，验证柔性手爪恒力输出控制功能以及柔性手爪扰动自适应恒力控制功能。

第五章：为进一步验证绳驱动力感知柔性手爪的应用功能特性，搭建机器人抓取应用实验系统，模拟实际应用中绳驱动力感知柔性手爪抓取物体的过程，完成绳驱动力感知柔性手爪对不同材质、不同形状、不同尺寸物体的抓取功能测试，验证绳驱动力感知柔性手爪的抓取应用性能和自适应恒力控制功能。

第六章：总结本文所完成的工作，对存在的问题进行了探讨，分析了课题后续需要开展的工作。

1.5 本章小结

本章介绍了课题研究背景及意义，对机器人柔性抓取的柔性手爪结构、力感知技术以及绳驱动技术应用的研究现状以及存在的问题进行了总结分析，提出本课题的主要研究内容。

第2章 柔性手爪建模分析及力感知策略

2.1 引言

通过分析可知，现有的柔性手爪力感知主要是使用力传感器、智能材料或算法的方法实现，存在力传感器安装固定复杂、柔性手爪制造要求高、改变抓取接触面特性、计算复杂等问题。为此，本文设计一种基于绳驱动的力感知柔性手爪并进行恒力控制研究。基于绳驱动进行柔性手爪力感知的思路是，利用绳索传递柔性手爪受力过程端部形变位移，并基于设计的力感知算法，实现柔性手爪的力感知功能。本章针对常见的鱼鳍型柔性手爪，设计基于柔性手爪端部形变位移的力感知策略，并搭建实验系统对设计的力感知策略进行验证，为绳驱动柔性手爪的力感知提供算法基础。

2.2 柔性手爪模型建立

2.2.1 手指部分结构

本文使用的柔性手爪的手指部分为鱼鳍型手指，如图2-1所示，从结构上看，鱼鳍型柔性手指为两端对称，中间有隔层的结构，存在当手指部分受力时，手指部分末端向与受力相反的方向移动的特性。同时可以看出，鱼鳍型柔性手指存在有限元理论中的可离散化结构，即可以将一个完整的手指部分离散成为有限个分段连续单元的組合，通过有限元理论可以建立手指部分受力和形变的对应关系，完成力-形状模型的建立。

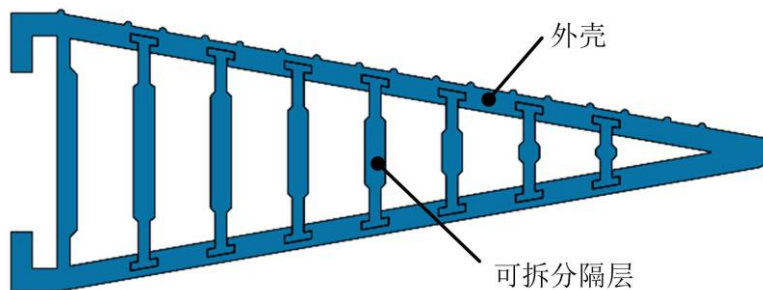


图 2-1 手指部分的结构

根据有限元理论的离散化概念可知，手指部分可以看成是一个弹性连续体，

可以将其划分为有限个单元。把连续体转化为由有限个单元组成的集合体，相邻单元之间只通过节点组合在一起，通过节点传递力和位移。从上图可以看出，柔性手指具备可以划分出节点和单元的结构，其中节点是手指部分中两条线段相交的点，单元则是任意两个相邻节点之间的连接部分。因此，可以将手指部分进行节点和单元的划分，为手指部分的力-形状模型提供了结构基础。

采用有限元理论对手指部分进行建模，做如下假设：

- (1) 手指部分在有效的抓取范围内符合线弹性特性；
- (2) 将单元看作是梁单元和杆单元的结合；
- (3) 手指部分隔层的连接处不存在铰链或转角，隔层与手指部分的连接处不存在相对位移或滑动，材质均匀；
- (4) 手指部分受到的力载荷看作是接触节点处的集中力；
- (5) 手指部分在设计时，两端完全对称。

通过有限元理论得到手指部分的受力和位移之间的关系^[69]。手指部分在制作时，在材料方面，采用的材料是 TPU 柔性材料，这种材料具有良好的线弹性，可以认定手指部分中的单元都是线弹性单元。将手指部分的外壳与隔层分开通过 3D 打印制作，打印完成后，将隔层安装在手指部分外壳中，完成手指部分的组装。

可以得出结论，手指部分的结构以及材料属性在有限元理论可分析的范围内，因此本文采用有限元法来建立手指部分在受力时，抓取力与手指部分变形的对应关系，即力-形状方程，通过手指部分的节点的位移和转角得到手指部分受到的抓取力。

2.2.2 力-形状模型

根据有限元理论可以得知，有限元法的基本计算步骤如下：

连续体离散化——将手指部分的结构离散化，变为有限个单元组成的集合体，其中两条线段相交的点作为节点 (i)，两个相邻节点之间的线段作为单元 (j)。

单元分析——将划分出的单元进行梁单元或杆单元的等效化处理，得到单元刚度矩阵的方程式，得到手指部分的各个单元的单元刚度矩阵 (K_j)。

单元综合（组装）——将得到的各个单元的刚度矩阵 (K_j) 中的每一个元素都按照相应的填充规则，安放在整体刚度矩阵 (K) 中，得到手指部分的整体刚

度矩阵 (K)。

得到力-形状方程——通过手指部分的整体刚度矩阵 (K) 得到手指部分某一节点 (i) 受力时, 对应的各个节点的位移与转角关系, 进而得到手指部分力-形状方程。

根据上述的计算步骤, 对手指部分进行有限元法分析, 建立力-形状方程。

首先, 对手指部分进行离散化处理。如图 2-2 所示, 对其进行单元划分, 同时对单元和节点进行编号, 其中红色的数字是节点编号, 黑色的数字是单元编号, 以每个节点为坐标原点建立局部坐标系 $o_i'-x_i'y_i'$, 以手指部分底部中心为坐标原点建立整体坐标系 $o-xy$ [70]。

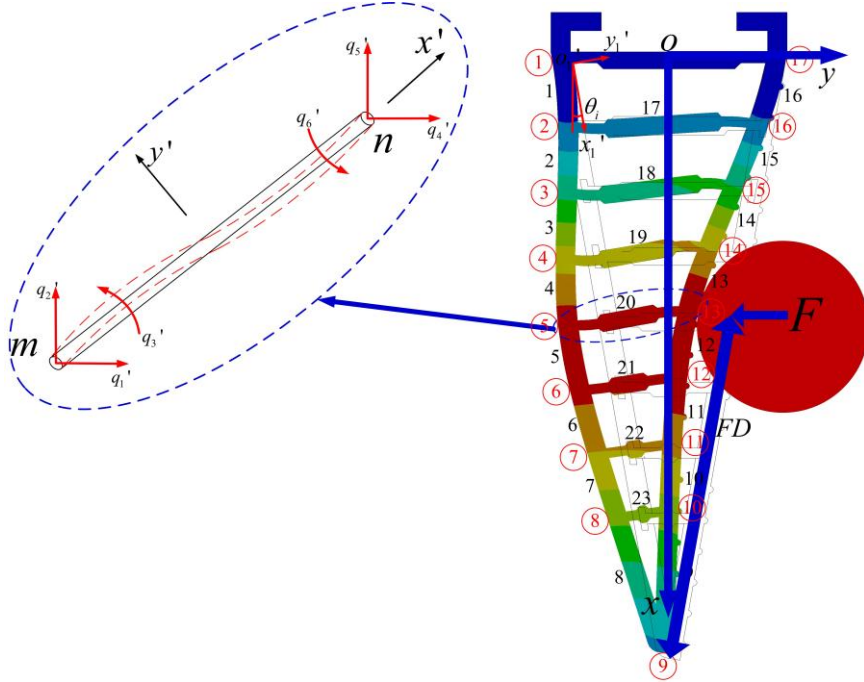


图 2-2 节点、单元划分图

其次, 进行单元分析。如图 2-2 所示单元可以看作杆单元和梁单元的合成, 杆单元的每端具有一个移动自由度, 梁单元的每端具有一个移动自由度和一个转动自由度, 由此可见手指部分中的每个单元末端都分别具有 3 个自由度。可以得到, 被划分单元 (j) 的位移向量在局部坐标系 $o_i'-x_i'y_i'$ 中可以表示为:

$$Q' = (q_1', q_2', q_3', q_4', q_5', q_6')^T \quad (2-1)$$

其中, q_2', q_3', q_5', q_6' 对应的是梁单元的自由度, q_1', q_4' 对应的是杆单元的自由度。

在局部坐标系 $o_i'-x_i'y_i'$ 中, 一维两节点杆单元两自由度的刚度矩阵为:

$$K^1 = \begin{bmatrix} \frac{EA}{l} & -\frac{EA}{l} \\ -\frac{EA}{l} & \frac{EA}{l} \end{bmatrix} \quad (2-2)$$

在局部坐标系 $o_i'-x_i'y_i'$ 中，一维两节点纯弯梁单元的刚度矩阵为：

$$K^2 = \begin{bmatrix} \frac{12EI}{l^3} & \frac{6EI}{l^2} & -\frac{12EI}{l^3} & \frac{6EI}{l^2} \\ \frac{6EI}{l^2} & \frac{4EI}{l} & -\frac{6EI}{l^2} & \frac{2EI}{l} \\ -\frac{12EI}{l^3} & \frac{6EI}{l^2} & \frac{12EI}{l^3} & -\frac{6EI}{l^2} \\ \frac{6EI}{l^2} & \frac{2EI}{l} & -\frac{6EI}{l^2} & \frac{4EI}{l} \end{bmatrix} \quad (2-3)$$

将杆单元和梁单元的刚度矩阵重新装配可以得到单元 (j) 的单元刚度矩阵 K_j ，如下：

$$K_j = \begin{bmatrix} \frac{EA_j}{l_j} & 0 & 0 & -\frac{EA_j}{l_j} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{12EI_j}{l_j^3} & \frac{6EI_j}{l_j^2} & 0 & -\frac{12EI_j}{l_j^3} & \frac{6EI_j}{l_j^2} \\ 0 & \frac{6EI_j}{l_j^2} & \frac{4EI_j}{l_j} & 0 & -\frac{6EI_j}{l_j^2} & \frac{2EI_j}{l_j} \\ -\frac{EA_j}{l_j} & 0 & 0 & \frac{EA_j}{l_j} & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{12EI_j}{l_j^3} & -\frac{6EI_j}{l_j^2} & 0 & \frac{12EI_j}{l_j^3} & -\frac{6EI_j}{l_j^2} \\ 0 & \frac{6EI_j}{l_j^2} & \frac{2EI_j}{l_j} & 0 & -\frac{6EI_j}{l_j^2} & \frac{4EI_j}{l_j} \end{bmatrix} \quad (2-4)$$

式中， E 为单元的杨氏模量 (Pa)、 A_j 为单元的截面积 (m^2)、 l_j 为单元长度 (m)、 I 为单元惯性矩 (m^4)。

然后，进行单元组装。为了得到手指部分在受力情况下的整体节点位移，需要根据各个单元的组合关系求解整体刚度矩阵。由于单元刚度矩阵是在各自的坐标系 $o_i'-x_i'y_i'$ 中建立的，要将各个单元刚度矩阵装配成整体刚度矩阵，需要把各个单元刚度矩阵在整体坐标系 $o-xy$ 下表示。因此需要得到两个坐标系之间的转换关系，然后进行整体坐标系的组装。假定两个坐标系之间的转换矩阵为 L_j ，可以表示为：

$$L_j = \begin{bmatrix} \cos \theta_j & \sin \theta_j & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -\sin \theta_j & \cos \theta_j & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \cos \theta_j & \sin \theta_j & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\sin \theta_j & \cos \theta_j & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2-5)$$

其中, θ_j 的值要根据上述图中的节点的连接关系来确定, 如下表 2-1 所示, 单元 1 对应节点 1, 节点 2, 单元 2 对应节点 2, 节点 3, 而单元 23 对应节点 8, 节点 10, 以此类推。此处把节点 1 到节点 2 的方向当作是局部坐标系 x_i' 的方向, 则 θ_j 是局部坐标系 x_i' 轴与整体坐标系 x 轴之间的夹角。通过几何关系可以得到 θ_j 的值, 进而得到转换矩阵 L_j 。

θ_j 需要通过节点之间的相互关系来确定, 即各个单元所对应的节点信息, 具体的单元与节点对应的关系如表 2-1 所示:

表 2-1 节点与单元对应关系

单元编号	节点编号	
1	1	2
2	2	3
3	3	4
$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$
23	8	10

各个单元在整体坐标系 $o-xy$ 中的单元刚度矩阵为 $\bar{K}_j$, 且在整体坐标系 $o-xy$ 下可以表达为:

$$\bar{K}_j = L_j^T K_j L_j \quad (2-6)$$

将各个单元刚度矩阵中的元素, 放入整体刚度矩阵的对应位置中, 需要遵循一定的规律, 具体遵循的规律如下:

每个单元都有两个节点编号为 m 和 n , 规定从 m 到 n 的方向为单元局部坐标系 x_i' 轴的方向。其中单元刚度矩阵 $\bar{K}_j$ 中的任意元素记作 k_{ij} ($0 \leq i, j \leq 6$), k_{ij} 在整体刚度矩阵中对应的的行和列分别用 p 和 q 表示, 则有

$$p = \begin{cases} 3m+i-3, i \leq 3 \\ 3n+i-6, i > 3 \end{cases} \quad (2-7)$$

$$q = \begin{cases} 3m+j-3, j \leq 3 \\ 3n+j-6, j > 3 \end{cases} \quad (2-8)$$

将单元刚度矩阵中的元素 k_{ij} 放入整体刚度矩阵 K 的对应位置中, 即

$$K = \sum \bar{K}_j \quad (2-9)$$

得到整体刚度矩阵后, 根据有限元理论, 载荷和变形之间的关系可以描述为:

$$Q = K^{-1} * F \quad (2-10)$$

其中, F 为载荷向量; Q 为位移向量;

同时, 在求解时需要设定边界条件, 将单元 1 和单元 17 作为固定约束; 根据给定的载荷向量以及整体刚度矩阵就可以得到对应的位移向量, 其中位移向量中包含着所有节点产生的位移和转角。求得的位移向量 Q 如下:

$$Q = [d_1^x, d_1^y, \alpha_1, d_2^x, d_2^y, \alpha_2, d_3^x, d_3^y, \alpha_3, \dots, d_{17}^x, d_{17}^y, \alpha_{17}]^T \quad (2-11)$$

综上所述, 通过有限元法得到力-形状方程, 可以得到某个节点受力时整体手指部分的所有节点的位移和转角。

2.2.3 力-位移模型

根据有限元理论, 载荷和变形之间的关系可以描述为:

$$Q = K^{-1} * F \quad (2-12)$$

其中, 整体刚度矩阵 K 已由上文推导完成, 载荷向量 F 可以表示为:

$$F = [F_1^x \ F_1^y \ M_1 \ F_2^x \ F_2^y \ M_2 \ \dots \ F_{17}^x \ F_{17}^y \ M_{17}]^T \quad (2-13)$$

其中, F_i^x 为 i 节点在 x_i' 方向上施加的力, F_i^y 为 i 节点在 y_i' 方向上施加的力, M_i 为 i 节点上施加的弯矩。

位移向量 Q 可以表示为:

$$Q = [d_1^x \ d_1^y \ \partial_1 \ d_2^x \ d_2^y \ \partial_2 \ \dots \ d_{17}^x \ d_{17}^y \ \partial_{17}]^T \quad (2-14)$$

其中, d_i^x 为 i 节点在 x_i' 方向上的位移, d_i^y 为 i 节点在 y_i' 方向上的位移, ∂_i 为 i 节点的转角。

由手指部分本身结构可知, 局部坐标系中 y_i' 轴方向的力与手指部分所受到的实际抓取力的方向相近, 因此采用 y_i' 轴方向的力对手指部分的抓取力进行表征, 则可以得到:

$$\begin{bmatrix} d_1^x \\ d_1^y \\ \vdots \\ \partial_{17} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{11} & K_{12} & \dots & K_{1*51} \\ K_{21} & K_{22} & \dots & K_{2*51} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ K_{51*1} & \dots & \dots & K_{51*51} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_1^x \\ F_1^y \\ \vdots \\ M_{17} \end{bmatrix} \quad (2-15)$$

由于第 i 节点受力时，手指部分的端部（第 9 节点）的变形量最大，所以采用第 i 节点受力时，端部（第 9 节点）对应的力-位移关系：

$$F_i^y = \frac{1}{K_{26*i}} * d_{26}^i \quad (2-16)$$

$$F_i = k_i^9 * d_i \quad (2-17)$$

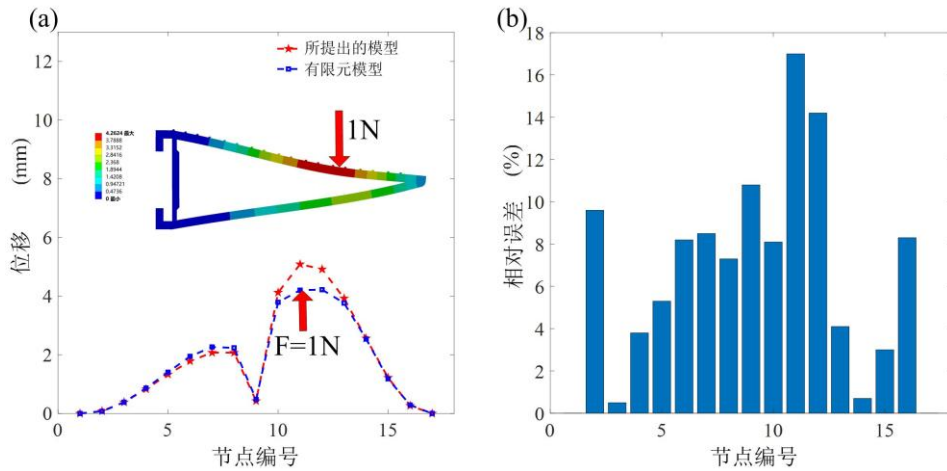
其中， $F_i^y = F_i$ 为手指部分的抓取力， $\frac{1}{K_{26*i}} = k_i^9$ 为第 i 个节点受力时的抓取力与端部变形位移的对应关系， $d_{26}^i = d_i$ 为 $o-xy$ 坐标系中的端部（第 9 节点） y 方向位移。

2.3 有限元仿真验证

2.3.1 模型验证

基于建立的手指部分静力学模型，对手指部分的力学特性进行分析。通过 MATLAB 软件仿真计算手指部分受力状态下的形变值，同时通过 ANSYS 软件仿真分析手指部分受力状态下的形变值，通过对比验证理论模型的准确性，为后续手指部分的力感知策略提供模型基础。

为了验证手指部分力学模型，对无隔层手指部分的形变特性进行分析。建模时，将手指部分划分 17 个节点，在手爪不同位置处施加相同的力（ $F=1N$ ）对手指部分变形进行分析。图 2-3 所示为无隔层手指部分在不同节点处受力的形变结果。可以看出，本文采用的手指部分力学模型的求解结果与有限元仿真结果较为接近，验证了模型的正确性。



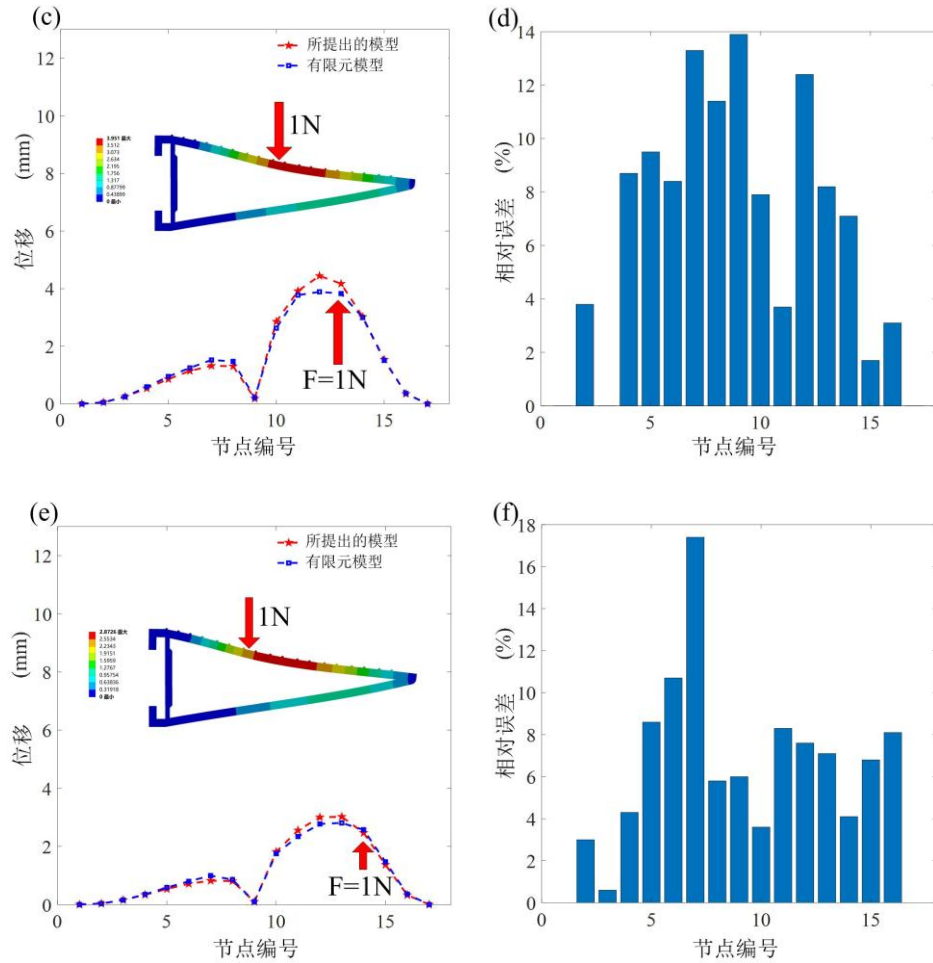


图 2-3 无隔层手指部分不同节点受力形变特性（17 节点划分，1N）：（a）节点 11 受力形变，（b）节点 11 受力形变误差，（c）节点 13 受力形变，（d）节点 13 受力形变误差，（e）节点 14 受力形变，（f）节点 14 受力形变误差

为了进一步验证模型有效性，对有隔层手指部分的形变特性进行分析。选取手指部分带有 7 个隔层，建模时手指部分单元划分 17 个节点，在手指部分不同位置处施加相同的力 ($F=1N$) 对手指部分变形进行分析。图 2-4 所示为有隔层手指部分在不同节点处受力的形变结果。可以看出，本文建立的手指部分力学模型的分析结果与有限元仿真结果较为接近，验证了模型的正确性。

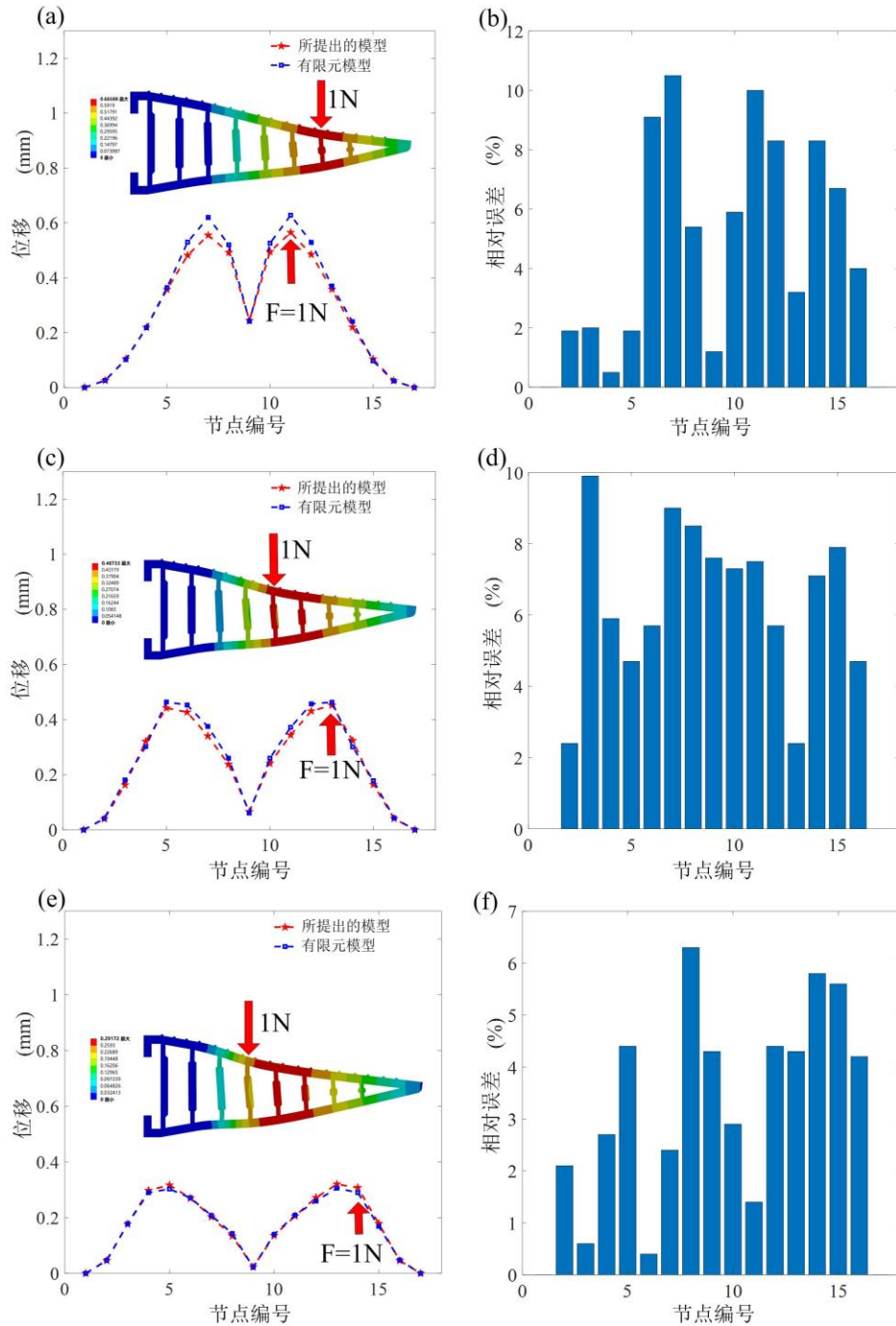


图 2-4 带隔层手指部分不同节点受力形变特性（7 个隔，17 节点划分，1N）：（a）节点 11 受力形变，（b）节点 11 受力形变误差，（c）节点 13 受力形变，（d）节点 13 受力形变误差，（e）节点 14 受力形变，（f）节点 14 受力形变误差

为了进一步分析不同节点划分模型的精度，选取含有 7 个隔层的手指部分，在不同的节点划分下，在手指部分相同位置处施加相同的力 ($F=1N$) 对手指部分变形进行分析。图 2-5 所示为不同节点划分模型对应的手指部分分析结果。可以看出，节点划分越多，模型精度越高。

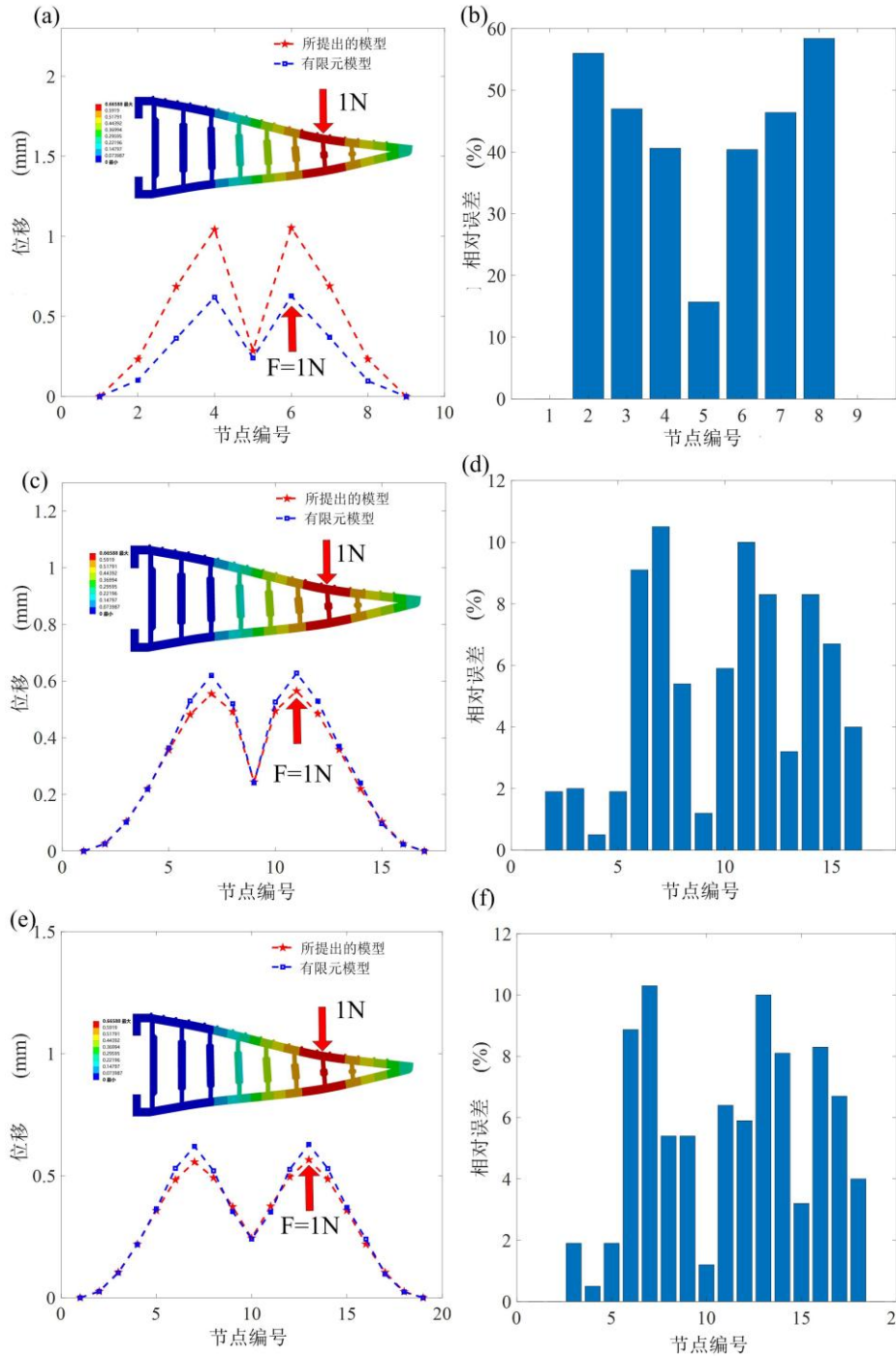


图 2-5 不同节点划分下手指部分模型精度分析：（a）9 个节点划分受力形变，（b）9 个节点划分受力形变误差，（c）17 个节点划分受力形变，（d）17 个节点划分受力形变误差，（e）19 个节点划分受力形变，（f）19 个节点划分受力形变误差

2.3.2 力学特性分析

基于验证的手指部分力学模型，进一步分析手指部分的力学特性。如图 2-6 所示为带 7 个隔层的手指部分在不同作用力下的形变特性。可以看出，随着作用

力的变大，形变幅值变大，整体变形趋势是一致的。如图 2-7 所示为不同隔层的手指部分的形变特性，分析时施加的作用力为 1N，可以看出，随着隔层的增加形变位移变小，隔层能够提高手指部分的刚度。如图 2-8 所示为带 7 个隔层的手指部分在不同节点受力时的形变特性，分析时施加的作用力为 1N，可以看出，抓取位置靠近越指尖时形变位移越大。

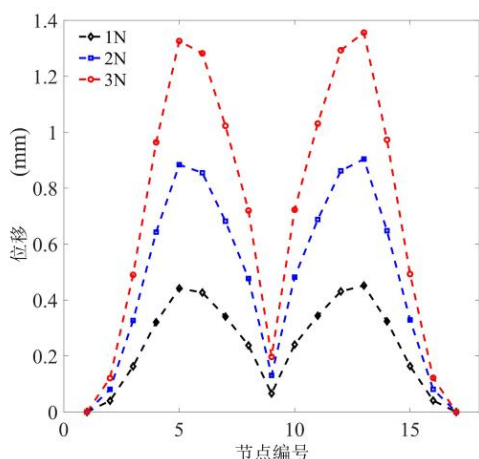


图 2-6 手指部分不同受力下的形变特性

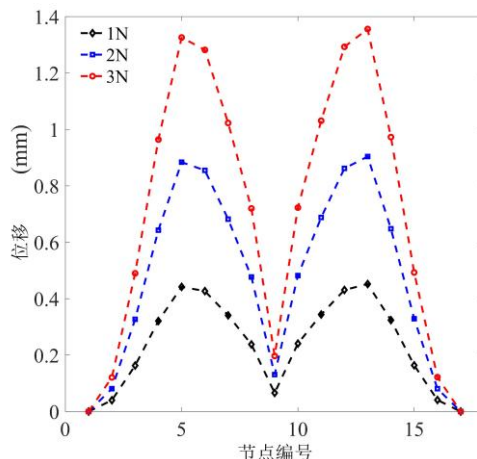


图 2-7 不同隔层手指部分的形变特性

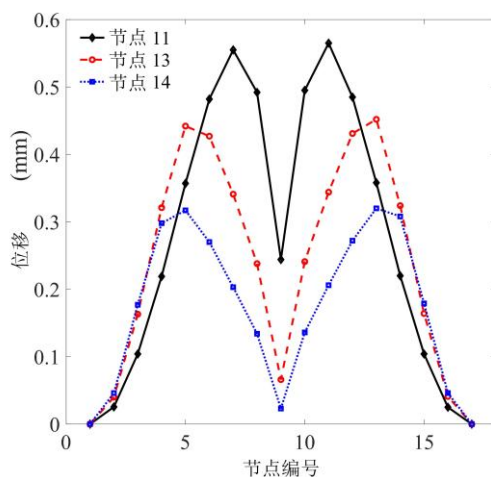


图 2-8 不同节点受力时手指部分的形变特性（17 节点划分、7 隔层、1N）

2.4 基于视觉的柔性手爪力感知算法

2.4.1 算法设计

本章研究的基于视觉的柔性手爪力感知系统包括机器人、柔性手爪和视觉摄像机，如图 2-9 (a) 所示。柔性手爪由驱动单元、传动部分和手指部分组成。手

指部分为鳍状结构，中间有隔层。采用垂直于手指部分放置光源和视觉摄像机，检测手指部分顶部（节点 17）和端部（节点 9）的坐标。

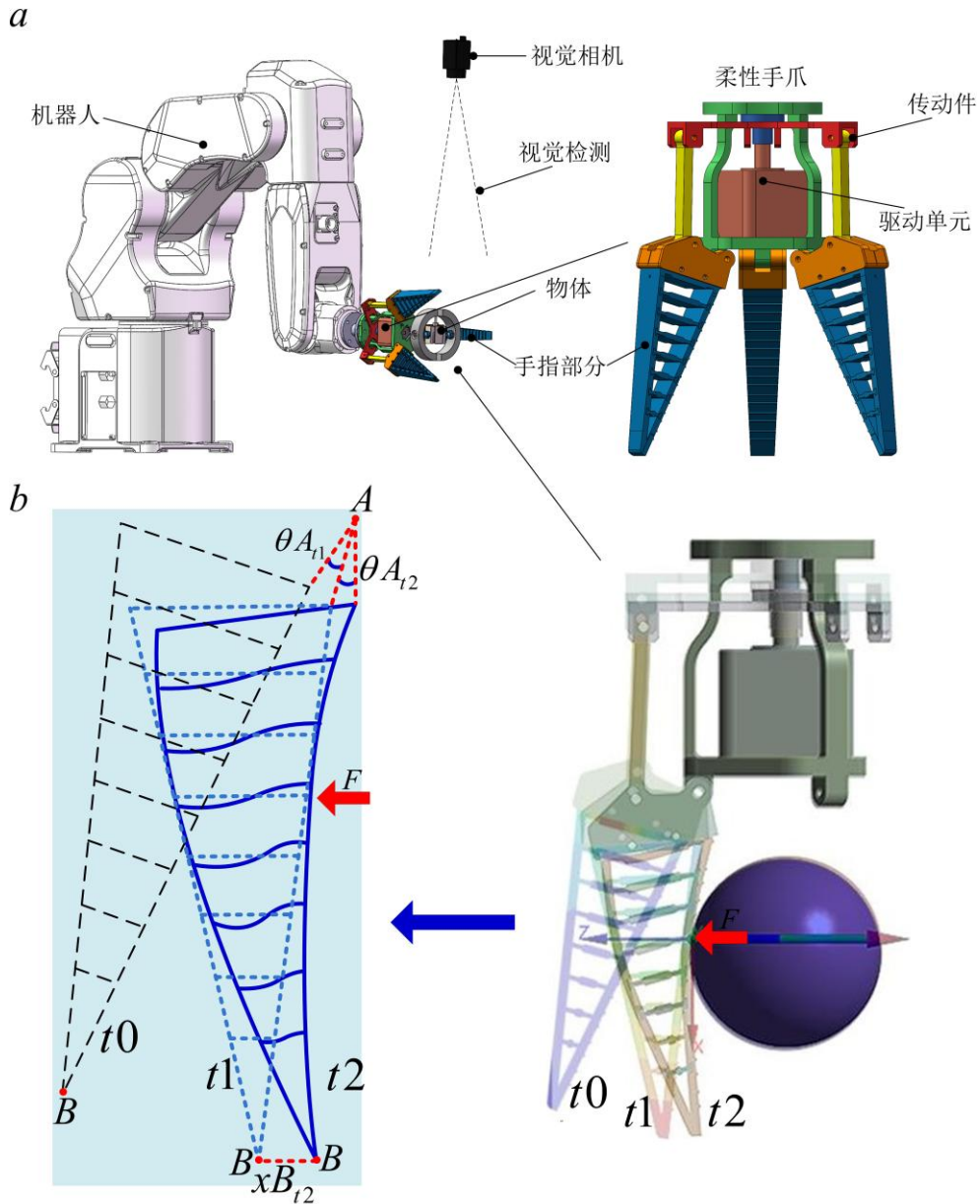


图 2-9 柔性手爪力感知系统：（a）柔性手爪抓取力感知系统组成；（b）柔性手爪不同时刻受力产生的形变

图 2-9 (b) 为手指部分在抓取物体时，在不同时刻的受力形变情况。可以看出，抓取过程中，在抓取力作用下手指部分会产生形变，根据上文提出的柔性手爪力感知策略可知，可以通过端部位移得到柔性手爪的抓取力，所以本节采用机器视觉对手指部分的端部进行测量，得到抓取过程中的端部坐标，根据端部变形位移得到柔性手爪在抓取过程中的受力。

根据上文的有限元理论，抓取力与端部变形位移之间的关系可表示为

$$F_i = k_i^9 * d_i \quad (2-18)$$

其中 F_i 为第 i 个节点受力时的抓取力， d_i 为 $o-xy$ 坐标系中的端部变形位移， k_i^9 为第 i 个节点受力时的抓取力与端部变形位移的对应关系。

可以看出，如果要得到抓取力 (F_i)，首先，要得到在 $o-xy$ 坐标系中的端部变形位移 (d_i)，但在实际抓取过程中， d_i 难以实时测量。为了测量 d_i ，采用机器视觉测量端部坐标，通过坐标转化得到 d_i ；如图 2-10 所示，以接触点为坐标原点建立柔性手爪视觉坐标系 $O-XY$ ，在 $O-XY$ 坐标系中通过机器视觉可以获得实时抓取过程中端部位移 (xB_{t2})，根据几何关系 (坐标转换)，可以得到 d_i 。

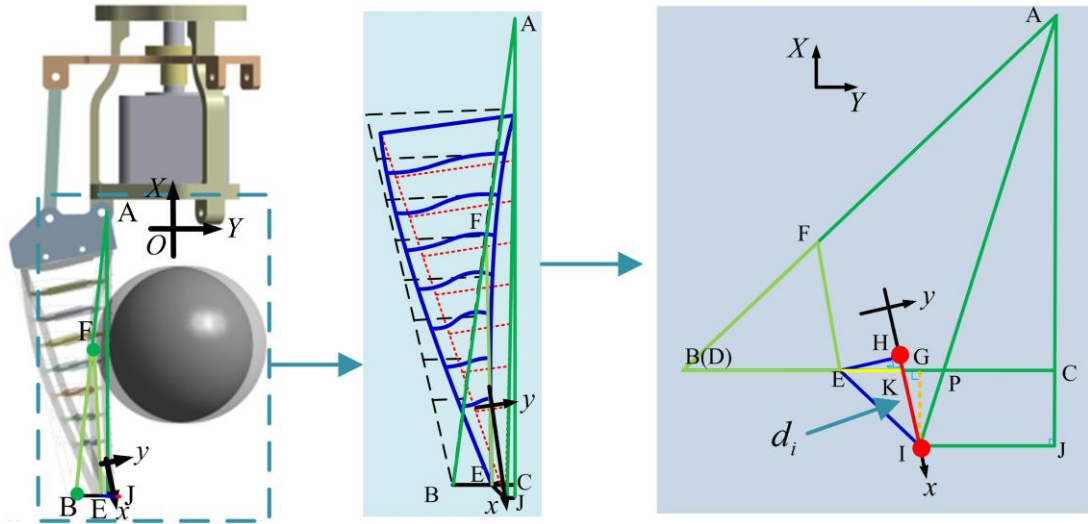


图 2-10 在 t_2 时刻中 $o-xy$ 坐标系中的终端位移

如图 2-10 所示，根据几何关系可以得到 $o-xy$ 坐标系中的端部变形位移 (d_i)，可以表示为：

$$d_i = \frac{l(\sin \theta_2 - \sin \theta_1)}{\sin \theta_3} - s_m + xB_{t2} * \sin \theta_3 \quad (2-19)$$

其中 $s_m = l[\sin \theta_3 (\cos \theta_2 - \sin \theta_2) + \sin \theta_2 - \sin \theta_1]$, $\theta_1 = 64.14^\circ - \theta_{A_{t1}}$, $\theta_2 = 64.14^\circ + \theta_{A_{t1}} + \theta_{A_{t2}}$, $\theta_3 = 54.14^\circ + \theta_{A_{t1}} + \theta_{A_{t2}}$, l 为手指部分的长度， $\theta_{A_{t1}}$ 为从 t_0 时刻到 t_1 时刻的顶部转动角度； xB_{t2} , $\theta_{A_{t2}}$ 为从 t_1 时刻到 t_2 时刻的端部位移、顶部转动角度。

根据式 (2-19) 可知，为了得到 d_i ，还需要 $\theta_{A_{t1}}$ 、 $\theta_{A_{t2}}$ 和 xB_{t2} 三个参数。通过机器视觉检测手指部分的端部 (节点 9) 和顶部 (节点 17) 坐标，获取所需参数。如图 2-11 所示，为获取顶部旋转角度和端部位移，将柔性手爪抓取过程划分为

不同的抓取时刻，包括初始时刻（ t_0 ）、接触时刻（ t_1 ）和完成时刻（ t_2 ），由视觉摄像机在不同时刻检测顶部和端部坐标。视觉相机检测到的坐标为 t_0 时刻 (XA_{t_0}, YA_{t_0}) (XB_{t_0}, YB_{t_0}) ， t_1 时刻 (XA_{t_1}, YA_{t_1}) (XB_{t_1}, YB_{t_1}) ， t_2 时刻 (XA_{t_2}, YA_{t_2}) (XB_{t_2}, YB_{t_2}) 。

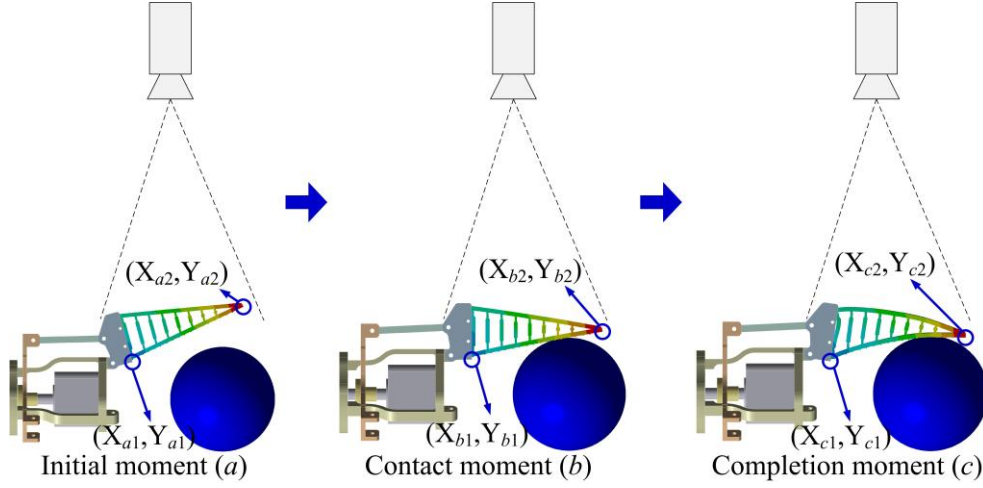


图 2-11 不同时刻的视觉坐标检测

将机器视觉采集到的坐标通过转换得到顶部旋转角度（ $\theta A_{t_1}, \theta A_{t_2}$ ）和端部位移（ xB_{t_2} ），进而得到柔性手爪的抓取力 F_i 。机器视觉采集到的坐标与顶部旋转角度（ $\theta A_{t_1}, \theta A_{t_2}$ ）和端部位移（ xB_{t_2} ）的对应关系如下图 2-12 所示。

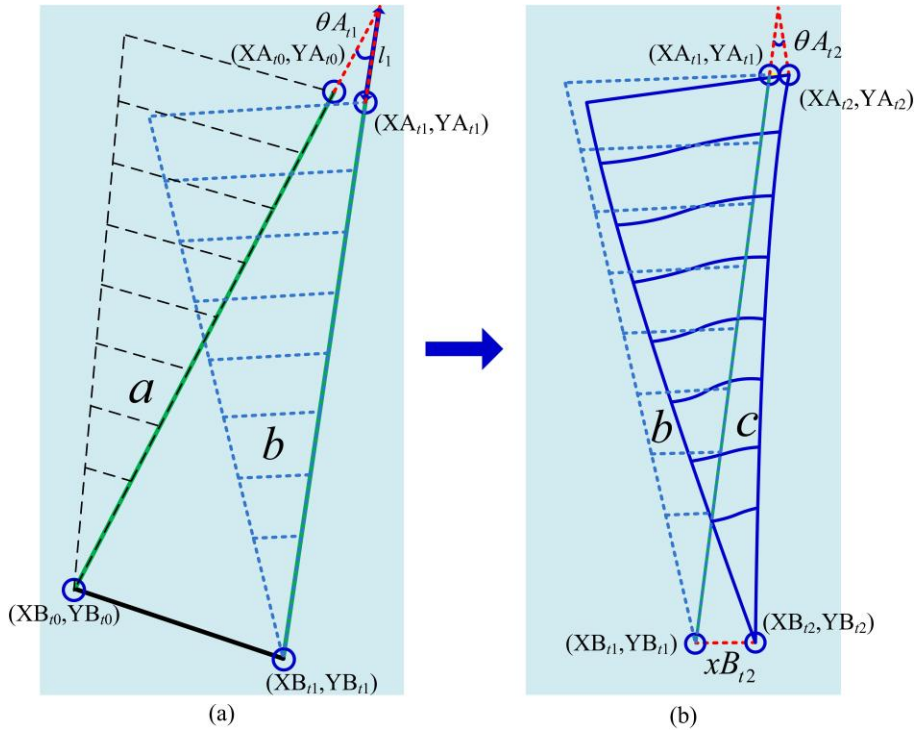


图 2-12 顶部转角和端部位移: (a) t_1 时刻顶部转角（ θA_{t_1} ），(b) t_2 时刻顶部转角（ θA_{t_2} ）和端部位移（ xB_{t_2} ）

根据图 2-12 关系可知，顶部旋转角度（ θA_{t1} ， θA_{t2} ）和端部位移（ $x B_{t2}$ ）与手指部分端部（第 9 节点）和顶部（第 17 节点）坐标存在关系，具体转化过程如下：

$$\sin \frac{\theta A_{t1}}{2} = \left(\frac{\sqrt{(X A_{t1} - X A_{t0})^2 + (Y A_{t1} - Y A_{t0})^2}}{2} \right) / l_1 \quad (2-20)$$

$$\sin \frac{\theta A_{t2}}{2} = \left(\frac{\sqrt{(X A_{t2} - X A_{t1})^2 + (Y A_{t2} - Y A_{t1})^2}}{2} \right) / l_1 \quad (2-21)$$

$$x B_{t2} = \sqrt{(X B_{t2} - X B_{t1})^2 + (Y B_{t2} - Y B_{t1})^2} \quad (2-22)$$

其次，要得到第 i 节点受力时，对应的抓取力与端部变形位移的对应关系（ k_i^9 ），需要对受力节点进行判断。定义接触节点到端部的距离为 FD ，根据柔性手爪的结构参数和图 2-2 中对应的节点划分，可以得到 FD 的长度为

$$FD = \frac{\sin(90 - \frac{\theta A_{t2}}{2}) * x B_{t2}}{\sin(\theta A_{t2})} \quad (2-23)$$

根据接触节点（ i ）与 FD 距离关系，可以得到接触节点（ i ），将公式（2-23）、（2-19）代入公式（2-18）得到抓取力 F_i 。

综上所述，基于视觉的柔性手爪抓取力感知流程为：通过视觉检测不同抓取时刻的顶部与端部的坐标，得到顶部的转角（ θA_{t1} ， θA_{t2} ）与端部的位移（ $x B_{t2}$ ），通过参数得到 o - xy 坐标系中的端部变形位移 d_i 以及接触节点 i ，得到第 i 个节点受力时的抓取力与端部变形位移的对应关系 k_i^9 ，进而得到抓取力 F_i 。算法流程如图 2-13 所示。

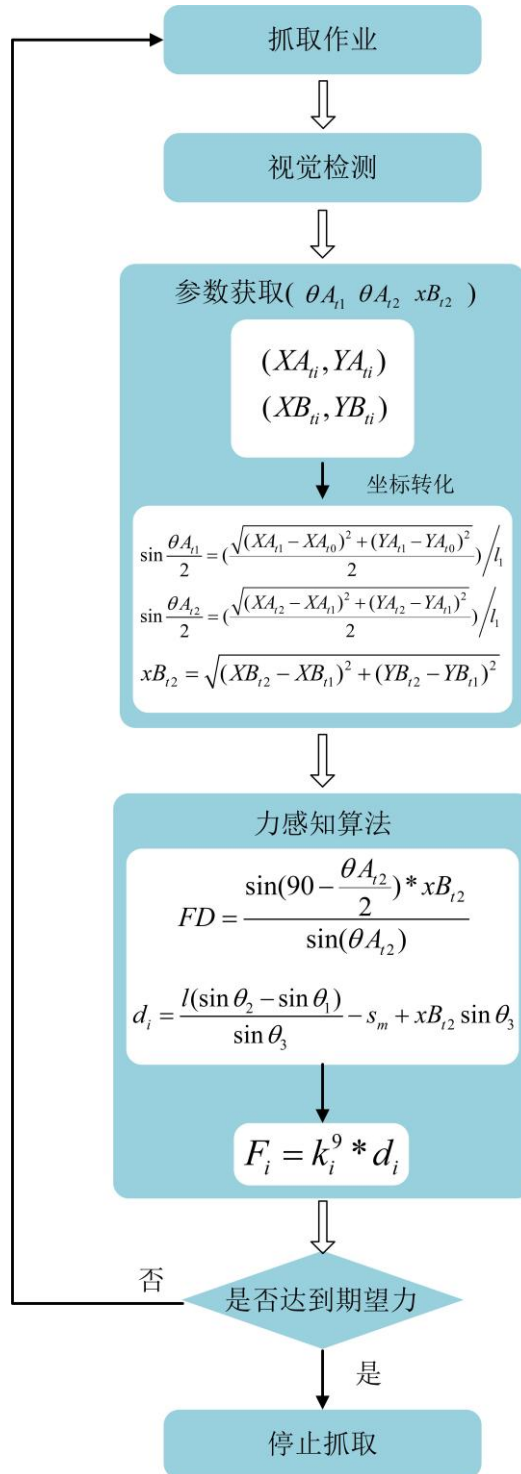


图 2-13 柔性手爪抓取力感知流程

2.4.2 控制系统设计

根据图 2-13 所示的算法流程可知，通过视觉对抓取过程中顶部和端部的坐标进行检测，得到柔性手爪抓取力，从而实现抓取力伺服控制。控制系统流程如图 2-14 所示。

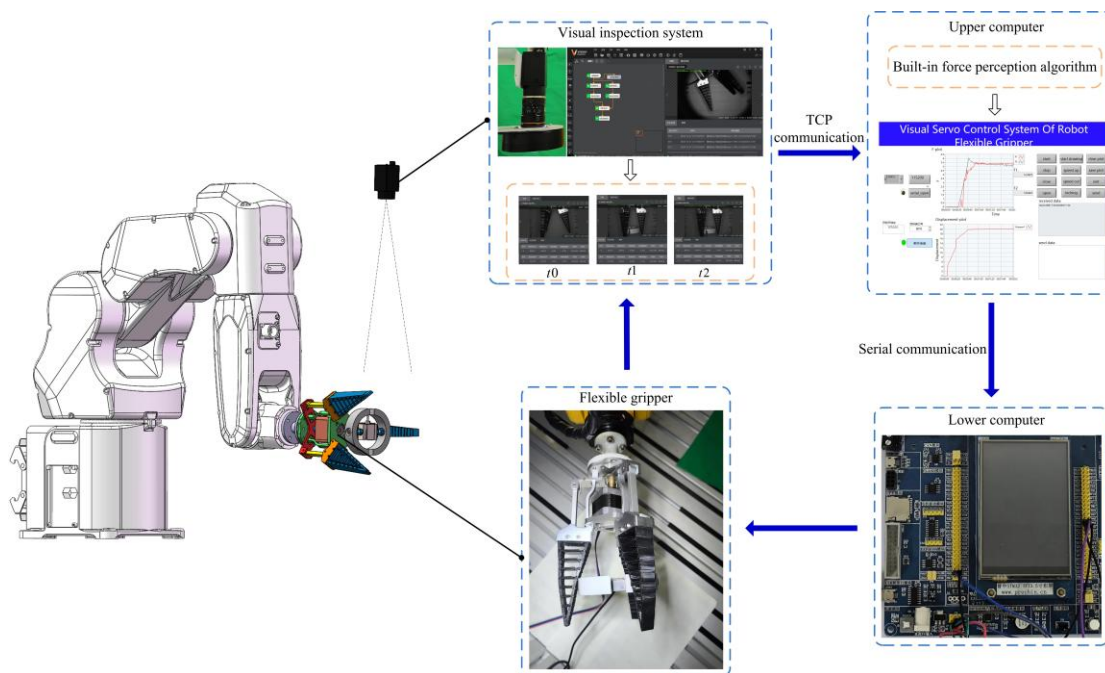


图 2-14 控制系统流程图

如图 2-14 所示,本文采用 Vision Maste 作为机器视觉的上位机,由 LABVIEW 软件搭建柔性手爪视觉伺服上位机、以 STM32 搭建控制核心作为下位机控制柔性手爪开合抓取。使用 Vision Maste 进行图像采集、处理,获取柔性手爪在抓取过程中的顶部和端部坐标,搭建了 TCP 通信传输通道,将坐标数据发送到柔性手爪视觉伺服上位机中,柔性手爪视觉伺服上位机内置有力感知算法程序,同时搭建了 TCP 通信传输通道及串口通信传输通道,柔性手爪视觉伺服上位机通过 TCP 通信传输通道接收坐标数据,代入力感知算法程序,得到柔性手爪的抓取力,通过串口通信传输通道与 STM32 控制核心连接,发送开合抓取信号。

实际的抓取过程是将柔性手爪安装于机器人末端,且柔性手爪保持水平,视觉相机垂直于柔性手爪,采集柔性手爪顶部以及端部的坐标,通过 TCP 通信传输通道发送给柔性手爪视觉伺服上位机,代入内置的力感知算法程序得到柔性手爪抓取力,当力感知算法得到的抓取力未达到期望力,则保持抓取。当力感知算法得到的抓取力达到期望力时,通过视觉伺服上位机下发指令给 STM32 控制核心,控制柔性手爪停止抓取,实现视觉伺服控制功能。最后,使用视觉伺服上位机采集力传感器的实际抓取力,与力感知算法得到的抓取力同时在上位机中展示并保存。

2.4.3 实验验证

(1) 实验系统搭建

构建的基于视觉的柔性手爪力感知实验系统如图 2-15 所示，包括机器人、视觉位移检测系统、柔性手爪和被抓取物体。该机器人采用一个六自由度的工业机器人，用于调整柔性手爪的位姿。视觉位移检测系统包括视觉摄像头以及光源，视觉摄像头采用 HIKROBOT 的 MV-CA032-10GC3D，通过视觉摄像头检测手指部分的变形位移；采用步进电机作为驱动单元，实现柔性手爪抓取的开启和关闭动作。3D 打印制作的手指部分包含 7 个隔层，由 TPU 柔性材料制成，具有良好的线弹性。为了验证所提出的基于视觉的抓取力感知策略得到的抓取力结果的正确性，设计了集成力传感器的被抓取对象仿真装置，以获取抓取过程中的实际抓取力。

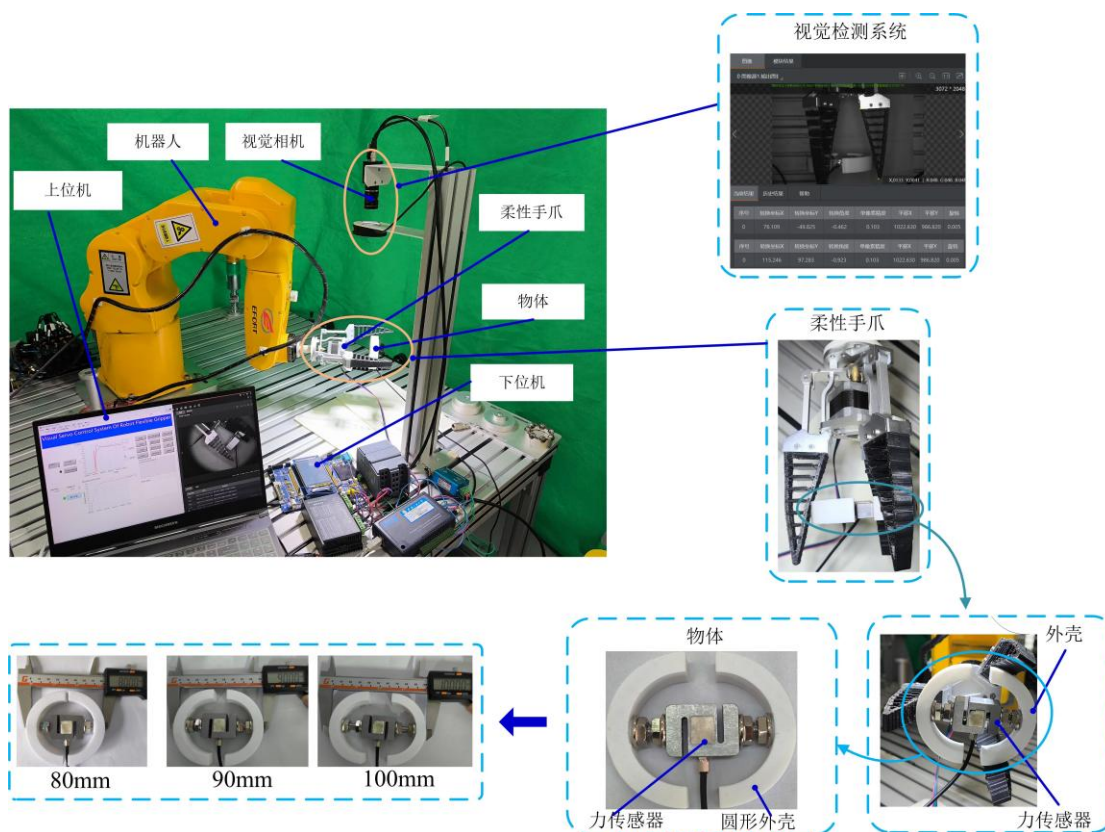


图 2-15 柔性手爪力感知实验系统

(2) 硬件选型

埃夫特机器人：实验所用的六自由度机器人为埃夫特公司生产的型号为 ER3-600 的桌面型机器人，该机器人工作半径为 593mm，额定功率为 1KW，额定电压为 220V，最大负载为 3KG。如图 2-16 所示为 ER-300 机器人和示教器以

及控制箱。



图 2-16 ER-300 机器人、示教器及控制箱

视觉相机与环形光源：实验所用的视觉相机与环形光源都为海康公司所生产，其中视觉相机型号为 MV-CA032-10GC，光源为配套环形光源，如图 2-17 所示。其中 MV-CA032-10GC 拥有各种功能，具体参数如表 2-2，同时配套 MVS 软件。

表 2-2 MV-CA032-10GC 相机主要参数表

型号	MV-CA032-10GM
最大帧率	37.5 fps 2048 × 1536 Mono 8
像元尺寸	3.45 μm × 3.45 μm
靶面尺寸	1/1.8"
协议/标准	GigE Vision V2.0, GenICam



图 2-17 MV-CA032-10GC 视觉相机、环形光源以及 MVS 软件

柔性手爪：柔性手爪采用东莞易爪机器人科技有限公司生产的步进电机驱动的三指柔性机械手，其中驱动单元为步进电机，手指部分通过重新设计将其中间的一体化隔层变为中间可拆卸安装的隔层，方便后续绳的安装，采用 TPU 材料通过 3D 打印制作，如下图 2-18 所示。

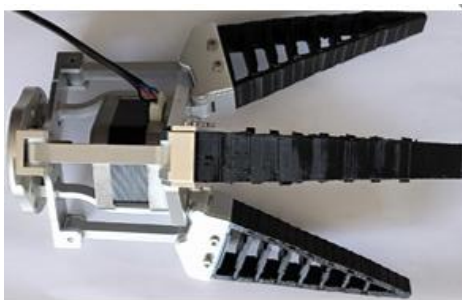


图 2-18 柔性手爪结构

压力传感器与模拟量放大器：实验所用的压力传感器由蚌埠市承映传感器公司生产，型号为 HZC-MS3，传感器的力测量范围为 0~100N，并且它的非线性误差仅 0.01%FS；模拟量放大器由蚌埠市大洋传感系统工程有限公司生产，型号为 DY510，其输出电压为 0~10V，如图 2-19 所示。同时根据实验要求，设计了圆形外壳方便测量柔性手爪抓取物体时的实际抓取力，与压力传感器结合组成被抓取对象仿真装置。

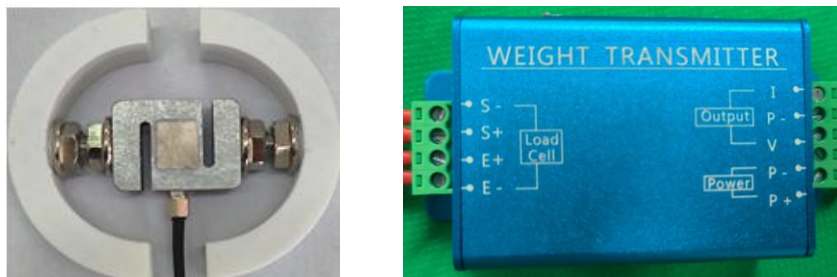


图 2-19 压力传感器与放大器

数据采集卡：实验所用的数据采集卡由研华科技（中国）有限公司生产，型号为 USB-4704，其拥有 14 位 A/D、D/A 转换器，其采样速率可高达 48KHz；8 路单端或 4 路差分模拟量输入和两路模拟量输出，数据采集卡如图 2-20 所示。



图 2-20 数据采集卡

STM32 单片机及电机驱动器：STM32 单片机采用中国深圳市普中科技有限公司生产的玄武系列 F103ZET6 芯片，电机驱动器采用的是步进电机驱动器，型

号是 Microstep Driver DM542，驱动器是用于将脉冲信号转换成角位移并反馈给电机的设备。

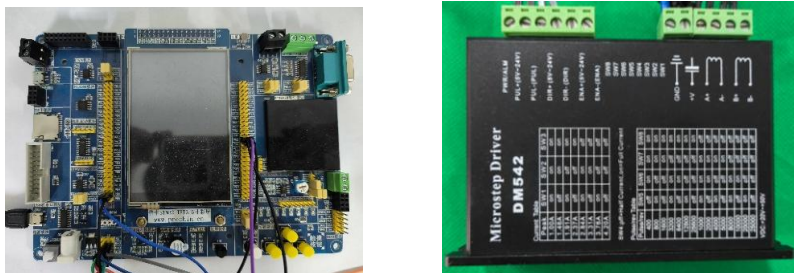


图 2-21 STM32 单片机与电机驱动器

(3) 软件设计

为了实现基于机器视觉的力感知功能，必须解决视觉上位机与柔性手爪视觉伺服上位机的通信问题、柔性手爪视觉伺服上位机与单片机的通信问题以及与压力传感器之间的通讯问题。采用 TCP 通信、串口通信以及数据采集卡来解决通信问题。

1) 视觉软件设计

采用海康公司研发的视觉相机配套 MVS 软件，与 MV-CA032-10GC 视觉相机通过网线进行通信，实现对柔性手爪顶部和端部的坐标采集，MVS 软件主要通过图形化编程，根据预设的程序进行作业。柔性手爪抓取物体时，视觉相机采集图片进行分析，从而得到柔性手爪顶部和端部的坐标，具体程序如下图 2-22 所示：

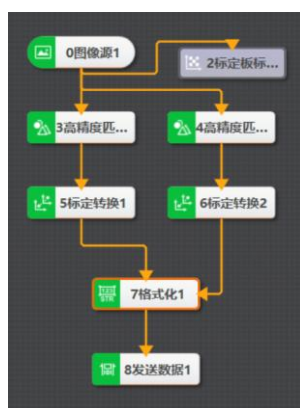


图 2-22 视觉程序工作流程

工作流程从上到下依次按箭头指示进行，首先设置图像源采集，获取视觉相机采集到的图像；其次完成坐标系标定，然后对图像进行处理，设置高精度匹配中的特征点，调用标定结果，对获取到的坐标进行坐标转换，最后将获取到的坐

标,通过格式化进行打包处理,在发送数据之前,需要在视觉上位机中搭建 TCP 通信作为服务器端,设置 IP 地址为“127.0.0.1”,端口号为“8070”,然后规定数据发送的格式,以“start”作为开始标志位,以“;”作为间隔,以“\r\n”作为结束标志位,将数据以数据包的形式发送给柔性手爪视觉伺服上位机。

2) 柔性手爪视觉伺服上位机设计

柔性手爪进行力感知需要将采集的坐标数据进行处理,并将结果反馈给控制芯片,所以柔性手爪视觉伺服上位机需要具备 TCP 通信、串口通信功能。

在柔性手爪视觉伺服上位机中搭建 TCP 通信作为客户端,在接收到数据后,需要对坐标数据进行处理,并将其带入到力感知算法程序中,实现实时的抓取力感知功能。同时需要将得到的坐标数据进行滤波处理,在程序中加入滤波程序,将数据的波动稳定在一定的范围内,然后将数据代入到力感知算法程序中,通过力感知程序输出柔性手爪的抓取力,当达到期望力时,视觉伺服上位机需要通过串口通信发送数据给单片机,让柔性手爪停止抓取,实现视觉伺服功能,同时需要获取柔性手爪抓取力传感器得到的实际的抓取力,并与力感知算法程序计算的力一起显示在上位机界面上。

在上述的程序完成后,视觉伺服上位机的界面如下图 2-23 所示,包含了 TCP 通信、串口通信、传感器数据采集以及算法计算的功能,可以实现柔性手爪视觉伺服力感知实验验证。

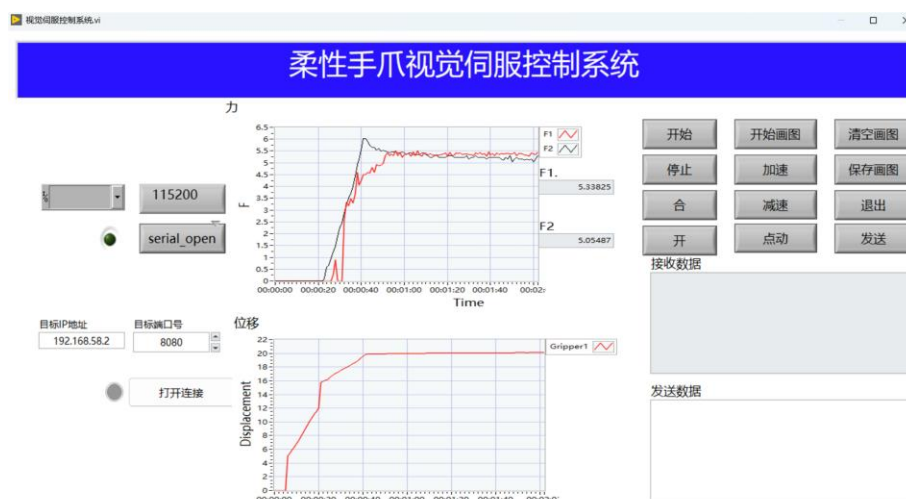


图 2-23 视觉伺服上位机界面展示

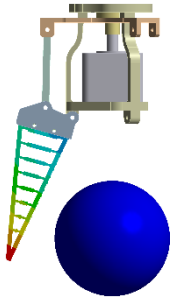
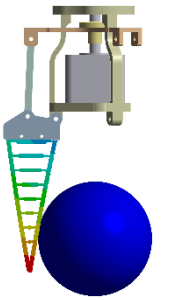
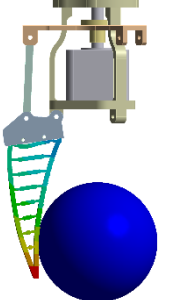
(4) 柔性手爪力感知性能测试

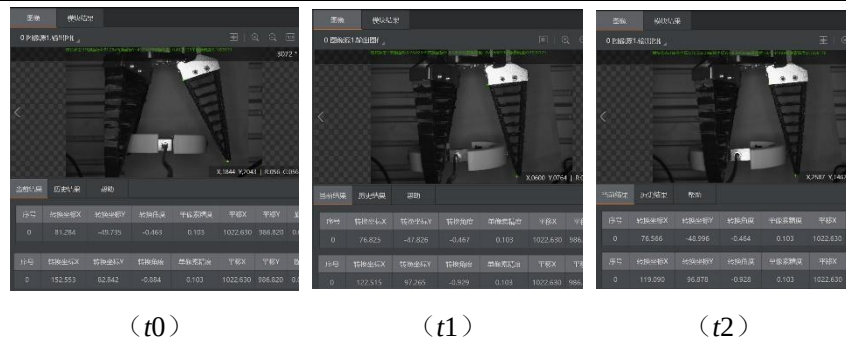
基于实验系统,对柔性手爪力感知策略进行了实验验证。选取三种不同直径

$d=80\text{mm}$ 、 $d=90\text{mm}$ 、 $d=100\text{mm}$ 的物体进行抓取实验，每个直径物体选取 3 个抓取接触节点 $i=11$ 、 $i=13$ 和 $i=14$ 。表 2-3 为柔性手爪抓取过程中视觉位移检测的实验结果。视觉相机获取的位移检测数据如表 2-4、表 2-5、表 2-6 所示，柔性手爪力感知策略获取的柔性手爪感知力与力传感器获取的传感器测量力如表 2-7、表 2-8、表 2-9 所示，柔性手爪感知力与传感器测量力的对比如图 2-24 所示。

结果表明，柔性手爪力感知策略可以实现在不同节点抓取不同直径物体的力感知功能。通过力感知策略感知力的平均误差在 5%左右，在可接受范围内，验证了力感知策略的准确性和可行性。

表 2-3 柔性手爪抓取过程中视觉位移检测实验结果

	初始时刻（ t_0 ）	接触时刻（ t_1 ）	完成时刻（ t_2 ）
抓取状态			
	$d=80\text{mm}$		
实验			
	(t_0)	(t_1)	(t_2)
	$d=90\text{mm}$		


 $d=100\text{mm}$
表 2-4 抓取对象实验结果数据 ($d=80\text{mm}$)

位置			t_0	t_1	t_2
节点 11	端部 (节点 9)	X	155.752	115.478	113.147
		Y	81.370	96.633	97.014
	顶部 (节点 17)	X	86.825	81.377	80.516
		Y	-49.055	-48.755	-49.413
节点 13	端部 (节点 9)	X	152.553	119.643	118.159
		Y	82.842	96.581	97.310
	顶部 (节点 17)	X	81.284	76.659	76.336
		Y	-49.735	-49.528	-49.127
节点 14	端部 (节点 9)	X	156.420	133.425	129.764
		Y	81.283	92.497	92.717
	顶部 (节点 17)	X	86.464	82.913	82.343
		Y	-49.324	-48.071	-48.794

表 2-5 抓取对象实验结果数据 ($d=90\text{mm}$)

位置		t_0	t_1	t_2
----	--	-------	-------	-------

节点 11	端部（节点 9）	X	152.553	116.297	115.246
		Y	82.842	96.524	97.283
	顶部（节点 17）	X	81.284	76.533	76.109
		Y	-49.735	-50.234	-49.825
节点 13	端部（节点 9）	X	152.553	131.293	129.464
		Y	82.842	92.464	92.978
	顶部（节点 17）	X	81.284	78.604	78.191
		Y	-49.735	-49.726	-49.479
节点 14	端部（节点 9）	X	158.832	145.619	143.356
		Y	82.437	88.634	89.477
	顶部（节点 17）	X	90.285	88.183	87.691
		Y	-48.645	-48.375	-48.303

表 2-6 抓取对象实验结果数据（ $d=100\text{mm}$ ）

位置			t_0	t_1	t_2
节点 11	端部（节点 9）	X	152.553	122.515	119.090
		Y	82.842	97.265	96.878
	顶部（节点 17）	X	81.284	76.825	76.566
		Y	-49.735	-47.826	-48.996
节点 13	端部（节点 9）	X	152.553	137.298	134.184
		Y	82.842	92.080	91.791
	顶部（节点 17）	X	81.284	79.267	79.043
		Y	-49.735	-47.882	-49.116
节点 14	端部（节点 9）	X	152.553	154.182	142.298
		Y	82.842	84.443	87.592
	顶部（节点 17）	X	81.284	81.776	79.164
		Y	-49.735	-47.942	-49.452

表 2-7 不同节点抓取力（ $d=80\text{mm}$ ）

	节点 11	节点 13	节点 14
柔性手爪感知力	3.40N	1.96N	2.32N

传感器测量力	3.45N	1.93N	2.24N
--------	-------	-------	-------

表 2-8 不同节点抓取力 ($d=90\text{mm}$)

	节点 11	节点 13	节点 14
柔性手爪感知力	0.96N	1.2N	5.2N
传感器测量力	0.97N	1.04N	5.33N

表 2-9 不同节点抓取力 ($d=100\text{mm}$)

	节点 11	节点 13	节点 14
柔性手爪感知力	1.685N	1.14N	4.84N
传感器测量力	1.44N	1.2N	4.78N

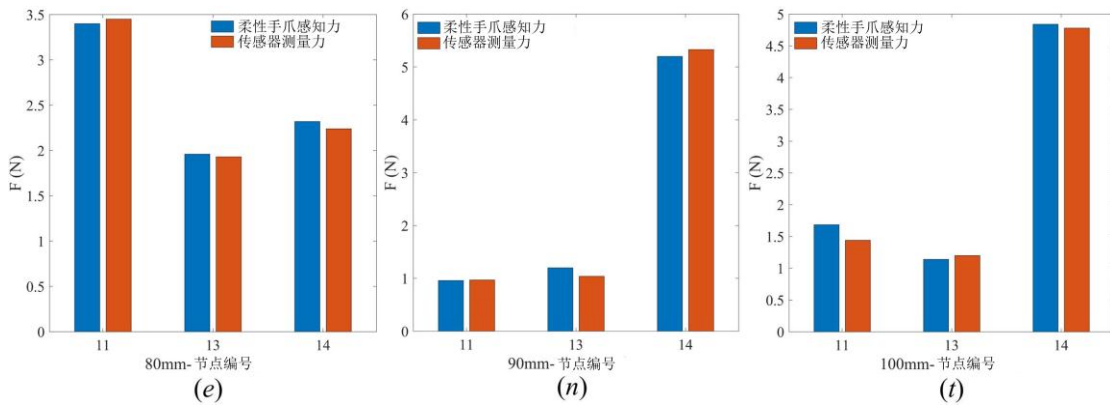


图 2-24 柔性手爪感知力与传感器测量力对比:

(e) 抓取直径 $d=80\text{mm}$ 物体, (n) 抓取直径 $d=90\text{mm}$ 物体, (t) 抓取直径 $d=100\text{mm}$ 物体

(5) 抓取力视觉伺服控制性能测试

如图 2-25 所示, 基于实验系统对柔性手爪视觉伺服控制性能进行实验验证, 选取三种不同直径 $d=80\text{mm}$ 、 $d=90\text{mm}$ 、 $d=100\text{mm}$ 的物体进行抓取实验, 抓取节点分别选取节点 $i=11$ 、 $i=13$ 和 $i=14$, 期望抓取力(F_d)设置为 5.4N , 进行抓取力视觉伺服控制性能实验验证。如图 2-30 所示, 其中, (a)、(b)和(c)分别为抓取物体直径 $d=80\text{mm}$, 接触点为节点 $i=11$ 、 $i=13$ 和 $i=14$ 时柔性手爪的感知力与力控制结果; (d)、(e)和(f)分别为抓取物体直径 $d=90\text{mm}$, 接触点为节点 $i=11$ 、 $i=13$ 和 $i=14$ 时柔性手爪的感知力与力控制结果; (g)、(h)和(i)分别为抓取物体直径 $d=100\text{mm}$, 接触点为节点 $i=11$ 、 $i=13$ 和 $i=14$ 时柔性手爪感知力与力控制结果。

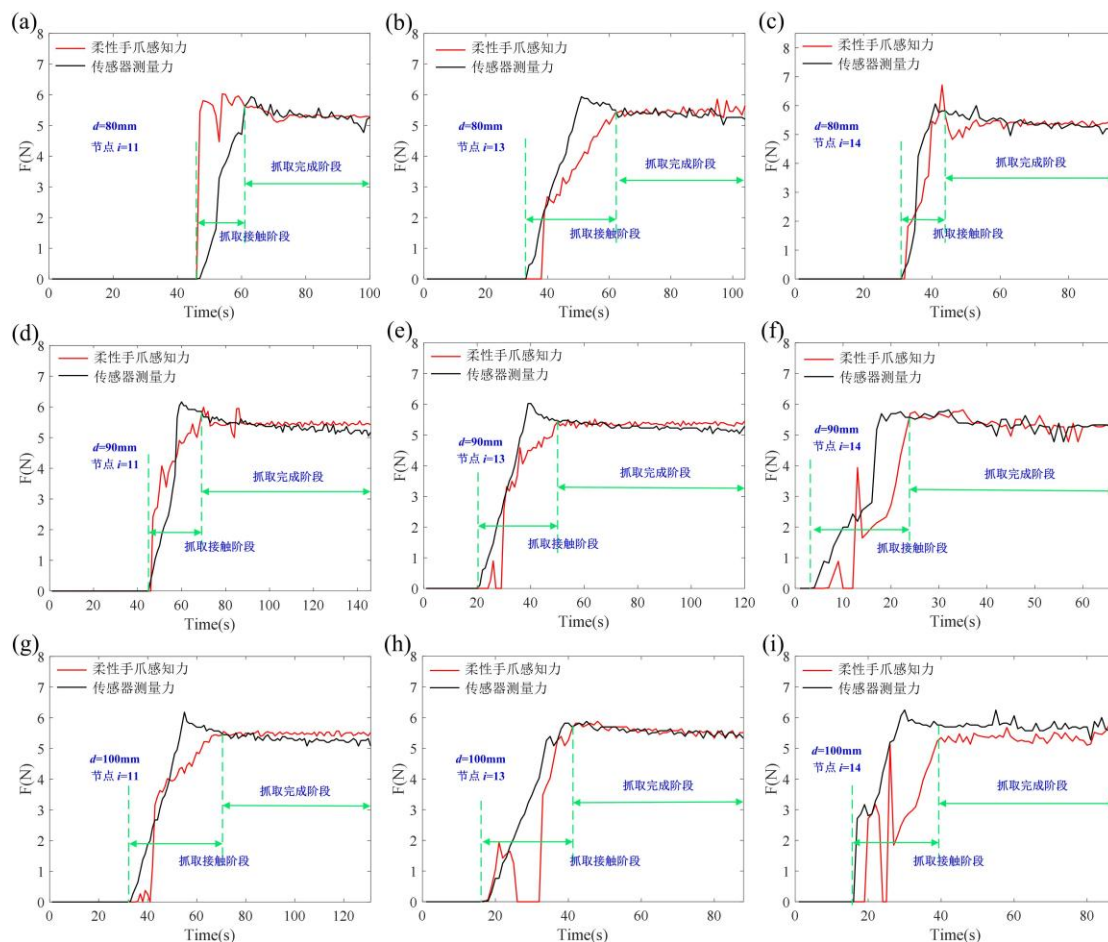


图 2-25 视觉伺服控制实验结果

可以看出,在抓取完成阶段,柔性手爪输出期望的抓取力,抓取 $d=80\text{mm}$ 的物体的误差较小,抓取 $d=100\text{mm}$ 的物体的误差较大,且在节点 $i=13$ 抓取物体时误差较小,约为 3% 左右,说明本文设计的视觉伺服柔性手爪抓取力控制策略的有效性。

为了进一步验证本文设计的视觉伺服柔性手爪抓取力控制策略,对柔性手爪的不同抓取力控制功能进行验证。实验过程中,选取抓取物体直径为 $d=90\text{mm}$,抓取节点为节点 $i=13$,抓取期望力设置分别为 $F_d=4.4\text{N}$ 、 $F_d=5.4\text{N}$ 和 $F_d=6.4\text{N}$ 。如图 2-26 所示为不同期望抓取力伺服控制实验结果。

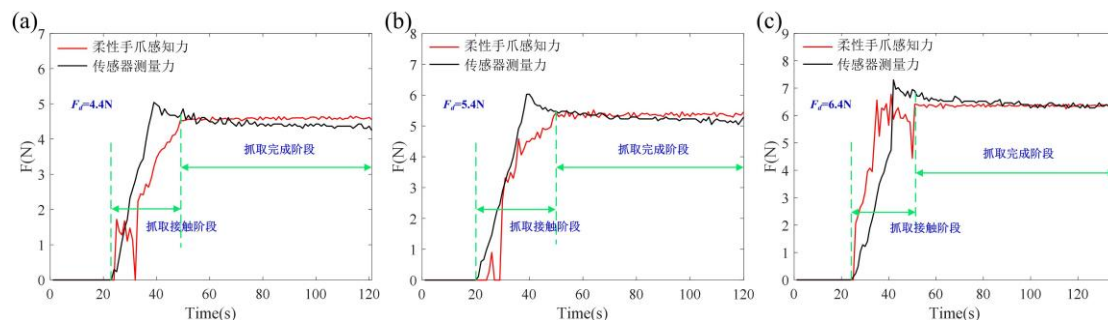


图 2-26 不同期望力下视觉伺服控制结果

如图 2-26 所示, 柔性手爪能够实现不同抓取力的控制, 在抓取完成阶段, 柔性手爪的输出力与力传感器测量的力基本一致, 说明本文设计的视觉伺服柔性手爪抓取力控制策略能够实现不同期望力的伺服控制。

上述结果表明, 通过视觉伺服控制实验系统, 在不同的期望力下, 在不同节点抓取不同直径的被抓取物体, 可以实现视觉伺服控制功能。在抓取稳定阶段力感知效果较好, 误差在 3%左右, 满足精度要求, 验证了力感知策略的准确性和可行性。

2.5 本章小结

本章针对常见的鱼鳍型柔性手爪, 基于有限元理论搭建了柔性手爪手指数学模型, 得到了柔性手爪手指的力-位移模型, 并通过有限元仿真验证了数学模型的准确性; 基于此, 设计了基于柔性手爪端部形变位移的力感知策略, 实现柔性手爪抓取接触节点判断以及抓取力感知, 搭建了基于视觉的实验系统, 对柔性手爪抓取力策略进行验证。结果表明, 设计的柔性手爪力感知误差在 3%左右, 柔性手爪能够实现伺服控制功能, 验证了力感知策略的有效性。

第3章 绳驱动力感知柔性手爪设计研制

3.1 引言

针对现有的通过力传感器或内嵌智能材料进行柔性手爪力感知存在的弊端，本章利用绳索能够传递柔性手爪端部形变位移的思路，设计一种基于绳驱动的力感知柔性手爪及其控制系统并进行样机研制，搭建绳驱动力感知柔性手爪力感知实验系统，验证绳驱动力感知柔性手爪的抓取力感知功能，为后续柔性手爪的恒力控制提供样机基础。

3.2 结构设计

为了避免现有的柔性手爪进行力感知存在的弊端，可以得到柔性手爪的力感知单元的设计需求为：

- (1) 可以测量柔性手爪端部位移；
- (2) 不改变柔性手爪表面接触特性；
- (3) 力感知单元在测量端部位移时，不与抓取物接触，实现非接触式测量；
- (4) 柔性手爪的三指可以分别进行力感知；
- (5) 不影响柔性手爪的抓取工作范围；
- (6) 不改变鱼鳍型柔性手爪的结构；
- (7) 力感知单元应当安装简单，可以安装在柔性手爪上，且可以与机器人连接；
- (8) 整个装置需要轻量化处理，便于后续机器人带动抓取物体；
- (9) 可以提升柔性手爪的刚度，提高其抓取物体的能力；

根据上文的力感知单元中轻量化、非接触式测量的设计需求，装置采用绳传递柔性手爪端部位移，设计了绳驱动力感知柔性手爪，如图 3-1 所示，主要由驱动单元、传动件、手指部分和力感知单元组成，其中，力感知单元主要由角度传感器、联轴器、回复机构组成，回复机构包含连接件、外壳、发条弹簧，力感知单元与手指部分通过绳连接。在不影响柔性手爪抓取工作范围的前提下，可以实现非接触式测量柔性手爪端部位移，且不改变柔性手爪表面接触特性，同时可以

实现三指的抓取力感知功能，为了不改变鱼鳍型柔性手爪结构，且方便安装绳，将鱼鳍型柔性手爪的隔层变为可拆卸隔层，便于安装绳且不改变鱼鳍型柔性手爪的力学特性与结构。同时为了满足安装需求，力感知单元可以安装固定在柔性手爪的端部，并可以通过法兰与机器人连接。

在使用过程中，通过法兰将柔性手爪安装在机器人末端，当抓取物体时，手指部分末端向受力的反方向移动，通过绳带动力感知单元的角度传感器转动，结合力感知算法实现柔性手爪抓取力的检测。

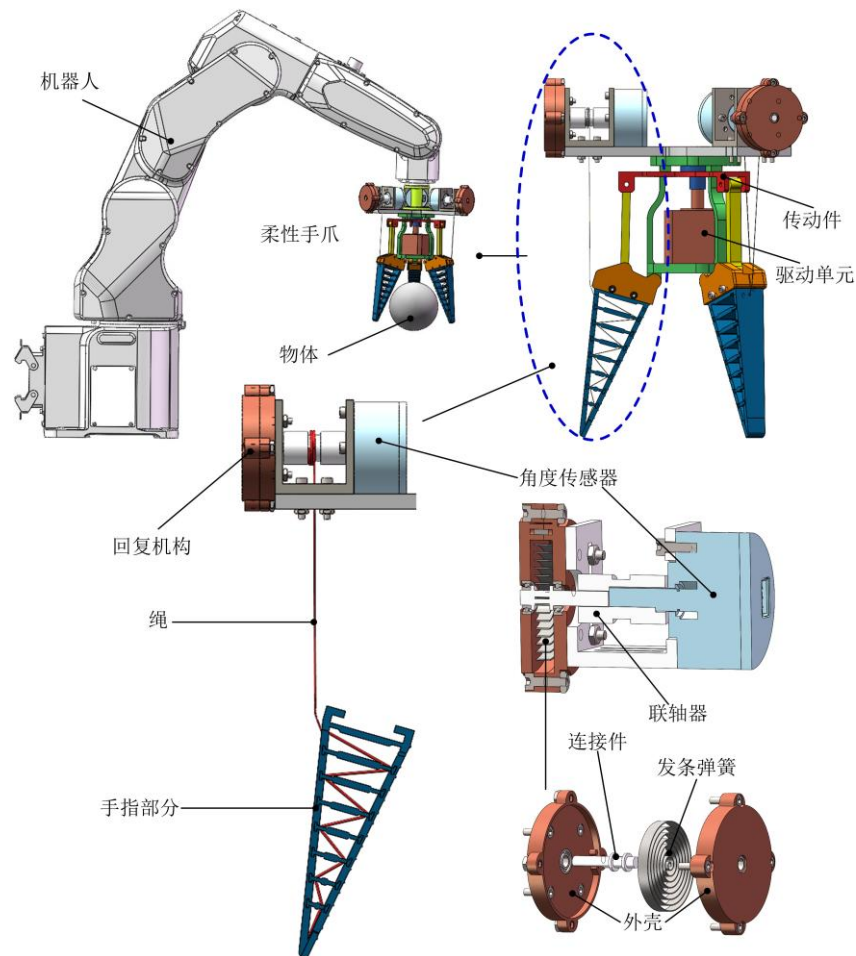


图 3-1 绳驱动力感知柔性手爪整体结构

3.3 控制系统设计

根据第二章的柔性手爪力感知算法，设计绳驱动力感知柔性手爪力感知控制系统，实现绳驱动力感知柔性手爪的抓取力感知功能。如图 3-2 所示，本文采用 QT 软件搭建柔性手爪力感知上位机，柔性手爪力感知上位机具有控制下位机运动、获取下位机数据并存储以及画图展示的功能；本文采用 STM32 单片机作为

控制核心搭建下位机，下位机具有与绳驱动力感知柔性手爪通信、与柔性手爪力感知上位机通信、接受柔性手爪力感知上位机信号并解析、接受力感知单元信号并处理、输出信号给柔性手爪力感知上位机以及输出信号控制柔性手爪的功能。将上述的力感知算法编写为程序，内置在下位机中，其中端部位移由带有 GRM 角度传感器的力感知单元测量得到，当柔性手爪抓取物体时，力感知单元获取到端部的位移，传输到下位机中，并通过内置的力感知算法程序得到接触点所受的外力，然后将位移数据以及所受外力数据上传到上位机中画图展示并存储。

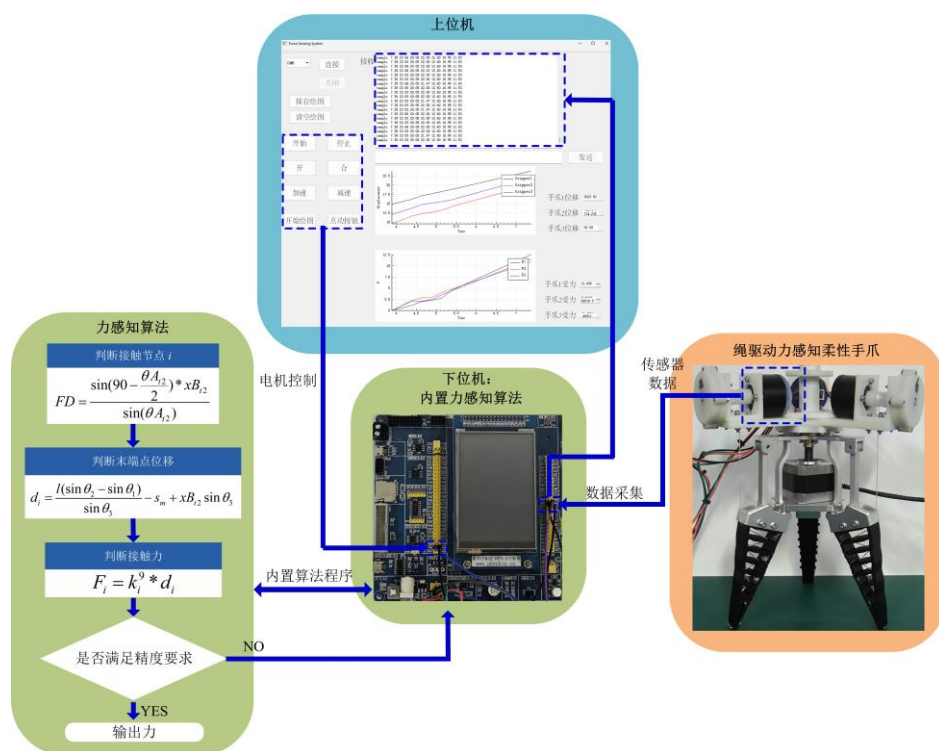


图 3-2 绳驱动力感知柔性手爪力感知控制系统设计

绳驱动力感知柔性手爪的力感知策略流程如图 3-2 所示。在实际抓取过程中，通过点击柔性手爪力感知上位机按钮发送开始信号到下位机，下位机对信号进行解析，控制绳驱动力感知柔性手爪闭合，当绳驱动力感知柔性手爪抓取物体时，下位机接受角度传感器传输的数据，通过下位机内置的力感知程序，确定绳驱动力感知柔性手爪抓取接触节点及受力大小，在下位机内部进行数据处理，将处理好的数据上传，显示在柔性手爪力感知上位机中，并将数据进行画图显示。

3.4 样机研制

根据设计的绳驱动力感知柔性手爪结构，研制绳驱动力感知柔性手爪样机。绳驱动力感知柔性手爪驱动单元采用两相混合式步进电机，传动结构由连杆构成，采用 3D 打印技术制作绳驱动力感知柔性手爪力感知单元，采用 TPU 材料进行手指部分的打印制作，手指部分由七层可拆卸的隔层与手爪外壳组成，每个隔层的边缘有孔，且相邻隔层的孔位置左右相反，绳一端固定在手爪外壳底端，另一端依次穿过隔层的孔，再穿过手爪外壳的孔缠绕在力感知单元上。连接绳具有无弹性、坚固性好的特点。力感知单元中采用 GRM 角度传感器，对于测量完成后 GRM 角度传感器的复位，采用装有发条弹簧的装置作为回复机构。研制的绳驱动力感知柔性手爪样机如图 3-3 所示。

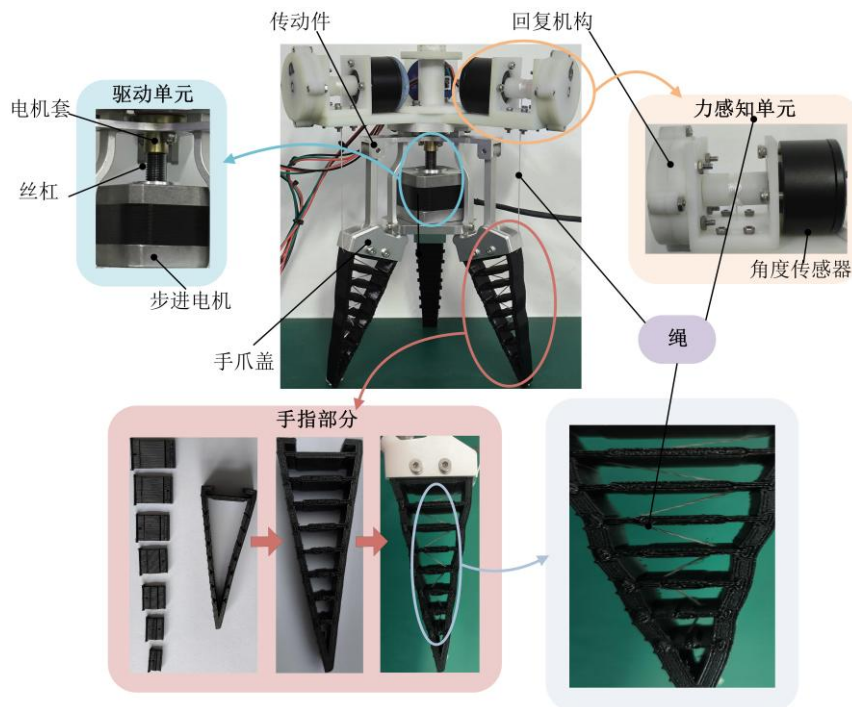


图 3-3 绳驱动力感知柔性手爪样机研制

3.5 性能验证

3.5.1 实验系统搭建

为了验证绳驱动力感知柔性手爪的抓取力感知功能，搭建绳驱动力感知柔性手爪力感知实验系统，如图 3-4 所示。实验系统包括机器人、绳驱动力感知柔性

手爪和待抓取物体，其中，机器人采用六自由度工业机器人，绳驱动力感知柔性手爪采用步进电机作为驱动单元，实现手爪抓取的开合动作；手指部分和力感知单元由 3D 打印制作，具有 GRM 角度传感器，包含带有发条弹簧的回复机构，实现角度传感器的复位，柔性手爪与力感知单元通过绳连接；为了便于对比验证柔性手爪的抓取力，设计了集成力传感器的抓取物体模拟装置，并通过智能显示控制器显示力传感器传输的数据，抓取过程能够同时获取实际的抓取力。采用以 STM32F103 芯片为核心的单片机作为下位机搭建控制系统，采用 QT 软件搭建柔性手爪力感知上位机进行控制与数据展示。

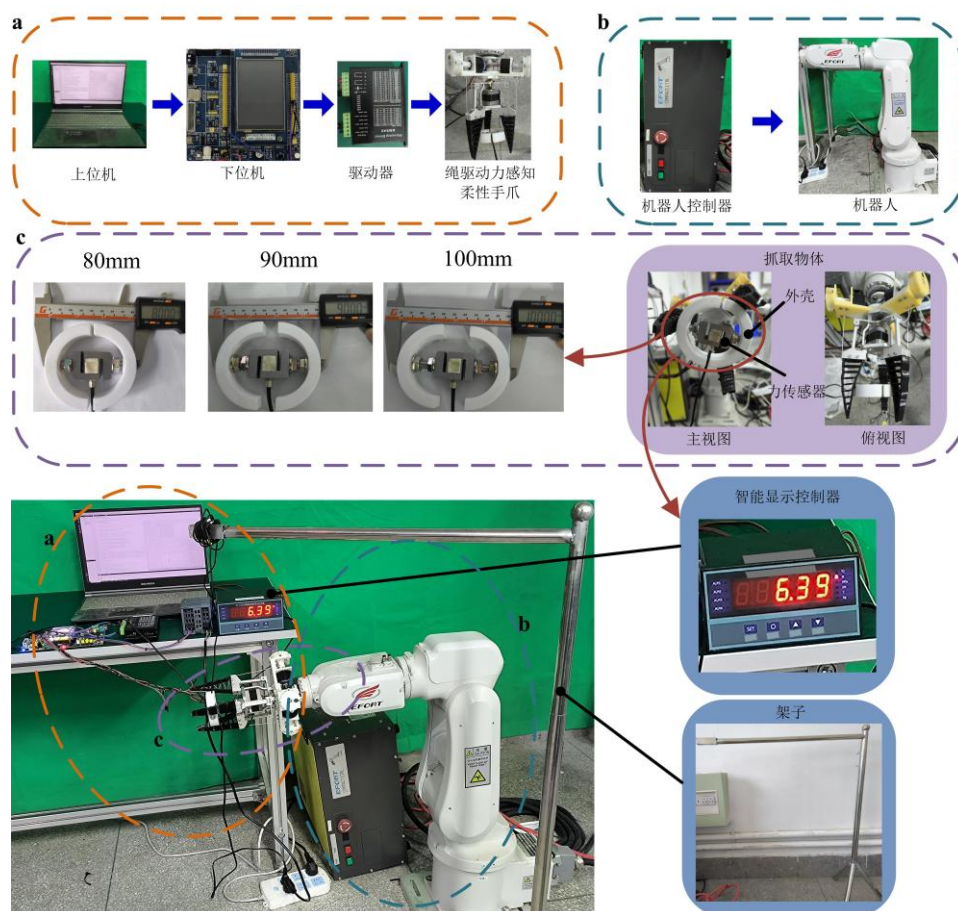


图 3-4 绳驱动力感知柔性手爪力感知实验系统

3.5.2 硬件选型

将实验系统搭建完成后，由于大部分硬件器件与上文中的器件相同，此处只针对不同的器件进行介绍，具体如下：

角度传感器：实验所用的角度传感器是中国东莞轮趣科技生产的磁敏角度传感器 SA100，如下图 3-5 所示。角度分辨率为 0.09 度、支持旋转、PWM 输出。



图 3-5 磁敏角度传感器

智能显示控制仪：实验所用智能数显仪表是中国蚌埠市蚌埠承映传感器有限公司生产的型号为 MCK-Z-I 的智能数显仪表，如下图 3-6 所示。与各种具有线性输出特性的传感器配套；模拟量同步输出。



图 3-6 智能显示控制仪

3.5.3 软件设计

为了实现绳驱动力感知柔性手爪的力感知功能，必须解决柔性手爪力感知上位机与单片机的通信问题，力感知算法的程序化问题。采用 QT 软件进行柔性手爪力感知上位机程序编写、KEIL 软件编写力感知算法程序来解决问题。

(1) 下位机设计

绳驱动力感知柔性手爪在实现力感知功能时，需要实现对角度传感器的数据采集处理、力感知算法的程序化以及对力感知结果的上传展示。

首先，需要实现串口通信，定义波特率为 115200，数据位为 8 位，无停止位，无校验位；其次，采集、处理角度传感的数据，由于角度传感器的数据输出支持 PWM 输出，可以直接测量 PWM 程序输出的高低电平数量，通过算法处理，实现对角度传感器的输出角度进行采集；最后，由于在力感知算法中，需要对不同的抓取时刻进行区分，以便通过定时器与柔性手爪抓取速度得到不同时刻的顶部转角，所以采用不同的定时器对三个柔性手爪的手指部分的力感知程序进行不同抓取时刻区分，得到不同时刻的顶部转角。

(2) 柔性手爪力感知上位机设计

为了实现绳驱动力感知柔性手爪的力感知功能，必须解决上位机与单片机的

通信问题以及力感知结果的数据展示问题。采用 QT 软件搭建柔性手爪力感知上位机使用串口通信解决上位机与单片机的通信问题,并将力感知结果进行画图展示。

柔性手爪力感知上位机在搭建串口通信的程序以及画图展示的程序后,对上位机的 UI 界面进行设计,采用两张画布对其端部的位移以及抓取力感知结果进行展示,同时设计按钮用来控制单片机,进而控制柔性手爪手爪开合抓取。具体上位机界面如下图 3-7 所示。

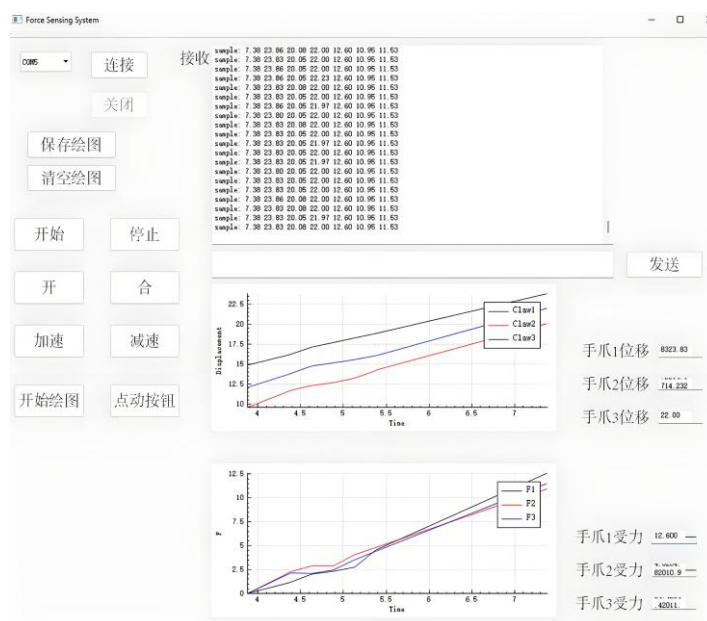


图 3-7 柔性手爪力感知上位机界面

3.5.4 实验验证

根据搭建的实验系统,开展绳驱动力感知柔性手爪抓取力感知策略实验验证。选取三种不同直径物体进行抓取实验,同时每种直径物体分别选取 3 个抓取接触节点。抓取过程中,力感知单元将数据传输到下位机中,进行节点判断与接触点受力计算,并将数据结果传输到上位机,在上位机中进行数据显示与画图显示,实验结果如下所示。

如图 3-8 所示,绳驱动力感知柔性手爪分别在节点 $i=11$ 、 $i=13$ 和 $i=14$ 抓取 $d=80\text{mm}$ 直径的抓取物的结果展示。其中图 3-8 (a) 为三个手指部分在节点 $i=11$ 处抓取物体时的力感知结果,图 3-8 (b) 为三个手指部分抓取力平均值与实际抓取力的对比,图 3-8 (c) 为三个手指部分抓取力平均值与实际抓取力的误差。其中图 3-8 (d)、(e) 和 (f) 为三个手指部分在节点 $i=13$ 抓取物体的结果,

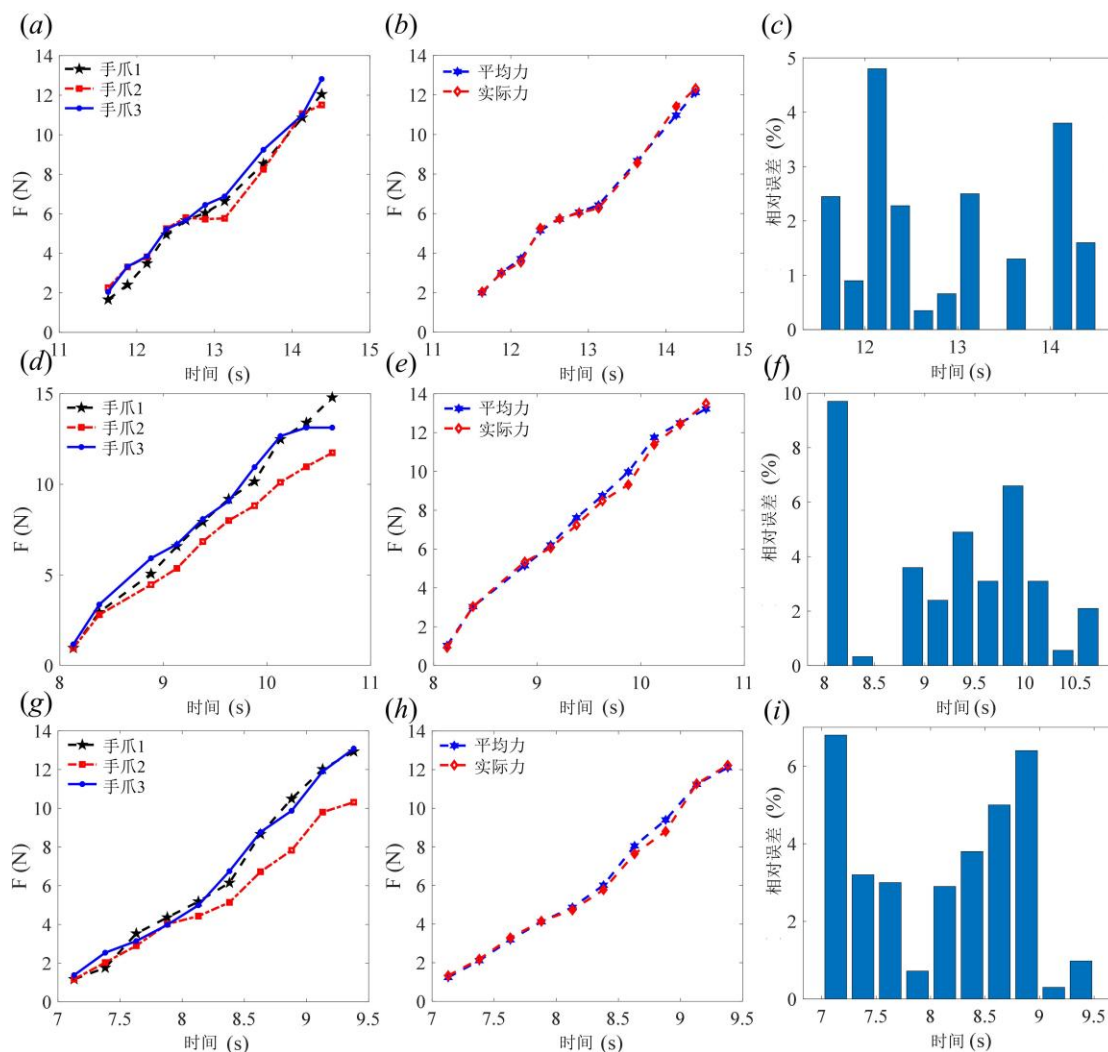
图 3-8 (g)、(h) 和 (i) 为三个手指部分在节点 $i=14$ 抓取物体的结果。实验

图 3-8 实验测试结果（直径 80mm）：

(a) 节点 11 抓取力, (b) 节点 11 抓取力平均值与实际抓取力, (c) 节点 11 抓取力误差, (d) 节点 13 抓取力, (e) 节点 13 抓取力平均值与实际抓取力, (f) 节点 13 抓取力误差, (g) 节点 14 抓取力, (h) 节点 14 抓取力平均值与实际抓取力, (i) 节点 14 抓取力误差

结果表明,手指部分在初始阶段,在绝对误差较小的情况下,相对误差较大,而在抓取末尾阶段,绝对误差较大但相对误差小。绳驱动力感知柔性手爪进行力感知时中间阶段力感知效果相对于初始阶段与末尾阶段,效果更好。

如图 3-9 所示,绳驱动力感知柔性手爪分别在节点 $i=11$ 、 $i=13$ 和 $i=14$ 抓取 90mm 直径的抓取物的结果展示。其中图 3-9 (a)、(d) 和 (g) 为三个手指部分分别在节点 $i=11$ 、 $i=13$ 和 $i=14$ 处抓取物体时的力感知结果,图 3-9 (b)、

(e) 和 (h) 为三个手指部分分别在节点 $i=11$ 、 $i=13$ 和 $i=14$ 处抓取物体时的抓取力平均值与实际抓取力的对比, (c)、(f) 和 (i) 分别为三个手指部分在节点 $i=11$ 、 $i=13$ 和 $i=14$ 处抓取物体时的抓取力平均值与实际抓取力的误差。

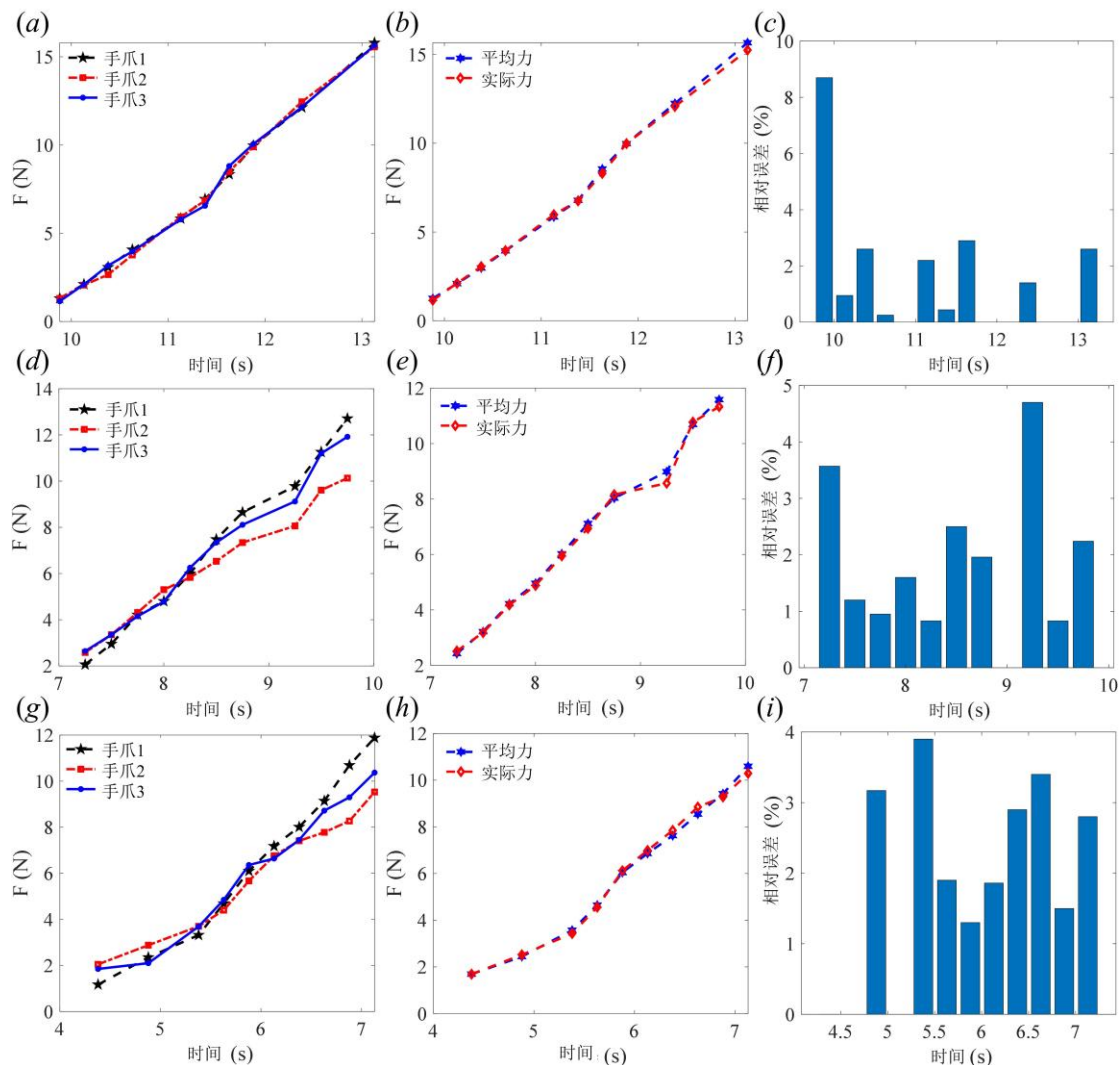


图 3-9 实验测试结果 (直径 90mm) :

(a) 节点 11 抓取力, (b) 节点 11 抓取力平均值与实际抓取力, (c) 节点 11 抓取力误差, (d) 节点 13 抓取力, (e) 节点 13 抓取力平均值与实际抓取力, (f) 节点 13 抓取力误差, (g) 节点 14 抓取力, (h) 节点 14 抓取力平均值与实际抓取力, (i) 节点 14 抓取力误差

可以看出, 手指部分在节点 $i=14$ 的抓取初始阶段误差较小, 但在节点 $i=13$ 与节点 $i=14$ 抓取时, 三个手指部分的力感知之间误差较大。在节点 $i=11$ 进行抓取时, 力感知效果最好, 同时可以看出中间阶段力感知效果比初始阶段与末尾阶段更好。

如图 3-10 所示，绳驱动力感知柔性手爪分别在节点 $i=11$ 、 $i=13$ 和 $i=14$ 抓取 100mm 直径的抓取物的结果展示。其中图 3-10 (a)、(b) 和 (c) 为三个手指部分在节点 $i=11$ 处抓取物体时的力感知结果、抓取力平均值与实际抓取力的对比和抓取力平均值与实际抓取力的误差，三个手指部分节点 $i=13$ 处抓取物体时力感知结果、抓取力平均值与实际抓取力的对比与抓取力平均值与实际抓取力的误差如图 3-10 (d)、(e) 和 (f) 所示，图 3-10 (g)、(h) 和 (i) 展示的是三个手指部分在节点 $i=14$ 处抓取物体时的抓取结果。

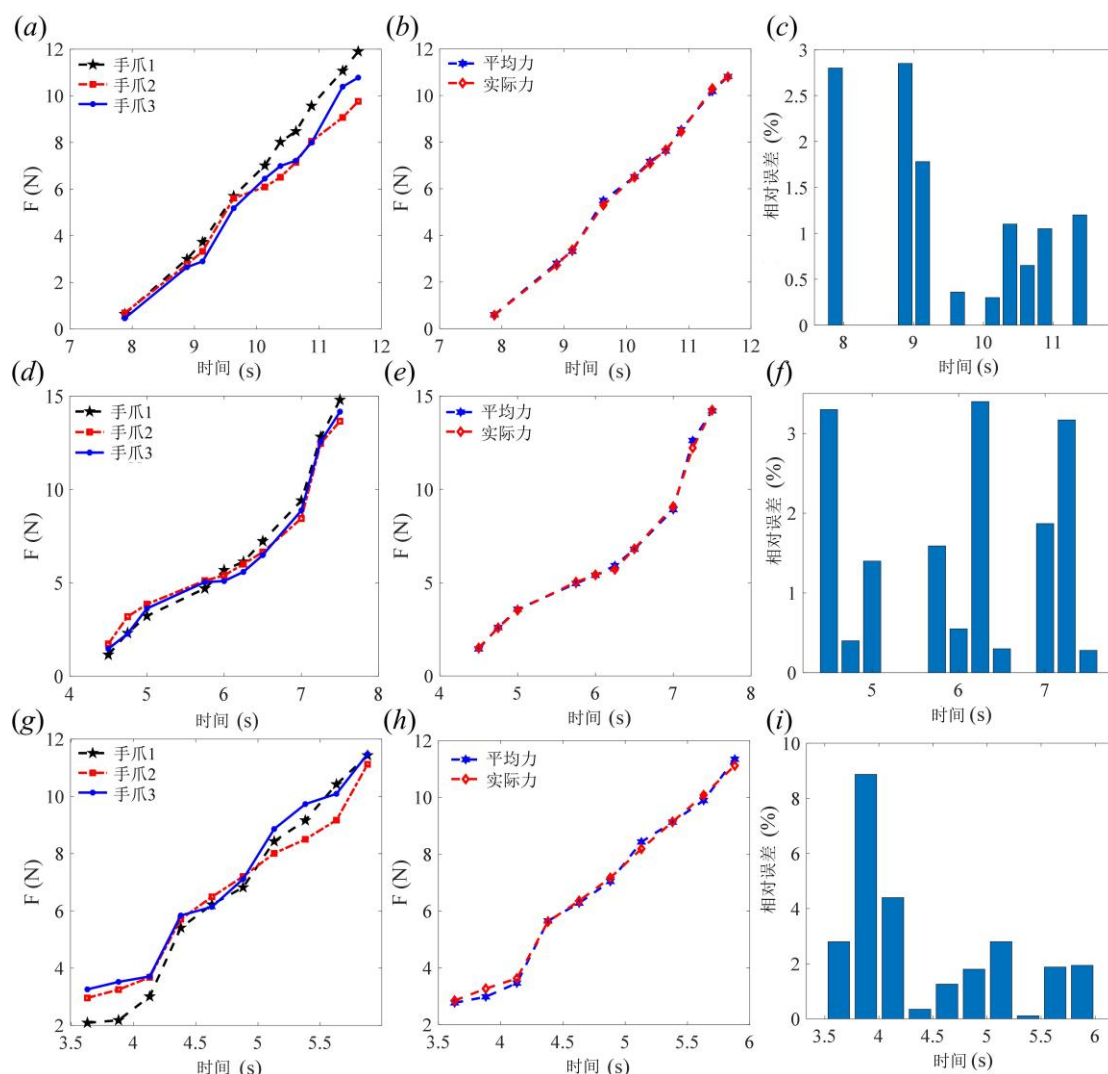


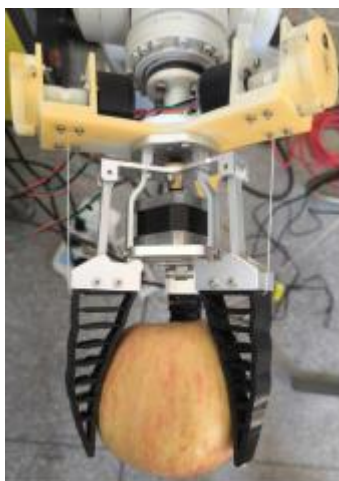
图 3-10 实验测试结果（直径 100mm）：

(a) 节点 11 抓取力，(b) 节点 11 抓取力平均值与实际抓取力，(c) 节点 11 抓取力误差，(d) 节点 13 抓取力，(e) 节点 13 抓取力平均值与实际抓取力，(f) 节点 13 抓取力误差，(g) 节点 14 抓取力，(h) 节点 14 抓取力平均值与实际抓取力，(i) 节点 14 抓取力误差

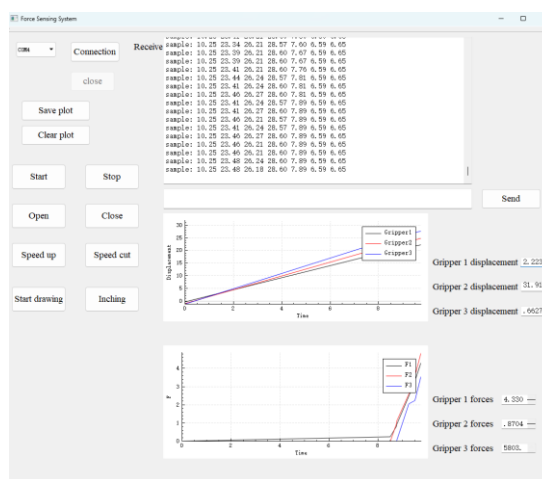
结果表明手指部分在末尾阶段时力感知的绝对误差较大,在初始阶段时相对误差较大。可以看出中间阶段的绝对误差较小,中间阶段力感知效果比初始阶段与末尾阶段更好。

绳驱动力感知柔性手爪对不同直径的抓取物在不同节点处进行抓取,在下位机中进行数据的采集与处理,在上位机中展示,通过力感知策略进行力感知的平均误差在 2.3%左右,可以看出在节点 $i=11$ 处进行抓取时三个手指部分之间的绝对误差小,同时可以看出,在抓取的中间阶段力感知效果最好。结果表明,绳驱动力感知柔性手爪进行力感知的误差在可接受范围内,验证了力感知装置的可行性、有效性。

基于性能验证,使用绳驱动力感知柔性手爪抓取不同物体,验证其抓取不同物体的能力,如下图 3-11 到图 3-14 所示,绳驱动力感知柔性手爪分别抓取不同的物体,并检测抓取过程中的抓取力。结果表明,本章所设计的绳驱动力感知柔性手爪可以用于抓取不同类型物体,并进行力感知。



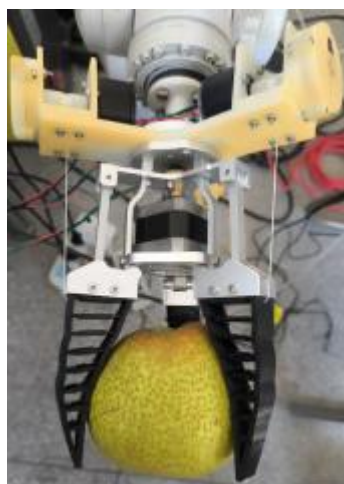
(a)



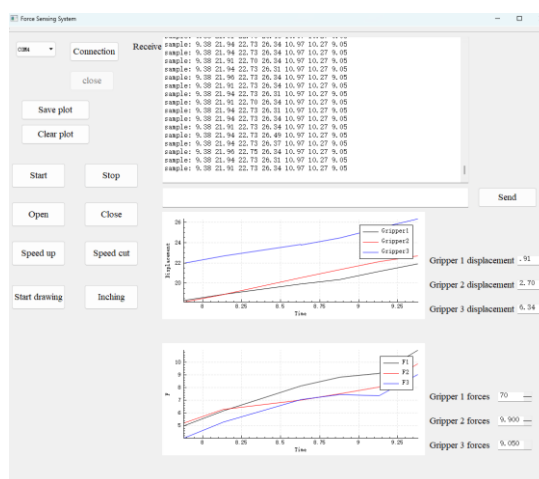
(b)

图 3-11 绳驱动力感知柔性手爪抓取苹果:

(a) 抓取苹果展示, (b) 上位机结果展示



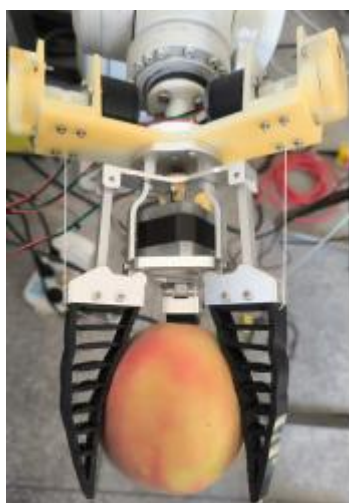
(a)



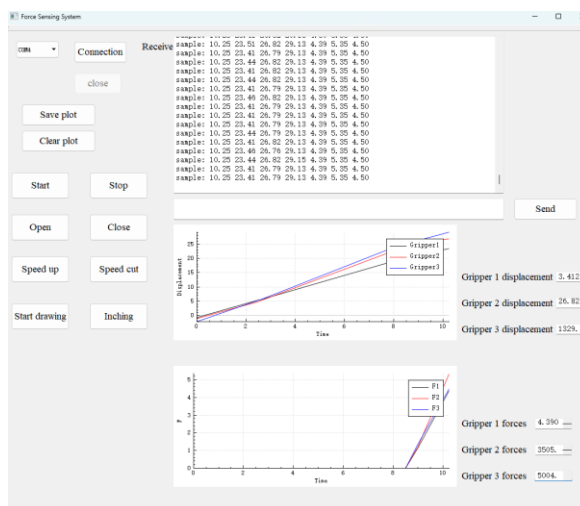
(b)

图 3-12 绳驱动力感知柔性手爪抓取梨:

(a) 抓取梨展示, (b) 上位机结果展示



(a)



(b)

图 3-13 绳驱动力感知柔性手爪抓取桃:

(a) 柔性手爪抓取桃展示, (b) 上位机结果展示

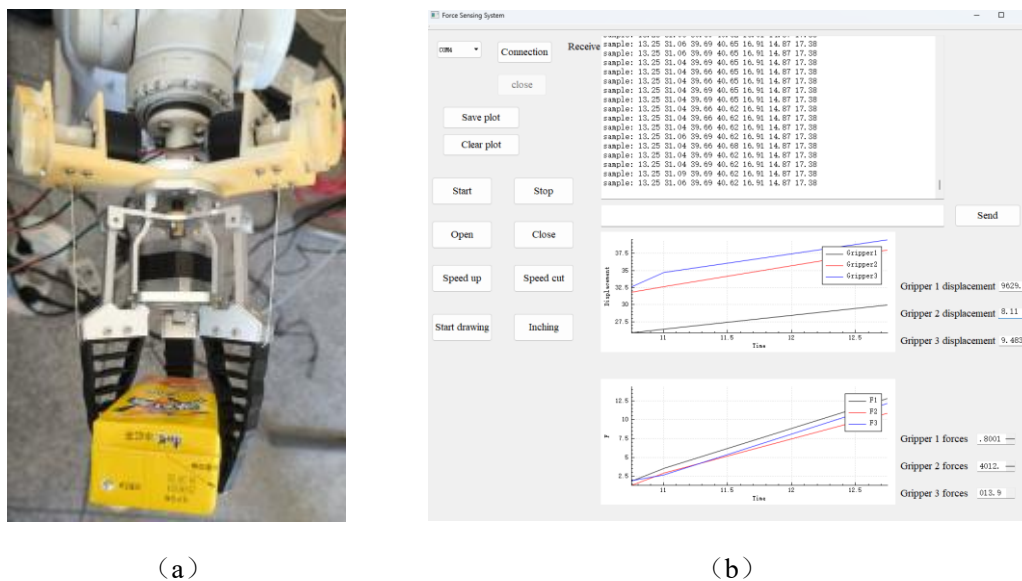


图 3-14 绳驱动力感知柔性手爪抓取饮料：

(a) 柔性手爪抓取饮料展示，(b) 上位机结果展示

3.6 本章小结

本章根据柔性手爪抓取力感知策略的功能需求，设计研制绳驱动力感知柔性手爪，搭建绳驱动力感知柔性手爪控制系统，制作了实验样机，搭建了绳驱动力感知柔性手爪实验系统，实验结果表明，绳驱动力感知柔性手爪通过力感知策略进行力感知的平均误差在 2.3% 左右，能够实现力感知功能。

第4章 绳驱动力感知柔性手爪恒力控制

4.1 引言

上一章对绳驱动力感知柔性手爪进行了设计与样机研制,并通过实验验证了绳驱动力感知柔性手爪的力感知功能。为了进一步符合在实际生产和使用过程中,本章在上一章的绳驱动力感知柔性手爪的控制系统的基础上,设计绳驱动力感知柔性手爪恒力控制策略,实现柔性手爪抓取过程的恒力控制及扰动自适应恒力控制,搭建绳驱动力感知柔性手爪恒力控制实验系统,进行恒力抓取实验与扰动自适应恒力控制实验,为绳驱动力感知柔性手爪完成实际抓取任务奠定基础。

4.2 绳驱动力感知柔性手爪恒力控制策略

4.2.1 恒力输出控制策略

根据第二章的柔性手爪力感知算法,结合第三章的绳驱动力感知柔性手爪的控制系统,设计了绳驱动力感知柔性手爪恒力控制策略,实现绳驱动力感知柔性手爪恒力控制功能。

如图 4-1 所示,绳驱动力感知柔性手爪恒力控制流程为:首先在控制系统中设置所希望输出的恒力(期望力),然后通过上位机控制绳驱动力感知柔性手爪抓取物体;当绳驱动力感知柔性手爪接触物体后,保持持续抓取,通过控制系统得到实时的抓取力,直到抓取力等于期望力,停止抓取。

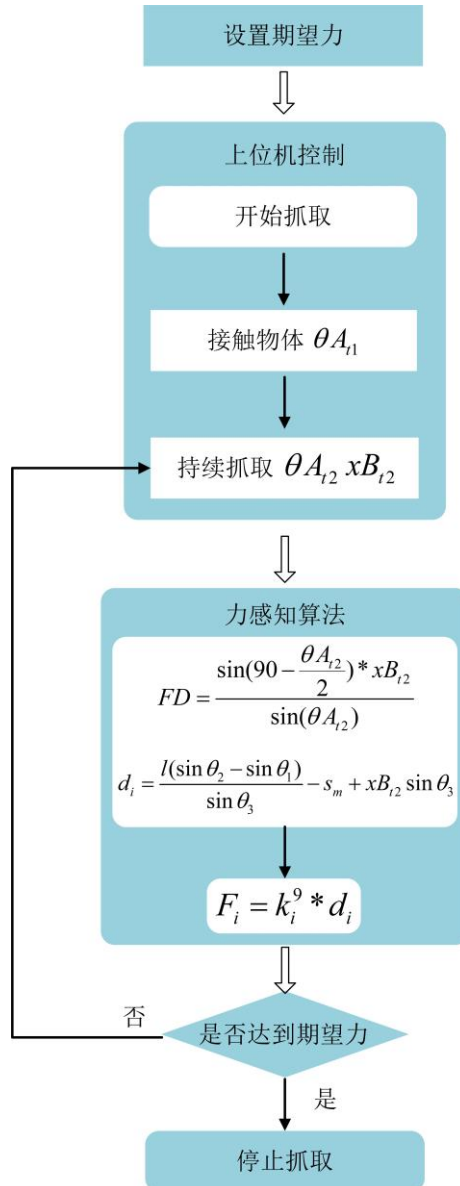


图 4-1 绳驱动力感知柔性手爪恒力控制流程图

4.2.2 扰动自适应恒力控制策略

实际的生产应用中，柔性手爪在抓取物体时，存在达到期望力也无法抓取物体的现象，这时物体与绳驱动力感知柔性手爪之间产生相对滑动，会导致抓取失败，所以针对此问题设计了绳驱动力感知柔性手爪扰动自适应恒力控制策略。

如图 4-2 所示，绳驱动力感知柔性手爪扰动自适应恒力控制流程为：机器人拉动物体，当抓取力达到期望力且物体被拉动则结束抓取，当抓取力达到期望力但物体没有被拉动，且导致手指部分与物体接触的位置产生变化，当检测到物体与柔性手爪之间存在相对滑动时，根据内置在下位机中的算法，重新进行节点判

断，此时节点减小，会导致抓取力小于期望力，柔性手爪再次持续进行抓取，直到抓取力再次等于期望力，停止抓取，如果拉动物体则结束抓取，如果未拉动物体，则重复上述的流程，直到物体被拉动，完成抓取，输出抓取力。

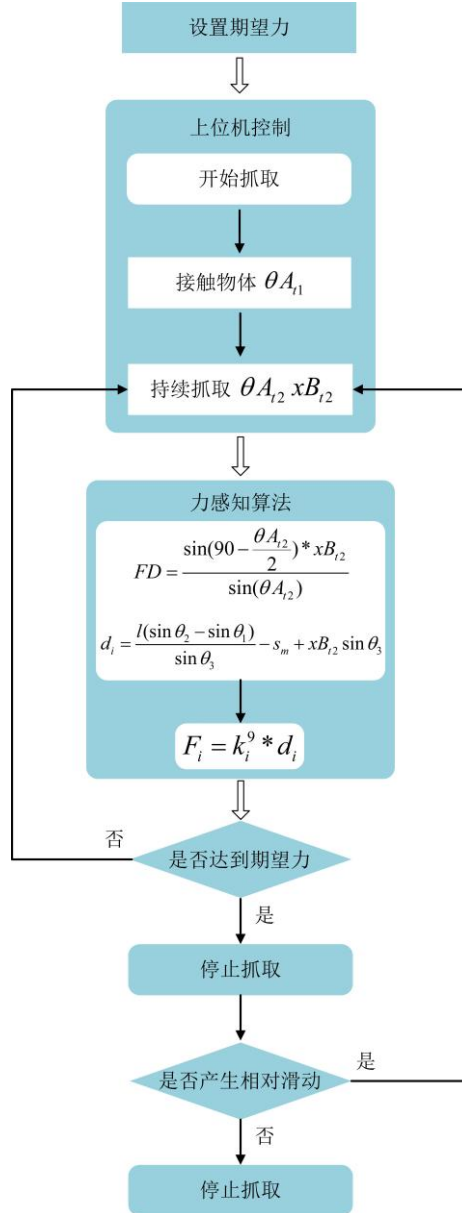


图 4-2 柔性手爪扰动自适应恒力控制流程图

4.3 实验验证

4.3.1 实验系统搭建

如图 4-3 所示，基于研制的绳驱动力感知柔性手爪，搭建了绳驱动力感知柔性手爪恒力控制实验系统。实验系统包括绳驱动力感知柔性手爪、角度传感器、

数据采集卡、两个模拟量放大器、拉力传感器，由 LABVIEW 软件搭建的上位机、STM32 作为控制核心搭建的下位机以及集成力传感器的抓取物体模拟装置，使用树脂材料以及 TPU 材料通过 3D 打印分别制作了绳驱动力感知柔性手爪力感知单元以及手指部分，其中力感知单元与手指部分通过绳连接。

本文采用 LABVIEW 软件搭建柔性手爪恒力控制上位机，具有控制下位机运动、获取下位机数据并存储、获取拉力传感器、压力传感器数据以及画图展示的功能，本文采用 STM32 单片机作为控制核心搭建下位机，与绳驱动力感知柔性手爪、柔性手爪恒力控制上位机通信，具有接受柔性手爪恒力控制上位机信号并解析、接受力感知单元信号并处理以及输出信号控制柔性手爪的功能。将上述的力感知算法编写为程序，内置在下位机中，其中端部位移由带有 GRM 角度传感器的力感知单元测量得到，当绳驱动力感知柔性手爪抓取物体时，力感知单元获取到端部的位移，传输到下位机中，并通过内置的力感知算法程序得到接触点所受的外力，然后将位移数据以及所受外力数据上传到上位机中画图展示并存储，压力传感器与拉力传感器连接模拟量放大器通过数据采集卡与柔性手爪恒力控制上位机连接，将力数据直接传输到柔性手爪恒力控制上位机中，并在柔性手爪恒力控制上位机中与柔性手爪的感知力在一张画布中展示。

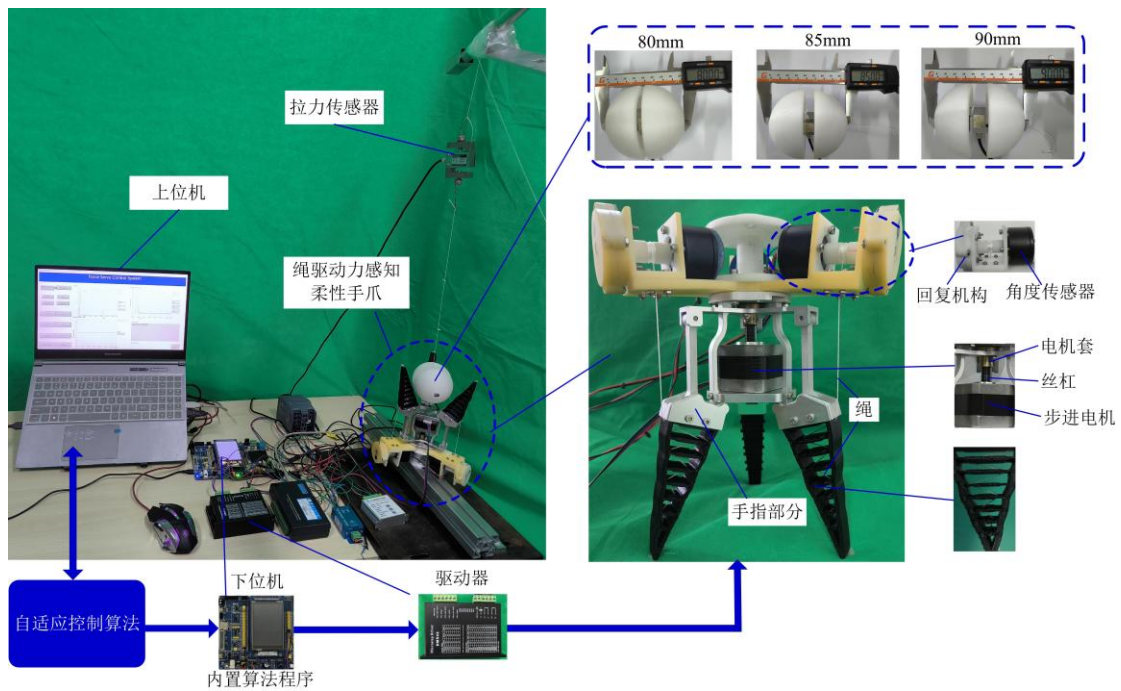


图 4-3 绳驱动力感知柔性手爪恒力控制实验系统

4.3.2 硬件选型

将实验系统搭建完成后，由于大部分硬件器件与上文中的器件相同，此处只针对不同的器件进行介绍，具体如下：

拉力传感器与模拟量放大器：实验所用的拉力传感器由蚌埠市大洋传感系统工程有限公司生产，型号为 DYLY-103，具有抗偏载、精度高、强度好、安装方便以及拉压输出对称性好等特点，传感器的力测量范围为 0~100N，并且它的非线性误差仅 0.03%FS，模拟量放大器由蚌埠市大洋传感系统工程有限公司生产，型号为 DY500，其输出电压为 0~10V，如图 4-4 所示。



图 4-4 拉力传感器与模拟量放大器

球形被抓取物：根据实验要求，由于要验证当物体与柔性手爪产生滑动时的柔性手爪自适应恒力控制功能，所以采用树脂材料通过 3D 打印制作了球形被抓取物，如图 4-5 所示。其内部安放由上文提到的压力传感器，型号为 HZC-MS3，其与上文提到的型号为 DY510 的模拟量放大器连接。



图 4-5 不同直径的球形被抓取物

4.3.3 软件设计

(1) 柔性手爪恒力控制上位机设计

为了实现柔性手爪的力感知伺服控制功能，必须实现柔性手爪恒力控制上位机与下位机的通信功能以及传感器数据采集功能。采用 LABVIEW 软件搭建柔性手爪恒力控制上位机，使用串口通信以及连接数据采集卡，解决通信以及传感器数据采集问题。

柔性手爪恒力控制上位机在搭建串口通信的程序以及传感器数据采集的程序后，对上位机的 UI 界面进行设计，采用三张画布分别对其端部的位移、抓取力感知结果以及接触节点结果进行展示，同时设计部分按钮用来控制单片机，进而控制柔性手爪开合抓取，具体上位机界面如下图 4-6 所示。

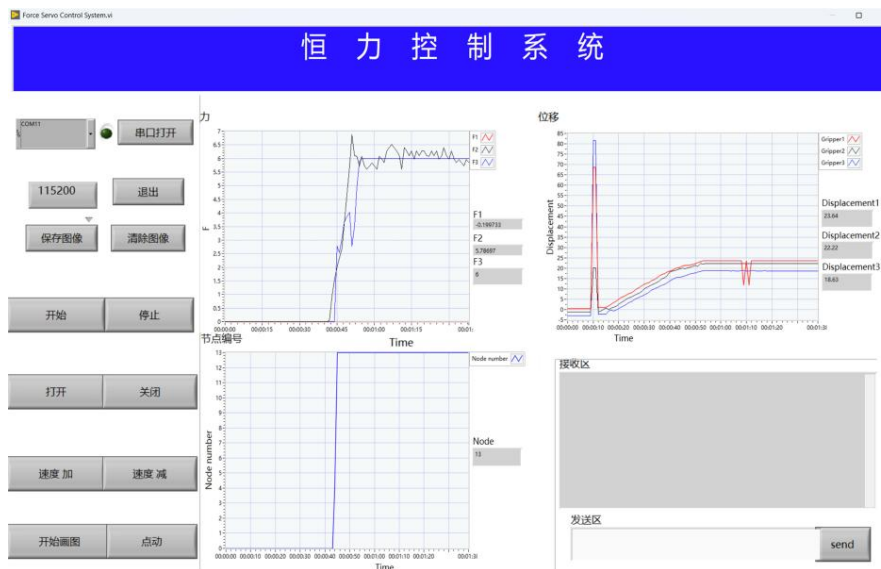


图 4-6 柔性手爪恒力控制上位机界面

(2) 下位机程序设计

为了实现绳驱动力感知柔性手爪的扰动自适应恒力控制功能，在下位机中搭建扰动自适应恒力控制程序。由于下位机是以 STM32 为控制核心，所以程序在 KEIL 软件中编写，在上文所提到的柔性手爪力感知算法程序中，添加扰动自适应算法程序，基于在不同状态下角度传感器的输出干扰不同的现象，对柔性手爪是否与物体产生相对滑动的情况进行判断，并将结果输出，完成扰动自适应程序的编写，用于检测绳驱动力感知柔性手爪与物体产生的相对滑动。在绳驱动力感知柔性手爪抓取力达到期望力时，如果绳驱动力感知柔性手爪未能完成抓取作业，则通过扰动自适应程序判断是否产生滑动，当产生滑动时，通过力感知算法程序再次对接触节点进行判断，使绳驱动力感知柔性手爪再次抓取物体直到达到期望力。

4.3.4 恒力控制性能测试

基于搭建的绳驱动力感知柔性手爪恒力控制实验系统，对绳驱动力感知柔性手爪在不同节点处抓取不同直径物体的恒力控制进行了实验验证。选取三种不同

直径物体分别在节点 $i=11$ 、 $i=12$ 、 $i=13$ 和 $i=14$ 进行恒力控制实验。

如图 4-7 所示，绳驱动力感知柔性手爪分别在节点 $i=11$ 、 $i=12$ 、 $i=13$ 和 $i=14$ 抓取 $d=80\text{mm}$ 直径的物体的恒力控制结果展示。其中 (a)、(b)、(c) 和 (d) 分别为柔性手爪在节点 $i=11$ 、 $i=12$ 、 $i=13$ 和 $i=14$ 抓取直径 $d=80\text{mm}$ 物体的柔性手爪感知力与传感器测量力的对比图。结果表明，柔性手爪感知力与传感器测量力的变化趋势一致，但由于力传感器在实时测量时的数据为峰值，数值偏大，导致柔性手爪与力传感器在初始阶段曲线不重合，误差较大，但在抓取力稳定阶段曲线重合，精度较高，且传感器测量力在柔性手爪感知力附近波动。可以看出，绳驱动力感知柔性手爪进行恒力控制抓取时，在抓取完成阶段效果更好。

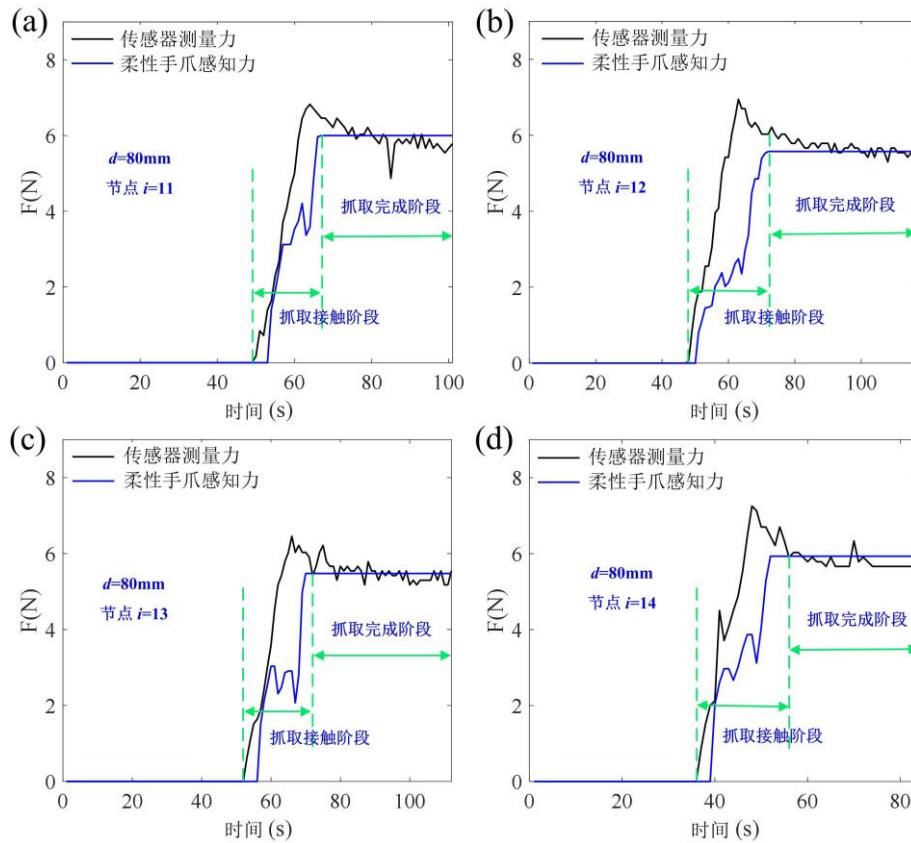


图 4-7 80mm 抓取物在不同节点的恒力抓取

如图 4-8 所示，绳驱动力感知柔性手爪分别在节点 $i=11$ 、 $i=12$ 、 $i=13$ 和 $i=14$ 抓取 $d=85\text{mm}$ 直径的物体的恒力控制结果展示。其中 (a) 为柔性手爪在节点 $i=11$ 抓取直径 $d=85\text{mm}$ 物体的柔性手爪感知力与传感器测量力的对比图，(b) 为柔性手爪在节点 $i=12$ 抓取直径 $d=85\text{mm}$ 物体的柔性手爪感知力与传感器测量力的对比图，(c) 为柔性手爪在节点 $i=13$ 抓取直径 $d=85\text{mm}$ 物体的柔性手爪感知力

与传感器测量力的对比图，(d)为柔性手爪在节点 $i=14$ 抓取直径 $d=85\text{mm}$ 物体的柔性手爪感知力与传感器测量力的对比图。可以看出，柔性手爪感知力与传感器的测量力的曲线变化趋势一致，绳驱动力感知柔性手爪进行恒力控制抓取时，在抓取完成阶段效果更好。

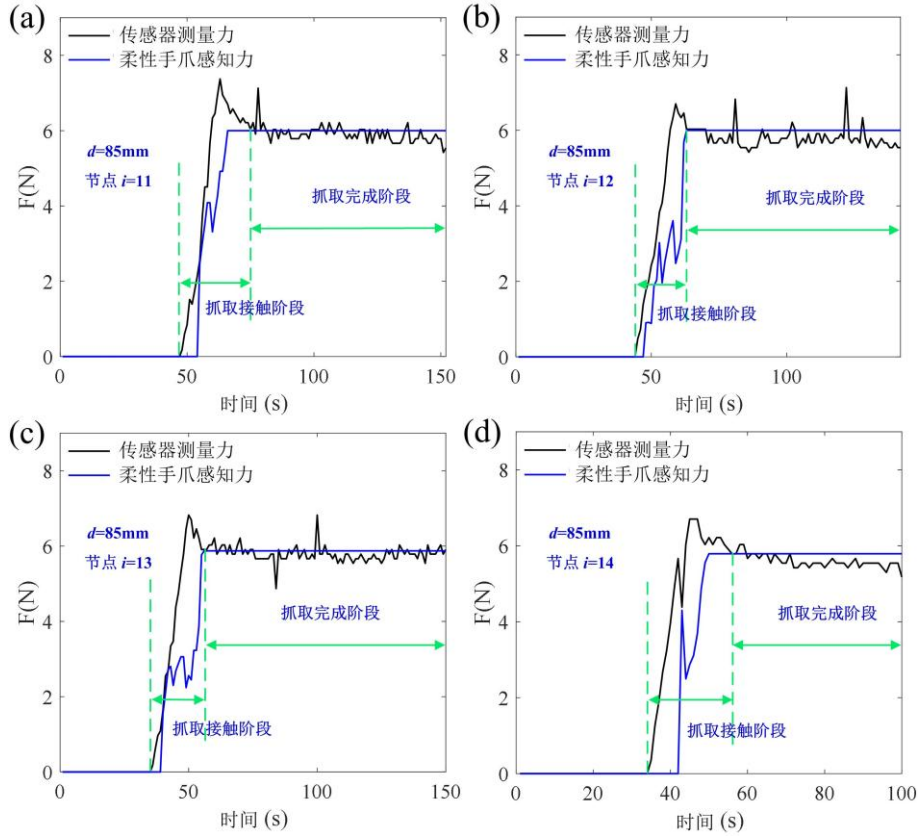


图 4-8 85mm 抓取物在不同节点的恒力抓取

如图 4-9 所示，绳驱动力感知柔性手爪分别在节点 $i=11$ 、 $i=12$ 、 $i=13$ 和 $i=14$ 抓取 $d=90\text{mm}$ 直径的物体的恒力控制结果展示。其中柔性手爪分别在节点 $i=11$ 、 $i=12$ 、 $i=13$ 和 $i=14$ 抓取直径 $d=90\text{mm}$ 物体的柔性手爪感知力与传感器测量力的对比图为 (a)、(b)、(c) 和 (d)。结果表明，在抓取完成阶段效果优于初始实时力感知阶段，当传感器的测量力稳定时，曲线重合，且柔性手爪感知力与传感器的测量力的变化趋势一致，绳驱动力感知柔性手爪可以实现抓取力的恒力控制。

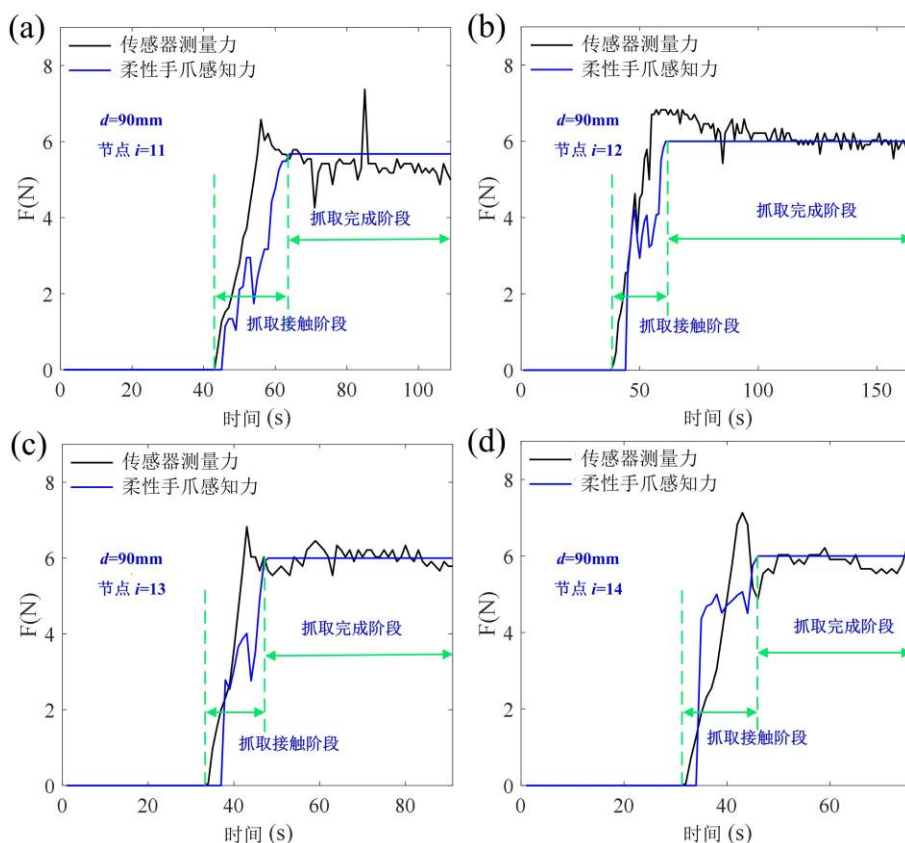


图 4-9 90mm 抓取物在不同节点的恒力抓取

4.3.5 扰动自适应恒力控制性能测试

在搭建的控制系统的基础上,添加如图 4-2 所示的扰动自适应恒力控制策略,绳驱动力感知柔性手爪安装在平台上抓取悬挂的物体时,当绳驱动力感知柔性手爪的抓取力达到预期力时,停止抓取;当物体受到外界扰动与绳驱动力感知柔性手爪接触面之间产生相对滑移时,绳驱动力感知柔性手爪与物体的接触节点发生变化,力感知单元检测到抓取力发生变化(减小),通过扰动自适应恒力控制算法,绳驱动力感知柔性手爪调节抓取力达到预期力时停止,完成物体的稳定抓取。

如图 4-10 所示,在 6N 期望力下,绳驱动力感知柔性手爪分别在起始为节点 13 处抓取 $d=80\text{mm}$ 、 $d=85\text{mm}$ 、 $d=90\text{mm}$ 的物体,进行扰动自适应恒力控制。当绳驱动力感知柔性手爪抓取力达到期望力时停止,然后拉动物体,拉力为最大值前后,由于物体与绳驱动力感知柔性手爪产生了相对移动,此时节点减小,柔性手爪感知力与传感器测量力同时变小,绳驱动力感知柔性手爪再次抓取物体,直到抓取力达到期望力时停止。其中 (a)、(d) 为绳驱动力感知柔性手爪抓取直径 $d=80\text{mm}$ 物体时进行扰动自适应恒力控制的拉力、柔性手爪感知力与传感器

测量力的对比图以及节点变化图，(b)、(e)为绳驱动力感知柔性手爪抓取直径 $d=85\text{mm}$ 物体时进行扰动自适应恒力控制的拉力、柔性手爪感知力与传感器测量力的对比图以及节点变化图，(c)、(f)为绳驱动力感知柔性手爪抓取直径 $d=90\text{mm}$ 物体时进行扰动自适应恒力控制的拉力、柔性手爪感知力与传感器测量力对比图以及节点变化图。可以看出在拉力为最大值前后，节点减小，柔性手爪感知力与传感器测量力的变化趋势一致，在抓取稳定阶段传感器测量力在柔性手爪感知力附近波动，抓取完成阶段效果最好。

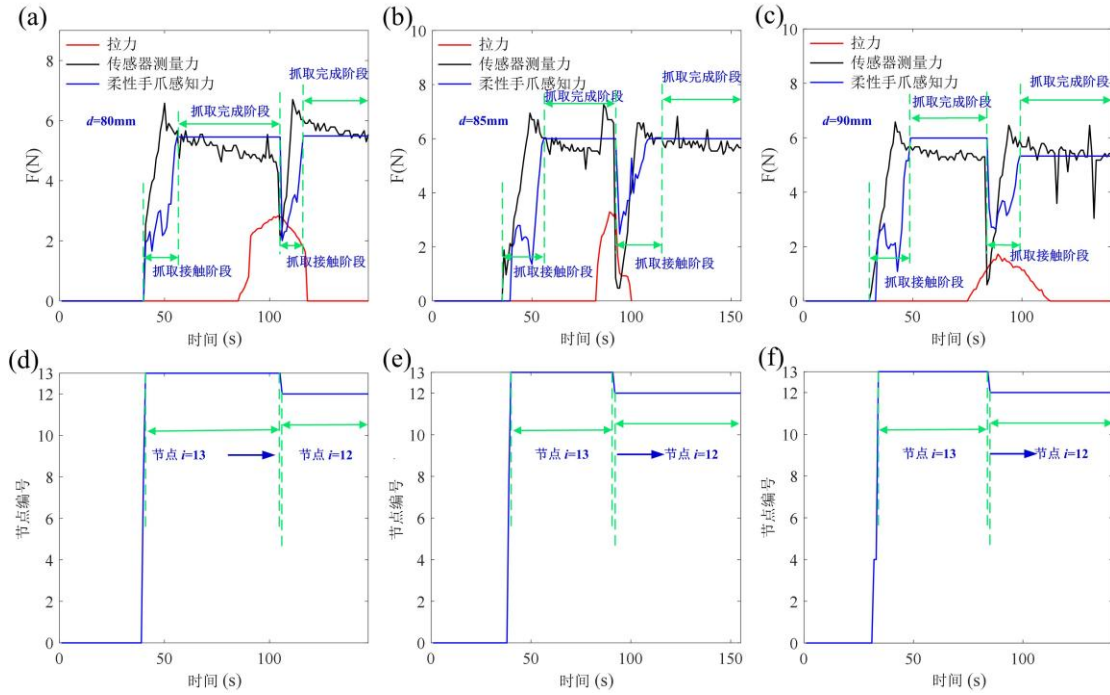


图 4-10 力伺服自适应控制结果

如图 4-11 所示，设置 $F_d=4\text{N}$ 、 $F_d=5\text{N}$ 和 $F_d=6\text{N}$ 期望力，绳驱动力感知柔性手爪抓取直径 $d=85\text{mm}$ 物体，进行扰动自适应恒力控制。其中 (a)、(d) 分别为期望力为 $F_d=4\text{N}$ 时绳驱动力感知柔性手爪抓取物体，得到的拉力、柔性手爪感知力与传感器测量力的关系及对应的节点变化图，(b)、(e) 分别为期望力为 $F_d=5\text{N}$ 时，绳驱动力感知柔性手爪抓取直径 $d=85\text{mm}$ 物体，得到的拉力、柔性手爪感知力与传感器测量力的关系及对应的节点变化图，(c)、(f) 分别为期望力为 $F_d=6\text{N}$ 时，绳驱动力感知柔性手爪抓取直径 $d=85\text{mm}$ 物体，得到的拉力、柔性手爪感知力与传感器测量力的关系及对应的节点变化图。可以看出，当期望力不同时，柔性手爪感知力与传感器测量力的变化趋势一致，且在期望力附近波动，在抓取稳定阶段柔性手爪感知力与传感器测量力曲线重合。结果表明，

绳驱动力感知柔性手爪可以实现不同期望力的扰动自适应恒力控制,且在抓取稳定阶段效果最好。

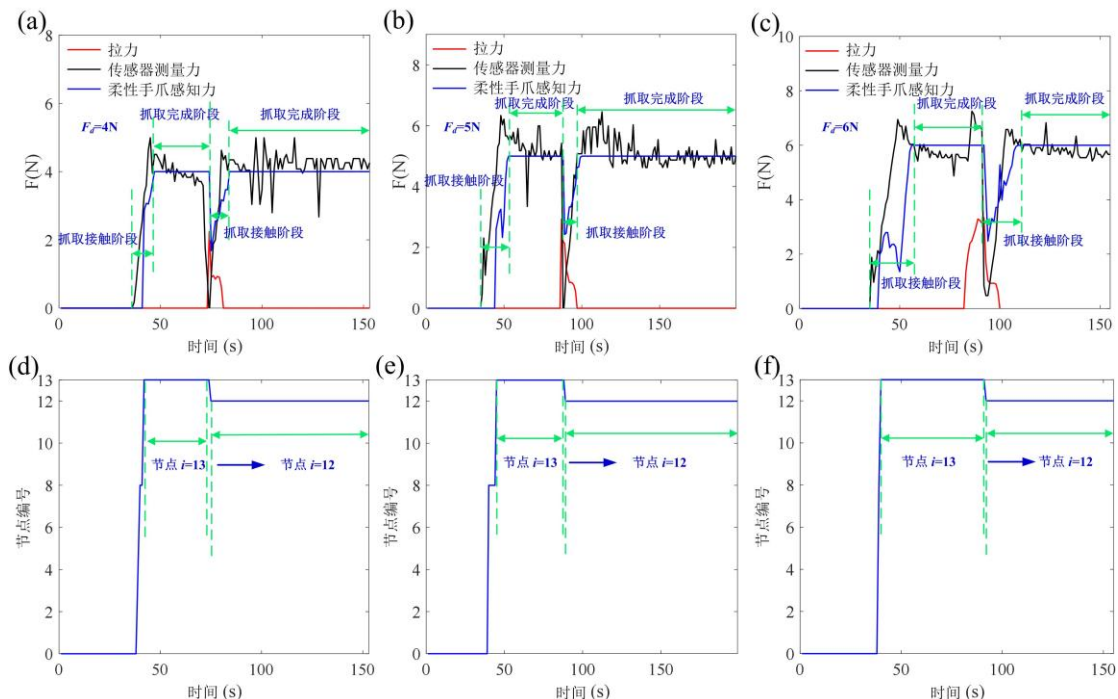


图 4-11 不同期望力下力伺服自适应控制结果

4.4 本章小结

本章针对绳驱动力感知柔性手爪的自适应控制功能,设计了绳驱动力感知柔性手爪恒力输出控制策略,可以实现抓取力恒力输出控制功能;设计了绳驱动力感知柔性手爪扰动自适应恒力控制策略,能够实现当绳驱动力感知柔性手爪抓取物体,与物体产生相对滑动时,进行滑动检测以及扰动自适应恒力控制功能;搭建了绳驱动力感知柔性手爪恒力控制实验系统,分别在节点 $i=11$ 、 $i=12$ 、 $i=13$ 和 $i=14$ 处,抓取三种不同直径物体,并进行恒力抓取实验与扰动自适应恒力控制实验,验证了绳驱动力感知柔性手爪具备恒力输出控制功能以及扰动自适应恒力控制功能。

第五章 绳驱动力感知柔性手爪实验研究

5.1 引言

第四章对绳驱动力感知柔性手爪的恒力控制功能以及扰动自适应恒力控制功能进行验证。在此基础上,本章将研制的绳驱动力感知柔性手爪安装在机器人末端搭建机器人柔性抓取实验系统,模拟实际抓取物体的情况,对绳驱动力感知柔性手爪的抓取功能进行功能测试实验和实际应用实验,验证了绳驱动力感知柔性手爪对不同物体具有良好的抓取能力以及自适应恒力控制功能。

5.2 功能测试实验

抓取承载力作为衡量柔性手爪功能的重要指标,是一个柔性手爪工作范围的重要体现,通过绳驱动力感知柔性手爪抓取不同材质、不同形状、不同尺寸的物体,以被抓取物体悬空超过 30 秒且不产生相对滑动视为抓取成功,验证柔性手爪的抓取功能。

5.2.1 实验系统搭建

上文中已经进行了绳驱动力感知柔性手爪的自适应控制研究,为了衡量绳驱动力感知柔性手爪实际使用功能,需要对抓取功能进行验证,搭建了绳驱动力感知柔性手爪抓取功能测试实验系统,如图 5-1 所示。实验系统包括协作机器人、基于 STM32 的控制系统、驱动器以及绳驱动力感知柔性手爪。

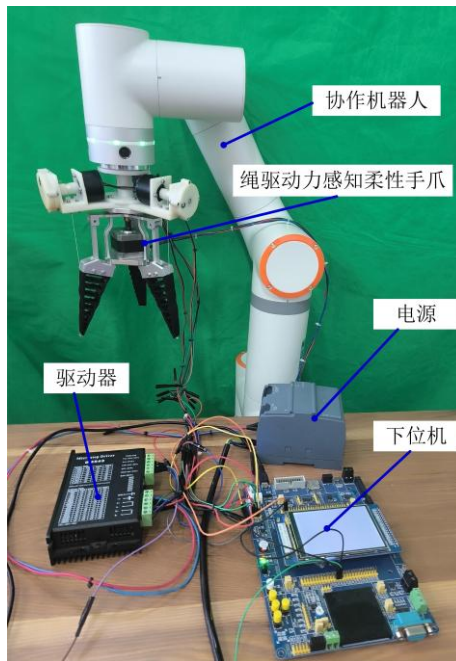


图 5-1 功能测试实验系统

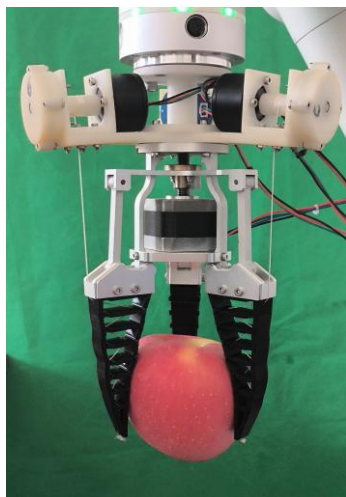
5.2.2 硬件选型

将实验系统搭建完成后，可以看出，大部分硬件器件与上文中的器件相同，此处对不同的器件进行介绍，具体如下：

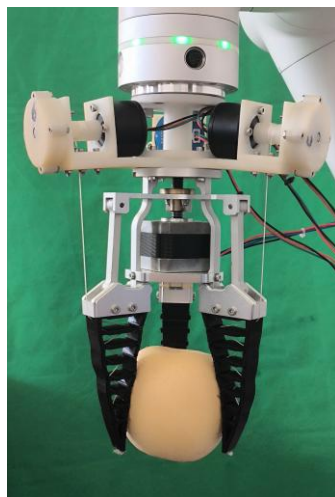
协作机器人：实验所用的协作机器人是法奥意威（苏州）机器人系统有限公司生产的 FR3 协作机器人，其有效负载为 3kg，工作半径为 622mm，重复定位精度为正负 0.02mm，本体质量为 15KG。协作机器人采用自研的实时控制系统，具备卓越的工业级精度、稳定性，自带网页上位机，采用图形化编程、零力示教、多轴联动，可以适用于各种应用环境，支持 ROS 二次开发，支持多种通讯协议方式。

5.2.3 实验验证

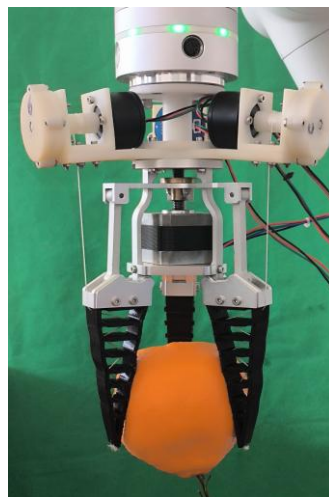
基于搭建的功能测试实验系统，使用绳驱动力感知柔性手爪抓取不同材质、不同形状、不同尺寸的物体，对其抓取性能进行验证。选取多种物体进行抓取，以被抓取物悬空 30 秒视为抓取成功。具体包括：苹果、纸、饮料、订书机等，如图 5-2 所示，展示了绳驱动力感知柔性手爪抓取的多种物体，各类物体的具体质量如表 5-1 所示。



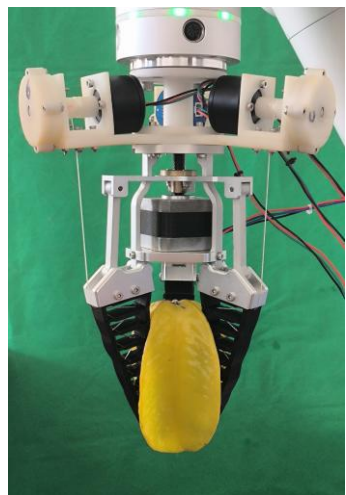
苹果



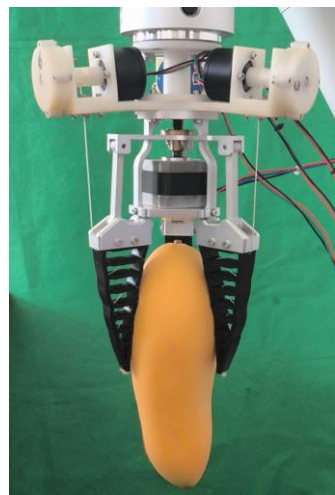
梨



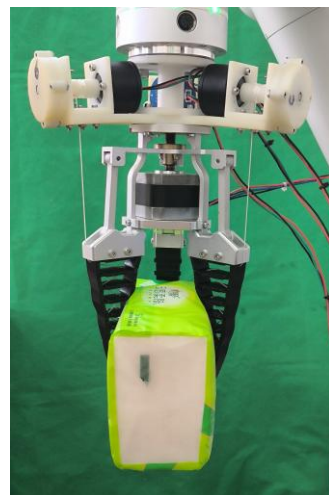
柑橘



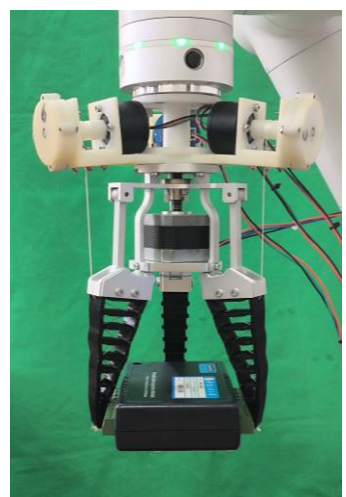
杨桃



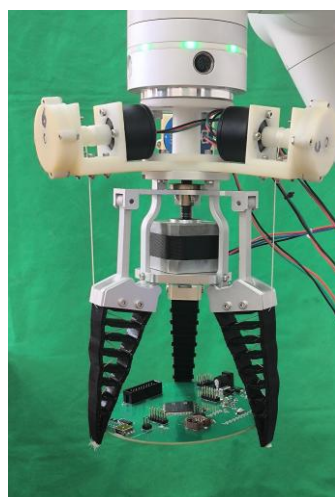
芒果



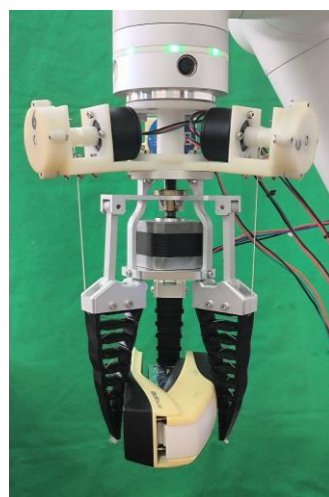
纸



数据采集卡



控制卡



订书机

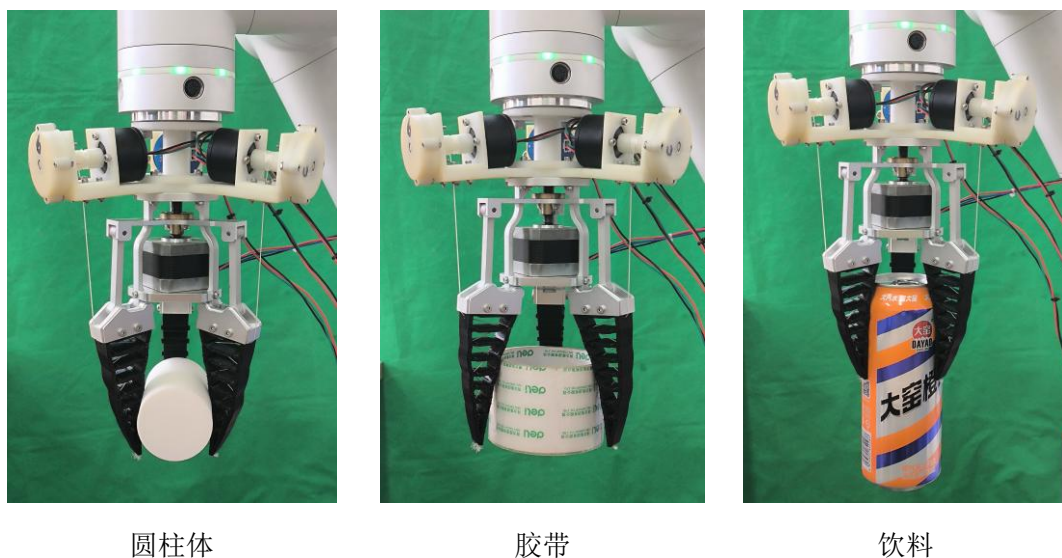


图 5-2 绳驱动力感知柔性手爪部分实物抓取实验

表 5-1 被抓取物体种类及质量

名称	质量 (g)	名称	质量 (g)
苹果	261	数据采集卡	169
梨	269	控制卡	53
柑橘	270	订书机	263
杨桃	121	圆柱体	240
芒果	551	胶带	45
纸	100	饮料	516

在抓取实验中,对上述不同材质、不同形状、不同尺寸的物体进行抓取,针对苹果等水果,绳驱动力感知柔性手爪可以采用包络抓取水果的表面,不破坏水果的表皮;针对圆柱体等表面光滑的物体,绳驱动力感知柔性手爪能够通过自身的防滑设计,加大抓取力实现光滑物体的抓取;针对数据采集卡和订书机等形状相差较大的物体,绳驱动力感知柔性手爪可以通过改变自身的抓取角度,采用三个手指同时抓取,提供支撑力完成抓取。通过对上述不同物体的一系列抓取实验表明,本文设计的绳驱动力感知柔性手爪具有良好的柔顺性和自适应性,在实际抓取过程中,具有较高的实物抓取能力以及稳定性,且在抓取物体的重量方面,也有一定的提升,满足了实际使用的性能要求。

5.3 机器人抓取应用实验

5.3.1 实验系统搭建

在完成绳驱动力感知柔性手爪的抓取功能测试研究后,为了进一步验证绳驱动力感知柔性手爪在实际应用中的功能,搭建了机器人抓取应用实验系统,验证研制的绳驱动力感知柔性手爪的扰动自适应恒力控制抓取应用性能,如图 5-3 所示。实验系统包括协作机器人、基于网页的机器人上位机、基于 LABVIEW 软件的上位机、基于 STM32 的控制系统、数据采集卡、模拟量放大器、拉力传感器、绳驱动力感知柔性手爪以及作为抓取物直径为 92.3mm 的物体。

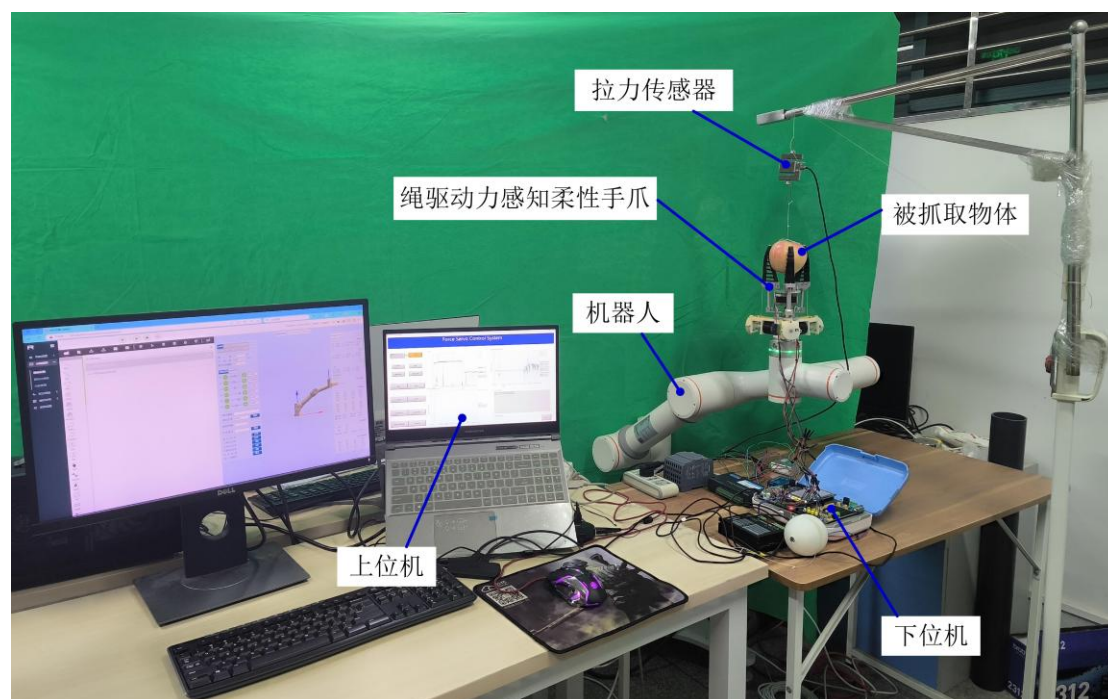


图 5-3 机器人抓取应用实验系统

5.3.2 硬件选型

将实验系统搭建完成后,由于大部分硬件器件与上文中的器件相同,此处对不同的器件进行介绍,具体如下:

为了进行机器人抓取应用实验,机器人需要更大的负载能力,带动绳驱动力感知柔性手爪移动,所以本实验所用的协作机器人是法奥意威(苏州)机器人系统有限公司生产的 FR5 协作机器人,具体参数如下:

表 5-2 FR5 机器人参数

产品名称	协作机器人
产品型号	FR5
负载能力	5KG
工作半径	922mm
本体质量	22KG
额定输入电压	220V/单相/50HZ
额定输出电压	48VDC
输出短路额定值	48V42A

5.3.3 软件设计

使用 FR5 协作机器人实现机器人抓取的功能。机器人上位机为法奥意威公司提供的网页版上位机，具备单轴点动、多轴联动、示教模拟、状态信息输出以及各种外设添加等多种功能了，但要实现机器人抓取功能，需要具备 TCP 通信功能，轨迹输出功能，使用程序示教功能对机器人进行编程。在机器人上位机中通过一定的数据收发格式，实现通过 TCP 通信对机器人位姿调整，发送格式为“/f/bIII52III201III149IIIMoveJ (xxx,xxx,xxx,xxx,xxx,xxx,xxx,xxx,xxx,xxx,xxx,0,0,0,100,180,100,0.000,0.000,0.000,0.000,0,0,0,0,0,0) II”。将数据以发送格式发送给机器人可以实现机器人抓取任务。机器人上位机如下图 5-4 所示。

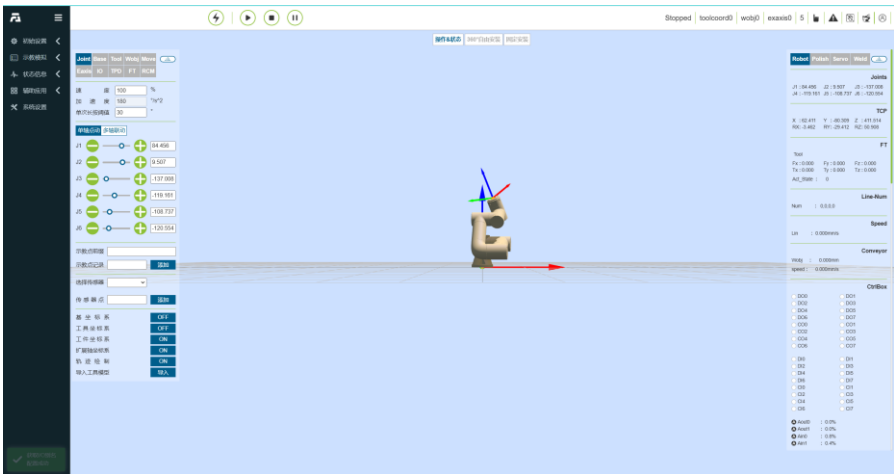


图 5-4 机器人上位机界面

此处采用的上位机为第 4 章中的柔性手爪恒力控制上位机，已在前文介绍过，此处不再多做介绍，具体界面如 5-5 所示。

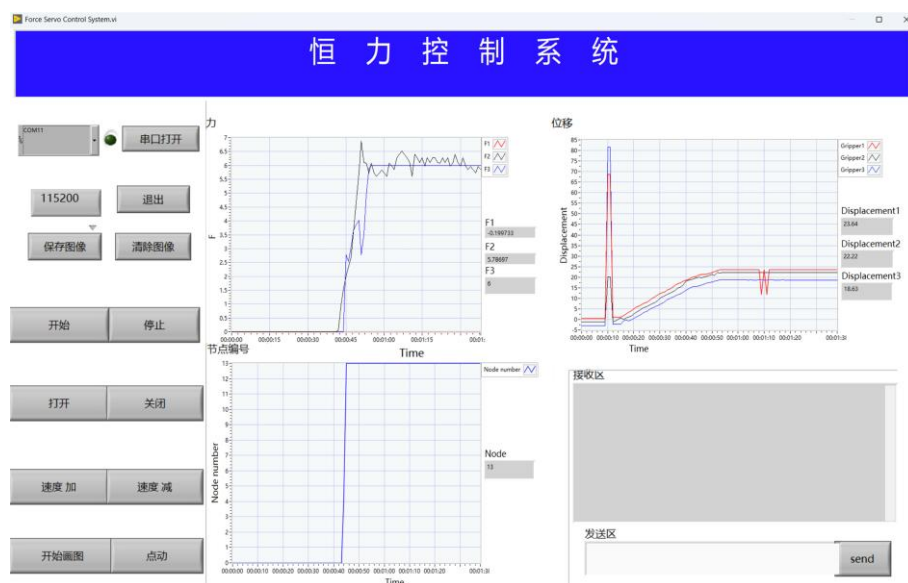


图 5-5 柔性手爪恒力控制上位机界面

5.3.4 实验验证

机器人抓取应用流程如图 5-6 所示，绳驱动力感知柔性手爪安装在协作机器人末端，抓取物体的过程可以分为五个步骤：第一，绳驱动力感知柔性手爪连接在机器人末端，由机器人移动带动绳驱动力感知柔性手爪到被抓取物体的相应位置；第二，绳驱动力感知柔性手爪开始抓取作业，由上位机控制绳驱动力感知柔性手爪开始抓取物体，直到达到设置的期望力；第三，由机器人带动绳驱动力感知柔性手爪向下拉动物体，检测物体与手爪之间是否产生了相对滑动；第四，检测到产生相对滑动时，绳驱动力感知柔性手爪再次抓取物体直到达到再次期望力，停止抓取；第五，由机器人带动绳驱动力感知柔性手爪按照预定好的轨迹将物体运送到指定位置。

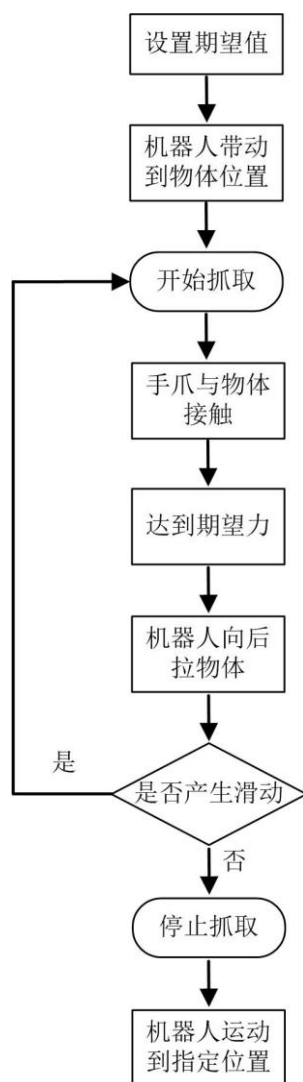


图 5-6 机器人抓取应用流程图

在机器人抓取应用过程中，绳驱动力感知柔性手爪要通过扰动自适应恒力控制抓取物体，具体的抓取过程如图 5-7 所示。首先，绳驱动力感知柔性手爪为完全张开状态；然后，开始与物体接触，进行力感知；其次，持续抓取物体直达到期望力；接着，机器人带动绳驱动力感知柔性手爪向后移动，物体与绳驱动力感知柔性手爪产生相对滑动；最后，绳驱动力感知柔性手爪检测到滑动，再次抓取物体，直达到期望力。

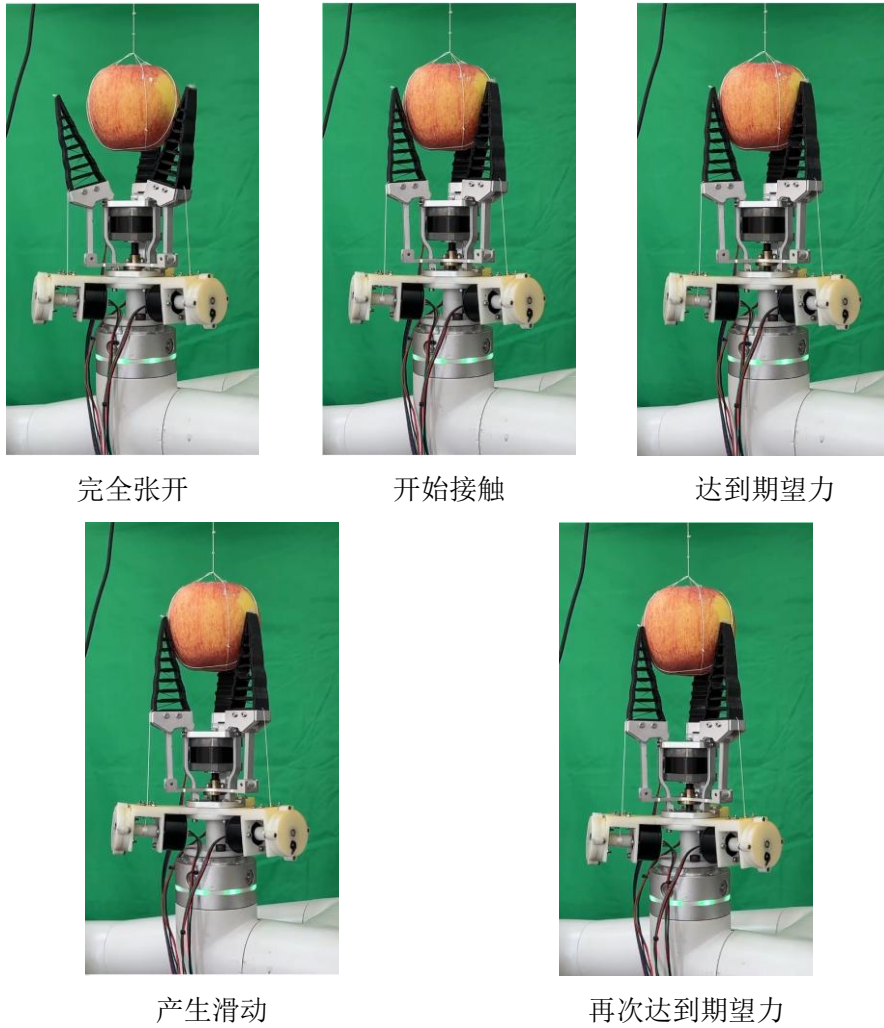


图 5-7 抓取过程图

在明确机器人抓取应用流程与抓取过程后，通过机器人带动绳驱动力感知柔性手爪进行抓取实物的实验，验证其在实际应用中的性能。如图 5-8 所示，绳驱动力感知柔性手爪分别在 $F_d=4\text{N}$ 、 $F_d=5\text{N}$ 和 $F_d=6\text{N}$ 期望力下，抓取苹果，当抓取力达到期望力后，停止抓取，然后使用协作机器人拖动物体，接触节点变化，抓取力减小后，绳驱动力感知柔性手爪再次抓取物体直到再次达到期望力，实现扰动自适应恒力控制，其中 (a)、(d) 为在 $F_d=4\text{N}$ 期望力下抓取物体，得到的拉力与柔性手爪感知力的关系以及对应的节点变化图，(b)、(e) 为在 $F_d=5\text{N}$ 期望力下抓取物体，得到的拉力与柔性手爪感知力的关系以及对应的节点变化图，(c)、(f) 在 $F_d=6\text{N}$ 期望力下抓取物体，得到的拉力与柔性手爪感知力的关系以及对应的节点变化图。

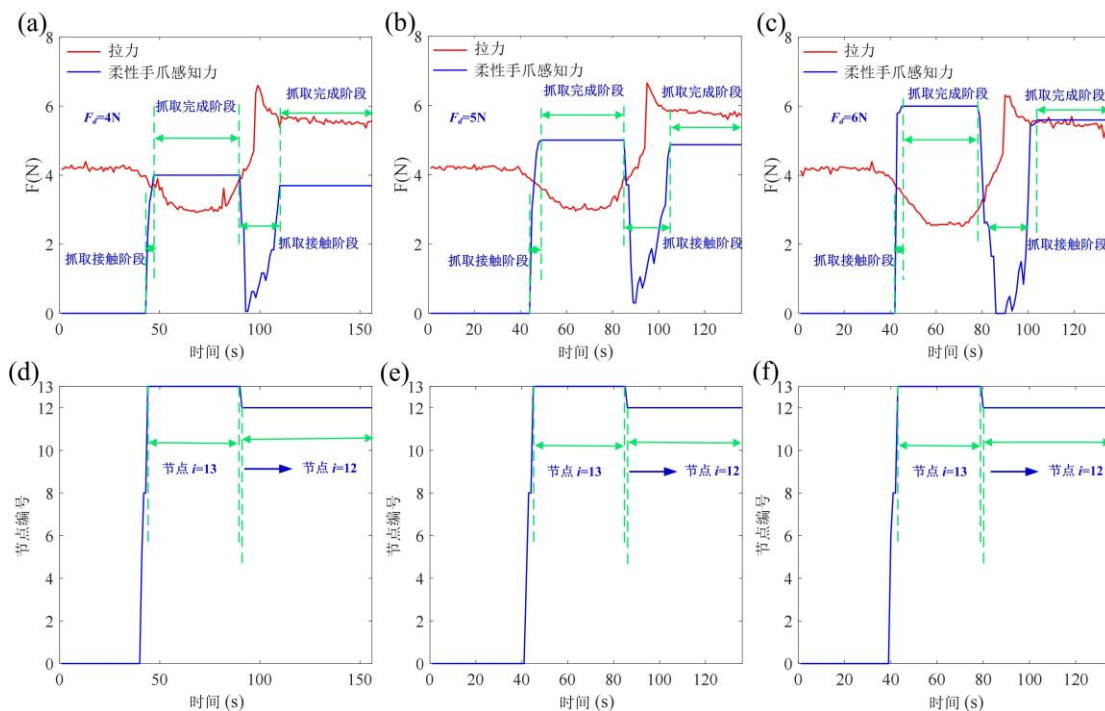


图 5-8 实际应用中不同期望力下抓取物体

实验展示了在绳驱动力感知柔性手爪上进行扰动自适应恒力控制抓取物体的应用。开始时,绳驱动力感知柔性手爪未进行抓取,夹持力为零,当绳驱动力感知柔性手爪抓取物体时,夹持力迅速增大,直到达到设定的预期值时,停止抓取,此时施加一个外部干扰:用机器人拽物体,由于改变了绳驱动力感知柔性手爪的抓取节点,节点减小,此时抓取力与理论力都减小,为了不使物体滑落,绳驱动力感知柔性手爪自动增大夹持力,使得绳驱动力感知柔性手爪的抓取力始终保持恒力,保持抓取状态,直到物体被完全摘下。结果表明,机器人带动绳驱动力感知柔性手爪进行模拟实际的抓取应用实验,可以在物体与绳驱动力感知柔性手爪产生滑动时再次抓取物体,验证了扰动自适应恒力控制功能。

5.4 本章小结

本章对绳驱动力感知柔性手爪进行了功能测试实验,搭建了功能测试实验平台,验证了绳驱动力感知柔性手爪抓取不同材质、不同形状、不同尺寸的物体的能力。结果表明,绳驱动力感知柔性手爪可以实现对各种物品的抓取,具有良好的柔顺性和自适应性;同时为了验证绳驱动力感知柔性手爪在实际应用中的功能,搭建了机器人抓取应用实验系统,对机器人抓取的实际应用性能进行分析,分别

在 $F_d=4\text{N}$ 、 $F_d=5\text{N}$ 和 $F_d=6\text{N}$ 期望力下抓取苹果；通过机器人拖拽模拟真实抓取场景，验证了绳驱动力感知柔性手爪在机器人抓取应用中的扰动自适应恒力控制功能。

第六章 结论与展望

6.1 结论

本文主要分析了柔性手爪力感知策略,设计研制了一种绳驱动的力感知柔性手爪及恒力控制策略,主要结论如下:

(1) 针对鱼鳍型柔性手爪,通过有限元仿真验证了柔性手爪力感知算法,分析了不同隔层、不同接触节点受力下的算法精度,搭建了基于视觉的柔性手爪力感知实验系统。结果表明,设计的柔性手爪力感知算法可以实现柔性手爪抓取接触节点以及抓取力感知。

(2) 在鱼鳍型手爪结构的基础上,设计研制了绳驱动力感知柔性手爪及控制系统,搭建了绳驱动力感知柔性手爪力感知实验系统,分别在节点 $i=11$ 、 $i=13$ 和 $i=14$ 抓取三种不同直径的物体进行抓取力感知实验。结果表明,绳驱动力感知柔性手爪进行力感知的误差在 3% 左右,满足精度要求。

(3) 在验证力感知功能的基础上,设计了绳驱动力感知柔性手爪恒力控制策略以及扰动自适应控制策略,搭建了绳驱动力感知柔性手爪恒力控制实验系统,对绳驱动力感知柔性手爪的恒力输出控制以及扰动自适应恒力控制功能进行验证,分别在节点 $i=11$ 、 $i=12$ 、 $i=13$ 和 $i=14$ 抓取三种不同直径物体进行恒力抓取实验。结果表明,绳驱动力感知柔性手爪可以实现恒力控制功能和扰动自适应恒力控制功能。

(4) 本文搭建了机器人抓取应用实验系统,对绳驱动力感知柔性手爪的抓取性能进行了实验测试,结果表明,本文设计研制的绳驱动力感知柔性手爪可以实现对不同物品的柔性抓取,具有良好的柔顺性和自适应性,验证了绳驱动力感知柔性手爪在机器人抓取应用中的扰动自适应恒力控制功能,为机器人柔性抓取的实际应用提供了一种新的思路。

6.2 展望

本文设计研制了一种绳驱动力感知柔性手爪,研究了绳驱动力感知柔性手爪的恒力控制策略并进行了实验测试验证,然而,本文的研究仍具有较大的改进空

间，后续研究可以在以下方面做进一步的研究工作：

（1）本文提出的力感知算法可以对绳驱动力感知柔性手爪在抓取过程中接触的节点进行判断，但对于不规则物体来说，无法保证绳驱动力感知柔性手爪抓取接触的节点只有一个，可能存在同时接触两个或多个节点的现象存在，对计算结果产生影响，后续可以通过深度学习对绳驱动力感知柔性手爪抓取的物体进行判断，引入节点影响因子，实现不规则物体的力感知功能。

（2）本文在绳驱动力感知柔性手爪力感知程序的基础上，搭建了自适应恒力控制策略，可以实现当物体与绳驱动力感知柔性手爪产生相对滑动时，再次进行恒力控制抓取，但存在仍然无法保证完全完成抓取任务，后续可以对力伺服控制程序进行优化处理，对绳驱动力感知柔性手爪的抓取稳定性进行研究，使绳驱动力感知柔性手爪可以很好的完成抓取任务。

参考文献

- [1] Tang Y, Chen M, Wang C, et al. Recognition and localization methods for vision-based fruit picking robots: a review [J]. *Front Plant Sci*, 2020, 11: 510.
- [2] Zhu Z, Liu Y, Ju J, et al. Design and experimental test of rope-driven force sensing flexible gripper [J]. *Sensors (Basel)*, 2024, 24(19):6407.
- [3] Chen X, Sun Y, Zhang Q, et al. Three-dimension object detection and forward-looking control strategy for non-destructive grasp of thin-skinned fruits [J]. *Applied Soft Computing*, 2024, 150:111082.
- [4] Wei Y, Cai L, Fang H, et al. Fruit recognition and classification based on tactile information of flexible hand [J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2024, 370:115224.
- [5] Wang C, Li C, Han Q, et al. A performance analysis of a litchi picking robot system for actively removing obstructions, using an artificial intelligence algorithm [J]. *Agronomy*, 2023, 13(11):2795.
- [6] Fu M, Guo S, Chen A, et al. Design and experimentation of multi-fruit envelope-cutting kiwifruit picking robot [J]. *Front Plant Sci*, 2024, 15: 1338050.
- [7] Zhang H, Chen B, Li Z, et al. Design and simulation analysis of a reverse flexible harvesting device for fresh corn [J]. *Agriculture*, 2022, 12(11):1953.
- [8] Wang Y, Wu H, Zhu Z, et al. Continuous picking of yellow peaches with recognition and collision-free path [J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2023, 214:108273.
- [9] Gao J, Zhang F, Zhang J, et al. Picking patterns evaluation for cherry tomato robotic harvesting end-effector design [J]. *Biosystems Engineering*, 2024, 239: 1-12:1-12.
- [10] Jo Y, Park Y, Son H I. A suction cup-based soft robotic gripper for cucumber harvesting: Design and validation [J]. *Biosystems Engineering*, 2024, 238: 143-56:143-156.
- [11] Xie B, Jin M, Duan J, et al. Design of adaptive grippers for fruit-picking robots

- p>considering contact behavior [J]. Agriculture, 2024, 14(7):1082.
- [12] Zhao Y, Wan X, Duo H. Review of rigid fruit and vegetable picking robots [J]. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 2023, 16(5): 1-11:1-11.
- [13] Wang, Yi X, Yingkuan W, et al. Review of smart robots for fruit and vegetable picking in agriculture [J]. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 2022, 15(1): 33-54.
- [14] Navas E, Shamshiri R R, Dworak V, et al. Soft gripper for small fruits harvesting and pick and place operations [J]. Frontiers in Robotics and AI, 2024, 10:157.
- [15] Lee E S, Yoon H-S. Development of a rod gripper for drones using flexible fingers and bistable structures [J]. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing, 2022, 23(11): 1325-1335.
- [16] Cong Y, Chen R, Ma B, et al. A comprehensive study of 3-D vision-based robot manipulation [J]. IEEE Trans Cybern, 2023, 53(3): 1682-1698.
- [17] Liang J, Bian X, Jia L, et al. A method for grasp detection of flexible four-finger gripper [J]. Robotics and Autonomous Systems, 2024, 178:1047210.
- [18] Huang P, Zhu L, Zhang Z, et al. Row end detection and headland turning control for an autonomous banana-picking robot [J]. Machines, 2021, 9(5):103.
- [19] Zhang Y, Wang K, Cai M, et al. Structural design and control performance study of flexible finger mechanisms for robot end effectors [J]. Actuators, 2024, 13(7):271.
- [20] Deimel R, Brock O. A novel type of compliant and underactuated robotic hand for dexterous grasping [J]. The International Journal of Robotics Research, 2015, 35(1-3): 161-85.
- [21] Li M S, Huh T M, Yahnker C R, et al. Resonant pneumatic tactile sensing for soft grippers [J]. IEEE Robotics and Automation Letters, 2022, 7(4): 10105-11:10105-10111.
- [22] Deng M, Fan F, Wei X. Learning-based object recognition via a eutectogel electronic skin enabled soft robotic gripper [J]. IEEE Robotics and Automation Letters, 2023, 8(11): 7424-31.

- [23] Hao T, Xiao H, Liu Y, et al. Gripping performance of soft grippers with fingerprint-like surface texture for objects with slippery surfaces [J]. *Tribology International*, 2023, 189:108992.
- [24] Jeong D, Lee K. Design and analysis of an origami-based three-finger manipulator [J]. *Robotica*, 2017, 36(2): 261-74.
- [25] Deshpande S, Almubarak Y. Octopus-inspired robotic arm powered by shape memory alloys (SMA) [J]. *Actuators*, 2023, 12(10):377.
- [26] Xu M, Liu Y, Li J, et al. Review of flexible robotic grippers, with a focus on grippers based on magnetorheological materials [J]. *Materials (Basel)*, 2024, 17(19):4858.
- [27] Tang Z, Xu L, Wang Y, et al. Collision-free motion planning of a six-link manipulator used in a citrus picking robot [J]. *Applied Sciences*, 2021, 11(23):11336.
- [28] He Z, Lian B, Song Y. Rigid-soft coupled robotic gripper for adaptable grasping [J]. *Journal of Bionic Engineering*, 2023, 20(6): 2601-18.
- [29] Xu W, Zhang H, Zheng N, et al. Design and experiments of a compliant adaptive grasper based on fish fin structure; proceedings of the 2018 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO), F 12-15 Dec. 2018, [C].
- [30] Li H, Zhou P, Zhang S, et al. A high-load bioinspired soft gripper with force booster fingers [J]. *Mechanism and Machine Theory*, 2022, 177.
- [31] Ji H, Zhang L, Nie S, et al. Optimization design and experiment study on a water hydraulic flexible actuator integrating flexible inner skeleton and soft external skin used for underwater flexible gripper [J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2024, 366:114957.
- [32] Nie S, Huo L, Ji H, et al. Bending deformation characteristics of high-pressure soft actuator driven by water-hydraulics for underwater manipulator [J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2022, 344:113736.
- [33] Pi J, Liu J, Zhou K, et al. An octopus-inspired bionic flexible gripper for apple grasping [J]. *Agriculture*, 2021, 11(10):1014.
- [34] Li T, Zheng K, Liu J, et al. Research on operation intention based on flexible

- tactile sensing handle [J]. IEEE Access, 2021, 9: 12362-73.
- [35] Wang B, Yu T. Numerical investigation of novel 3D-SPA for gripping analysis in multi-environment [J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2023, 240:107916.
- [36] Yamaguchi A, Takemura K, Yokota S, et al. A robot hand using electro-conjugate fluid [J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2011, 170(1-2): 139-46.
- [37] Wang R, Li X, Huang H. Design of thick panels origami-inspired flexible grasper with anti-interference ability [J]. Mechanism and Machine Theory, 2023, 189:105431.
- [38] Liu J, Chen Z, Wen G, et al. Origami chomper - based flexible gripper with superior gripping performances [J]. Advanced Intelligent Systems, 2023, 5(10):2300238.
- [39] Zhang Z, Fan W, Long Y, et al. Hybrid-driven origami gripper with variable stiffness and finger length [J]. Cyborg Bionic Syst, 2024, 5: 0103.
- [40] 田素坤, 王湘江. 导电聚合物驱动器悬臂梁模型建立及柔性抓取装置设计 (英文) [J]. 传感技术学报. 2016, 29(04): 489-94.
- [41] Bastola A K, Hossain M. The shape – morphing performance of magnetoactive soft materials [J]. Materials & Design, 2021, 211:110172.
- [42] Fan Q, Miao J, Tian M, et al. Low-voltage driven flexible double-layer electrothermal actuator for smart human-machine interactions [J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2020, 315:112352.
- [43] Wang W, Tang Y, Li C. Controlling bending deformation of a shape memory alloy-based soft planar gripper to grip deformable objects [J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2021, 193.
- [44] Tang Y, Chen M, Wang C, et al. Recognition and localization methods for vision-based fruit picking robots: a review [J]. Frontiers in Plant Science, 2020, 11:510.
- [45] Zhu Y, Wang T, Gong W, et al. Design and motion analysis of soft robotic arm with pneumatic-network structure [J]. Smart Materials and Structures, 2024, 33(9):095038.

- [46] Guo X, Jin C, Li X, et al. Electromechanical performance of flexible sensor based on 3D printed biomimetic all-PDMS-coated multistage structure: Toward kinesiology monitoring and human-machine interaction [J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2024, 369:115193.
- [47] Zheng W, Xie Y, Zhang B, et al. Dexterous robotic grasping of delicate fruits aided with a multi-sensory e-glove and manual grasping analysis for damage-free manipulation [J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2021, 190:106472.
- [48] Chen Y, Guo S, Li C, et al. Size recognition and adaptive grasping using an integration of actuating and sensing soft pneumatic gripper [J]. *Robotics and Autonomous Systems*, 2018, 104: 14-24.
- [49] 吴培良, 李瑶, 牛明月, 等. 一种视/触觉融合的柔性物体抓取力估计方法 [J]. *机器人*, 2024, 46(05): 544-53.
- [50] 于丰华, 周传琦, 杨鑫, 等. 日光温室番茄采摘机器人设计与试验 [J]. *农业机械学报*, 2022, 53(01): 41-9.
- [51] Gong Z, Gao Z, Zhu G, et al. A solid-liquid composite flexible bionic three-axis tactile sensor for dexterous hands [J]. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 2024, 9(9): 7907-14.
- [52] Li T, Sun X, Shu X, et al. Robot grasping system and grasp stability prediction based on flexible tactile sensor array [J]. *Machines*, 2021, 9(6):119.
- [53] Lv J, Luo L, Chen J, et al. Design and fabrication of flexible composite tactile sensors for robotic soft grippers [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2024, 24(3): 2482-90.
- [54] Wang Y, Jin X, Zheng J, et al. An energy-efficient classification system for peach ripeness using YOLOv4 and flexible piezoelectric sensor [J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2023, 210:107909.
- [55] Ren J, Wu F, Shang E, et al. 3D printed smart elastomeric foam with force sensing and its integration with robotic gripper [J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2023, 349:113998.
- [56] Dilibal S, Sahin H, Danquah J O, et al. Additively manufactured custom soft

- p gripper with embedded soft force sensors for an industrial robot [J].
-
- International Journal of Precision Engineering and Manufacturing, 2021, 22(4):
-
- 709-18.
- [57] Kumar R, Mehta U, Chand P. A low cost linear force feedback control system
for a two-fingered parallel configuration gripper [J]. Procedia Computer
Science, 2017, 105: 264-9.
- [58] Zheng Y, Pi J, Guo T, et al. Design and simulation of a gripper structure of
cluster tomato based on manual picking behavior [J]. Front Plant Sci, 2022, 13:
974456.
- [59] Yang S, Ji J, Cai H, et al. Modeling and force analysis of a harvesting robot for
button mushrooms [J]. IEEE Access, 2022, 10: 78519-26.
- [60] Xie Y, Zhang B, Zhou J, et al. An Integrated multi-sensor network for adaptive
grasping of fragile fruits: design and feasibility tests [J]. Sensors (Basel), 2020,
20(17):4973.
- [61] Xie M, Zhu M, Yang Z, et al. Flexible self-powered multifunctional sensor for
stiffness-tunable soft robotic gripper by multimaterial 3D printing [J]. Nano
Energy, 2021, 79:105438.
- [62] Jin L, Wang Z, Tian S, et al. Grasping perception and prediction model of
kiwifruit firmness based on flexible sensing claw [J]. Computers and
Electronics in Agriculture, 2023, 215:108389.
- [63] Yang Y, Wang P, Zhu H, et al. A variable stiffness soft robotic manipulator based
on antagonistic design of supercoiled polymer artificial muscles and shape
memory alloys [J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2024, 366:114999.
- [64] Kang M, Han Y-J, Han M-W. A shape memory alloy-based soft actuator
mimicking an elephant's trunk [J]. Polymers, 2023, 15(5):1126.
- [65] Lan C-C, Lin C-M, Fan C-H. A self-sensing microgripper module with wide
handling ranges [J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2011, 16(1):
141-50.
- [66] Zhang J, Liu G. Self-adaption grasping force analysis for an apple sorting hand-
claw with robustness [J]. Robotica, 2014, 34(4): 723-37.

- [67] Macdonald I, Dubay R. Development of an adaptive force control strategy for soft robotic gripping [J]. *Applied Sciences*, 2024, 14(16):7354.
- [68] Shan X, Birglen L. Modeling and analysis of soft robotic fingers using the fin ray effect [J]. *The International Journal of Robotics Research*, 2020, 39(14): 1686-705.
- [69] Zhang Z, Zhou J, Yi B, et al. A flexible swallowing gripper for harvesting apples and its grasping force sensing model [J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2023, 204:107489.
- [70] Xu W, Zhang H, Yuan H, et al. A compliant adaptive gripper and its intrinsic force sensing method [J]. *IEEE Transactions on Robotics*, 2021, 37(5): 1584-603.
- [71] 韦慧玲, 梁成斌, 王金海, 等. 绳驱柔性机械手研究进展及其在农业机器人中的应用 [J]. *智能化农业装备学报(中英文)*, 2024, 5(04): 95-106.
- [72] 齐飞, 张恒, 孙杰, 等. 考虑驱动耦合的绳驱动外肢体机器人运动建模及控制研究 [J]. *仪器仪表学报*, 2023, 44(06): 21-34.
- [73] 崔祯, 赵志刚, 苏程, 等. 绳牵引上肢康复机器人动力学及动态稳定性分析 [J/OL]. *北京航空航天大学学报*, 2025, 1-17. <https://doi.org/10.13700/j.bh.1001-5965.2024.0827>.
- [74] 杨凯盛, 胡俊豪, 韩陈洁, 等. 绳驱动踝关节康复机器人的运动学与刚度研究 [J]. *机器人*, 2024, 46(04): 503-12.
- [75] 曹旭东, 路敦民. 苹果采摘末端执行器设计及分析 [J]. *林业机械与木工设备*, 2024, 52(09): 97-101+9.

攻读硕士学位期间的主要学术成果

1.发表的学术论文

- [1] Design and Experimental Test of Rope-Driven Force Sensing Flexible Gripper [J]. Sensors, 2024, 24(19): 6407. (SCI:001332870600001) (第一作者)
- [2] Grasping force perception and servo control of robotic flexible gripper with vision-based deformation displacement detection[J]. Measurement Science and Technology. (在审, 第二作者, 导师第一)

2.申请的知识产权

- [1] 一种具有力感知功能的机器人柔性手爪及其使用方法[P].发明专利: CN117984355A, 2024, 实审, 第二发明人(导师第一)。
- [2] 一种电磁驱动的机器人柔顺搬运装置及其使用方法[P], 发明专利: CN118003359A, 2024, 实审, 第7发明人(导师第一)。
- [3] 一种机器人柔顺磨抛装置[P]. 发明专利: ZL202410138418.2, 2025, 授权, 第7发明人(导师第一)。
- [4] 一种具有减振功能的变刚度联接装置及其使用方法, 发明专利: ZL202410138420.X, 2025, 授权, 第7发明人(导师第一)。

3.参与科研项目

- [1] 安徽省高校优秀青年科研项目: 弹性薄壁构件机器人磨抛系统柔顺交互控制机理研究, 2023AH030018。
- [2] 芜湖市科技项目(重点研发项目): 多源数据驱动的化纤纺丝高质高效智能落筒关键技术、装备研发及应用, 2022yf57。

致谢

时光飞逝，三年的读研究生涯即将迎来尾声，研一入学的场景历历在目，到如今已经是研三的结尾，即将毕业。三年时间，老师、同学、朋友及家人们都曾给予我帮助、支持和鼓励，在这论文即将完稿之际，向他们表达我最诚挚的谢意！

首先，衷心感谢我的导师刘玉飞老师。从论文选题、框架设计到细节修改，您始终以渊博的学识和严谨的治学态度为我指明方向。您对学术研究的热情、对教学工作的投入以及对学生的关怀，将成为我终身学习的榜样。

感谢鞠老师，在研究生工作和学习上给予的关心和帮助，鞠老师强大的科研能力、严谨的科研态度，多次给与的指导意见，让我少走了许多弯路，在此由衷的祝愿鞠老师身体健康、工作顺利。

感谢师兄陈洋洋师兄、吴朗师兄、严志川师兄和纪旭阳师兄在课题上对我的指导，在生活上对我的帮助，感谢同门邵传好、包琪和金文丽，在学术讨论中提供的启发，在生活中对我的包容，感谢室友松、亮和文，在生活与精神上的支持陪伴，感谢师弟丁成龙、刘小佳、王东，为实验带来新的气象，这段共同奋斗的时光将成为我珍贵的回忆。

最后，感恩我的父母和姐姐。二十余载求学路，是你们无条件的支持与理解，赋予我直面困难的勇气，家人的帮助与关怀永远是我继续向前的勇气源泉。每当我迷茫困顿之时，你们的关怀始终是我坚实的后盾。

谨以此文，献给所有在成长道路上指引我、温暖我的人们。前路漫漫，唯有不忘初心，方能不负所望

尚德敏学 唯实惟新

