



天津中德应用技术大学
Tianjin Sino-German University of Applied Sciences

本科生毕业设计

基于 STM32 的仿生机械手设计与实现
**Design and Implementation of Bionic Mechanical
Hand Based on STM32**

姓 名 吕 阳

学 院 机械工程学院

专 业 机械电子工程

指导教师 张 培

职 称 副教授

完成时间 2023 年 5 月

天津中德应用技术大学
本科生毕业设计（论文）的声明

本人郑重声明：所呈交的毕业设计（论文），是本人在指导教师指导下，进行研究工作所取得的成果。除文中已经注明引用的内容外，本毕业设计（论文）的研究成果不包含任何他人创作的、已公开发表或没有公开发表的作品内容。对本设计（论文）所涉及的研究工作做出贡献的其他个人和集体，均已在文中以明确方式标明。本毕业设计（论文）原创性声明的法律责任由本人承担。

毕业设计（论文）作者签名：

年 月 日

本人声明：该毕业设计（论文）是本人指导学生完成的研究成果，已经审阅过设计（论文）的全部内容，并能够保证题目、关键词、摘要部分中英文内容的一致性和准确性。

毕业设计（论文）指导教师签名：

年 月 日

摘 要

近年来，仿生机器人的发展十分迅速，这其中人们对仿生机械手的关注与日俱增。仿生机械手是一种模拟人类手部结构和功能的机器人，其重要性在于它不仅具有人类手的灵活性和精度，而且通过加入传感器和控制系统来能够实现自主控制和感知环境的能力，在人工智能、机器人技术和生物医学等领域有着广泛的应用前景。

本文设计了一种基于 STM32 单片机的仿生机械手，集机械结构设计、软件编程和电路设计于一体，并且机械手可以在体感手套的控制下实现实时动作变化，完成抓握和抓取物体的动作。本文具体研究内容如下：

首先，分析生物学中人类手部的结构和运动方式，以此确定仿生机械手的自由度，并设计制造一款具有 6 个自由度的仿生机械手。其次，通过分析机械手功能需求，初步明确机械手的结构设计方案、手指的关节数量和以及 3D 打印的制作方式。再次，对主控器、关节处所用电机、通讯设备和外部控制设备进行选型，选用 STM32 作为机械手的主控器，选用舵机、蓝牙模块和体感手套分别作为机械手的关节处所用电机、通讯设备和外部控制设备，完成机械手各硬件的选型。最后，编写仿生机械手的控制程序，并对机械手进行装配调试，最终完成样机一台。

测试表明，通过结构设计、硬件选型、软件编程实现的仿生机械手，能够通过体感手套的控制实现抓握和抓取物体的功能。因此，本文对仿生机械手的研发具有实践应用价值。

关键词：仿人机械手；STM32；蓝牙模块；体感手套

ABSTRACT

In recent years, the development of bionic robots has been rapid, and among them, people's attention to bionic mechanical hands has been increasing. A bionic mechanical hand is a robot that simulates the structure and function of the human hand. The importance lies in it not only has the flexibility and precision of the human hand, but also be able to achieve autonomous control and environmental perception by adding sensors and control systems, which has broad application prospects in artificial intelligence, robotics, and biomedical fields.

This article designs a bionic mechanical hand based on the STM32 microcontroller, integrating mechanical structure design, software programming, and circuit design. The mechanical hand can achieve real-time motion changes and complete grasping and gripping actions under the control of a motion sensing glove. The specific research contents of this article are as follows:

Firstly, the structure and movement mode of the human hand in biology are analyzed to determine the degrees of freedom of the bionic mechanical hand, and a bionic mechanical hand with six degrees of freedom is designed and manufactured. Secondly, by analyzing the functional requirements of the mechanical hand, the structural design scheme of the mechanical hand, the number of finger joints and the 3D printing production method are preliminarily determined. Thirdly, the selection of the main controller, motors, communication equipment and external control devices are made. STM32 is selected as the main controller of the mechanical hand, and servos, Bluetooth modules and motion sensing gloves are selected as the motors, communication equipment, and external control devices, respectively, completing the hardware selection of the mechanical hand. Finally, the control program of the bionic mechanical hand is written, and the mechanical hand is assembled and debugged to finally complete a prototype.

Tests have shown that the bionic mechanical hand developed through structural design, hardware selection, and software programming can achieve grasping and gripping functions under the control of motion sensing gloves. Therefore, this article has practical application value for the development of bionic mechanical hands.

Key words: Bionic Mechanical Hand; STM 32; Bluetooth Module; Motion-Sensing Glove

目 录

第一章 绪论	1
1.1 研究背景及意义	1
1.2 仿生机械手国内外研究现状	1
1.2.1 仿生机械手国外研究现状	1
1.2.2 仿生机械手国内研究现状	4
1.3 研究方法	6
第二章 仿生机械手的总体设计	7
2.1 人手自由度简介	7
2.2 仿生机械手自由度设计	7
2.3 仿生机械手手指运动分析	9
2.3.1 仿生机械手灵活性分析	9
2.3.2 仿生机械手手指关节传力方式	9
第三章 仿生机械手的结构设计	10
3.1 仿生机械手的预期功能	10
3.2 仿生机械手的手指设计方案	10
3.3 底座的设计	12
第四章 仿生机械手的硬件设计	14
4.1 主控器的选型	14
4.2 电机的选型	15
4.2.1 电机的分类	15
4.2.2 舵机的分类	16
4.3 外部控制设备的选型	19
4.4 通讯设备的选型	20
第五章 仿生机械手的程序设计	22
5.1 仿生机械手的装配	22
5.2 开发环境介绍	22
5.3 蓝牙模块的程序设计	23
5.4 主控程序设计	24
第六章 仿生机械手的装配与调试	25

6.1 仿生机械手的装配	25
6.2 仿生机械手的调试	26
6.2.1 连接调试	26
6.2.2 程序调试	27
6.2.3 整体联合调试	27
第七章 总结与展望	28
7.1 总结	28
7.2 展望	28
参考文献	29
致 谢	31
附 录	32
附录一 中文译文及外文资料	32
附录二 总体电路连接图	41
附录三 主控程序	43

第一章 绪论

1.1 研究背景及意义

机械手作为机器人的重要组成部分，具有广泛的应用前景。然而，传统的机械手在操作精度和灵活性方面存在一定的局限性。为了解决这些问题，仿生学应运而生。

仿生学^[1]诞生于 19 世纪 60 年代，是研究生物学原理并将其应用于工程技术中的学科。仿生学研究的对象包括生物体的结构、生理功能以及其适应环境的能力等。仿生学的发展和应用于仿生机械手的设计和制造提供了理论基础和技术支持。

因为仿生机械手的出现，传统机械手在工业制造和医疗卫生等领域内操控精度和灵活性不足的劣势被极大的改善，使得机器人能够更加自然的与周围环境进行交互，从而拓展了仿生机械手的应用范围。尤其是在医疗卫生领域，仿生机械手的出现推动了手部假肢^[2]的发展，为广大的残疾人群体提供了便利。

此外，仿生机械手作为机器人技术中的重要组成部分，其研究和应用将推动机器人技术的发展，促进机器人技术与人类社会的深度融合，对于促进智能制造和智能服务领域的发展具有重大意义。

本文借鉴了国内外机械手设计的经验，设计了一款基于 STM32 的仿生机械手，具有 6 个自由度，并且能够通过体感手套进行实时控制，实现抓握和抓取物体的动作，具有一定的操作精度，在手掌底部装配的电机极大的增加了机械手的灵活性。本文所设计的仿生机械手虽然和国内外所设计的机械手还有一定的差距，但是在工业制造领域和医疗领域中为残疾患者设计假肢具有一定参考意义。

1.2 仿生机械手国内外研究现状

从上世纪 70 年代开始，国外开始对机械手进行系统化研究，截止到今天，国外各国家已经研发出了许多具有重大参考意义的机械手。国内的仿生机械手研究虽起步较晚，但凭借着国内科学家和机械爱好者坚持不懈的努力，以及借鉴国外研发机械手的经验，我国机械手研究发展迅速。而且随着科学技术的发展，现如今的机械手无论是在结构还是功能上都比之前的机械手更加灵巧，更加微型^[3]，且能够轻松完成复杂的动作。

1.2.1 仿生机械手国外研究现状

20 世纪 70 年代，机械手技术快速发展，在手指个数和自由度方面，机械手都有所改善。1974 年，日本设计并制作了 Okada 手^[4]，如图 1-1 所示，在早期机械手中影响巨大，它由 3 根手指和 1 个手掌构成。其中拇指只具有 3 个自由度，另外两个手指各有 4 个自由度。手指上的每个关节均由直流电机驱动，且动力及运动的传递是通过钢丝和滑轮传动实现，不过他只能进行一些简单的操作，如将螺栓拧进螺母。和同时代作品相比，它在灵巧性和重量方面都有所改善。



图 1-1 Okada 机械手

1998 年，意大利热那亚大学成功设计并研制出了 DIST 手^[5]，如图 1-2 所示，该手由四个完全相同的手指组成，自由度共计 16 个。该机械手由 5 个直流电机以及多个跟腱和滑轮进行驱动。此外该机械手的体积小、重量轻，大小与成年人手相近。次年，美国国家航空宇航局开发出了 NASA 手^[6]，如图 1-3 所示，NASA 手被开发出来的目的主要是帮助宇航员更顺利的完成太空舱外的复杂操作任务，该手采用全驱动形式，共由 14 个直流电机驱动。与早期的机械手相比，它在外形、功能与灵巧度等方面有很大的改进。



图 1-2 DIST 机械手



图 1-3 NASA 机械手

随着科学及社会的发展，21 世纪以后，美国斯坦福大学的学者 Salisbury 研发了三指 Stanford/JPL 手^[7]，如图 1-4 所示，该手一共由 9 个关节构成，每根手指都有 3 个关节，且都为主动自由度，此类设计大大提高了机械手活动的灵活性。其次，Stanford/JPL 手由 12 个直流伺服电机驱动，整只手采用 N+1 型腱传动方式将动力传递到关节处。该手第一次将位置、触觉、力等传感器完整应用，这就使其具备了丰富的对外界认知能力。Salisbury 等人还开展了灵巧双手抓握物的试验^[8]。从试验可以看出该手的优点——自由度较小，没有冗余关节，抓住点明确，抓住物相对固定，其缺陷则是无法向人手那样灵活活动。



图 1-4 Stanford/JPL 机械手

2013 年，美国 iRobot 公司和耶鲁大学 Dollar 团队研制的 iHY 手，如图 1-5 所示，具有很大的抓取力，可以抓取任何物体，具有柔性的手指，不怕敲击测试。此外，通过装配在指尖的触觉传感器，iHY 可以轻松识别抓取的物体。

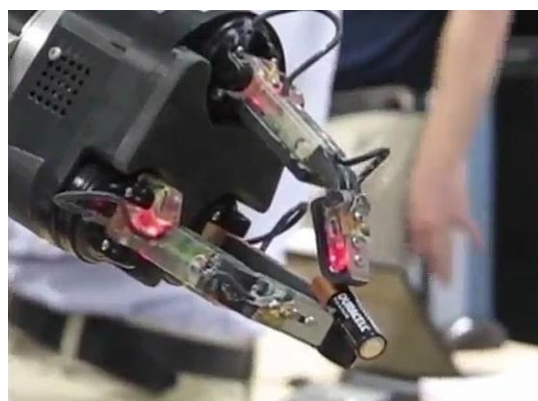


图 1-5 iHY 机械手

2022 年，美国麻省理工学院计算机科学和人工智能实验室的爱德华教授和他的感知科学小组开发了一种使用新型机械手，如图 1-6 所示，其灵敏度几乎可以达到甚至超过人类皮肤的灵敏度，机器人由两个灵活的鳍状射线手指组成，可轻易抓取迷你螺

丝刀、草莓、丙烯酸涂料管、易拉罐和高脚杯等物品。

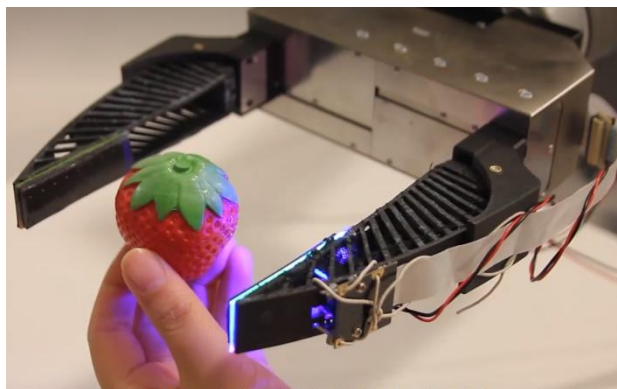


图 1-6 使用型机械手

1.2.2 仿生机械手国内研究现状

国内研究机械手相对较晚，至二十世纪八十年代国内才开始研发机械手，虽起步较晚，但是我国在仿生机械手设计研发时，借助前人的经验，取精去粕，成功研发出了具有高强灵巧度的机械手。

二十世纪八十年代，北京航空航天大学书写了国内机械手的篇章，该校借鉴了 Stanford/JPL 手设计研发出了 BH-1 机械手。因为是初次设计且国内没有相应的学术资料，所以该手在结构和功能方面比较简单。北京航空航天大学之后又陆续研制了 BH-2、BH3 和 BH-4 机械手^[9]，如图 1-7，1-8 所示。BH-3 手共有三个手指，每个手指上共有三个关节，设计者在各个关节上均配置了压力感应器，指尖也配备了压力感应器，启动方式通过内置式马达带动，可进行实时控制。而 BH-4 机械手^[10]则使用了模块化设计，并采用了手指模型和手掌模型，共有四个手指，16 个自由度。各个手指上都有一个直流伺服电机可以分别进行引导。而通过使用数据工具套，每个手指均由一台直流伺服电机分别加以带动。通过使用数据工具套，就能够完成某些实验测试，比如抓鸡蛋、搬水、模拟人手操作等。

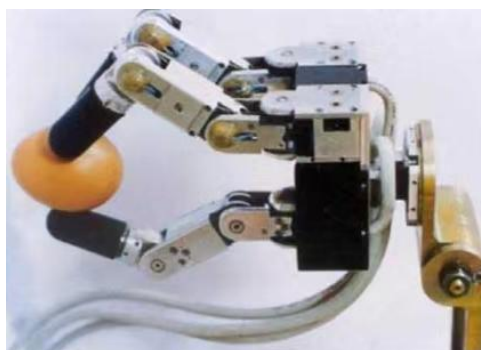


图 1-7 BH-3 机械手



图 1-8 BH-4 机械手

2001 年，哈尔滨工业机器人研究所开发出了四指 HIT/DLR I 机械手^[11]，如图 1-9 所示，该手和以往的机械手不同，它主要通过腱传递动力。该手的每根手指共有四个关节，共计 13 个自由度。同时该手由于安装了各种感应器^[12]，从而可以兼容各种机械操控方式。此外，由于该手所有的驱动电路都安装在腕关节上，有较高的集成度。



图 1-9 HIT/DLR I 机械手

2013 年，清华大学研制出一种感知自适应机械手（Perceiving Self-adaptive Hand，简称 PESA 手），如图 1-10 所示，PESA 手具有 20 个关节，15 个自由度。每个手指结构相同，均有 4 个关节、3 个自由度，由 3 个电机分别驱动。根部为双自由度关节，实现根部弯曲和侧摆。手指中部有两个关节，由一个电机驱动。手指具有感知自适应抓取功能，当根部关节接触物体后，通过控制器驱动中部电机转动，带动中部关节和末端关节同时转动。

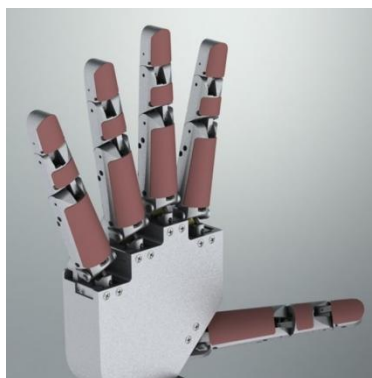


图 1-10 PESA 机械手

2021 年，上海交通大学主导研发了一款柔软而富有弹性、轻便、低成本的充气式

仿生神经机械手，如图 1-11 所示，重量仅有 292g，仅为商用刚性仿生手重量的一半左右。还结合了触觉反馈和肌电控制，不仅能够实现多种灵活的手部动作，还可帮助截肢患者恢复触觉感知反馈和闭环控制能力。



图 1-11 仿生神经机械手

综上所述，自从上世纪 70 年代以来，各个国家对机械手的研究从未间断，机械手广泛应用于工业制造领域，军事领域，医疗领域和其他高科技产业领域。国外机械手的发展相对比较全面，尤其在发达国家中，机械手广泛用于自动化生产线，不仅提高了生产效率，还极大的避免了事故的发生。虽然我国近几年机械手的发展比较迅速，但和国外的一些国家相比还是有很大的差距^[13]，在灵活性和操控性方面国内机械手发展仍需要向世界先进国家学习。

1.3 研究方法

本文旨在设计并实现一款具有 6 自由度，能通过体感手套的控制实现抓握和抓取物体的动作的仿生机械手，主要运用文献研究法、实验研究法以及对比研究法 3 种研究方法。

(1) 文献研究法：通过搜集、查阅有机械手相关的文献资料来完成本文设计，为机械手的机械结构设计与硬件选型提供理论支持。

(2) 实验研究法：通过机械手抓取实物小球的实验来调试改进设备，使本题更具说服力和客观性。

(3) 对比研究法：通过对比各类控制器，电机等的特点与优势，选择出最适合本设计部件型号。

第二章 仿生机械手的总体设计

任何机构想要获得确切的运动都要进行自由度的设计，仿生机械手更是如此，因为和普通机械手相比它不仅具备抓握能力，还要仿人手进行制造。因此在设计手指的外形和关节数目这些对自由度影响大的因素时，需要仔细斟酌。

2.1 人手自由度简介

人类经过几千年的进化，人手的结构如图 2-1 所示。人手的结构复杂且巧妙，手部共有 27 块骨骼，由腕部，掌部以及手指组成。其中大拇指只有远、近节两个指骨，其余四指各有近节、中节、远节三个指骨^[14]。整个手掌共有 27 个自由度。

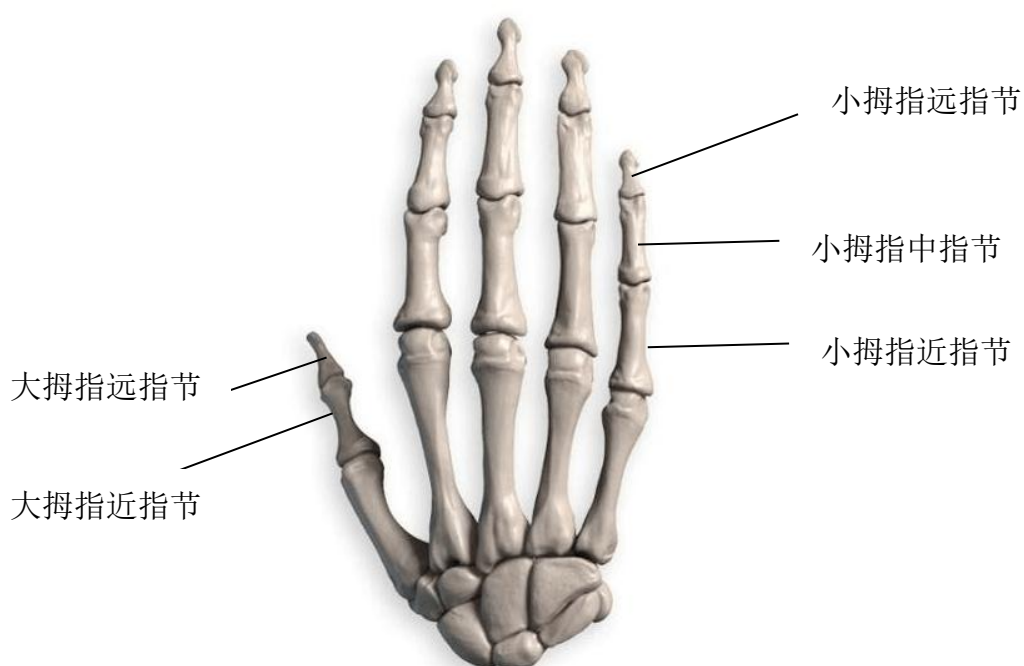


图 2-1 人体手骨结构图

2.2 仿生机械手自由度设计

机构要产生确切动作运动的基本要求是：原动件的数量和机构的自由度数目必须相等并且都大于零。如果机构自由度数目等于零或大于原动件数量，机构就不会产生动作；如果自由度数量小于原动件数量，则机构会在最脆弱的部分产生损伤^[15]。本文所设计的仿生机械手用平面连杆机构进行连接，因此不必考虑空间自由度的影响。平面连杆机构其优点是：

(1) 平面连杆机构使回转运动和往复移动得到转换，以实现预期的运动规律或轨迹。

(2) 平面连杆机构相连处都为面接触，因此接触面间压强小、易润滑、磨损少，可以承受较大的载荷。

(3) 结构简单，便于制造。

本文设计的机械手与人类手指结构分布大致相同，可以实现简单的抓握，因此本文设计的机械手含有五个手指，五指都是由近指节、中指节和远指节构成，各个关节之间采用连杆进行连接。机械手的结构如图 2-2 所示。每根手指 8 个关节，其中有一个为固定关节，在进行自由度计算时，不做考虑，其余皆为活动关节。虽然自由度表示了机械手各个手指的灵活性，但也不是自由度越多越好。因为随着自由度的增加，其结构也会变得越来越复杂。因此本文将四指的指根的球副副和大拇指指根的球面副转换为转动副进行计算设计。其机构运动简图如图 2-3 所示。

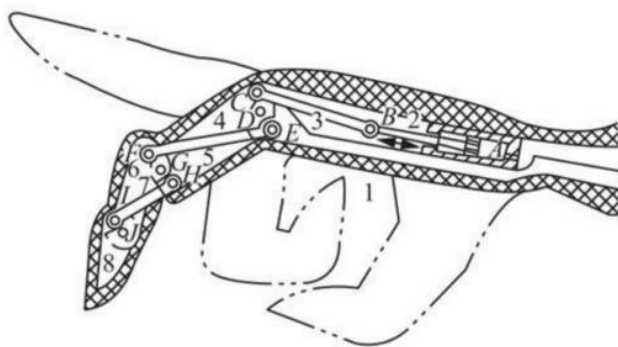


图 2-2 机械手结构图

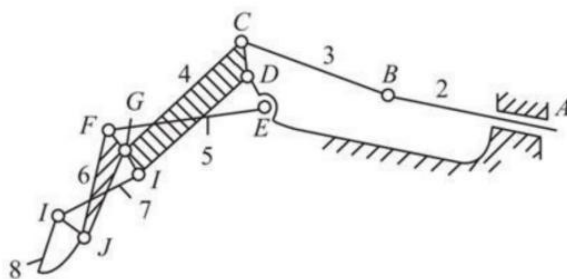


图 2-3 机械手运动简图

其中 $n=7$ ， $P_L=10$ ， $P_H=0$ ，所以每根手指的自由度 F 如式 (2-1) 所示：

$$F = 3n - 2P_L - P_H = 3 \times 7 - 2 \times 10 = 1 \quad (2-1)$$

上式中 F 表示机械手机构的自由度； n 表示机械手机构中能活动的机构数目； P_L 表示机械手机构中低副的数目； P_H 表示机械手机构中高副的数目。

综上所述，该手指自由度为 1，且等于原动件数目，因此机构有确定的运动，符合运动条件。而本文设计的仿生机械手共有 5 个手指，每根手指各 1 个自由度，外加手掌底部设计了 1 个旋转舵机，所以本文设计的仿生机械手共有 6 个自由度。

2.3 仿生机械手手指运动分析

2.3.1 仿生机械手灵活性分析

本文设计的机械手五根手指在结构上基本一致，以食指为例。手指主要是由近指关节、中指关节以及远指关节组成，三个指节通过螺丝连接在一起，远指关节和近指关节通过连杆进行连接，中指关节和手掌前的小凸台通过连杆进行连接，近指关节也是通过连杆和手掌的舵机进行连接。但如果只是将关节和连杆用螺丝简单的固定在一起，那么手指在活动的时候就会变得非常僵硬，为了改进这点。本文在远指关节连接的连杆两端分别设计了两个万向球，当近指关节和手掌舵机进行连接时，连杆和万向球通过螺丝直接固定在一起，这样就使得灵巧机械手在转动的时候可以模仿人手指的运动来进行灵活的弯曲等一系列动作。

2.3.2 仿生机械手手指关节传力方式

整个手指的运动是通过手掌的舵机作为动力源，机构运动简图 2-2 在上文已提到，舵机带动着连杆 2 运动，这时连杆 2 会进行缩紧或者是伸展，同时连杆 2 的运动会使得连杆 3 也进行相应的运动，连杆 3 的运动也会带动机构 4 进行运动，以此类推，通过这样的运动方式，使得机械手的五根手指能够灵活地弯曲或者是抓取物品等。

第三章 仿生机械手的结构设计

机械手的机械结构设计是本文的重点内容。正确的机械结构能使机械手进行正确的抓取物品与弯曲。本文在预期效果以及参考相关书籍与资料的基础上对机械手的结构进行设计。

3.1 仿生机械手的预期功能

正常人手的抓握方式分为两种，即力性抓握和精准抓握^[16]，如图 3-1 (a)、(b) 所示。力性抓握是指五指各关节同时弯曲，使物体被握在手指与手掌之间。它是对物体进行适应抓取，不需要非常精确的位置控制。精准抓握^[17]是依靠指拇指与食指或者拇指与食指和中指之间配合实现侧捏、夹持等精细动作。如图 3-1 所示。

机械手的灵活性、抓取的精确度等动作都是仿照人手的结构功能来进行研发设计的，本文中要设计的机械手可以实现力性抓握的功能，具体如下：

- (1) 灵活性强且安全可靠。
- (2) 根据外部控制设备的操作实时进行变化。
- (3) 能实现抓握和抓取物体的功能。

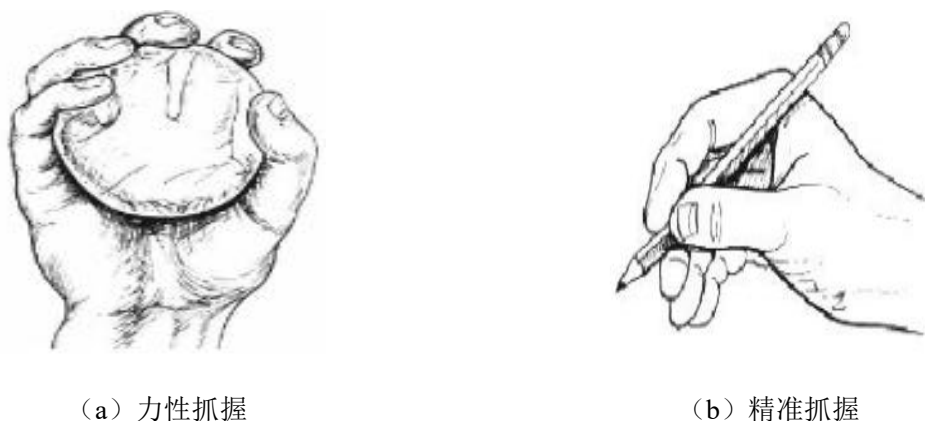


图 3-1 抓握示意图

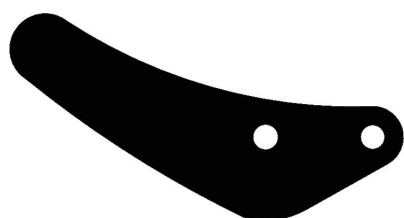
3.2 仿生机械手的手指设计方案

对抓取体小球进行受力分析可发现，最少需要两个方向不同的力才能完成对小球的抓取动作，因此机械手手指最小的数量应该为两根，但通过对国内外机械手现状的研究发现，两根或者三根手指的机械手在抓取物体的准确度及灵巧性方面远远不如四指或者五指的机械手^[17]。所以，本文设计的机械手与人手构造一样，有 1 个大拇指和 4 个完全一致的手指，每个手指都由 3 个关节构成，这样的设计对于抓取物体的准确度、稳定性以及灵活性都是最优的。

人手可以灵活地抓取不同形状的物体以及做出不同的手势主要依靠的就是关节，因此，为了机械手结构设计的合理性，其他四指采用三指节设计方案即近指节，远指节，中指节，如图 3-2 (a)、(b)、(c) 所示，且形状结构相同。大拇也指采用三

指节进行设计，但形状与其他四指不同。如图 3-2 (d)、(e)、(f) 所示。考虑到结构设计和功能要求，五根手指之间都采用连杆和螺丝进行连接，仿生手指的指节和手背部分采用 ABS 材料^[18]进行 3D 打印，如图 3-2 (g)、(h) 所示。采用这样连接的优势是：

- (1) 连杆结构简单，制造简单，降低了机械手自身的生产成本。
- (2) 连杆自身重量很轻，安装在机械手上不会增加手指的重量。



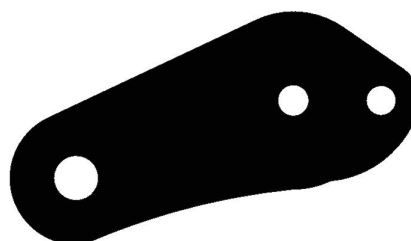
(a) 其余四指远指节



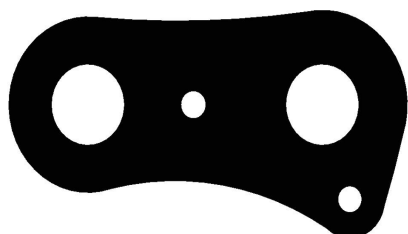
(b) 其余四指中指节



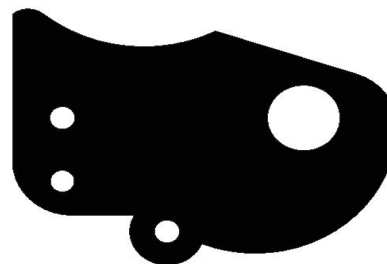
(c) 其余四指近指节



(d) 大拇指远指节



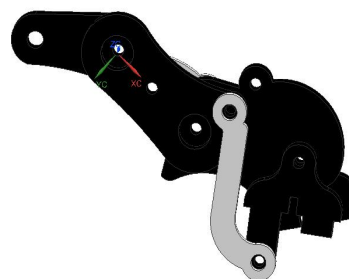
(e) 大拇指中指节



(f) 大拇指近指节



(g) 其余四指装配图



(h) 大拇指装配图

图3-2 机械手手指结构图

3.3 底座的设计

本文中要设计的机械手不仅包括手掌、手指，还包括底座。底座需要支撑起整个机构，此外还需容纳 STM32，因此底座设计最重要的是尺寸大小的选择。

底座制造也采用 3D 打印，结构如图 3-3 (a) 所示，将底板整体外形设计成呈阶梯形并对转角部分进行倒角，这样可以减少不必要的尺寸设计和制造成本。此外，底板部分采用通孔设计，这也在一定程度上减少了 3D 打印材料的使用，节约了制造成本。右侧结构为 STM32 预留，左侧六边形结构为手掌整体结构预留。为了更好的支撑手掌，本文设计了一个手掌支架，其由两部分组成，即手掌支架 1，如图 3-3 (b) 所示；手掌支架 2，如图 3-3 (c) 所示。三个手掌支架 1 和一个手掌支架 2 组装成一个完整的手掌支架。底板和支架实物装配图如图 3-3 (d) 所示。

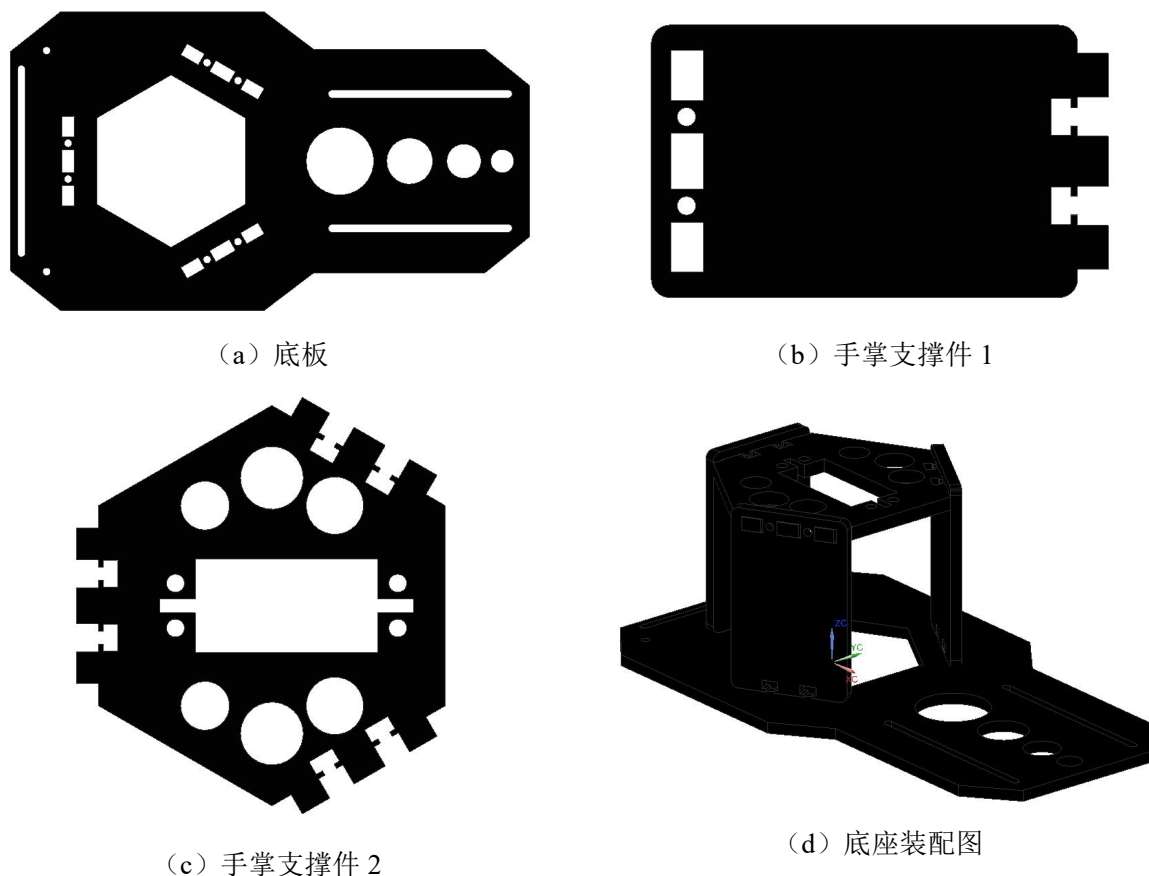


图3-3 底座结构图

在底板与支架的装配过程中，支架 1 与支架 2、支架 1 与底板之间采用 M3×10 的平头螺丝和 M3 螺母固定，考虑到设计的美观，底板与地面之间应留有空隙，因此用 M3×8 的尼龙柱进行支撑，用 M3×6 的平头螺丝固定。STM32 与底座之间也按此方法预留空隙并固定。所需各零件的数目如表 3-1 所示。

表 3-1 零件种类及数目

类目	数量
M3×10	12
M3×16	4
M3 螺母	12
M3×8 尼龙柱	8

综合上述内容，本文设计的仿生机械手共有 5 根手指和 6 个自由度，每根手指包括近指节、中指节，远指节 3 个指节。各指节通过连杆连接在一起形成一根完整的手指。通过对平面连杆机构的运动分析，仿生机械手在结构上可以实现抓握和抓取物体的动作。总体外观如图 3-4 所示：

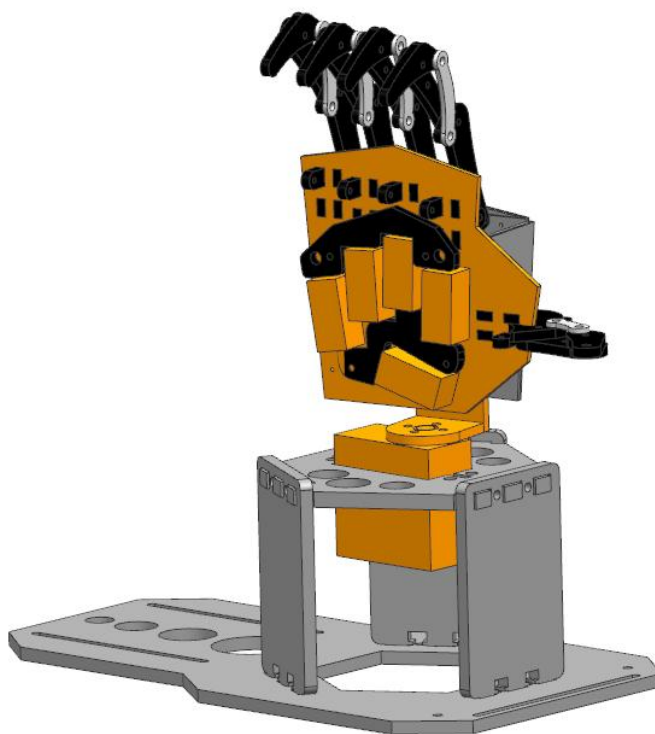


图 3-4 外形设计图

第四章 仿生机械手的硬件设计

4.1 主控器的选型

市面上常用的主控器有 STM32、树莓派以及 Arduino，和前两者相比，STM32 的型号丰富，应用广泛，这就意味着其具有更强的兼容性。STM32 是一款由意法半导体公司生产的 32 位微控制器^[18]，基于 ARM Cortex-M 内核开发。STM32 单片机旁边的一排金属针脚就是引脚，分为电源、时钟、控制和其他功能。其中，ST 表示意法半导体公司，M 代表微控制器，32 代表三十二位。并根据内部结构而分为不同的产品系列。目前最主要的产品是 STM32F0、STM32F1 和 STM32F3；超低功耗的 STM32L0、STM32L1、STM32L4 和 STM32L4+；高性能的 STM32F2、STM32F4、STM32F7 和 STM32H7。

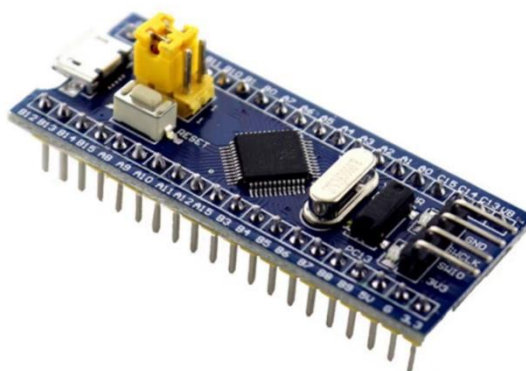


图 4-1 STM32 控制器

由于在本文中所设计的机械手，具有手灵活操控和抓取物体的设计要求，需要功能强大的系统来进行操作，同时此操作系统还需安装在机械手底座上，对尺寸也有要求，经过对市面上微型操作系统调研后，最终选用 STM32F103RBT6，其参数性能和原理图分别如表 4-1 和图 4-2 所示。

表 4-1 STM32 性能参数表

类目	参数说明
内核	ARM32 位的 Cortex™-M3 CPU
定时器	7 个定时器
模数转换器	2 个 12 位模数转换器
I/O 端口	80 个快速 I/O 端口
调试模式	串行单线调试 (SWD) JTAG 接口
通信接口	9 个通信接口
DMA	7 通道控制器

U7			
1	VBAT	VDD3	64
2	TAMPER-RTC/PC13	VSS3	63
3	OSC32I/PC14	SDIO5/PB9	62
4	OSC32O/PC15	T4C3/SDIO4/PB8	61
5	OSCI	BOOT0	60
6	OSCO	SDA/NADV/PB7	59
7	NRST	SCL/T4C1/PB6	58
8	PC0/IN10	MOSI3/SD3/PB5	57
9	PC1/IN11	JNTRST/PB4	56
10	PC2/IN12	JTDO/PB3	55
11	PC3/IN13	RXD5/SDCMD/PD2	54
12	VSSA	TXD5/SDCK/PC12	53
13	VDDA	RXD4/SDIO3/PC11	52
14	WKUP/PA0/IN0/T2T1	CXD4/SDIO2/PC10	51
15	PA1/IN1/T2C2	JTD1/PA15	50
16	PA2/IN2/TXD2	SWCLK/PA14	49
17	PA3/IN3/RXD2	VDD2	48
18	VSS4	VSS2	47
19	VDD4	SWDIO/PA13	46
20	PA4/NSS1/DA1	CANTX/U+/PA12	45
21	PA5/SCK1/DA2	CANRX/U-/PA11	44
22	PA6/MISO1	T1C3/RXD1/PA10	43
23	PA7/MOSI1	T1C2/TXD1/PA9	42
24	PC4/IN14	T1C1/MCO/PA8	41
25	PC5/IN15	SDIO1/T8C4/PC9	40
26	PB0/IN8/T3C3	SDIO0/T8C3/PC8	39
27	PB1/IN9/T3C4	MCK3/SDIO7/PC7	38
28	PB2/BOOT1	MCK2/SDIO6/PC6	37
29	PB10/SCL2/TXD3	MOSI2/SD2/PB15	36
30	PB11/SDA2/RXD3	MISO2/PB14	35
31	VSS1	SCK2/CK/2PB13	34
32	VDD1	NSS2/WS2/PB12	33

STM32F103RBT6

图 4-2 STM32 原理图

4.2 电机的选型

4.2.1 电机的分类

电机按照用途可以划分为驱动用电动机和控制用电动机。驱动用电动机又包括电动工具用电动机、小型器械用电动机等。控制用电动机则分为步进电动机和伺服电动机，如图 4-3 (a)、(b) 所示。



(a) 步进电动机



(b) 伺服电动机

图 4-3 电机种类

(1) 步进电机，结构如图 4-4 (a) 所示，分为机电式、磁电式及直线式三种基本类型。它是一种将电脉冲信号转换成相应角位移或线位移的电动机。每输入一个脉冲信号，转子就转动一个角度或前进一步，其输出的角位移或线位移与输入的脉冲数成正比，转速与脉冲频率成正比。因此，步进电动机又称脉冲电动机。因步进电动机没有传感器，所以停止角度会有偏差，只适合低转速场合。比如打印机和磁盘等装置。

(2) 伺服电机，结构如图 4-4 (b) 所示，分为交流和直流伺服电机两大类，它是自动控制装置中被用作执行元件的微型电机，其功能是将电信号转换成转轴的角位移。

伺服电动机又称执行电动机。在自动控制系统中用作执行元件，把所收到的电信号转换成电动机轴上的角位移或角速度输出。伺服电机具有的起动转矩很大，当定子内有控制电流，转子迅速转动时，即产生启动速度快、灵敏度高的特性，且运转均匀、无自转现象。运行中的伺服电机只要失去调节电压，电机马上停止运行。通常应用在机械工业及医药行业等。

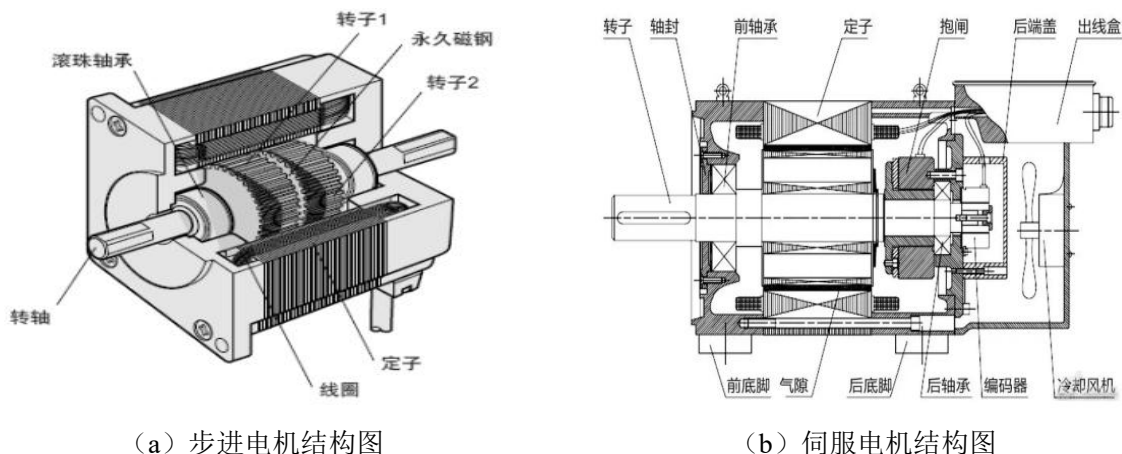


图 4-4 电机结构图

步进电机和伺服电机的区别^[19]如表 4-2 所示：

表 4-2 步进电机与伺服电机的比较

电机类型	步进电机	伺服电机
控制方式	通过控制脉冲个数控制转动角度	通过控制脉冲时间控制转动角度
工作流程	一般需要两个脉冲：信号脉冲和方向脉冲	先一个电源连接开关，再连接伺服电机
低频特性	在低速时易出现低频振动现象	运转非常平稳，即使在低速时也不会出现振动现象
过载能力	一般不具有过载能力	具有较强的过载能力

4.2.2 舵机的分类

舵机 (Servo) 是一种常用的电机，如图 4-5 (a)、(b) 所示。可以控制输出轴的角度和位置。它通常由电机、减速机、控制电路、位置反馈装置等组成。舵机一般被用于控制机械臂、机器人、航模、车模等设备的运动，具有精度高、响应快、控制简便等优点。

舵机的工作原理是通过接收控制信号控制电机转动，电机通过减速机驱动输出轴旋转，输出轴的位置会被反馈到控制电路中，从而控制输出轴的位置和角度。舵机通常有三根线，分别是电源线 (VCC)、接地线 (GND) 和控制信号线 (Signal)，其中控制信号线用于接收外部控制信号。

舵机的控制信号通常是一个 PWM (Pulse Width Modulation) 信号，通过改变 PWM 信号的占空比来控制舵机转动的角度和位置。

舵机的种类和规格繁多，可以根据不同的应用需求选择适合的型号。常见的舵机有模拟式舵机和数字式舵机两种，模拟舵机和数字舵机主要区别为是否具有 MCU 微控制器，数字式舵机的精度更高、响应更快，无反应区范围小，抗干扰能力强，而模拟式舵机价格更便宜。另外，舵机还可以根据输出转矩、控制精度、使用环境、旋转角度、结构和功率等方面进行分类。



(a) 舵机实物图

(b) 舵机拆解图

图 4-5 舵机图片

根据设计要求以及对电机分类的调查研究，该机械手手指部分的控制电机应该选择小巧且能不断变化角度的舵机为宜。市面上有很多型号且应用于不同范围的舵机，最终选用舵机型号为 LFD-01 金属轴防堵转舵机，因为该舵机内部设有堵转保护算法，一般具有很大的扭力且速度很快，可以 180° 转动，工作时噪声小且相比于其他舵机具有高寿命。实物图和参数分别如图 4-6 和表 4-3 所示。



图 4-6 LFD-01 实物图

表 4-3 LFD-01 性能参数表

类目	参数说明
工作电压	4.8-6V
转动速度	0.10sec/60° 6V
转动范围	0-180°
空载电流	50mA
堵转电流	700mA
控制方式	PWM 脉宽控制

而手掌部分因支撑整个手掌的重量，受力相对较大，所以选择高精度的数字舵机 LD-1501MG，该舵机扭力为 17KG，完全可以满足实验需求。实物图和参数分别如图 4-7 和表 4-4 所示。



图 4-7 LD-1501MG

表 4-4 LD-1501MG 性能参数表

类目	参数说明
工作电压	6-8.4V
转动速度	0.16sec/60° 7.4V
转动范围	0-180°
空载电流	100mA
堵转电流	2.4-3mA
控制方式	PWM 脉宽控制

在本文的设计中，共有六个舵机，其中 5 个 LFD-01 舵机用来控制手指的弯曲，而 LD-1501MG 则用来控制手部的旋转，机械手依靠这六个舵机来完成抓握与抓取动作，其电路连接图如图 4-8 所示。STM32 的 51、52、53、54、58 和 61 引脚与舵机的 S 引脚相连，以此来实现主控器对舵机的控制。

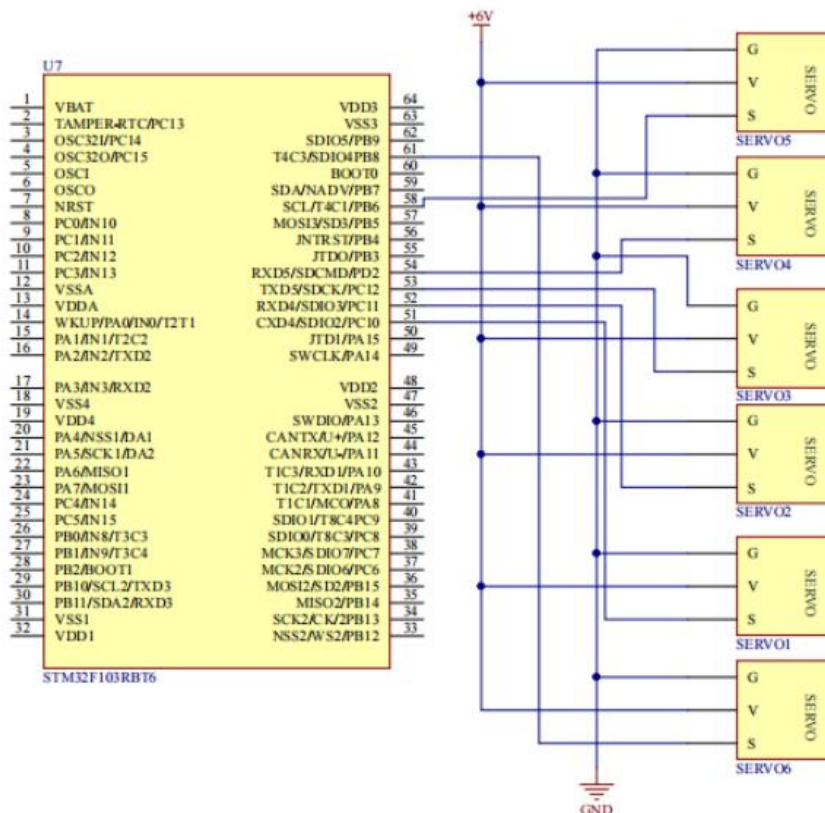


图 4-8 舵机连接图

4.3 外部控制设备的选型

本文机械手的控制方式设计了 PS2 游戏手柄控制和体感手套控制两种控制方式，两种控制方式的主要区别如表 4-5 所示：

表 4-5 体感手套与 PS2 游戏手柄的比较

外控制器	体感手套	PS2 游戏手柄
控制方式	体感遥控	按键控制
通讯方式	蓝牙模块	接收器
控制距离	10 米左右	10 米左右

如上表所示，我们可以从控制方式中得知游戏手柄控制方式不够灵活，其功能和设计都比较固定，不能灵活变化。此外，游戏手柄的控制方式不够直观，需要操作者进行一定的学习和适应才能掌握。而装配有电位器和陀螺仪加速度传感器的体感手套可以实现更加精确的手指和手腕的弯曲控制，如图 4-9 (a)、(b) 所示。

其中，体感手套上的主控板通过读取电位器的变化值，将数据通过蓝牙发送到机械手上，以此来控制五指的弯曲与伸直，而陀螺仪加速度传感器可以测量手腕的角速度和加速度，从而确定手腕的旋转方向。五指和手腕部分的运动相互独立，互不干扰。

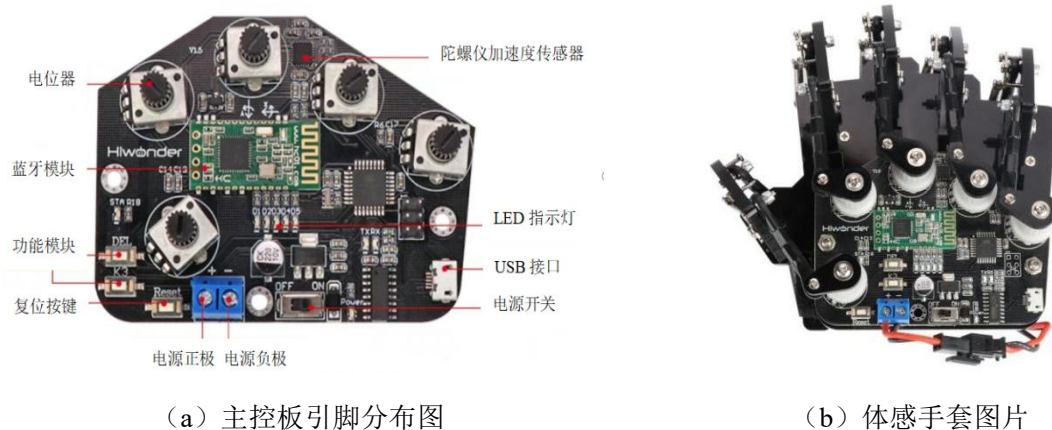


图 4-9 体感手套

4.4 通讯设备的选型

市面上的通讯设备各色各样，本文预期采用无线通讯方式，而在无线通讯方式中 WIFI 通讯和蓝牙^[20]通讯应用最为广泛，对两者进行比较，比较结果如表 4-6 所示：

表 4-6 通讯设备的比较

通讯设备	蓝牙模块	WIFI 模块
应用场景	耳机、键盘等其他设备	主要为互联网
安全性	通过配对来确保只有授权设备可以连接到彼此	通常采用 WPA2 等强加密协议来保护数据的安全性
传输特点	带宽高、传输距离远	带宽低、传输距离近

从上表中我们可以看出 WIFI 模块的应用场景更为广泛，尤其是在传输方面 WIFI 通信优势明显，但是更突出的传输能力意味着更大的功耗，本文设计应同时注重续航能力，因此优先选择蓝牙模块。

蓝牙模块通常包括发射器和接收器，本文设计选择的蓝牙模块为 HC-08，发射器和接收器分别如图 4-10 (a)、(b) 所示，性能参数表如表 4-7 所示。

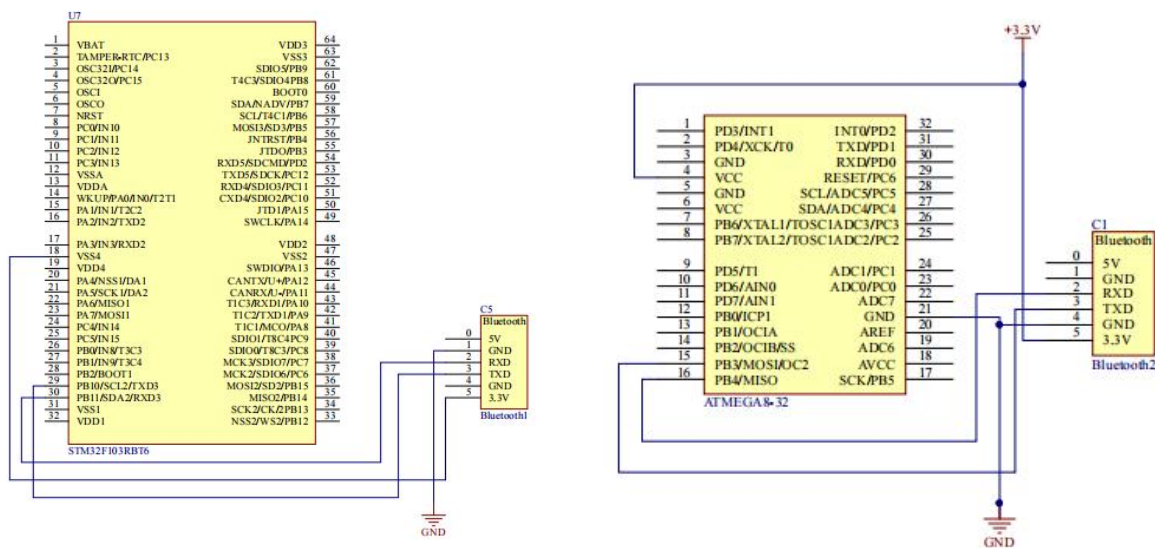


图 4-10 蓝牙模块图片

表 4-7 HC-08 性能参数表

类目	参数说明
工作频段	2.4GHZ ISM
通讯电平	3.3V
天线接口	内置 PCB 接线
空中速率	1Mbps
发射功率	4dBm (MAX)

在工作时，装在体感手套上的蓝牙发射器向机械手上的蓝牙接收器发射信号，两者在成功建立通讯后，操作者就可以通过实时控制手套来实现机械手的变化。其电路连接图如图 4-11 (a)、(b) 所示。STM32 主控器的 PB10 和 PB11 分别和蓝牙接收器的 TXD 和 RXD 相连，以实现通过串口与蓝牙模块通信，并将 STM32 的电源和地线连接到蓝牙模块上，以提供电源和接地。位于体感手套上的 ATMEGA 和蓝牙发射器的连接方式与 STM32 和蓝牙接收器的连接方式不尽相同。首先，ATMEGA 的 VCC 端口与蓝牙模块的 3.3V 端口连接在一起，并连接到外部的 3.3V 电源上。其次，ATMEGA 的 PB3 和 PB4 端口和蓝牙模块的 TXD 以及 RXD 连接在一起，依次提供串口通信。



(a) 蓝牙接收器电路连接图

(b) 蓝牙发射器电路连接图

图 4-11 蓝牙模块电路连接图

第五章 仿生机械手的程序设计

5.1 仿生机械手功能分析

为实现机械手的预期功能，不仅要对其进行结构设计，设计出能合适实现动作的结构，还要为其设计正确的程序，只有这样机械手才能完美运行。如图 5-1 所示，本文将仿生机械手的功能需求分为为两类，即输入与输出。体感手套通过蓝牙通讯将体感手势传输到 STM32 中，而 STM32 在开源舵机控制器的加持下，将体感手势输出到各个舵机中，依次来实现机械手的各种动作。

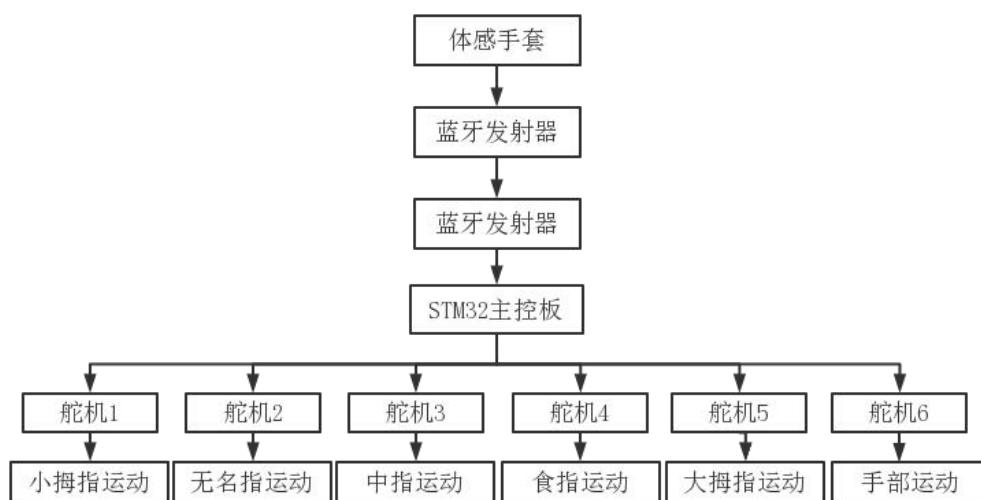


图 5-1 功能分析图

5.2 开发环境介绍

本文项目的硬件控制平台由 STM32 和 HC-08 蓝牙通讯模块组成，两者统一使用开发环境 Keil5^[21]进行编译和 Mcuisp 进行烧录，如图 5-2 (a)、(b) 所示。



(a) Keil5 软件图标



(b) Mcuisp 软件图标

图 5-2 软件图标

Keil5 是一款由 Keil 软件公司开发的集成开发环境 (IDE)，用于嵌入式系统的软件开发。它支持多种微控制器平台，包括 ARM、8051 和 C166 等。Keil5 提供了一个

强大的编辑器、编译器和调试器，以及一些额外的工具，例如 Flash 编程器和仿真器。其软件界面简洁友好，上手简单，因此是开发 STM32 的不二之选。

Mcuisp (Microcontroller In-System Programmer) 是一种嵌入式系统编程工具，用于在目标系统内部对微控制器进行编程和调试。它是一种通用性较强的工具，可以支持多种不同的微控制器平台。Mcuisp 工具通常由两部分组成：软件和硬件。软件部分是一种用于控制微控制器的编程算法，通常使用 C 或汇编语言编写。硬件部分则是一种与目标系统进行通信的接口电路，通常使用 USB 或串口连接到计算机上。

5.3 蓝牙模块的程序设计

本文设计的机械手通过蓝牙模块进行数据传输，因此需要对蓝牙模块进行程序编写，Keil5 能兼容多种编程语言，本文中我们首选 C++ 作为系统的编程语言。

蓝牙通讯编程时需要用到 `bluetooth.h` 和 `rfcomm.h` 作为头文件，在此头文件下我们需要用 `socket()` 函数，该函数可以创建一个 Bluetooth socket 对象，再次就可以设置 socket 参数，以此来完成我们预期的功能。再者程序中的 `send()` 和 `recv()` 函数就会驱动蓝牙模块的发射器和接收器进行发送和接受数据。图 5-3 为蓝牙模块的运行流程图。

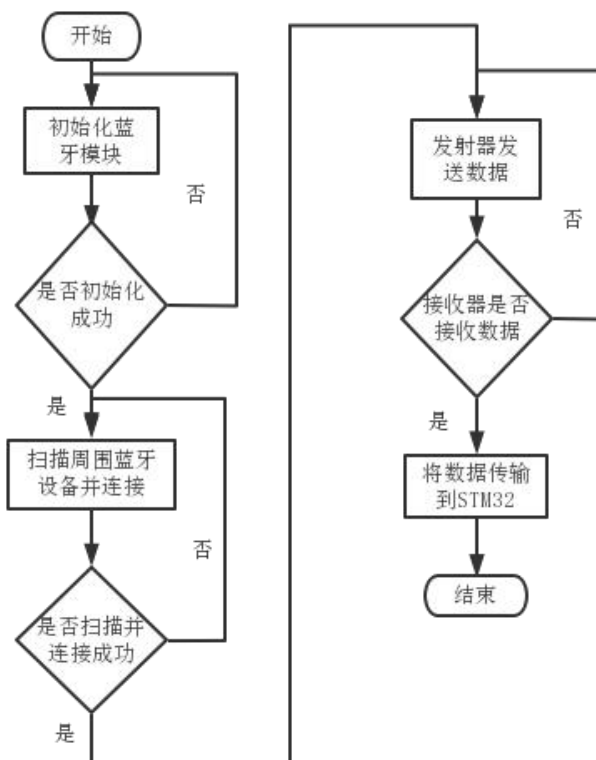


图 5-3 蓝牙模块流程图

5.4 主控程序设计

本文设计仿生机械手的主控制器为 STM32，除通讯模块依靠 HC-08 实现外，其余功能的实现与运行都依靠 STM32。本项目使用 Keil5 对 STM32 单片机进行开发，其中核心是熟练使用片上外设和通讯方式，以实现单片机的各种功能。在本项目中，涉及到 GPIO、定时器 TIM、CAN 总线通信、EXIT 外部中断等多种功能。其中 USART 用于单片机与蓝牙模块之间的通信；CAN 总线则用于对各种电机进行速度、方向和角度的控制。结合机械手各部件的功能，最后绘制出主控程序流程图如图 5-4 所示。

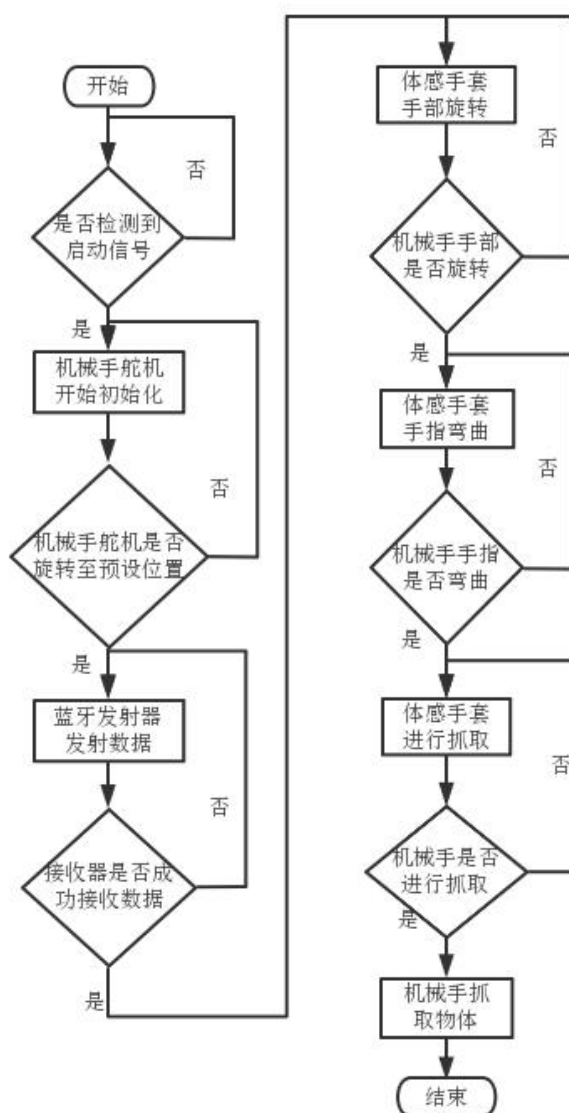


图 5-4 程序整体流程图

第六章 仿生机械手的装配与调试

6.1 仿生机械手的装配

根据前四章的内容对机械手进行打印并装配，在装配之前先检查各部分舵机以及舵机控制器连线是否正常连接，如图 6-1、6-2 所示，LFD-01 舵机的 ID1-ID5 接口分别连接在开源舵机控制器的 PWM 舵机接口上的 1-5 号接口。ID1-ID5 接口与 LFD-01 相连，分别对应着小拇指，无名指，中指，食指，大拇指。

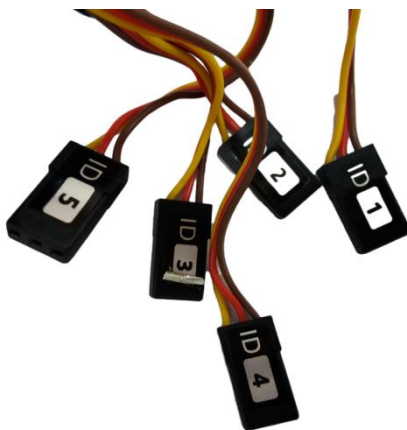


图 6-1 舵机接口

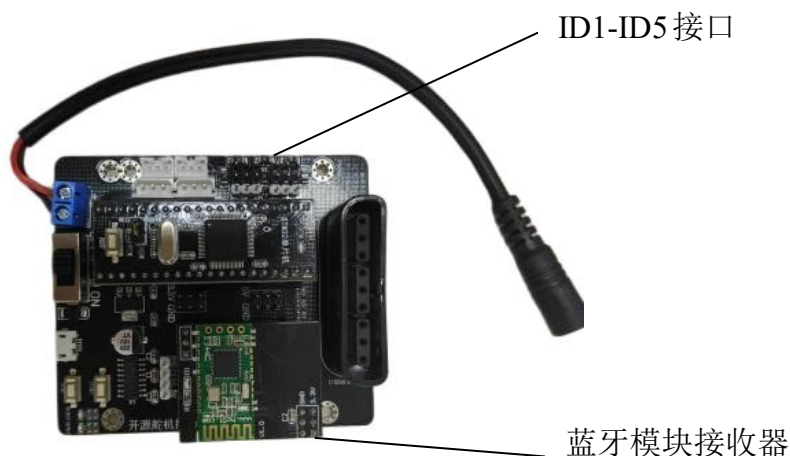


图 6-2 PWM 舵机接口

而舵机控制器上的 6 号接口则与 LD-1501MG 相连接，从而达到控制手掌以及手指部分的转动。其次检查电源线的连接，电源线连接应该遵循红正黑负的原则。再检查完各部分的连线后对机械手进行组装，组装后的实物图如 6-3 所示。

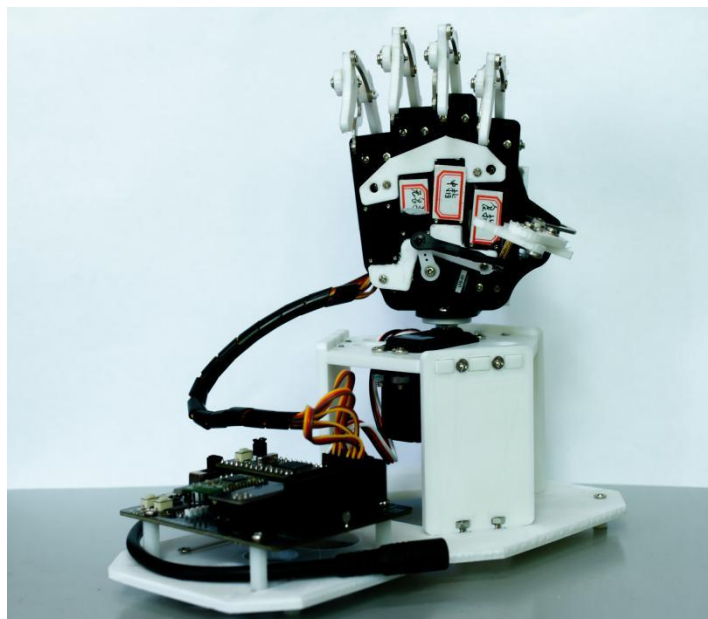


图 6-3 实物图

6.2 仿生机械手的调试

6.2.1 连接调试

组装完成后，首先，接通机械手和体感手套的电源体感手套的电源连接，查看二者之间是否能正常通过蓝牙进行连接，如果体感手套上的 STA 指示灯常亮，则表示二者之间连接成功。再次，进行体感手套的校准，先关闭手套电源，右手握拳，掌心向下，然后打开电源，待校准指示灯（D1-D5）熄灭过后打开手掌，此时校准指示灯闪烁，表示手套校准成功，如图 6-4 所示。体感手套校准成功后，按下 K3，直至 D1-4 灯全部亮起，此时可以对机械手进行操控。

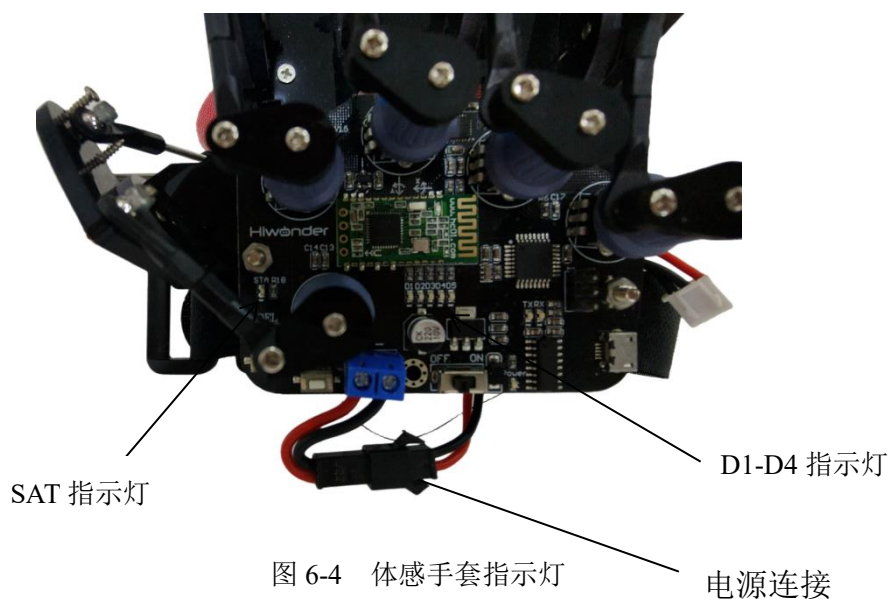


图 6-4 体感手套指示灯

6.2.2 程序调试

首先将编写好的程序进行编译，编译无错误后保存成 hex 文件以待烧录。烧录时应注意端口和比特率（默认 115200），这两项发生错误则无法成功烧录程序。烧录时出现“命令执行完毕，一切正常”，如图 6-5 所示，则代表程序可以初步使用，这时便可以进行整体联合调试。



图 6-5 烧录界面

6.2.3 整体联合调试

将仿生机械手组装调试好后，开始对机械手进行整体联合调试，主要内容如下：接通电源查看机械手是否会旋转至初始位置；机械手手部旋转是否灵活；手指是否可以正常弯曲；机械手是否可以实现抓取。反复测试机械手的稳定性，完善系统控制流程，不断完善控制系统整体性能。测试数据如表 6-1 所示：

表 6-1 整体功能测试

数据类目	手指是否能正常弯曲	手掌能否正常旋转	是否能实现抓取
试验次数	50	50	50
正确次数	45	47	48
正确率	90%	94%	96%
错误现象	小拇指不能正常弯曲，其余四指正常	旋转时有震颤现象	抓取物体后会脱落
错误原因	舵机未能正常启动	手背设计过薄，手掌支撑件设计过高导致重心变高	舵机角度偏差导致抓取力不足

第七章 总结与展望

7.1 总结

本文在查阅相关资料的基础上，结合仿生机械手国内外发展现状，设计了一款 6 自由度、全驱动，能够通过体感手套控制实现抓握和抓取功能的仿生机械手。

本文所完成的内容如下：

(1) 完成了基于 STM32 仿生机械手的机械结构设计。包括仿生机械手的底座、手掌等的设计，并绘制了三维模型图。

(2) 完成了基于 STM32 仿生机械手的电控系统设计。包括仿生机械手的硬件选型，并绘制了硬件连接图。

(3) 完成了基于 STM32 的仿生机械手的软件编程调试。包括仿生机械手手指运动、抓握等功能，并绘制了程序编写逻辑流程图。

(4) 完成了基于 STM32 的仿生机械手的整体调试与实验。并组装了基于 STM32 的仿生机械手样机 1 台。

7.2 展望

由于实验室资源有限且时间紧迫，这篇文章还有一些构思并未实现，存在些许缺点和不足需要改进与完善，在此将其指出，以供后人参考：

(1) 本文在对仿生机械手进行运动分析时，只在运动简图上分析了机械手的自由度以及传力方式，并未对机械手进行运动仿真。

(2) 本文在第三章分析仿生机械手的预期功能时，曾提出力性抓握和精准抓握两种抓握方式。力性抓握是指五指各关节同时弯曲，使物体被握在手指与手掌之间，它是对物体进行适应抓取，不需要非常精确的位置控制；精准抓握是依靠大拇指与食指或者拇指与食指和中指之间配合实现侧捏、夹持等精细动作。但由于本人能力有限，只实现了力性抓握的抓握方式。

(3) 本文在进行结构设计时，因为结构在强度和刚度方面的要求并不是主要设计需求，所以并没有对机械手进行受力分析以及有限元分析，只是简单的选取了 ABS 塑料作为机械手的整体材料组成。

综上所述，本文虽实现了抓握和抓取功能的设计要求，但文中依然存在许多不合理的地方，因此在未来有资源和时间的情况下会针对这些问题对机械手进行进一步的优化，使本文的研究达到一个新的高度。

参考文献

- [1] Xu Hongjia, Niu Fu, Meng Lingshuai, Sun Jinggong, Li Dongjin. Overview of Vibration Control Research Based on Bionics Principle[J]. Basic & Clinical Pharmacology & Toxicology, 2020, 7(12): 126-128.
- [2] Qu Xuecheng, Liu Zhuo, Tan Puchuan, Wang Chan, Liu Ying, Feng Hongqing, Luo Dan, Li Zhou, Wang Zhonglin. Artificial Tactile Perception Smart Finger for Material Identification Based on Triboelectric Sensing[J]. Science advances, 2022, 8(31): 20-27.
- [3] Ren Zhong, Zhang Tieshan. Automatic Control System of Manipulator Clamping Angle Based on Machine Vision[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2023, 2479(1): 12-14.
- [4] 张鑫. 刚柔混合线驱动仿生机械手的设计与分析[D]. 北京交通大学, 2020.
- [5] 赵小欢. 仿生手的结构设计和抓握控制研究[D]. 燕山大学, 2017.
- [6] 王龙. 刚柔复合气动仿生手研制及性能分析[D]. 杭州电子科技大学, 2022.
- [7] 杜群. 基于表面肌电信号的智能仿生手设计与研究[D]. 中国矿业大学, 2021.
- [8] 郭语. 超声电机驱动的多指灵巧手及主从控制系统的研究[D]. 南京航空航天大学, 2013.
- [9] 龚峻山. 基于并联手指结构的机器人灵巧手的设计与研究[D]. 北京交通大学, 2020.
- [10] 蔡世波, 陶志成, 万伟伟, 喻豪勇, 鲍官军. 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.
- [11] 杨智勇, 谢迪, 王君, 周红军. 仿人机械手运动空间范围特性分析[J]. 机械设计与制造, 2022, 23(12): 73-78.
- [12] 夏鹏超, 姜淑凤, 何鑫林, 柯寅峰. 欠驱动机械手关键技术对比及运动结构设计[J]. 高师理科学刊, 2021, 41(11): 35-39+43.
- [13] 李哲. 装配线用灵巧手系统研究[D]. 长安大学, 2017.
- [14] 周荣荻. 多指灵巧手的抓取规划策略研究[D]. 安徽工程大学, 2013.
- [15] 孙恒, 陈作模, 葛文杰. 机械原理[M]. 北京: 高等教育出版社, 2013.
- [16] Yeh PeiChun, Chen ChingHsuan, Chen ChenSheng. Using a 3D-Printed Hand Orthosis to Improve Three-jaw Chuck Hand Function in Individuals with Cervical Spinal Cord Injury: a Feasibility study[J]. IEEE transactions on neural systems and rehabilitation engineering: A publication of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society, 2023, 42(18): 33-36.
- [17] Piller Sophia, Senna Irene, Wiebusch Dennis, BenZion Itay, Ernst Marc O. Grasping behavior does not recover after sight restoration from congenital blindness[J]. Current biology: CB, 2023, 21(9): 54-56.
- [18] Lebedeva E. A. Astaf'eva S. A. Trukhinov D. K. Kornilitsina E. V. Nurullaev E. M. Mechanical Characteristics of ABS Plastic After Microwave Irradiation[J]. Russian Journal of Physical Chemistry B, 2023, 17(1): 13-15.

- [19] 司鹏辉. 步进电机和交流伺服电机性能综合比较[J]. 电子测试, 2015, 32(13): 85-86+47.
- [20] 卞合善. 基于蓝牙 4.0 低功耗室内定位研究[D]. 北京邮电大学, 2015.
- [21] 李媛. 基于 Proteus 和 Keil 的项目式单片机教学改革[J]. 商丘师范学院学报, 2022, 38(9): 88-91.

致 谢

时间滴答滴答，已过四载，转眼间，大学四年的故事就要结束。在这四年里我收获颇丰，遇到了很多有趣的灵魂，学习到了很多的知识，参加了许多比赛，这些经历使我的心理素质和工作能力大有提升，为我的本科毕业设计打下了坚实的基础。经过数月的努力，毕业设计即将结束。回顾这段时光，由于缺乏实践经验，机械手的设计还是有一定的缺陷，而若没有老师的指导和帮助，完成机械手的设计任务将会变得极其困难。

师泽如辉，虽微致远。首先要感谢我的毕设指导老师张培老师，她对待生活乐观开朗的态度以及工作时的认真严谨使我受益匪浅。虽然老师平日里工作繁忙，但是从论文选题到设计提纲及多次修改后的定稿，张老师都给予了我指导和帮助，正是在她的指导下，本篇论文才得以逐步成型。再次感谢张老师的悉心教导，以后的日子里，我一定会铭记这段时光，砥砺前行。

其次要感谢我的室友们，我们来自五湖四海，性格迥异。四年的涟漪如同一本故事跌宕起伏的书，我们相处在一间小小的宿舍，抒写着我们自己独一无二的故事。故事中有开心的笑，伤心的哭，固执己见的怒，但好在我们都能找到一条解决问题的道路。人无完人，这世上没有人是十全十美的，我有很多缺点，所以非常感谢他们四年间对我的包容和理解，希望他们都能所愿皆所得，祝他们武运昌隆！

同时我还要感谢辅导员和所有的代课老师。在大学四年的生活里，这些老师给予了我很大的帮助，在我困惑时为我答疑解惑，在我迷茫时，为我指引方向。他们为我提供了优秀的学习和研究环境，在实验和数据分析过程中，他们还给予了我许多有益的建议和帮助。

最后我想感谢一下自己，感谢自己四年来的努力与坚持，四年期间虽未获得什么大的成就，但也从竞赛和与各式各样的人的相处过程中收获不少，更加明确了自己的目标，更加明确了以后要成为一个什么样的人，要做什么样的事。“大学就要做些让自己后悔的事”，这是在大学开学时我送给自己说的话，回首四年，留下的憾事很多，未完成的目标也不少，但大学的故事到此终结，遗憾终成过往，愿自己可以在往后的日子里一往无前。再见少年拉满弓，不惧岁月不惧风。

“人生就像是一块巧克力，你永远不知道下一块是什么滋味”，在此再次感谢生活中给予我帮助的人们，希望再见时，我们的故事已然达到高潮。

附 录

附录一 中文译文及外文资料

仿生机械手的运动学和动力学分析

摘要：仿生操纵器可以帮助残疾人提高其生活质量，从而成为许多学者研究的焦点。本文对一个仿生机械手进行了运动学和动力学分析。首先，建立了该仿生机械手的运动学模型。得到了输入变量和输出变量之间的关系。然后，利用拉格朗日方法建立了仿生机械手的动态模型。分析了力矩作用下的角位移、角速度和角加速度等动力学参数。结果表明，这三个角度的角位移随时间的增加而增大。随着时间的增加，角速度先增大后减小。角加速度随时间的增加而振荡。本文为仿生机械手的应用奠定了基础。

1.引言

在过去的几十年里，由于战争和交通事故的爆发，残疾人的人数有所增加。根据第二次全国残疾人抽样调查，中国残疾人共有 7050 万户，占家庭总数的 17.80%。其中，有两个或两个以上残疾人家庭的 876 万户，所有残疾人家庭的 12.43%。残疾人家庭人口占全国总人口的 19.98%。此外，残疾人中有许多残疾人是手部截肢者，他们的生活质量受到了严重影响。因此，仿生机械手的研究成为近年来的热点。

仿生操纵器的研究。提出了一种基于肌电图的自动调整假体手握力的新方法。然后，对绳驱动欠驱动机械手进行了研究，建立了动态模型。结果表明，该机械手能够稳定地抓取目标。高密度肌电图发展历程：

早在中国的隋唐时期，发明家们就制造了许多用于工作或娱乐的自动机械装置。用机器把人类从繁忙的工作中解放出来，一直是人类的美好愿望。19 世纪 70 年代，许多科学家对以马为代表的四足哺乳动物的步态感兴趣，并通过连续拍摄对哺乳动物的步态特征进行了研究。19 世纪末，机械马的设计理念出现了。在这一时期，对四足哺乳动物的运动有了初步的探索。

2.机构描述

手掌由腕骨、掌骨和指骨组成。受人手组成的启发，提出了一种由刚性杆和旋转关节组成的仿生机械手，可以看出食指有三个自由度（自由度）。因此，应使用三个电机来使食指准确地移动。讨论了食指的运动学和动力学问题。首先，建立参照系，固定参照系位于食指底部，其 Z 轴与基础旋转关节的旋转轴平行。

3.直接运动学分析

根据食指的组成，可以认为它是一个三个自由度的连续机构。食指的运动草图如图 5 所示。从图 5 可以看出，食指由三个刚性杆 OA、AB 和 BC 组成。C1、C2 和 C3 分别为刚性棒 OA、AB 和 BC 的质心。X 轴与刚性杆 OA 的夹角定义为 θ_1 ，刚性杆 AB 与线连接节点 O、A 的夹角定义为 θ_2 。此外，刚性杆 BC 与连接节点 A 和节点 B 之间的夹角定义为 θ_3 。节点 O 与 C1 之间的距离为 d_1 ，节点 A 与 C2 之间的距离为 d_2 。此外，节点 B 和 C3 之间的距离为 d_3 。刚性棒 OA、AB 和 BC 的长度分别为 l_1 、 l_2 和 l_3 。

食指的形状可以通过改变由电机驱动的角度 θ_1 、 θ_2 和 θ_3 来控制，并选择它们作为食指的输入变量。选择节点 C 的位置，用其笛卡尔坐标 (x, y, z) 表示，作为食指的输出。四足机器人的运动控制方法是机器人领域的一个严峻挑战，因为四足机器人是一个具有浮动基的高维非线性时变系统，可以与各种环境交互。针对运动控制的方法有很多，可以分为两类，即基于模型的控制方法和无模型的控制方法。

4.总结

本文对食指进行了运动学和动力学分析。采用龙格-库塔法，模拟了食指的运动。结果表明，在给定力矩条件下，三个角度的角位移均随时间的增加而增大。角速度都随时间的增加而振荡。在设计食指时应考虑这些运动规律。角速度出现振荡趋势的原因是，本研究忽略了运动对间摩擦和电机摩擦等阻尼因素。此外，今后还将研究阻尼因素对食指动力学的影响。

PAPER • OPEN ACCESS

The Kinematic and Dynamic Analysis of a Bionic Manipulator

To cite this article: Zhifei Ji et al 2021 *J. Phys.: Conf. Ser.* **1948** 012078

View the [article online](#) for updates and enhancements.

You may also like

- [A novel underwater bipedal walking soft robot bio-inspired by the coconut octopus](#)
Qiuxuan Wu, Xiaochen Yang, Yan Wu et al.

- [A Wearable and Portable Real-Time Control Gesture Recognition System for Bionic Manipulator](#)
Tianao Cao, Dan Liu, Qisong Wang et al.

- [Octopus-inspired sucker to absorb soft tissues: stiffness gradient and acetabular protuberance improve the adsorption effect](#)
Yi Wang, Guangkai Sun, Yanlin He et al.



EGS 244th Electrochemical Society Meeting

October 8 - 12, 2023 • Gothenburg, Sweden

50 symposia in electrochemistry & solid state science

▶ Deadline Extended!
Last chance to submit!

New deadline:
April 21
submit your abstract!

This content was downloaded from IP address 42.80.219.81 on 21/04/2023 at 02:32

The Kinematic and Dynamic Analysis of a Bionic Manipulator

Zhifei Ji^{1,2}, Hualin Hong¹, Xiaodong Yuan¹, Jianyu, Fan¹ and Min Lin^{1,*}

¹College of Ocean Equipment and Mechanical Engineering, Jimei University, Xiamen, Fujian, 361021, China

²Fujian Province Key Laboratory of Ocean Renewable Energy Equipment, Xiamen, Fujian, 361021, China

*Corresponding author's e-mail: 20176100009@jmu.edu.cn

Abstract. Bionic manipulators can help people with disabilities to improve their quality of life, they thus became a focus researched by many scholars. In this paper, the kinematic and dynamic analysis of a bionic manipulator was conducted. Firstly, the kinematic model of the bionic manipulator was developed. The relationships between input and out variables were obtained. Then, the dynamic model of the bionic manipulator was established by using the Lagrangian method. The dynamic parameters including the angular displacement, angular velocity and angular acceleration under the action of torque were analyzed. The results indicated that the angular displacements of the three angles are increasing with time. With the increasing of time, the angular velocity first increased and then decreased. The angular accelerations are oscillation with an increase in time. The work in this paper lays the groundwork for future applications of bionic manipulators.

1. Introduction

In the past few decades, the number of disabled people has increased due to the outbreak of war and traffic accidents. According to the second national sample survey on disabled persons [1], there are 70.5 million households, accounting for 17.80% of the total number of households, with disabled persons in China. Among them, there are 8.76 million households with two or more disabled persons, accounting for 12.43 percent of all households with disabled persons. The population of households with disabled persons accounts for 19.98 percent of the national total population. Moreover, many disabled persons among disabilities are hand amputees and the quality of their life has been greatly affected. It follows that the research on bionic manipulators has become a hot point recently.

The bionic manipulators have been researched by lots of scholars. A novel method based of electromyography was proposed to adjust the grip strength of the prosthetic hand automatically [2-4]. Afterwards, the rope-driven under-actuated manipulator was studied and the dynamic model was developed by [5]. It was obtained that the proposed manipulator can grasp objects stably. High-density electromyography (EMG) signals were employed in [6] to characterize the accuracy of recognizing the discharges of motor units during natural movement and their correlation with finger kinematics was then researched. The dynamics should be considered during the design of the bionic manipulators. Many models including pulley combination model and connecting rod model were proposed by [7-9]. Their dynamic characteristics were studied. Li [10] researched a single finger by using the principle of virtual work and obtained relationship between the driving torques, the internal forces of the coupling rod spring and the gripping forces. Moreover, when analyzing the dynamics of the bionic manipulators, the fingers are usually regarded as light rods. The weight of the fingers is thus ignored to simplify the



Content from this work may be used under the terms of the [Creative Commons Attribution 3.0 licence](https://creativecommons.org/licenses/by/3.0/). Any further distribution of this work must maintain attribution to the author(s) and the title of the work, journal citation and DOI.

Published under licence by IOP Publishing Ltd

1

calculation procedures. The angular displacement, angular velocity and angular acceleration of a bionic manipulator were analyzed by modeling the bionic manipulator as hinges and linkage mechanisms [11-14].

The main contribution of this article is to obtain the relationship between the input and out parameters of one finger of the bionic manipulator and studied the dynamics of the finger considering its weight.

2. Mechanism description

As illustrated in figure 1, a human palm is composed of carpal bones, metacarpal bones and phalanx bones. Inspired by the composition of a human hand, a bionic manipulator composed of rigid rods and revolute joints is proposed, shown in Figure 2.

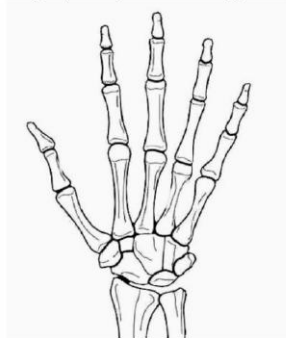


Figure 1. A human hand

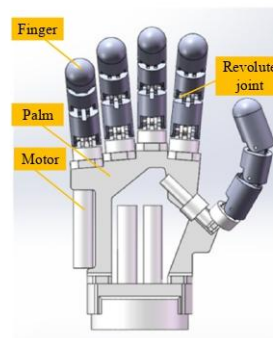


Figure 2. Bionic manipulator

From figure 2, it can be seen that the bionic manipulator is composed of finger prostheses, a palm of hand, fishing lines, spring plates and motors. The fingers can generate rotational motions driven by the motors through the fishing lines, shown in figure 3. The spring plates are used to restore the original shape when the finger relaxes. The motor used to close the thumb is denoted by motor 1 while the motor used to rotate the thumb is denoted by motor 2. Moreover, the closure of the index finger is controlled by motor 3 while the closure of the middle finger, ring finger and pinkie is controlled by motor 4.

From figure 2, it can be seen that the index finger has three DOFs (degrees of freedom). It follows that three motors should be used to make the index finger move accurately. In the follows sections, the kinematics and dynamics of the index finger are discussed. Firstly, the reference frame should be established, which is shown in figure 4. In figure 4, the fixed reference frame is locate at the base of the index finger, with its Z axis parallel to the rotational axis of the base revolute joint.

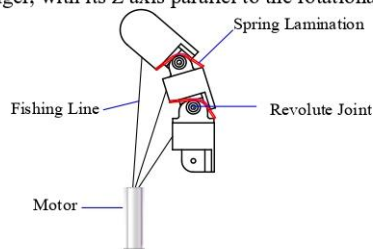


Figure 3. Connection of spring piece and fishing line

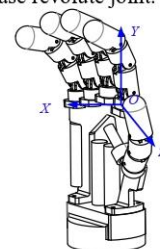


Figure 4. The fixed reference frame

3. Direct kinematic analysis

According to the composition of the index finger, it can be considered as a serial mechanism of three degrees of freedom. The motion sketch of the index finger is thus shown in figure 5. From figure 5, it can be seen that the index finger is composed of three rigid rods OA , AB and BC . C_1 , C_2 and C_3 are the centroid of the rigid rods OA , AB and BC respectively. The angle between the X axis and the rigid rod OA is defined as θ_1 while the angle between the rigid rod AB and the line joining nodes O and A is defined as θ_2 . Moreover, the angle between the rigid rod BC and the line joining nodes A and B is defined as θ_3 . The distance between nodes O and C_1 is d_1 while the distance between nodes A and C_2 is d_2 . Furthermore, the distance between nodes B and C_3 is d_3 . The lengths of rigid rods OA , AB and BC are l_1 , l_2 and l_3 respectively.

The shape of the index finger can be controlled by varying the angles θ_1 , θ_2 and θ_3 , driven by motors, which are chosen as the input variables of the index finger. The position of node C , expressed by its Cartesian coordinates (x , y and z) is chosen as the output of the index finger.

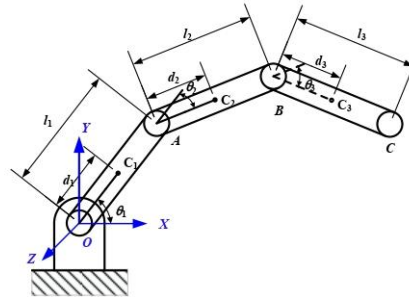


Figure 5. Motion sketch of the index finger

Let $\mathbf{X}_1 = [x_1, y_1, z_1]^T$, $\mathbf{X}_2 = [x_2, y_2, z_2]^T$ and $\mathbf{X}_3 = [x_3, y_3, z_3]^T$ denote the coordinates of points C_1 , C_2 and C_3 respectively. These coordinates can be written as

$$\mathbf{X}_1 = [x_1, y_1, z_1]^T = [d_1 \cos \theta_1, d_1 \sin \theta_1, 0]^T \tag{1}$$

$$\mathbf{X}_2 = [x_2, y_2, z_2]^T = [l_1 \cos \theta_1 + d_2 \cos \theta_2, l_1 \sin \theta_1 + d_2 \sin \theta_2, 0]^T \tag{2}$$

$$\mathbf{X}_3 = [x_3, y_3, z_3]^T = [l_1 \cos \theta_1 + l_2 \cos \theta_2 + d_3 \cos \theta_3, l_1 \sin \theta_1 + l_2 \sin \theta_2 + d_3 \sin \theta_3, 0]^T \tag{3}$$

The direct kinematic analysis of the index finger corresponds to the computation of position of the node C for given angles θ_1 , θ_2 and θ_3 . From figure 5, the coordinates of node C can be easily computed, which take the following form

$$\mathbf{X} = \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} l_1 \cos \theta_1 + l_2 \cos \theta_2 + l_3 \cos \theta_3 \\ l_1 \sin \theta_1 + l_2 \sin \theta_2 + l_3 \sin \theta_3 \\ 0 \end{bmatrix} \tag{4}$$

From equation (4), it can be seen the movement of node C is constrained to the XY plane. For a set of given input variables, the output variables can be easily computed.

4. Dynamic analysis

The Lagrangian approach is employed in this work to derive an appropriate dynamic model of the index finger. Afterwards, the kinetic and potential energy should be firstly computed.

4.1. Kinetic energy

According to equations (1)-(3), the velocity of centroid of the rigid rods OA , AB and BC can be written as

$$v_1 = [\dot{x}_1^2 + \dot{y}_1^2]^{\frac{1}{2}} = [d_1^2 \dot{\theta}_1^2]^{\frac{1}{2}} \quad (5)$$

$$v_2 = [\dot{x}_2^2 + \dot{y}_2^2]^{\frac{1}{2}} = \left\{ [d_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) \dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2 + l_1 \cos \theta_1 \cdot \dot{\theta}_1]^2 + [d_2 \sin(\theta_1 + \theta_2) \dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2 + l_1 \sin \theta_1 \cdot \dot{\theta}_1]^2 \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (6)$$

$$v_3 = [\dot{x}_3^2 + \dot{y}_3^2]^{\frac{1}{2}} = \left\{ \left[(l_1 \cos \theta_1 \cdot \dot{\theta}_1 + l_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) \cdot (\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2) + d_3 \cos \sum_{i=1}^3 \theta_i \cdot \sum_{i=1}^3 \dot{\theta}_i \right]^2 + \left[(l_1 \sin \theta_1 \cdot \dot{\theta}_1 + l_2 \sin(\theta_1 + \theta_2) \cdot (\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2) + d_3 \sin \sum_{i=1}^3 \theta_i \cdot \sum_{i=1}^3 \dot{\theta}_i \right]^2 \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (7)$$

Since the kinetic energy of a rigid rod contains the translational kinetic energy corresponding to the rod's translations and the rotational kinetic energy corresponding to the rod's rotations, the kinetic energy of the index finger can thus be computed as

$$E_k = \sum_{i=1}^3 E_{ki} = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^3 (m_i v_i^2 + J_{oi} \dot{\theta}_i^2) \quad (8)$$

where J_{o1} , J_{o2} and J_{o3} are the moments of inertia of the rods OA , AB and BC with respect to their centers.

4.2. Potential energy

The potential energy of the index finger includes the gravitational potential energy of the rigid rods and the elastic potential energy of the torsional springs, which are used to restore the finger's original position without the control of the motor. The potential energy of the index finger takes the following form

$$E_p = \sum_{i=1}^3 E_{pi} \quad (9)$$

where

$$E_{p1} = \frac{k}{2} \left(\frac{\pi \theta_1}{180} \right)^2 + d_1 g m_1 \sin \theta_1 \quad (10)$$

$$E_{p2} = g m_2 [l_1 \sin \theta_1 + d_2 \sin(\theta_1 + \theta_2)] + \frac{k}{2} \left(\frac{\pi \theta_2}{180} \right)^2 \quad (11)$$

4.3. Equations of motion

The equations of motion of the index finger are developed here using the Lagrangian method, namely

$$\tau = \frac{d}{dt} \frac{\partial E_k}{\partial \dot{\theta}} - \frac{\partial E_k}{\partial \theta} + \frac{\partial E_p}{\partial \theta} \quad (12)$$

where $\theta = [\theta_1, \theta_2, \theta_3]^T$. By substituting equations (8) and (9) into equation (12), the dynamic model of the index finger can be obtained as

$$\mathbf{M}\ddot{\theta} + \mathbf{H}\dot{\theta}^2 + \mathbf{K}\theta_q + \mathbf{G} = \mathbf{F} \quad (13)$$

where

$$\mathbf{G} = \begin{bmatrix} d_3 g m_3 \cos \sum_{i=1}^3 \theta_i + (d_2 g m_2 + g l_2 m_3) \cos \sum_{i=1}^2 \theta_i + (d_1 g m_1 + g l_1 m_2 + g l_1 m_3) \cos \theta_1 + \frac{k}{2} \left(\frac{\pi}{180} \right)^2 \theta_1 \\ (d_2 g m_2 + g l_2 m_3) \cos \sum_{i=1}^3 \theta_i + (d_2 g m_2 + g l_2 m_3) \cos \sum_{i=1}^2 \theta_i + \frac{k}{2} \left(\frac{\pi}{180} \right)^2 \theta_2 \\ d_3 g m_3 \cos \sum_{i=1}^3 \theta_i + \frac{k}{2} \left(\frac{\pi}{180} \right)^2 \theta_3 \end{bmatrix} \quad (14)$$

$$\mathbf{F} = [\tau_1 \quad \tau_2 \quad \tau_3]^T, \quad \theta_q = [\dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 \quad \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_3 \quad \dot{\theta}_2 \dot{\theta}_3]^T \quad (15)$$

Furthermore, \mathbf{M} , \mathbf{H} and \mathbf{K} are all 3×3 matrices whose elements are defined as follows (e.g. M_{ij} is the element located on the i th line and the j th column of \mathbf{M} , etc.):

$$\begin{aligned}
 M_{11} &= J_{o_1} + d_1^2 m_1 + d_2^2 m_2 + d_3^2 m_3 + l_1^2 m_2 + l_1^2 m_3 + l_2^2 m_3 + 2d_2 l_1 m_2 + 2l_1 l_2 m_3 \cos \theta_2 + \\
 &\quad 2d_3 l_1 m_3 \cos \theta_3 + 2d_3 l_2 m_3 \cos(\theta_2 + \theta_3) \\
 M_{12} &= l_2^2 m_3 + d_2^2 m_2 + d_3^2 m_3 + 2d_2 l_1 m_2 + 2l_1 l_2 m_3 \cos \theta_2 + 2d_3 l_1 m_3 \cos \theta_3 + 2d_3 l_2 m_3 \cos(\theta_2 + \theta_3) \\
 M_{13} &= d_3^2 m_3 + d_3 l_2 m_3 \cos \theta_3 + d_3 l_1 m_3 \cos(\theta_2 + \theta_3) \\
 M_{21} &= d_2^2 m_2 + d_3^2 m_3 + l_2^2 m_3 + d_2 l_1 m_2 + l_1 l_2 m_3 \cos \theta_2 + 2d_3 l_2 m_3 \cos \theta_3 + d_3 l_1 m_3 \cos(\theta_2 + \theta_3) \\
 M_{22} &= J_{o_2} + d_2^2 m_2 + d_3^2 m_3 + l_2^2 m_3 + 2d_3 l_2 m_3 \cos \theta_3 \\
 M_{23} &= d_3^2 m_3 + d_3 l_2 m_3 \cos \theta_3 \\
 M_{31} &= d_3^2 m_3 + d_3 l_2 m_3 \cos \theta_3 + d_3 l_1 m_3 \cos(\theta_2 + \theta_3) \\
 M_{32} &= d_3^2 m_3 + d_3 l_2 m_3 \cos \theta_3, \quad M_{33} = J_{o_3} + d_3^2 m_3
 \end{aligned} \tag{16}$$

$$\begin{aligned}
 H_{12} &= (-d_2 l_1 m_2 - l_1 l_2 m_3) \sin \theta_2 - d_3 l_1 m_3 \sin(\theta_2 + \theta_3) \\
 H_{13} &= -d_3 l_2 m_3 \sin \theta_3 - d_3 l_1 m_3 \sin(\theta_2 + \theta_3) \\
 H_{21} &= (d_2 l_1 m_2 + l_1 l_2 m_3) \sin \theta_2 + d_3 l_1 m_3 \sin(\theta_2 + \theta_3), \\
 H_{23} &= -d_3 l_2 m_3 \sin \theta_3, \quad H_{11} = H_{22} = H_{33} = 0 \\
 H_{31} &= d_3 l_2 m_3 \sin \theta_3 + d_3 l_1 m_3 \sin(\theta_2 + \theta_3), \\
 H_{32} &= d_3 l_2 m_3 \sin \theta_3
 \end{aligned} \tag{17}$$

$$\begin{aligned}
 K_{11} &= (-2d_2 l_1 m_2 - 2l_1 l_2 m_3) \sin \theta_2 - 2d_3 l_1 m_3 \sin(\theta_2 + \theta_3), \\
 K_{12} &= -2d_3 l_2 m_3 \sin \theta_3 - 2d_3 l_1 m_3 \sin(\theta_2 + \theta_3) \\
 K_{13} &= -2d_3 l_2 m_3 \sin \theta_3 - 2d_3 l_1 m_3 \sin(\theta_2 + \theta_3) \\
 K_{22} &= -2d_3 l_2 m_3 \sin \theta_3, \quad K_{23} = -2d_3 l_2 m_3 \sin \theta_3 \\
 K_{31} &= 2d_3 l_2 m_3 \sin \theta_3, \quad K_{21} = K_{32} = K_{33} = 0
 \end{aligned} \tag{18}$$

5. Numerical simulations

The dynamic model of the index finger is established in equation (13). By using equation (13), the motions of the index finger can be obtained for the given torques τ_1 , τ_2 and τ_3 . In this section, the numerical simulations of the finger's motions are conducted. Moreover, the coefficients of equation (13) are listed in table 1.

Table 1. Coefficients of equation (13)

Parameter	Value	Unit	Parameter	Value	Unit
l_1	1.5	m	m_1	0.1	kg
l_2	1.5	m	m_2	0.1	kg
l_3	1.5	m	m_3	0.1	kg
d_1	1	m	J_{o_1}	1	kg·m ²
d_2	1	m	J_{o_2}	1	kg·m ²
d_3	1	m	J_{o_3}	1	kg·m ²
k	1	N/m	J_o	1	kg·m ²

present an oscillating trend is that the damping factors such as friction between moving pairs and friction of the motor are ignored in this study. Furthermore, the influence of the damping factors on the dynamics of the index finger will be researched in the future work.

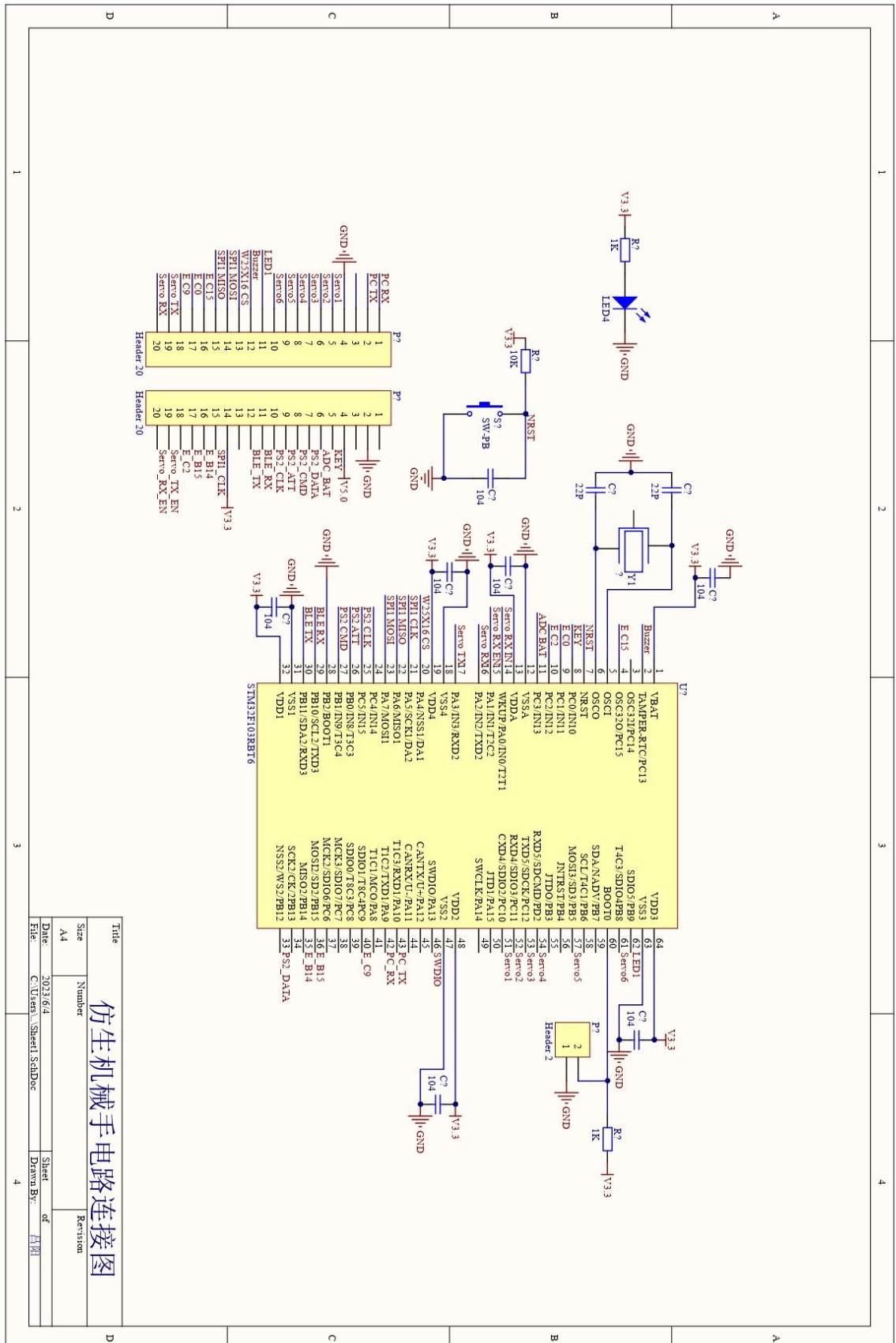
Acknowledgments

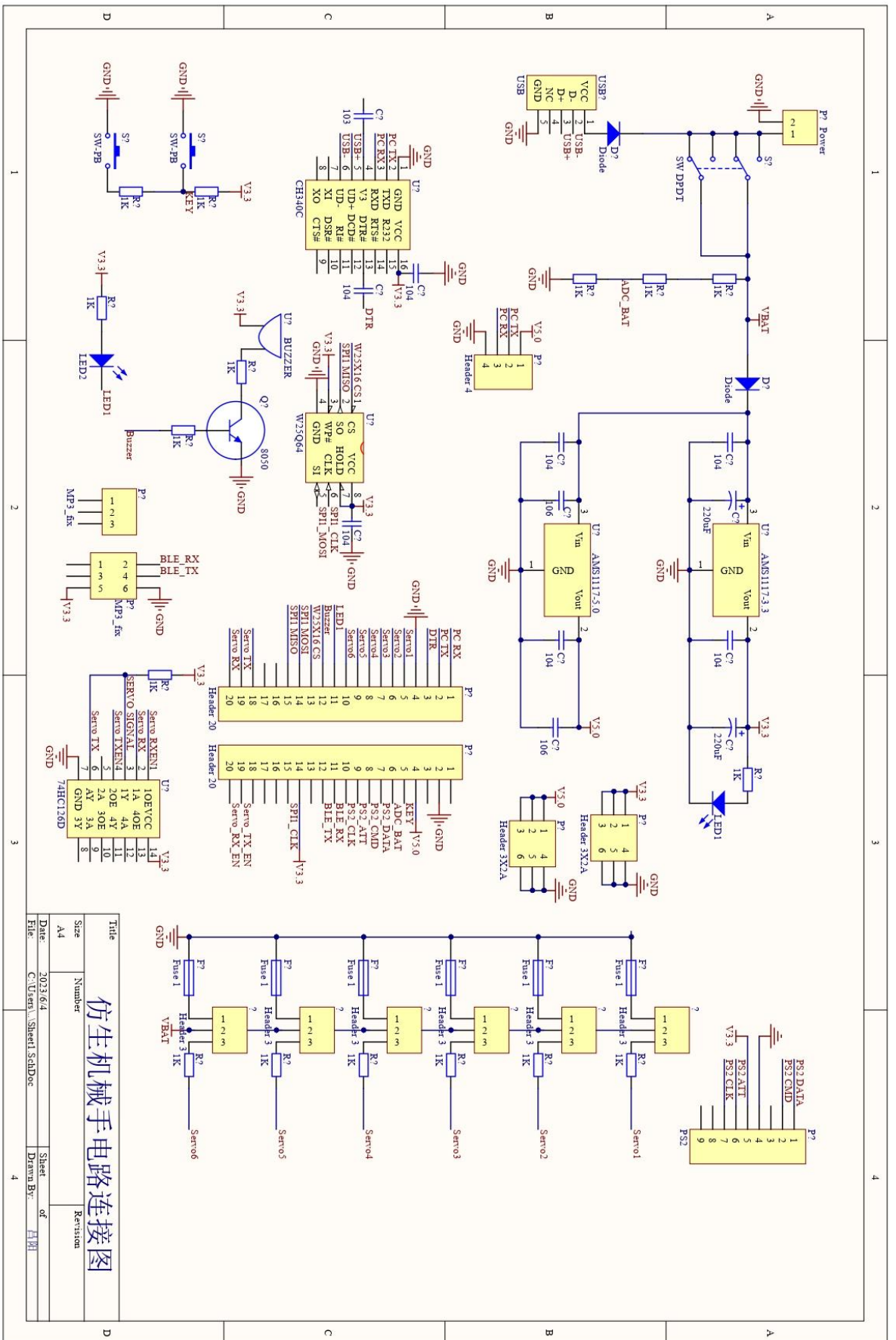
The authors gratefully acknowledge the support of the Natural Science Foundation of Fujian Province, China (Grant No. 2018J05088), the Scientific Research Foundation of Jimei University (Grant No. ZQ2017005), Training Program of the National Natural Science Foundation of Jimei University (ZP2020047) and the Young and Middle-aged Teacher Education Scientific Program of Fujian Province (Grant No. JAT200250).

References

- [1] National Bureau of Statistics, Leading Group of the Second National Sampling Survey on Disabled Persons. (2007) The second national handicapped person sampling survey of main data bulletin. <http://www.stats.gov.cn/tjsj/ndsj/shehui/2006/html/fu3.htm>.
- [2] Wang, R. C. (1998) The detection and analysis of surface EMG. *Chinese Journal of Biomedical Engineering*, 2: 63-66.
- [3] Li, X., Li D., Zhang G., Lu Z. (2006) Study on the control of bionic hand by electromyography signal. *China Journal of Mechanical Engineering*, 3: 488-490.
- [4] Cai, L. Y., Wang, Z. Z., Zhang H. H. (2000) Surface EMG signal classification method based on wavelet transform. *Journal of Data Acquisition & Processing*, 2: 255-258.
- [5] Lv, X., Qiao, S., Huang, Y., Liu, R. (2018) Analysis of stable grasp configuration of under actuated manipulator driven by wir. *Journal of Southeast University*, 3: 309-316.
- [6] Chen, C., Chai, G., Guo, W., Sheng, X., Dario, F., Zhu, X. (2019) Prediction of finger kinematics from discharge timings of motor units: implications for intuitive control of myoelectric Prostheses. *Journal of Neural Engineering*, 16: 026005.
- [7] He, X., Li, S., Hao, G. (2009) Mechanism design and experimental research of over-underactuated bionic manipulator. *Journal of Machine Design*, 26: 35-38.
- [8] Shen, Q., He, Y. (2002) Structural design and analysis of bionic manipulator. *Journal of Donghua University*, 1: 37-40.
- [9] Ji, Y., Wang, H., Zhao, C., Li, F. (2006) Mechanism Design and Kinematics Analysis of Prosthetic Manipulator. *Journal of Machine Design*, 6: 32-34.
- [10] Chu, L. (2014) Study on the optimization of grasp performance and grasp force control of under-actuated prostheses. Central South University, Changsha.
- [11] Huang, H., Fang, H., Jiang, L., Liu, H. (2010) Dynamic modeling and control of under-actuated finger based on virtual spring. *Journal of Jilin University*, 6: 1688-1692.
- [12] Shi, S., Gao, X., Jiang, L., Liu, H. (2004) Development of under-actuated adaptive robotic hand. *Robot*, 6: 496-501.
- [13] Mao, Y., Zhu, X., Li, S., Yang, F. (2008) Design of a new under-actuated humanoid manipulator. *Machine Design and Research*, 3: 33-38.
- [14] Li, X., Huang, Q., Chen, X., Yu, Z., Zhu, J., Han, Jianda. (2017) A novel under-actuated bionic hand and its grasping stability analysis. *Advances in Mechanical Engineering*, 9: 879-880.

附录二 总体电路连接图





附录三 主控程序

```
#include "include.h"
uint16 ServoPwmDuty[6] = {1500,1500,1500,1500,1500,1500};
//PWM 脉冲宽度
uint16 ServoPwmDutySet[6] = {1500,1500,1500,1500,1500,1500};
//PWM 脉冲宽度
float  ServoPwmDutyInc[6];
//当 PWM 脉宽发生变化时，每 2.5ms 或 20ms 递增 PWM 脉宽
bool ServoPwmDutyHaveChange = FALSE; //脉宽有变化标志位
uint16 ServoTime = 2000; //舵机从当前角度运动到指定角度的时间
void ServoSetPluseAndTime(uint8 id,uint16 p,uint16 time)
{
    if(id >= 0 && id <= 5 && p >= 500 && p <= 2500)
    {
        if(time < 20)
            time = 20;
        if(time > 30000)
            time = 30000;
        if(id == 4)
        {
            if(p > 2500)
                p = 2500;
            else if(p < 500)
                p = 500;
        }
        else
        {
            if(p > 2200)
                p = 2200;
            else if(p < 900)
                p = 900;
        }
        ServoPwmDutySet[id] = p;
        ServoTime = time;
    }
}
```

```
ServoPwmDutyHaveChange = TRUE;
}
}
void ServoPwmDutyCompare(void)//脉宽变化比较及速度控制
{
    uint8 i;
    static uint16 ServoPwmDutyIncTimes;//需要递增的次数
    static bool ServoRunning = FALSE; //舵机以指定速度到达指定位置
    if(ServoPwmDutyHaveChange)//停止运动并且脉宽发生变化时才进行计算
    {
        ServoPwmDutyHaveChange = FALSE;
        ServoPwmDutyIncTimes = ServoTime/20;
        //每 20ms 调用一次 ServoPwmDutyCompare()函数
        for(i=0;i<6;i++)
        {
            //if(ServoPwmDuty[i] != ServoPwmDutySet[i])
            {
                if(ServoPwmDutySet[i] > ServoPwmDuty[i])
                {
                    ServoPwmDutyInc[i] = ServoPwmDutySet[i] - ServoPwmDuty[i];
                    ServoPwmDutyInc[i] = -ServoPwmDutyInc[i];
                }
            }
        }
        ServoRunning = TRUE; //舵机开始运转
    }
    if(ServoRunning)
    {
        ServoPwmDutyIncTimes--;
        for(i=0;i<6;i++)
        {
            if(ServoPwmDutyIncTimes == 0)
            {
                ServoPwmDuty[i] = ServoPwmDutySet[i];
                ServoRunning = FALSE; //到达指定位置，舵机停止运动
            }
        }
    }
}
```

```
else
    {
        ServoPwmDuty[i] = ServoPwmDutySet[i] +
            (signed short int)(ServoPwmDutyInc[i] * ServoPwmDutyIncTimes);
    }
}
}
略
```