

西安交通大学



五自由度机器人结构设计与 轨迹规划

**Mechanical structure design and trajectory planning of five
degree of freedom manipulator**

学 院：机械学院

班 级：硕 8005 班

姓 名：朱继东

学 号：3118101192

指导老师：董霞

2019 年 6 月

摘要

本文以五自由度机械臂为研究对象，进行了机械臂的结构设计、运动求解、轨迹规划、传感器选型以及图像处理部分。机械臂的结构包括端部执行器、运动机构和底座三部分。端部执行器又称为手部，运动机构包括腕部、臂部、腰关节、肩关节和肘关节。机械臂的结构设计使其能够完成一系列的预定动作。在本文中，根据不同的情况进行了正运动求解和逆运动求解。在此基础上，以任务特点为前提，根据作业过程与返回过程两端点的关节位置、角速度四个边界约束条件，采用三次多项式规划策略插补完成了机械臂作业过程与返回过程的关节轨迹规划。针对五自由度机器人的工作环境及任务，介绍了传感器的工作原理及分类，选择了位置传感器、腕力传感器、关节力传感器以及视觉传感器等，介绍了多传感信息融合。最后，对视觉图处理做了简单案例分析，包括图像获取、灰度化、边缘检测、二值化等处理程序。

关键词：五自由度机械臂；结构设计；运动求解；轨迹规划

Abstract

In this paper, the structure design, motion solution, trajectory planning, sensor selection and image processing of a five-degree-of-freedom manipulator are studied. The structure of the manipulator consists of three parts: end actuator, motion mechanism and base. The end effector is also called the hand. The motion mechanism includes wrist, arm, lumbar joint, shoulder joint and elbow joint. The structural design of the manipulator enables it to complete a series of predetermined actions. In this paper, the forward motion and the inverse motion are solved according to different situations. On this basis, on the premise of task characteristics, according to the four boundary constraints of joint position and angular velocity at both ends of the operation process and return process, the joint trajectory planning of the manipulator during operation and return process is completed by using cubic polynomial interpolation strategy. Aiming at the working environment and tasks of a five-degree-of-freedom robot, the working principle and classification of sensors are introduced. Position sensors, wrist force sensors, joint force sensors and visual sensors are selected, and multi-sensor information fusion is introduced. Finally, a simple case study of visual image processing is made, including image acquisition, graying, edge detection, binarization and other processing procedures.

Key Words: 5-DOF robot manipulator; mechanical design; trajectory planning

目录

第 1 章 绪论.....	6
1.1 概述.....	6
1.2 国内外发展现状.....	6
1.3 研究内容与意义.....	7
第 2 章 五自由度机械臂结构设计.....	8
2.1 五自由度机械臂概述.....	8
2.2 底座的设计.....	10
2.3 臂部的设计.....	10
2.3.1 臂部的组成和作用.....	10
2.3.2 臂部设计的基本要求.....	11
2.3.3 臂部的常用结构.....	11
2.4 腕部的设计.....	12
2.4.1 腕部的作用.....	12
2.4.2 腕部的分类.....	12
2.5 手部的设计.....	13
2.5.1 手部的特点.....	13
2.5.2 手部的分类.....	13
2.6 驱动机构的选择.....	14
2.7 本章小结.....	15
第 3 章 运动求解与轨迹规划.....	16
3.1 机械臂运动学.....	16
3.2 问题描述.....	16
3.3 正运动学求解.....	18
3.4 逆运动学求解.....	19
3.5 轨迹规划.....	21
3.6 本章小结.....	23
第 4 章 传感器选型、安装分析及多传感信息融合处理.....	24
4.1 传感器概述.....	24
4.1.1 传感器组成.....	24
4.1.2 传感器分类.....	24
4.2 传感器选型分析.....	25
4.2.1 机器人传感器选型的要求.....	25
4.2.2 五自由度机器人传感器选型.....	26
4.3 多传感信息融合处理.....	30
4.4 本章小结.....	31
第 5 章 机器视觉图像处理.....	32
5.1 机器视觉概述.....	32
5.2 焊缝识别方案设计.....	32
5.3 本章小结.....	34
第 6 章 总结与展望.....	35

参考文献.....	36
附件.....	37

第 1 章 绪论

1.1 概述

随着市场经济的发展,商品生产从单一品种、大批量生产向多品种、小批量生产过渡,对于产品质量的提高、成本的降低提出了越来越高的要求。随着生产和技术的进步,人们需要机器代替人完成一些人类无法完成或不能高质量完成度的任务。机器人正是为适应市场变化及生产自动化的更高要求而出现的。机器人的定义处于不断发展变化之中,目前尚无统一的严格定义。通常,机器人被设计成类似于人类手臂的结构,所以又常被称为机器人操作手或机械臂,便形成机器人重要分支之一的工业机器人^[1,2]。

其中以机械臂为代表的工业机器人具有工作效率高、稳定可靠、重复精度好、能在高危环境下作业等优势,在传统制造业、特别是劳动密集型产业的转型升级中将发挥重要作用^[3]。

机械臂能够模仿人手和臂的某些动作功能,用来通过固定程序抓取、搬运物件或者操作工具的自动化装置。机械臂可以用来替代人的繁重劳动以实现生产的机械化和自动化,能在有害环境下操作以保护人身安全,因此广泛应用于机械制造、冶金、电子、轻工和能源的领域。随着电机、减速器、驱动、软件等技术的快速发展,机械臂快速进入更多的领域,得到更广泛的应用。

1.2 国内外发展现状

工业机器人最早出现是在 1969 年,Victor Scheinman 发明了“斯坦福机械臂”,该发明是一款全电动的 6 轴铰接式机器人,它可以实现机械臂的任意运动路径的规划。在该基础上,Victor Scheinman 设计了“MIT arm”,并和 GM 公司合作开发了 PUMA 机器人^[4]。

随后出现了各式各样的工业机器人,主要是以解决工业上的制造、加工需求,以完成一些简单的、重复性的动作和任务。通过文献搜索发现目前大量使用的有焊接机器人、机器人自动化装配线、搬运机器人、打磨抛光机器人、移动式机器人以及缝纫机器人等^[5]。机械臂作为工业机器人中的一个重要部分,对其的研究也越来越广。关于多自由度机械臂的结构设计、运动控制和轨迹规划是实现机器人自动化的一个重要研究方向。

在机器人机构方面,结合机器人在各个领域及各种场合的应用,研究人员开展了丰富而富有创造性的工作。在研究初期,机械手臂主要从事工业作业。工作简单,适应性差,重复运动多,因此对机械手本身的自由度的要求就比较低。一般自由度就能满足作业要求。然而,在科技高速发展的今天,人类所面临的工作

越来越复杂精细，在实际操作中，需要灵巧多变的操作手来适应任何角度、任何位置的安排。少自由度操作手臂显然不能满足现代产业制造和任务执行的需要，所以要增加自由度以增大手臂的工作范围和效率^[6]。

迄今为止，少自由度机械手臂的研究已经趋于完善，无论在运动学控制还是在动力学控制方面，都可按照设计者的意途去执行。这主要得利于少自由度机械手的运算简单，误差易于修正等因素。但是由于它自身的缺陷，其发展潜力已至极限。多自由度手臂以其自身结构优势已经成为发展的主流。其特点是工作范围广，精确度高，稳定性好，操作更加简单。虽然，当自由度大于后，其运算量成倍增加，但是依靠先进的计算机技术，与各关节变量相关的数据计算已不是难题。而且，为了突破传统机器人在工作范围上的限制，可将多自由度机械手安装在一个移动平台上，形成移动机器人。这更加扩展了机器人的功能性和实用性。当然，越复杂的机体，其设计就会越困难。对于移动机器人，不光要考虑机械手的定位，还要考虑平台的位姿、运动轨迹等实际问题，其受控的难度显而易见^[7,8]。因此多自由度机器人的研究应该得到充足重视。基于此，本文选择五自由度机械手作为研究对象。

1.3 研究内容与意义

本文将以五自由度机械臂设计载体，围绕五自由度机械臂的结构设计、运动求解和轨迹规划展开研究。结构设计方面，主要任务是完成一个五自由度机械臂的结构设计，包括端部执行器，运动机构和底部基座。运动求解，分别考虑正运动求解和逆运动求解两种不同的情况，进行求解。并在此基础上，完成五自由度机械臂的轨迹规划策略。

五自由度机械臂的结构设计是最常见的机械结构为参考，要求可实现预定的功能，包括移动和抓取等动作。

机械臂运动学不考虑使机械臂产生运动的力或力矩，只研究机械臂的运动特性，即机械臂的位置、速度、加速度以及位置变量相对于时间或其他变量的所有高阶导数。机械臂运动学涉及所有与运动有关的几何参数和时间参数，通常包括位置、速度、加速度的正、逆问题。

因此，本文的主要研究内容包括如下几点：

- 1) 了解现有机械臂的发展现状和趋势；
- 2) 以五自由度机械臂为设计对象，完成五自由度机械的结构设计；
- 3) 掌握多自由度机械臂的运动学求解，进行五自由度机械臂的运动求解，包括正运动求解和逆运动求解；
- 4) 在上述基础上，根据实际情况，完成五自由度机械臂的轨迹规划。

第 2 章 五自由度机械臂结构设计

2.1 五自由度机械臂概述

关节型机器人（articulated robot）是模拟人的上臂而构成的。为了保证机器人手部有 6 个空间自由度，其主动关节数目一般为 6，或不少于 6。一般情况下，全部关节皆为转动型关节，而且其前 3 个关节一般都集中在手腕部。关节型机器人的特点是结构紧凑，所占空间体积小，相对的工作空间最大，还能绕过基座周围的一些障碍物，是机器人中使用最多的一种结构形式。本文所涉及的就是这种关节机器人，也就是所说的机械臂。多关节机械臂的优点是：动作灵活、运动惯性小、通用性强、能抓取靠近机座的工件，并能绕过机体和工作机械之间的障碍物进行工作。串联多关节机器人目前广泛应用于工业自动化生产线上，从工业机器人的发展历程，可以看出串联多关节机器人的发展^[9,10]。本文的主要工作就是设计一种轻巧灵活的串联多关节机械臂，并且在此基础上对机械臂的运动学分析和求解，分析机械臂的结构特性。并进行轨迹规划。

机械结构的功能主要是靠机械零部件的几何形状及各个零部件之间的相对位置关系实现，在机器或机械中，任何零件都不是孤立存在，而是相互配合来完成预期的动作。机械臂的结构组成一般包括端部执行器、运动机构和底座三部分。

端部执行器又称为手部，负责机械臂的任务执行，如抓取、切削、喷涂等。本文中机械臂的主要任务是抓取，其根据被抓持物件的形状、尺寸、重量、材料和作业要求而有多种结构形式，如夹持型、托持型和吸附型等。手部的传力机构形式教多，常用的有：滑槽杠杆式、连杆杠杆式、斜楔杠杆式、齿轮齿条式、丝杠螺母式、弹簧式和重力式。

运动机构包括腕部、臂部、腰关节、肩关节和肘关节等。运动机构是使手部完成各种转动（摆动）、移动或复合运动来实现规定的动作，改变被抓持物件的位置和姿态。运动机构的升降、伸缩、旋转等独立运动方式，称为机械手的自由度。为了抓取空间中任意位置和方位的物体，需有 6 个自由度。前三个自由度（腰关节、肩关节和肘关节）负责将手部移动到规定的位置，后三个自由度（腕部）负责改变手部的姿态。自由度可以分为转动和平动自由度，是机械手设计的关键参数，自由度越多，机械手的灵活性越大，通用性越广，其结构也越复杂。

腕部是连接手部和臂部的部件，并可用来调节被抓物体的方位，以扩大机械手的动作范围，并使机械手变的更灵巧，适应性更强。手腕有独立的自由度。有回转运动、上下摆动、左右摆动。一般腕部设有回转运动再增加一个上下摆动即可满足工作要求，有些动作较为简单的专用机械手，为了简化结构，可以不设腕部，而直接用臂部运动驱动手部搬运工件。目前，应用最为广泛的手腕回转运动

机构为回转液压（气）缸，它的结构紧凑，灵巧但回转角度小（一般小于 270° ），并且要求严格密封，否则就难保证稳定的输出扭矩。因此在要求较大回转角的情况下，采用齿条传动或链轮以及轮系结构。

臂部是机械手的重要握持部件，它的作用是支撑腕部和手部（包括工件或夹具），并带动他们做空间运动。手臂的各种运动通常用驱动机构（如液压缸或者气缸）和各种传动机构来实现，从臂部的受力情况分析，它在工作中既受腕部、手部和工件的静、动载荷，而且自身运动较为多，受力复杂。因此，它的结构、工作范围、灵活性以及抓重大小和定位精度直接影响机械手的工作性能^[11]。

底座是支撑机械手的结构，分为移动底座和固定底座。

本文的机械臂固定在一个固定底座上，其一共有五个转动自由度，其中腰部、肩部和肘部各一个，另外腕部还有两个转动自由度，故称五自由机械臂，或 5R 机械臂。

机械臂的模型图如图 1.1。

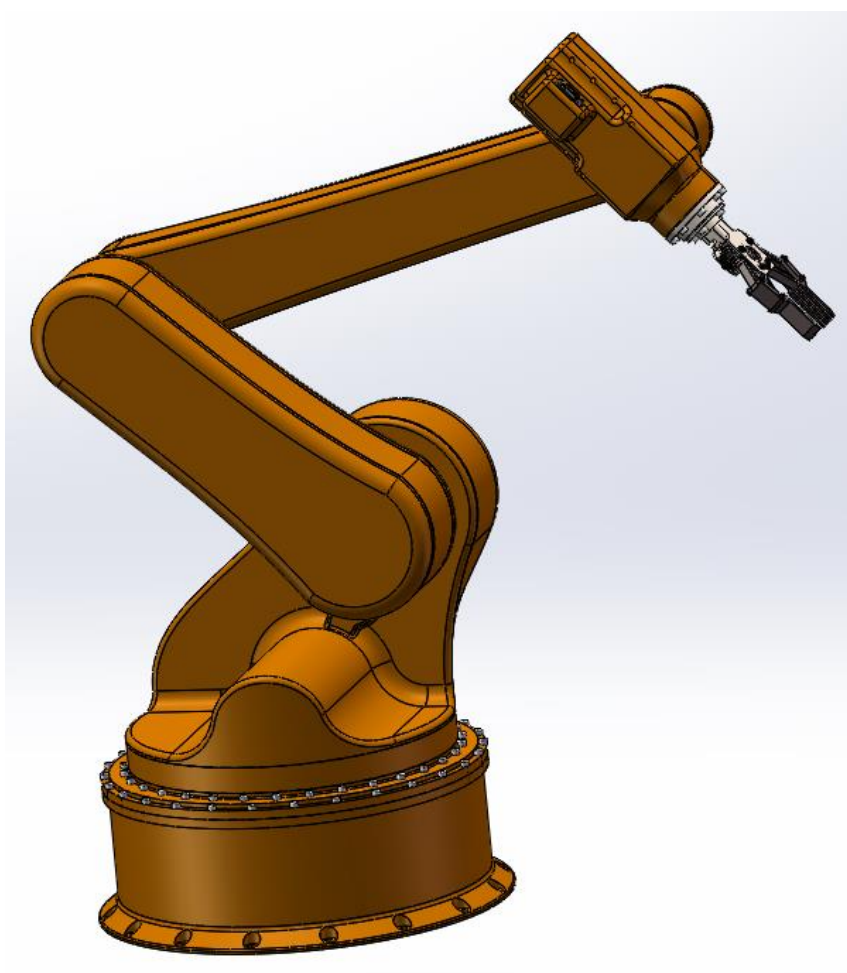


图 1.1 机械臂的模型图

2.2 底座的设计

底座是用于支承和连接若干部件的基础零件。它承受其他零部件的重量和工作载荷，又起到保证各零部件相对位置的基础作用。底座多采用铸件，其基本特点是尺寸相对于其他零件较大。其次底座的变形和振动将直接影响操作的平稳性故对刚度和抗振性提出下列要求：

- (1) 刚度和抗振性
- (2) 热变形
- (3) 稳定性
- (4) 其他要求

底座的三维图如图 1.2 所示：

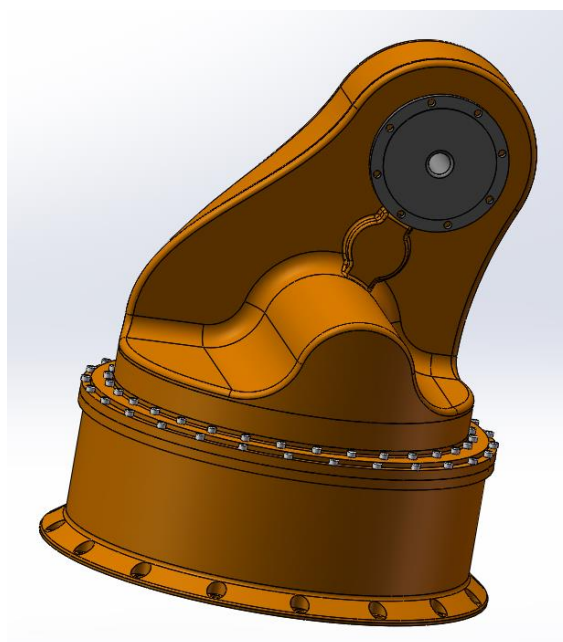


图 1.2 底座模型图

2.3 臂部的设计

2.3.1 臂部的组成和作用

一般机械手的臂部由大臂、小臂组成，一般具有两个自由度，即伸缩、回转、俯仰或升降。在运动时，直接承受腕部、手部和工件的静、动载荷；臂部是机械手的主要执行元件，其作用是支承手部和腕部并改变手部的空间位置。

2.3.2 臂部设计的基本要求

臂部的结构形式必须根据机器人的运动形式、抓取动作自由度、运动精度等因素来确定。同时，设计时必须考虑到手臂的受力情况，液压（气压）缸及导向装置的布置、内部管路与手腕的连接形式等因素。因此，设计臂部时一般要注意下述要求。

- (1) 手臂应具有足够的承载能力和刚度。
- (2) 导向性要好。
- (3) 重量和转动惯量要小。
- (4) 运动要平稳、定位精度要高。

2.3.3 臂部的常用结构

(1) 手臂直线运动机构

机械人手臂的伸缩、横向移动均属于直线运动。实现手臂往复直线运动的机构形式比较多，长用的有液压缸、齿轮齿条机构、丝杠螺母机构及连杆机构等。由于液压缸体积小、重量轻，因而在机器人的手臂结构中应用比较多。大臂的三维图如图 1.3 所示。

(2) 手臂回转运动机构

实现机器人手臂回转运动的机构形式多种多样，常用的有叶片式回转缸、齿轮传动机构、链轮传动机构、活塞缸和连杆机构等。小臂的三维图如图 1.4 所示。

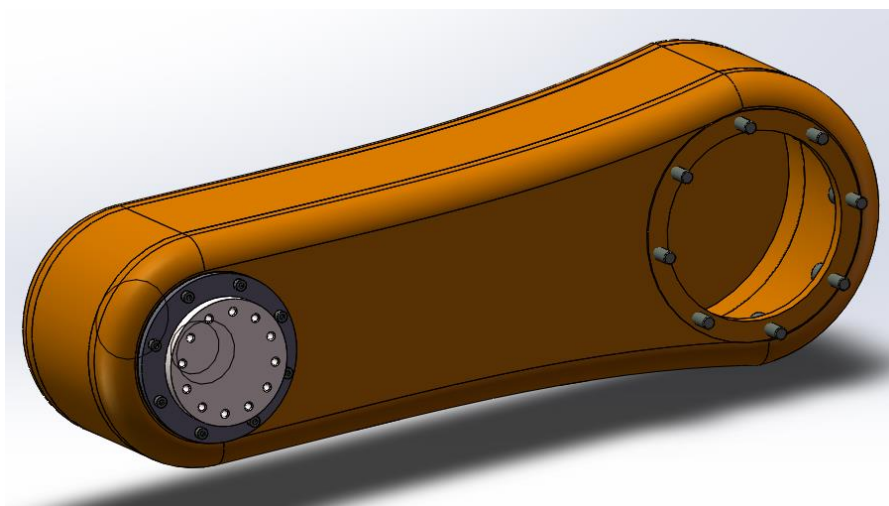


图 1.3 大臂的三维图

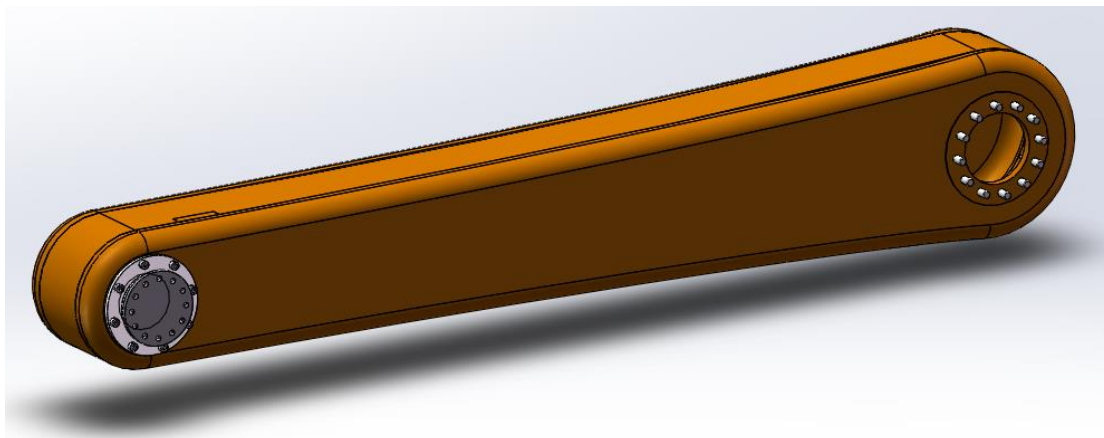


图 1.4 小臂的三维图

2.4 腕部的设计

2.4.1 腕部的作用

工业机器人的腕部是连接手部与臂部的部件，起支承手部的作用。机器人一般要具有 6 个自由度才能使手部达到目标位置和处于期望的姿态，手腕的自由度主要用来实现所期望的姿态。

2.4.2 腕部的分类

（1）按自由度数目分类

单自由度手腕：单自由度手腕仅仅实现偏转、俯仰和翻转三个自由度中的一种，其中翻转的角度较大，可达 360° 。而俯仰和偏转一般受结构限制，角度较小。这和人的手腕类似，手的左右偏转角只有 55° 和 15° ，手的上下俯仰角度只有 85° 。

二自由度手腕：二自由度手腕通常由偏转、俯仰和翻转三个自由度中任意两个构成。

三自由度手腕：通常由偏转、俯仰和翻转三个自由度构成。在此基础上也有许多变化。

（2）按驱动方式分类

直接驱动手腕：驱动源一般放在手腕上，这种直接驱动手腕的关键是能否设计和加工出尺寸小、重量轻而驱动扭矩大、驱动性能好的驱动电机或液压马达。

远距离传动手腕：手腕的驱动源一般固定在机架上。

机器人手腕部的三维图如图 1.5 所示

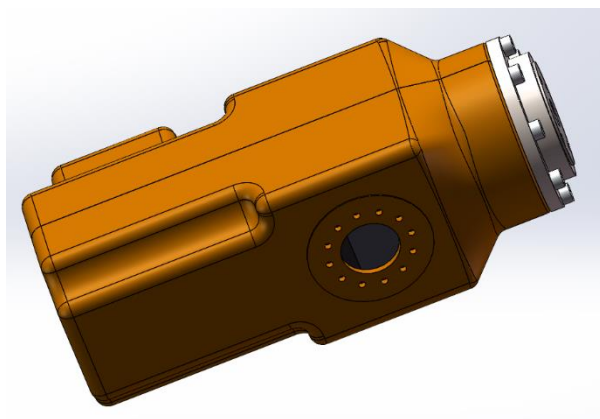


图 1.5 腕部的三维图

2.5 手部的设计

2.5.1 手部的特点

工业机器人的手部是装在工业机器人手腕上直接抓握工件或执行作业的部件。工业机器人手部有以下一些特点。

- (1) 手部与手腕相连处可拆卸。手部与手腕有机械接口。也可能有电、气、液的接头，当工业机器人作业对象不同时，可以方便地拆卸和更换手部。
- (2) 手部是工业机器人的末端操作器。它可以像人手那样具有手指，也可以不具备手指。
- (3) 手部的通用性比较差。工业机器人的手部通常是专用的装置，一种手爪往往只能抓握一种工件或几种在形状、尺寸、质量等方面相近似的工件，只能执行一种作业。
- (4) 手部是一个独立的部件，假如把手腕归属于臂部，那么，工业机器人机械系统的三大件就是机身、臂部和手部。手部是决定整个工业机器人作业完成好坏、作业柔性好坏的关键部件之一。

2.5.2 手部的分类

由于手部要完成的作业任务繁多，手部的类型也多种多样。根据其用途，手部可分为手爪和工具两大类。手爪具有一定的通用性，它的主要功能是抓住工件、握持工件、释放工件。工具用于进行某种作业。

根据其夹持原理，手部又可分为机械钳爪和吸附式两大类。其中吸附式手部还可以分为磁力吸附式和真空吸附式两类。吸附式手部机构的功能超出了人手的

功能范围。在实际应用中，也有少数特殊形式的手部。

本机械手的手部采用两个对称的四杆机构组成，由一个舵机通过齿轮机构驱动其中一个连杆转动，实现手爪的开合。手部的三维图如图 1.6 所示。

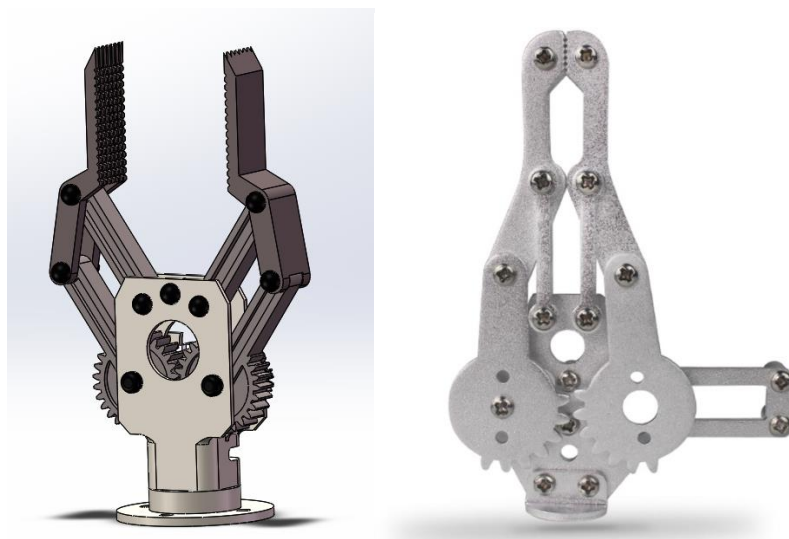


图 1.6 手部三维图及实物图

2.6 驱动机构的选择

驱动机构是机械手的重要组成部分，机械手的性能价格比在很大程度上取决于驱动方案及其装置。根据动力源的不同，工业机械手的驱动机构大致可分为液压、气动、电动和机械驱动等四类。本机械手的驱动方案选择电机驱动，这种驱动方式具有结构简单、易于控制、使用维修方便、不污染环境等优点，这也是现代机械手应用最多的驱动方式。

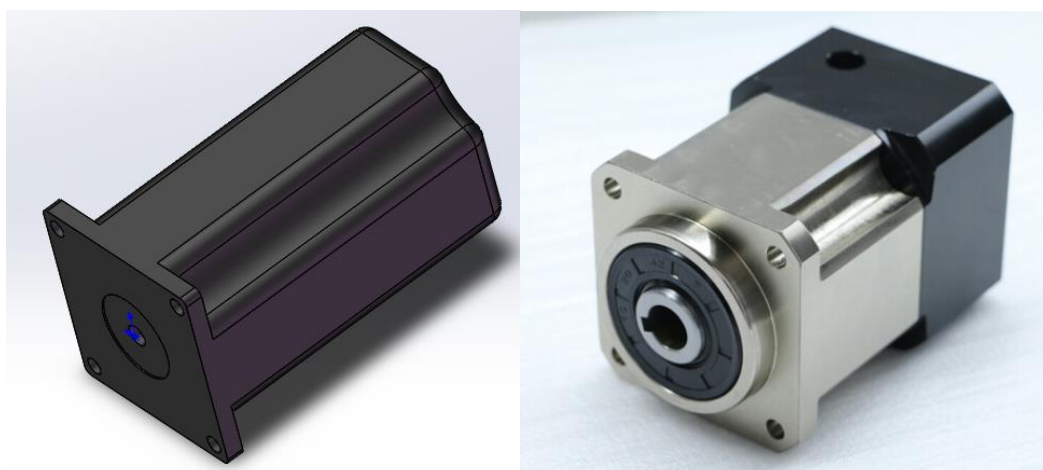


图 1.7 电机

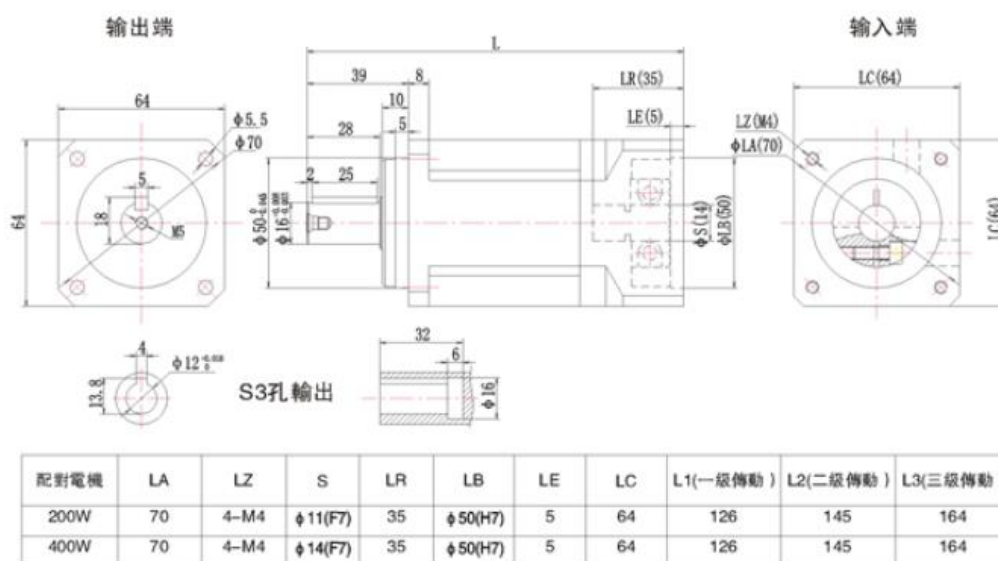


图 1.9 PLX60 伺服电机参数

这里选择硕普公司的型号为 PLX60，速比在 4~10 的伺服电机，此电机使用了德国阿尔法（alpha）技术行星减速机，具有精度高、噪音低、稳定性强的优点，同时齿轮采用了优质进口合金钢，硬度高、耐磨、使用寿命长的特点，齿圈采取一体成型，同心度非常精准，传动稳定性强。图 1.9 所示，型号 PLX60 伺服电机的参数。

2.7 本章小结

本章对机械手的结构组成进行了分析，对比了各种结构形式的特点，设计了各组成部分的结构形式，确定了具体的三维模型，确定了驱动机构的形式和具体型号。

首先对机械手的结构设计进行了概述，分析了结构的组成，讨论了各结构的作用和类型。然后，对比了各种结构形式的特点。接着，综合考虑各种因素之后，结合相关的设计要求，设计了各组成部分的具体结构形式，确定了详细的三维模型。最后，确定了驱动机构的形式和具体型号。本机械臂采用固定底座，一共有五个转动自由度，其中腰部、肩部和肘部各一个，用来确定末端执行器的空间位置；腕部有两个正交的转动自由度，用来确定末端执行器的姿态。机械臂的末端执行器为采用两个四杆机构组成的手爪，可以用来抓取物体。

第 3 章 运动求解与轨迹规划

3.1 机械臂运动学

机械臂运动学不考虑使机械臂产生运动的力或力矩,只研究机械臂的运动特性,即机械臂的位置、速度、加速度以及位置变量相对于时间或其他变量的所有高阶导数。机械臂运动学涉及所有与运动有关的几何参数和时间参数,通常包括位置、速度、加速度的正、逆问题。

机械臂的位置正问题即机械臂正运动学,是已知机械臂关节的角度值,计算机械臂末端的位姿。为了便于处理机械臂的复杂几何参数,首先要在机械臂的每个连杆上分别固连一个连坐标系,然后再描述这些坐标系之间的关系。描述机械臂的机构运动参数的方法很多,最为经典的运动学模型是由 **Danevit** 和 **Hartenberg** 给出的 **D-H** 模型^[12]。机械臂的位置逆问题即机械臂逆运动学,是已知机械臂末端的位姿,计算机械臂关节的角度值。这个问题的求解方法可分为两大类:封闭解法和数值解法。封闭解法又可分为代数法和几何法,其特点是可以找到所有的逆解,且计算速度比较快。代数法主要有消元法、聚筛法、Groebner 基法、吴文俊法等,通俗易懂,但矩阵元素过多,计算比较复杂。数值解法主要有消元法、延拓法、迭代计算法等,不受机械臂的结构限制^[13]。

本节将研究五自由度机械手的正向、逆向运动学。当已知所有的关节变量时,可用正运动学来确定机器人末端执行器的位姿。换言之,已知机械手所有连杆长度和关节角度,那么计算机器人手的位姿就称为正运动学分析。如果要使机器人末端手放在特定的点上并且具有特定的姿态,可用逆运动学来计算出每一关节变量的值,使机械手末端执行器放置在期望的位姿,这就叫做逆运动学分析^[14-16]。事实上,逆运动学方程更为重要,机械手控制器将用这些方程来计算关节值,并以此来运行机械手到达期望的位姿。

3.2 问题描述

假设 5 自由度机械臂根据外部给定的目标信息 (P, V, t_{f1}) ,表示末端机械手中心位置从静态初始点开始动作,在 t_{f1} 时刻运动至目标作业点位置 (P) 并以要求的笛卡尔速度 (V) 对目标作业,随后从目标作业点返回至静态初始点,等待下一个目标信息。

从上述任务要求可以将机械臂的动作轨迹分为两部分:

- 1) 机械手从静态初始点运动至目标作业点;

2) 机械手从目标作业点返回静态初始点。

对于机器人系统，可以采用关节向量 Q 随时间变化关系 $Q(t)$ 描述机器人的动作轨迹， $\dot{Q}(t)$ 与 $\ddot{Q}(t)$ 分别反应机器人系统各个关节运动的角速度和角加速度轨。

5 自由度机械臂系统对目标作业的轨迹规划数学模型可以概括为：

对于 5-DOF 机械臂系统 R ，系统工作空间中的障碍区域为 S ，机械臂静态初始点的关节位置状态为 $Q_0 = [Q_{10}, Q_{20}, Q_{30}, Q_{40}, Q_{50}]$ ，目标作业点的位置状态为 $Q_f = [Q_{1f}, Q_{2f}, Q_{3f}, Q_{4f}, Q_{5f}]$ ； t_{f1} 时刻在目标位置的关节角速度矢量为 $\dot{Q}_f = [\dot{Q}_{1f}, \dot{Q}_{2f}, \dot{Q}_{3f}, \dot{Q}_{4f}, \dot{Q}_{5f}]$ ，机械臂对目标物体作业的轨迹规划问题可以描述为在机器人系统所有可能的轨迹中优选一条最优的作业轨迹，使得：

$$Q^*(t) = \arg \min F(Q)$$

边界条件：

作业过程：

$$Q^*(0) = Q_0, \quad Q^*(t_{f1}) = Q_f,$$

$$\dot{Q}^*(0) = 0, \quad \dot{Q}^*(t_{f1}) = \dot{Q}_f$$

返回过程：

$$Q^*(t_{f1}) = Q_f, \quad Q^*(t_{f1} + t_{f2}) = Q_0,$$

$$\dot{Q}^*(t_{f1}) = \dot{Q}_f, \quad \dot{Q}^*(t_{f1} + t_{f2}) = 0,$$

其中 $F(Q)$ 为轨迹优选的目标函数， $Q^*(t)$ 为最优规划轨迹。在运动过程中，还需要满足下面的运动学约束条件：

$$Q_i^{min} \leq Q_i^*(t) \leq Q_i^{max}, \quad \forall t \in [0, t_{f1} + t_{f2}]$$

$$\dot{Q}_i^{min} \leq \dot{Q}_i^*(t) \leq \dot{Q}_i^{max}, \quad \forall t \in [0, t_{f1} + t_{f2}]$$

$$\ddot{Q}_i^{min} \leq \ddot{Q}_i^*(t) \leq \ddot{Q}_i^{max}, \quad \forall t \in [0, t_{f1} + t_{f2}]$$

该 5 自由度机械臂基座固定于地面上，已知该机械臂底座两个关节旋转中心在 Σ_w 中的坐标为 $\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}$ m，下臂（肩心到肘心的距离） L_1 长 0.08m，上臂（肘心到

腕心的距离） L_2 长 0.1m，腕心到机械爪中心的距离为 0.13m。

Σ_1 、 Σ_2 的原点均取为肩心

Σ_3 的原点取为肘心

Σ_4 、 Σ_5 的原点均取为腕心

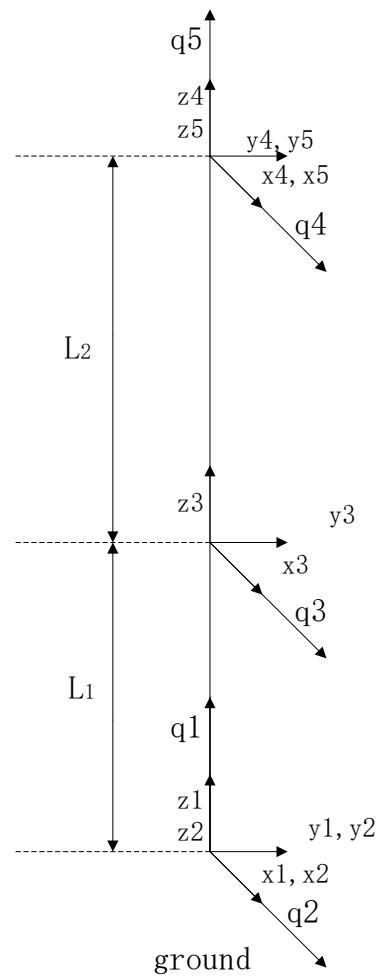
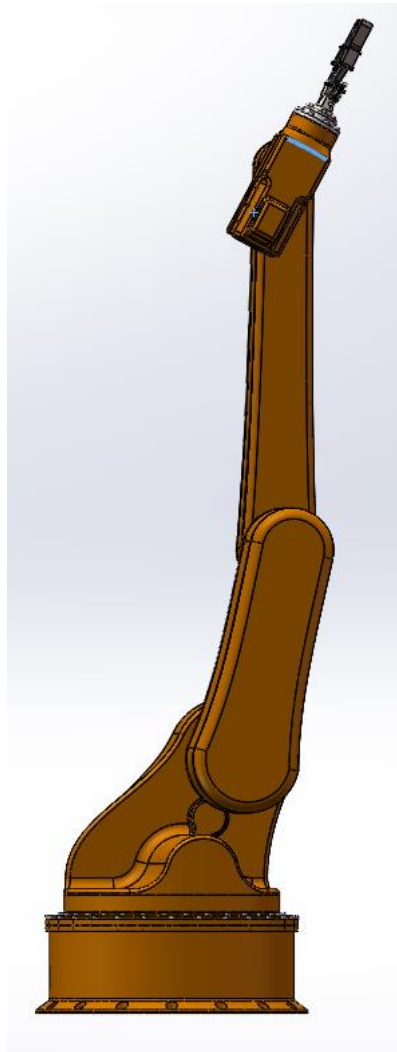
Σ_5 的原点取为机械爪中心

当 $q_1 = q_2 = q_3 = q_4 = q_5 = 0$ 时

下臂和上臂均竖直，肩心、肘心、腕心在同一直线上

Σ_w 、 Σ_1 、 Σ_2 、 Σ_3 、 Σ_4 、 Σ_5 、 Σ_6 、 Σ_5 的 x 轴、 y 轴、 z 轴分别平行

3.3 正运动学求解



$${}^0_1T = \begin{bmatrix} \cos q_1 & -\sin q_1 & 0 & 0 \\ \sin q_1 & \cos q_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0.1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$${}^1_2T = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos q_2 & -\sin q_2 & 0 \\ 0 & \sin q_2 & \cos q_2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$${}^2_3T = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos q_3 & -\sin q_3 & 0 \\ 0 & \sin q_3 & \cos q_3 & 0.08 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$${}^3_4T = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos q_4 & -\sin q_4 & 0 \\ 0 & \sin q_4 & \cos q_4 & 0.1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$${}^4_5T = \begin{bmatrix} \cos q_5 & -\sin q_5 & 0 & 0 \\ \sin q_5 & \cos q_5 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$${}^5F_s = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0.13 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$F_s = {}^0_1T {}^1_2T {}^2_3T {}^3_4T {}^4_5T {}^5F_s$$

当已知 q_1 、 q_2 、 q_3 、 q_4 、 q_5 时，将它们带入上式，可以求得 F_s 。

机械臂的运动学正解是唯一的，即在确定了连杆几何参数以及各个关节的角矢量以后，可以得到唯一确定的末端位姿。在确定了模型的连杆几何参数和关节角矢量以后，可以通过运动学正解来检测所建模型的正确性。

3.4 逆运动学求解

运动学逆问题在机器人运动学、动力学以及机器人控制领域占有极其重要的地位，它直接影响到机器人的控制精度。已知机械臂关键的几何参数，并且给出机械臂末端相对于参考坐标系的期望位姿，求解相应的关节变量，称为运动学逆问题。逆运动学问题求解比较困难,国内外这方面的研究很多,也提出了许多方法,如位姿分离法和解析法求解运动学逆解；反变换法和几何法等^[17]。

5 自由度机械臂基座固定于地面上，已知该机械臂底座两个关节旋转中心在 Σ_w 中的坐标为 $\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}$ m，下臂（肩心到肘心的距离）L1 长 0.08m，上臂（肘心到腕心的距离）L2 长 0.1m，腕心到机械爪中心的距离为 0.13m。

当 $q_1 = q_2 = q_3 = q_4 = q_5 = 0$ 时，下臂和上臂均竖直，肩心、肘心、腕心在同一直线上。 Σ_w 、 Σ_1 、 Σ_2 、 Σ_3 、 Σ_4 、 Σ_5 、 Σ_6 、 Σ_s 的 x 轴、y 轴、z 轴分别平行。

$$\begin{bmatrix} R_s & P_s \\ 0 & 1 \end{bmatrix} = {}^0_1T {}^1_2T {}^2_3T {}^3_4T {}^4_5T \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0.13 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

求 q_1 、 q_2 、 q_3 、 q_4 、 q_5 使得上式成立

各关节的运动范围：

关节	最大角度	最小角度
q1	180°	-180°
q2	108°	-108°
q3	150°	-150°
q4	130°	-130°
q5	180°	-180°

求解思路：

$$p_s = p_5 + R_s \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0.13 \end{bmatrix}$$

$$\text{得到世界坐标系下腕心 } p_5 = p_s - R_s \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0.13 \end{bmatrix}$$

令 $C = \|p_5 - p_1\|$ ，如果 $C > L_1 + L_2$ 或 $C < |L_1 - L_2|$ ，

则机械爪的腕心目标位置超出手臂物理可达范围，5 个关节角不存在合理的解。

当 $|L_1 - L_2| \leq C \leq L_1 + L_2$ 时，

由余弦定理 $C^2 = L_1^2 + L_2^2 - 2L_1L_2 \cos(\pi - q_3)$ ，得到 $q_3 = \pi - \cos^{-1} \left(\frac{L_1^2 + L_2^2 - C^2}{2L_1L_2} \right)$

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} p_5 \\ 1 \end{bmatrix} &= {}^0T_1T_2T_3T_4T_5T \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \\ {}^3T_4 &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos q_4 & -\sin q_4 & 0 \\ 0 & \sin q_4 & \cos q_4 & 0.1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\ {}^4T_5 &= \begin{bmatrix} \cos q_5 & -\sin q_5 & 0 & 0 \\ \sin q_5 & \cos q_5 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} p_5 \\ 1 \end{bmatrix} &= {}^0T_1T_2T_3T \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0.1 \\ 1 \end{bmatrix} \\ {}^2T_3 &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos q_3 & -\sin q_3 & 0 \\ 0 & \sin q_3 & \cos q_3 & 0.08 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\begin{bmatrix} p_5 \\ 1 \end{bmatrix} &= {}^0_1T_2^1T \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0.18 \\ 1 \end{bmatrix} \\
\begin{bmatrix} p_5 \\ 1 \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} \cos q_1 & -\sin q_1 & 0 & 0 \\ \sin q_1 & \cos q_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0.1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos q_2 & -\sin q_2 & 0 \\ 0 & \sin q_2 & \cos q_2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0.18 \\ 1 \end{bmatrix} \\
p_5 &= \begin{bmatrix} \cos q_1 & -\sin q_1 & 0 \\ \sin q_1 & \cos q_1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos q_2 & -\sin q_2 \\ 0 & \sin q_2 & \cos q_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0.18 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0.1 \end{bmatrix} \\
\begin{bmatrix} \cos q_1 & \sin q_1 & 0 \\ -\sin q_1 & \cos q_1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p_r(1) \\ p_r(2) \\ p_r(3) \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos q_2 & -\sin q_2 \\ 0 & \sin q_2 & \cos q_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0.18 \end{bmatrix} \\
p_r &= p_5 - \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0.1 \end{bmatrix} \\
\begin{bmatrix} \cos q_1 p_r(1) + \sin q_1 p_r(2) \\ -\sin q_1 p_r(1) + \cos q_1 p_r(2) \\ p_r(3) \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} 0 \\ -0.18 \sin q_2 \\ 0.18 \cos q_2 \end{bmatrix} \\
q_2 &= \cos^{-1} \left[\frac{50}{9} p_r(3) \right]
\end{aligned}$$

由 $\cos q_1 p_r(1) + \sin q_1 p_r(2) = 0$ ，可以求得 q_1 ，

同时 q_1 满足 $-\sin q_1 p_r(1) + \cos q_1 p_r(2) = -0.18 \sin q_2$

$$R_S = R_Z(q_1)R_X(q_2)R_X(q_3)R_X(q_4)R_Z(q_5)$$

$$R_X(q_4)R_Z(q_5) = R_X^T(q_3)R_X^T(q_2)R_Z^T(q_1)R_S$$

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos q_4 & -\sin q_4 \\ 0 & \sin q_4 & \cos q_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos q_5 & -\sin q_5 & 0 \\ \sin q_5 & \cos q_5 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = R_3$$

$$R_3 = R_X^T(q_3)R_X^T(q_2)R_Z^T(q_1)R_S$$

$$\begin{cases} \cos q_5 = R_3(1,1) \\ -\sin q_5 = R_3(1,2) \\ -\sin q_4 = R_3(2,3) \\ \cos q_4 = R_3(3,3) \end{cases}, \begin{cases} q_5 = \tan^{-1} \left(-\frac{R_3(1,2)}{R_3(1,1)} \right) \\ q_4 = \tan^{-1} \left(-\frac{R_3(2,3)}{R_3(3,3)} \right) \end{cases}$$

至此，解得所有关节角度 q_1 、 q_2 、 q_3 、 q_4 、 q_5 。

3.5 轨迹规划

从机械臂作业任务可以看出，机械臂作业过程与返回过程均是点对点的轨迹

规划问题，因此可以在关节空间内规划机械臂对目标作业的动作轨迹。根据任务特点，为保证机械臂运动过程中关节位置轨迹的连续可导性，根据作业过程与返回过程两端点的关节位置、角速度四个边界约束条件，可以分别采用三次多项式规划策略插补机械臂作业过程与返回过程的关节轨迹。

在作业过程中，机械臂的 5 个关节的位置边界条件满足 $\mathbf{Q}^*(0) = \mathbf{Q}_0$ ， $\mathbf{Q}^*(t_{f1}) = \mathbf{Q}_f$ ，关节速度条件满足 $\dot{\mathbf{Q}}^*(t_{f1}) = \dot{\mathbf{Q}}_f$ ， $\dot{\mathbf{Q}}^*(t_{f1} + t_{f2}) = 0$ ，由此满足此边界约束条件下唯一可确定的三次多项式关节轨迹为

$$Q_i(t) = a_{i0} + a_{i1}t + a_{i2}t^2 + a_{i3}t^3, \quad t \in [0, t_{f1}], \quad i = 1, 2, \dots, 7 \quad (1)$$

对于该过程的关节角速度和角加速度：

$$\begin{cases} \dot{Q}_i(t) = a_{i1} + 2a_{i2}t + 3a_{i3}t^2 \\ \ddot{Q}_i(t) = 2a_{i2} + 6a_{i3}t \end{cases}, \quad t \in [0, t_{f1}], \quad i = 1, 2, \dots, 7 \quad (2)$$

将作业过程的四个边界约束条件带入（1）式和（2）式，可以得到：

$$\begin{cases} a_{i0} = Q_{i0} \\ a_{i1} = 0 \\ a_{i2} = \frac{3}{t_{f1}^2}(Q_{if} - Q_{i0}) - \frac{1}{t_{f1}}\dot{Q}_{if} \\ a_{i3} = -\frac{2}{t_{f1}^3}(Q_{if} - Q_{i0}) + \frac{1}{t_{f1}^2}\dot{Q}_{if} \end{cases}, \quad i = 1, 2, \dots, 7 \quad (3)$$

应用式（3）可以求出机械臂在作业过程中符合两端点关节位置、速度边界约束条件的三次多项式关节轨迹曲线。同样在返回过程中，机械臂将于 $t_{f1} + t_{f2}$ 时刻返回至静态初始点，此时各关节速度值回归于零。由此，5 自由度的关节位置边界条件满足 $\mathbf{Q}^*(t_{f1}) = \mathbf{Q}_f$ ， $\mathbf{Q}^*(t_{f1} + t_{f2}) = \mathbf{Q}_0$ ，关节速度边界条件满足 $\dot{\mathbf{Q}}^*(t_{f1}) = \dot{\mathbf{Q}}_f$ ， $\dot{\mathbf{Q}}^*(t_{f1} + t_{f2}) = 0$ ，在此约束条件下返回过程唯一可以确定的三次多项式关节轨迹为

$$Q_i(t) = b_{i0} + b_{i1}(t - t_{f1}) + b_{i2}(t - t_{f1})^2 + b_{i3}(t - t_{f1})^3,$$

$$t \in [t_{f1}, t_{f1} + t_{f2}], \quad i = 1, 2, \dots, 7 \quad (4)$$

该过程的关节速度和加速度显然有：

$$\begin{cases} \dot{Q}_i(t) = b_{i1} + 2b_{i2}(t - t_{f1}) + 3b_{i3}(t - t_{f1})^2 \\ \ddot{Q}_i(t) = 2b_{i2} + 6b_{i3}(t - t_{f1}) \end{cases},$$

$$t \in [t_{f1}, t_{f1} + t_{f2}], \quad i = 1, 2, \dots, 7 \quad (5)$$

将返回过程的四个边界条件代入（4）式和（5）式中，可以得到：

$$\begin{cases} b_{i0} = Q_{if} \\ b_{i1} = \dot{Q}_{if} \\ b_{i2} = \frac{3}{t_{f2}^2}(Q_{i0} - Q_{if}) - \frac{2}{t_{f2}}\dot{Q}_{if} \\ b_{i3} = -\frac{2}{t_{f2}^3}(Q_{i0} - Q_{if}) + \frac{1}{t_{f2}^2}\dot{Q}_{if} \end{cases}, i = 1, 2, \dots, 7 \quad (6)$$

应用式（6）可以求出机械臂在返回过程阶段符合两端点关节位置、速度边界约束条件的三次多项式轨迹曲线。

3.6 本章小结

在这一部分主要分析了五自由度机械臂的运动学求解和轨迹规划问题。首先介绍了多自由度机械臂的运动学求解理论。对于多自由度的运动学求解问题，一般来说有正运动求解和逆运动求解。当已知所有的关节变量时,可用正运动学来确定机器人末端执行器的位姿。已知机械手所有连杆长度和关节角度，那么计算机器人手的位姿就称为正运动学分析。如果要使机器人末端手放在特定的点上并且具有特定的姿态，可用逆运动学来计算出每一关节变量的值，使机械手末端执行器放置在期望的位姿，称之为逆运动学求解。

在这一章中，分别采用正运动求解和逆运动求解，给出了求解过程和结果。并在此基础上进行了轨迹规划，求出机械臂在作业过程中和返回过程中的符合两端点关节位置、速度边界约束条件的三次多项式关节轨迹曲线。

第 4 章 传感器选型、安装分析及多传感信息融合处理

4.1 传感器概述

4.1.1 传感器组成

在机器人中，起到内部反馈控制作用或感知与外部环境的相互作用的装置被称为传感器。在机器人中，起到内部反馈控制作用或感知与外部环境的相互作用的装置被称为传感器。

传感器（Sensor, Transducer）按一定规律实现信号检测，并将被测量（物理的、化学的和生物的信息）通过变送器变换为另一种常用物理量（通常是电压或电流量等电量）。传感器一般由敏感元件、转换元件、基本转换电路组成。

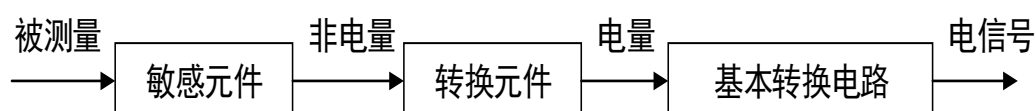


图 4.1 一般传感系统的组成

敏感元件是能直接感受被测量、并以确定关系输出某一物理量的元件，如弹性敏感元件可将力转换为位移或应变；转换元件可将敏感元件输出的非电物理量转换成电量；基本转换电路将由转换元件产生的电量转换成便于测量的电信号，如电压、电流、频率等。

4.1.2 传感器分类

（1）根据安装位置分类

内部传感器：检测机器人本身状态（手臂间角度等）的传感器。

外部传感器：检测机器人所处环境（是什么物体，离物体的距离有多远等）及状况（抓取的物体滑落等）的传感器。外部传感器分为末端执行器传感器和环境传感器。

末端执行器传感器：主要装在作为末端执行器的手上，检测处理精巧作业的感觉信息。有触觉、压觉、滑觉、力觉等。

环境传感器：用于识别物体和检测物体与机器人的距离，主要是视觉传感器。

（2）根据功能分类

触觉传感器：主要指确定工作对象是否存在，以及它的尺寸大小和形状等。

视觉传感器：孔、边、拐角的检测及工作对象形状的检测等。

接近觉传感器：主要用于探测机器人自身与周围物体之间相对位置或距离的传感器，接近觉介于触觉与视觉之间。

压觉传感器：主要用于检测机器人与作业对象之间接触面的法向压力值的大小。

滑觉传感器：主要用于检测物体因自重相对于机器人手爪的滑移量的大小。

4.2 传感器选型分析

4.2.1 机器人传感器选型的要求

机器人对传感器的一般要求：

- (1) 精度高，重复性好
- (2) 稳定性好，可靠性高
- (3) 抗干扰能力强
- (4) 重量轻，体积小，安装方便可靠
- (5) 价格便宜

设计机器人并选择传感器时应考虑不同机器人应用场景，不同的应用场景对工作要求的不同，所需要的传感器类型也不尽相同。比如：

(1) 搬运机器人：目前多数搬运机器人上不具有感觉能力。可以考虑安装视觉、触觉、力觉传感器，以提高机器人的工作能力。

(2) 焊接机器人：焊接机器人需要精准的定位，所以需要配备位置传感器，并辅助配置速度、接近觉、视觉传感器。

(3) 喷漆机器人：主要有两种类型的传感器：位置（或速度）的检测和工作对象的识别；位置检测传感器：光电开关、测速码盘、超声波测距传感器、气动式安全保护器等；工件识别传感器：视觉系统。

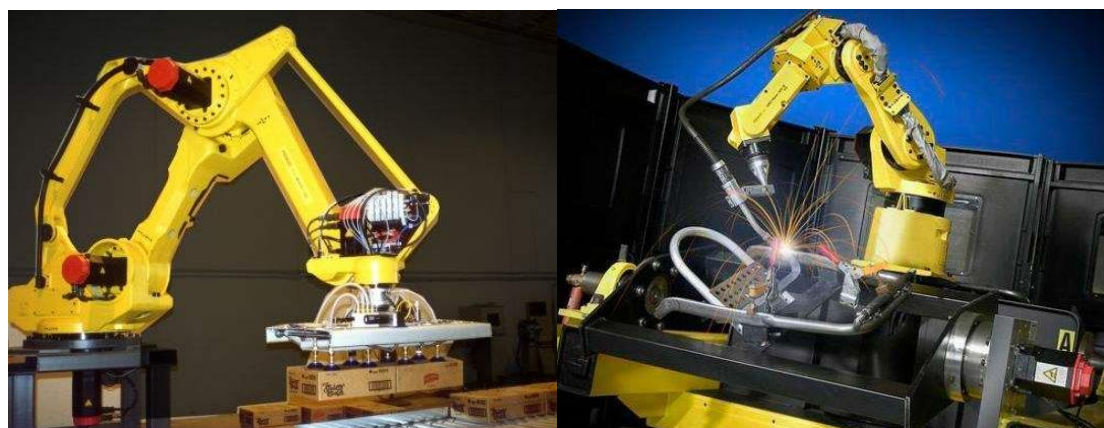


图 4.2 搬运机器人和焊接机器人

总之，不能盲目的进行传感器的选择，需要考量机器人工作任务的要求和对精度要求，并综合成本合理选择。

4.2.2 五自由度机器人传感器选型

本题目设计的五自由度机器人用途比较广泛，可以用于搬运、焊接、喷漆、装配等多种工作环境中，所以传感器选型应包括以下几种类型：

1. 位置传感器

这里的五自由度机器人所属关节型，每个运动副都是旋转型的，所以选择位置传感器时编码器是比较合理的选择。

这里选择型号为 ZSP3806GC 5-24V 600 的绝对式编码器，如图 4.3 及图 4.4 所示。此型号系列的编码器采用 AISC 光电器件，可靠性强，信号位置精准寿命长，抗干扰能力强，应用范围广。



分辨率	1~3600P/R	轴允许负荷	径向20N轴向10N
电源电压	DC5V或DC5~24V	转动惯量	$4 \times 10^{-3} \text{Kg} \cdot \text{m}^2$
输出电压VH	$\geq 3.5 \geq V_{cc} - 2.5V$	大转速	$\leq 5000 \text{r/min}$
输出电压VL	$\leq 0.5V$	抗震动	49m/S^2 (10~200Hz x, y, z 三个方向各2小时)
消耗电流	$\leq 100 \text{mA}$	抗冲击	980m/S^2 (x, y, z三个方向各2 次，每次持续6ms)
输出相	A.B.Z($\bar{A}.\bar{B}.\bar{Z}$)	防护等级	IP54
响应频率	100kHz	工作温度	$-20^\circ\text{C} \sim +70^\circ\text{C}$
上升/ 下降时间	24V < 1us 5V驱动器 $\leq 0.1 \text{us}$	储存温度	$-20^\circ\text{C} \sim +80^\circ\text{C}$
启动力矩	$1.5 \times 10^{-3} \text{N} \cdot \text{m} (+25^\circ\text{C})$	附件	

图 4.3 ZSP3806GC 5-24V 600 编码器及其技术参数

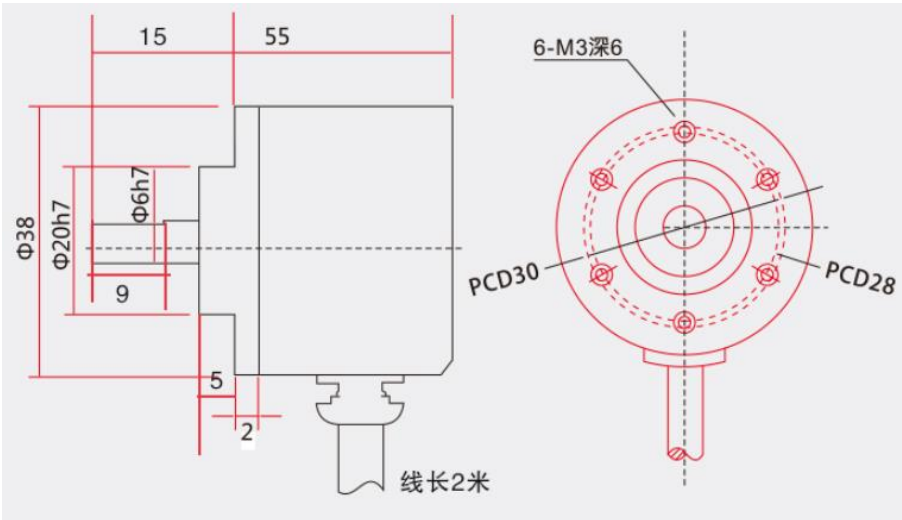


图 4.4 ZSP3806GC 5-24V 600 编码器外形尺寸

注：这里需要特别说明的是选择伺服电机时，一般都自带有编码器。

2. 腕力传感器

腕力传感器一般属于末端执行传感器，即主要安装在末端执行器上，检测末端执行器与外部环境之间的接触。腕力传感器一般使用压电材料做成，受压力作用时，压电材料的电阻特性发生变化，由电桥检测并输出为电压信号，最终处理为压力信息。

这里选择匈牙利 OPTOFORCE 品牌的型号是 HEX-E-CB-C-A-SWUSB 的六维力传感器，如图 4.5 所示。



图 4.5HEX-E-CB-C-A-SWUSB 六维力传感器

OptoForce 六维力传感器基于多个 3 维力传感器的矩阵排列，通过各个 3 维力传感器的形变我们可以计算出整个 6 维传感器的受力和力矩；OptoForce 六维力传感器可以用于各种力控应用如示教，抛光，打磨，装配等。可以装于各种机器人手臂末端；该传感器有以下特点：

- 价格合适：光学式六维力传感器，加工简单，可量产；
- 接口适用性高：集成多种通讯接口，支持多种机器人手臂末端安装；
- 稳定性高：基于机械原理以及精密光学检测，可以控制其形变量并且通过核心算法得到受力和力矩数据，因此抗干扰能力强，稳定性高。

表 4.1 HEX-E-CB-C-A-SWUSB 六维力传感器的量程及精度

测量力（力矩）	量程	型变量	分辨率
F_x 、 F_y	200N	$\pm 1.7\text{mm}$	0.2N
F_z	200N	$\pm 0.3\text{mm}$	0.8N
T_x 、 T_y	10Nm	$\pm 2^\circ$	—
T_z	6.5Nm	$\pm 5^\circ$	—

3. 关节力传感器

关节力传感器安装在每个关节的驱动器上,它测量驱动器本身的输出力和力矩,用于控制中的力反馈。这里腰部、大臂、小臂均需要安装关节力传感器。

这里选择 Hypersen 品牌型号是 HPS-FT060 的六维力传感器(如图 4.6 所示),该传感器应用场景众多,如拖动示教、路径规划、力控码垛、力控打磨、抛光、精密装配、机器人上下料、人形机器人力、力矩反馈控制。

该传感器具有以下特点:

- 高静态过载保护
- 24Bit 高速 ADC 采样
- 2000Hz 数据输出频率
- 高信噪比全数字输出
- 优化设计的应变测量结构
- 内置高精度解耦、滤波和温度补偿算法
- 低零漂、低温漂、低轴间串扰
- 可选 RS485、EtherCAT 或 Ethernet 通讯接口



图 4.6HPS-FT060 六维力传感器

表 4.2 HPS-FT060 六维力传感器技术参数

测量力（力矩）	量程	型变量	分辨率
F_x 、 F_y	600N	—	0.2N
F_z	1000N	—	0.4N
T_x 、 T_y	15Nm	—	0.002Nm
T_z	15Nm	—	0.002Nm

4. 视觉传感器

视觉传感器是将景物的光信号转换成电信号或图像数据的器件。视觉目的：进行位置、距离识别，形状识别，种类识别。

过去经常使用光导摄像等电视摄像机（模拟摄像机）作为机器人的视觉传感器，近年来开发了 CCD（Charge Coupled Devices，电荷耦合器件）和 CMOS（Complementary MetalOxide-Semiconductor，互补型金属氧化物半导体）器件等组成的固体视觉传感器（数码摄像机）。固体视觉传感器又可以分为一维线性传感器和二维线性传感器，目前二维线性传感器已经能做到四千个像素以上。由于固体视觉传感器具有体积小、重量轻等优点，因此应用日趋广泛。



图 4.7 高速工业相机

这里选择迈迪微视品牌的高速工业相机，有 MD-SUA133GC 和 MD-SUA133GM 两种型号可选，两种型号相机的参数如表 4.3 所示。

表 4.3 相机参数

型号	MD-SUA133GC	MD-SUA133GM
传感器	1/2.7" CMOS（全局快门）	
颜色类型	彩色	黑白
像元尺寸	4.0X4.0 μm	
有效像素	1280H*1024V（36 万）	
分辨率@帧率	1280X1024@240FPS	
像素位深度	8bit	
灵敏度	8V /Lux-s	
GPI0	6-pin Hirose 接头,1 路光隔触发输入(可复用为输入 GPI0), 一路光隔闪关灯输出（可复用为输出 GPI0）；可增配 2 路输入 3 路输出（双 6pin Hirose 接头）	

采集模式	连续性/软触发/硬触发	
最大增益（倍数）	7.88	
曝光时间范围（ms）	0.008~35.5	
滤光片	彩色标配 650nm 红外滤光片	黑白标配双面 AR 增透片
帧缓存	128M Bytes	
视频输出格式	Bayer8、Bayer12、Mono8、Mono12、Mono16、 RGB24、RGB32、RGB48	
视觉标准协议	支持 Directshow 协议、Twain 协议	
数据接口	支持 USB3 Vision 协议	
工作温度	0~50 度	
重量	小于 75g	
操作系统	WinXP、Win7/8/10 32&64 位系统； Linux 系统和 ARM linux 驱动、安卓平板驱动	
驱动程序	Directshow 组件、Halcon 专用组件、Labview 专用驱动、OCX 组件、TWAIN 组件	
其他功能	支持任意尺寸的 ROI 自定义分辨率、对比度和伽玛调节、 饱和度调节、白平衡校正、黑电平校正、自定义死点坐标校 正、ISP 图像处理加速、3D 降噪、自定 LUT 表、帧率调节、 自定义相机名称等	

4.3 多传感信息融合处理

传感器信息融合又称数据融合，是对多种信息的获取、表示传感器信息融合又称数据融合，是对多种信息的获取、表示及其内在联系进行综合处理和优化的技术。

传感器信息融合技术从多信息的视角进行处理及综合，得到各种信息的内在联系和规律，从而剔除无用的和错误的信息，保留正确的和有用的成分，最终实现信息的优化。它为智能信息留正确的和有用的成分，最终实现信息的优化。它为智能信息处理技术的研究提供了新的观念。

多传感器融合系统主要特点：

- 提供了冗余、互补信息
- 信息分层的结构特性
- 实时性
- 低代价性

传感器信息融合分类有组合、综合、融合和相关四种。

组合：由多个传感器组合成平行或互补方式来获得多组数据输出的一种处理方法，是一种最基本的方式，涉及的问题有输出方式的协调、综合以及传感器的选择。在硬件这一级上应用。例如：多个温度传感器测试房间温度，然后平均处理。

综合：信息优化处理中的一种获得明确信息的有效方法。例如：在虚拟现实技术中，使用两个分开设置的摄像机同时拍摄到一个物体的不同侧面的两幅图像，综合这两幅图像可以复原出一个准确的有立体感的图像。

融合：当将传感器数据组之间进行相关或将传感器数据与系统内部的知识模型进行相关，而产生信息的一个新的表达式。例如：智能空调控制器的应用。

相关：通过处理传感器信息获得某些结果，不仅需要单项信息处理，而且需要通过相关来进行处理，获悉传感器数据组之间的关系，从而得到正确信息，剔除无用和错误的信息。

4.4 本章小结

本章介绍了传感器的基本信息，包括传感器组成、分类及应用，主要对五自由度机器人的所用传感器进行了选型，包括位置传感器、关节力传感器、腕力传感器以及视觉传感器，最后介绍了多传感信息融合处理技术。

第 5 章 机器视觉图像处理

5.1 机器视觉概述

机器视觉是配备有感测视觉仪器（如自动对焦相机或感测器）的检测机器，其中光学检测仪器占有比重非常高，可用于检测出各种产品的缺陷，或者用与判断并选择出物体，或者用来测量尺寸...等，应用在自动化生产在线对物料进行校准与定位。是计算机视觉中最具有产业化的部分，主要大量应用于工厂自动化检测及机器人产业等。

将近 80%的工业视觉系统主要用在检测方面，包括用于提高生产效率、控制生产过程中的产品质量、采集产品数据等。产品的分类和选择也集成于检测功能中。



图 5.1 机器视觉应用

视觉系统检测生产线上的产品，决定产品是否匹配质量要求，并根据结果，产生相应的信号输入上位机。图像获取设备包括光源、摄像机等；图像处理设备包括相应的软件和硬件系统；输出设备是与制造过程相连的有关系统，包括可编程控制器和警报设备等。

机器视觉系统主要由三部分组成：图像的获取、图像的处理和分析、输出或显示。

5.2 焊缝识别方案设计

前文提到五自由度机器人的应用比较广泛，可用于码垛、焊接及安装，这里假设该机器人用作焊接，则机器人必须在识别出焊缝位置的情况下才能进行控制，进行工作。图像处理的一般步骤为图像获取、图像处理和分析、输出和显示，这里简单介绍一种基于 OPENCV3.1.0 的焊缝识别的图像识别方案设计。

（1）获取图像

首先图像获取，即获取 CCD 获取的外界的图像并存储在内存中，在 OPENCV 中直接使用 `imshow()` 即可获取内存中的图像，如图 5.2 所示。



图 5.2 获取源图像

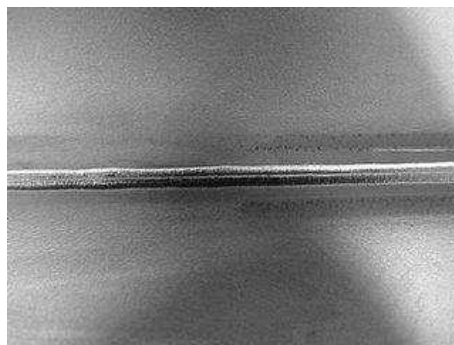


图 5.3 灰度化图像

(2) 颜色空间转换

这里图像颜色空间转换为灰度图，灰度图像上每个像素的颜色值又称为灰度，指黑白图像中点的颜色深度，范围一般从 0 到 255，白色为 255，黑色为 0。所谓灰度值是指色彩的浓淡程度，灰度直方图是指一幅数字图像中，对应每一个灰度值统计出具有该灰度值的像素数。图像灰度化处理可以作为图像处理的预处理步骤，为之后的图像分割、图像识别和图像分析等上层操作做准备。

在 OPENCV 中通过函数 `cvtColor(src,dst,CV_BGR2GRAY)` 进行颜色转化。转化后的图像如图 5.3 所示。

(3) 平滑处理，中值滤波

为了消除噪声点，对图像进行滤波处理是非常有必要的，这里直接选择中值滤波，在 OPENCV 中使用函数 `medianBlur(src,dst, size(3,3))`，其中 `size()` 的大小按照经验值选取 3*3。最后处理结果如图 5.4 所示。

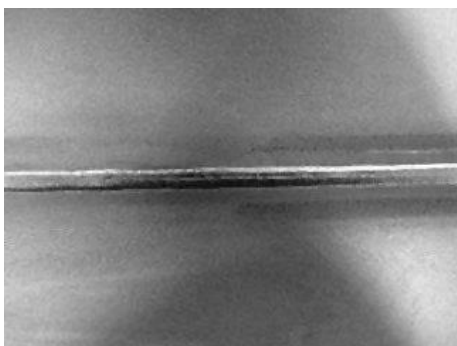


图 5.4 中值滤波



图 5.5 获取边缘

(4) 获取焊缝边缘

图像中焊缝与其他部分相比具有明显的水平边缘，使用 `Sobel` 算子提取水平边缘，OPENCV 函数为 `Sobel(src, dst, -1, 0, 1, 3, 1, 0)`，处理结果如图 5.5 所示。

(5) 图像二值化

二值分割阈值由系统根据边缘图像内容自适应的确定，使用 OPENCV 函数

`threshold(src, dst, 0, 255, CV_THRESH_BINARY | CV_THRESH_OTSU)`，结果如图 5.6 所示。

（6）形态学开操作

为了进一步有效的获取焊缝边缘，要进行区域合并和剔除噪声，使用形态学操作可以有比较好的实现，`element = getStructuringElement(MORPH_RECT, Size(8, 2))`，`morphologyEx(threImage, morphImage, CV_MOP_OPEN, element)`，其中 `element` 是形态学操作的结构元素，根据经验取形状为矩形，大小为 `8*2`，最终处理后得到结果如图 5.7 所示。



图 5.6 二值化图像

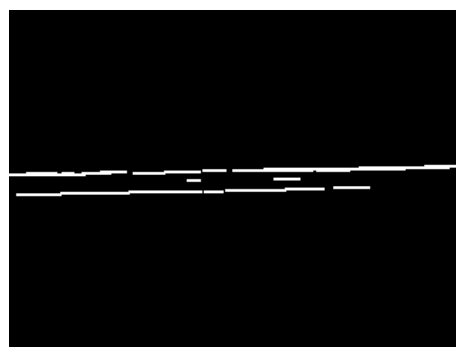


图 5.7 形态学操作处理图像

最终经过系统的图像处理，得到了较为清楚的焊缝图像，控制系统则可以控制末端执行器转移到正确的位置进行焊接工作。

5.3 本章小结

本章对机器视觉图像处理做了一个简单的介绍，包括机器视觉概述以及一个焊缝识别案例方案的设计，使用了使用 `OPENCV3.1.0` 在 `VISUAL STUDIO 2015` 环境下编写处理程序。

机器视觉应用前景广泛，在以后的学习中我要进一步的掌握图像处理方面的知识。

第6章 总结与展望

在本次机器人这门课的学习过程中，老师的授课过程让我受益匪浅。在本次大作业的完成过程中，让我对机器人的理解又近了一步。机器人学是一门很宽泛的课程，设计的内容也很多。在课堂上老师给我们讲述了很多内容，本文主要以五自由度机械臂为研究对象，从机械结构设计、运动求解、轨迹规划和传感器选型四个方面展开研究。

首先，在本文的一开始概括了机器人特别是工业机器人的发展以及国内外的发展现状，针对多自由度的机械臂进行了文献搜索和调研；随后，进行了结构设计，机械臂的结构组成一般包括端部执行器、运动机构和底座三部分。由于目前对于多自由度的机械臂已经研究很多，所以很容易检索到一些相似的文献作为参考，这一部分主要是结合自己所学的专业知识进行了机械结构的设计以完成预定的功能。在第三部分，主要是五自由度机械臂的运动求解和轨迹规划。对于五自由度机械臂的运动求解，包括了正运动求解，即在确定了连杆几何参数以及各个关节的角矢量以后，可以得到唯一确定的末端位姿。在确定了模型的连杆几何参数和关节角矢量以后，可以通过运动学正解来检测所建模型的正确性；逆运动求解，已知机械臂关键的几何参数，并且给出机械臂末端相对于参考坐标系的期望位姿，求解相应的关节变量，因此逆运动求解的解不是唯一确定的。最后，根据任务特点，为保证机械臂运动过程中关节位置轨迹的连续可导性，根据作业过程与返回过程两端点的关节位置、角速度四个边界约束条件，可以分别采用三次多项式规划策略插补机械臂作业过程与返回过程的关节轨迹。

由于本人对机器人的了解甚少，所以本文中所涉及的研究内容相对来说比较简单。因此，在以后的学习和科研过程中，可以根据项目需要在本文的基础上对本文所涉及的内容做进一步的拓展和补充。其中可能还涉及到结构的优化、轨迹策略的优化等等问题。除此之外，一个完整的工业机械臂还涉及到控制等问题，这些都是需要进一步学习和研究的。

最后，衷心的感谢老师的辛勤教诲，谢谢！祝愿老师身体健康，工作顺利！

参考文献

- [1]骆敏舟,方健,赵江海.工业机器人的技术发展及其应用[J]. 机械制造与自动化,2015,01:1-4.
- [2]穆剑桥,王智斌. 工业机器人的发展及现状综述[J]. 电子制作,2015,18:82.
- [3]计时鸣,黄希欢.工业机器人技术的发展与应用综述[J].机电工程,2015,01:1-13.
- [4]Victor Scheinman [EB/OL][2014-08-15].[http://en Wikipedia org/wiki/Victor Scheinman](http://en.wikipedia.org/wiki/Victor_Scheinman).
- [5]M Oh, SM Lee, T Kim, KY Lee, J Kim. Design of a teachingpendant program for a mobile shipbuilding welding robotusing a PDA.[J]Computer-Aided Design,2010,42(3) :173-182.
- [6]任崇轩.五自由度机械臂运动和控制仿真分析[D].华南理工大学,2012.
- [7]胡松. 5 自由度移动机器人的建模与仿真[D].曲阜师范大学,2009.
- [8]万海波. 五自由度机械手运动性能及动力学分析与仿真[D].河北工业大学,2007.
- [9]龚力. 基于移动平台的机械臂结构优化设计[D].武汉理工大学,2012.
- [10]郭炬. 串联多关节机械臂设计与分析[D].华中科技大学,2008.
- [11]马国庆. 移动服务机器人机械臂结构设计及其优化研究[D].哈尔滨工业大学,2014.
- [12]Danevit J, Hartenberg R S. A Kinematic Notation for Lower-pairMechanisms Based on Matrices [J], Trans. ASME J. of Applied Mechanics, 1995(22): 215-221
- [13]范叔炬.机械臂运动学算法设计[D].杭州: 浙江大学, 2008.
- [14]陈雷.五自由度机械手的运动学和动力学分析[D].天津: 河北工业大学, 2006.
- [15]谷鸣宇.六自由度机械手运动学、动力学分析和计算机仿真[D].长春: 吉林大学, 2005.
- [16]胡坤.移动机械手运动学分析与仿真[D].2006 (12) : 10060 07-0026.
- [17]李友虎,叶伯生,朱志红.基于几何法的机器人运动学逆解[J].武汉船舶职业技术学院学报,2002(1):9 — 11.
- [18]朱红娟. 基于旋量理论的五自由度焊接机器人正运动学分析研究[J].南京机电职业技术学院,2019(01).
- [19]谢小宝,林健力.焊接机器人应用现状与研究发展趋势[J].海峡科技与产业. 2018(06)

附件

备注：此程序是使用 OPENCV3.1.0 在 VISUAL STUDIO 2015 环境下编写。

```
#include<opencv2/opencv.hpp>
#include<iostream>

using namespace std;
using namespace cv;

Mat src, grayImage, dst;
const char* input_win = "input image";
const char* output_win = "output image";
int license_recognition(int, void*);

int main(int argc, char** argv) {
    src = imread("F:/zhujidong/picture/hanfeng.jpg");
    if (src.empty()) {
        printf("could not load image...\n");
        return -1;
    }
    namedWindow(input_win, CV_WINDOW_AUTOSIZE);
    namedWindow(output_win, CV_WINDOW_AUTOSIZE);

    license_recognition(0, 0);

    imshow(input_win, src);
    waitKey(0);
    return 0;
}

int license_recognition(int, void*) {
    //灰度化;
    cvtColor(src, grayImage, CV_BGR2GRAY);
    //cvtColor(src, grayImage, CV_BGR2HSV);
    imshow("grayImage", grayImage);
    imwrite("C:\\Users\\Administrator\\Desktop\\grayImage.png", grayImage);

    //平滑处理，中值滤波;
    Mat blurImage;
    medianBlur(grayImage, blurImage, 3);
    imshow("blurImage", blurImage);
}
```

```

imwrite("C:\\Users\\Administrator\\Desktop\\blurImage.png", blurImage);

//获取边缘;
Mat sobeImage;
Sobel(blurImage, sobeImage, -1, 0, 1, 3, 1, 0);
imshow("sobeImage", sobeImage);
imwrite("C:\\Users\\Administrator\\Desktop\\sobeImage.png", sobeImage);

//二值化;
Mat threImage;
threshold(sobeImage, threImage, 0, 255, CV_THRESH_BINARY |
CV_THRESH_OTSU);
imshow("threImage", threImage);
imwrite("C:\\Users\\Administrator\\Desktop\\threImage.png", threImage);

//形态学开操作;
Mat morphImage, element;
element = getStructuringElement(MORPH_RECT, Size(8, 2));
morphologyEx(threImage, morphImage, CV_MOP_OPEN, element);
imshow("morphImage", morphImage);
imwrite("C:\\Users\\Administrator\\Desktop\\morphImage.png", morphImage);

return 0;
}

```