

摘要

焊接是制造业的基础，在制造业中有二分之一以上的产品的连接是通过焊接来实现的。未来焊接发展的趋势是焊接自动化、机器人化及智能化，而传感技术是这一发展中最重要的部分。焊接传感器按其使用目的可分为测量和检测操作环境、检测和监控焊接过程两大类。在传感原理方面，主要分为声学、力学、电弧、光学传感等。本文设计了用于焊缝跟踪的视觉伺服控制系统，利用 CCD 视觉传感器采集出的图像，研究出了一套完整的图像处理算法，包括图像滤波、图像分割、边缘检测、直线拟合，最终有效的提取出焊缝的中心线位置信息，同时也满足实时性的要求。

由于焊接过程是一个多参数相互耦合的时变非线性系统，有许多因素影响焊缝成形的质量，由于其显著的随机性，用数学模型来精确的描述它非常困难，所以以前的一些线性控制方法，在不同程度上存在对经验依赖性大、适应性差等缺点。因此，在焊接过程控制中引入智能控制方法是非常有效的途径。本文分析了基于图像的机器人视觉伺服的基本原理，使用 BP 神经网络来确定达到指定位姿所需要的关节角度，将视觉信息直接融入伺服过程达到准确跟踪焊缝的目的，在保证伺服精度的情况下大大简化了控制算法，并且消除了系统标定误差对运动精度的影响，另外，本文利用 MATLAB 建立了神经网络控制器，结果证明神经网络控制器可以替代基于图像雅克比矩阵的控制器完成伺服控制。

关键词： 机器视觉；图像处理；BP 神经网络；视觉伺服

Abstract

Welding is the base of manufacture and more than half products of the jointing is achieved by welding in the manufacture. In the future, the trend of the welding developing will be welding automation, robotization and intelligentize, and sensor technology is the most important part of the development. According to intended use, the welding sensor can be classify as detecting the operating environment and monitoring welding process. According to fundamentals of sensor, it can be divided into acoustics, mechanics, electric arc and optical sensing. In this paper, using a CCD image sensor vision, has developed a complete set of image processing algorithms, including image filtering, image segmentation, edge detection, fitting a straight line, and ultimately effective to extract information about the weld centerline, while also meet the requirements of real-time. The welding process is a multi-parameter time-varying coupled nonlinear system. There are many factors affecting the quality of the weld, because of its significant randomness, it is very difficult to us a mathematical model to accurately describe.

Because the welding process is a multiparameter intercoupling nonlinear system, there are many factors affect the quality of weld joint, therefore, it is difficult to describe using mathematical model. The previous some of linear control method have a lot of defects about varying degrees dependent on the experience and poor adaptability, it's a very suited way to bring in brainpower controlling means in welding process. This article analyse the fundamental of robot visual servo based on image. Using neural network to ensure the demanded angle of joint in order to get the appoint position, put the vision information into the servo process directly to get the goal of following the welding line accurately, this greatly simplify the control algorithm under the condition of servo precision, and eliminate the influence of system's calibrated error to motion precision, besides this article proceed simulation experiment using MATLAB, and the result shows it's effectiveness.

Key words: machine vision ; image processing ; BP neural network ; vision servo.

第一章 绪论

1.1 引言

焊接是金属加工和制造业的重要工艺，它连接材料稳定、精度高、成本比较低并且技术手段先进。但是焊接现在要想满足现代化的生产制造的需要，还有许多值得提高的地方，例如生产效率的提高，工人工作环境的改善，焊接质量的提高等，这些都需要在焊接上应用自动化和智能化技术^[7]。机器人焊接技术由于具有焊接的质量好、高的工作效率、可以进行重复性的连续工作、能在恶劣环境下工作等优点，广泛应用于各类机械制造业，以及石油化工业和电子行业等，在革新制造技术、减少工人工作量、改善焊工工作环境、提高焊接的质量等方面表现出了巨大的优越性^[20]，是焊接工艺发展的里程碑。

据统计，现在有一百多万台工业机器人在全球得到应用，其中有高达百分之四十五的比例是焊接机器人。按照其发展过程焊接机器人大致可分为以下 3 代^[9]：

第一代焊接机器人是基于示教再现工作方式的，由于其对环境模型的建立不要求、机械结构产生的误差可以在示教时抵消掉、简便的操作等特点，其大量应用在焊接生产中；

第二代焊接机器人是利用传感技术进行离线编程，这类机器人的发展依靠的是离线的编程科技和焊接传感技术的不断发展；

第三代是智能焊接机器人，它装有多种传感器，接收作业指令后可以根据客观环境自行编程，但这一代正处于试验研究阶段。

现在在生产中应用做多的是第一代焊接机器人，虽然它能完成一些简单的焊接任务，

但它应对变化的能力差，完成任务单一，焊接前需要应用示教盒对焊接路径点一一进行定位和记录，也就是说它的焊接路径和位姿都是在焊接之前确定好的，这样当工件安装误差、焊接变形等因素存在时，焊接机器人就很难正确的跟踪焊接路径，影响焊接质量。并且当工件的形状结构很复杂时编程就变得相当困难，难以实现应有的焊接质量和精度。所以说把机器视觉引入焊接机器人，使之能将焊接环境的变化实时反馈给控制系统，从而精确的跟踪焊缝具有重要的现实意义。

本论文的主要工作是根据被动传感技术获得的实时焊缝图像，经过一系列的图像处理技术，获得实时的焊缝信息，从而指导焊接机器人进行焊接作业。本文工作有助于提高焊接机器人的自动化和智能化水平，从而使焊接机器人在实际应用中有更高的焊接质量和焊接精度，以满足现代化生产制造的要求。

1.2 视觉伺服控制系统概述

伴随科技进步和生产发展需要，工业机器人应该具有更高的智能化水平，这就需要对环境有更强的感知能力。人类通过眼睛获得了环境中 80% 以上的信息，所以视觉中包含了很多的环境信息，所以视觉伺服控制系统的研究就应运而生，这得益于计算机技术的飞速发展，因为这使以较快的速度从图像中提取目标信息变为可能。视觉伺服控制提高了机器人的控制精度及灵活应变能力，对由于标定引起的机器人误差具有强的鲁棒性^[10]。

由视觉传感向控制器提供外部环境信息，以调整机器人的位置和姿态的系统称为机器人视觉伺服系统。其研究的领域包括控制理论、运动学、图像处理、机器视觉等多个方面。机器人视觉伺服控制系统按照不同的标准可以划分为不同的类型。

(1) 按照摄像机的数目进行分类，可以分为单目视觉伺服系统、双目视觉伺服系统

以及多目视觉伺服系统。单目视觉伺服不能直接获到目标的三维信息，一般需要通过移动来获得深度信息，因此单目视觉多用于工作任务比较简单并且深度信息要求不高的工作环境中；双目视觉能够得到目标深度信息，现在大多数的视觉伺服系统主要采用双目视觉；多目视觉能够观察到目标不同的部分，能得到丰富的目标信息，但多目视觉控制器的设计比较复杂，并且难以保证系统的稳定性^[11]。

(2) 按照摄像机放置的位置不同，可以分为固定摄像机系统和手眼系统。固定摄像机系统可以观察到很大的工作空间场景，可以同时观察到目标和机器人的末端，所以能得到目标与机器人末端的相对速度，其缺点是难以获得准确的目标信息，并且目标图像可能会在机器人运动过程中被遮挡住。手眼系统能得到目标的精确位置，但是不能观察到机器人的末端，需要通过建立机器人运动学模型来求解机器人末端与目标的位置关系，这样就受运动学误差以及标定误差的影响比较大。为了克服这两种方法的不足，有人提出了将这两种方法协调作用的方案^[12]。

(3) 从控制结构的角度的可分为开环控制系统和闭环控制系统。开环控制事先应对机器人和摄像机进行精确标定，传感信号只包括运动前的目标位姿信息。闭环控制的视觉信息用作反馈，可以将摄像机与机器人的标定误差减小，但这些需要快速视觉处理硬件。

(4) 从反馈信息类型的误差信号定义的不同，机器人视觉伺服系统可分为基于位置的视觉伺服系统、基于图像的视觉伺服系统以及混合视觉伺服系统。基于位置视觉伺服系统的误差信号定义在三维笛卡儿空间，而基于图像的的误差信号定义在二维图像空间。下面重点介绍这几种伺服控制系统。

1.3 机器视觉的应用及发展趋势

1.3.1 机器视觉简介

机器视觉又常称计算机视觉，它通过图像或视频数据来观察周围世界，通过从摄像机拍摄的图像或视频中提取出能观察到的事物。机器视觉的功能与人类通过眼睛观察世界的视觉感知十分相近。称机器视觉是强调用机器构成的系统来处理视觉问题，而称计算机视觉是强调处理视觉的问题是一个计算问题，核心部件是计算功能强大的计算机^[1]。

随着信息时代的到来，越来越多的信息需要用计算机技术来解决。利用计算机进行多媒体的处理技术已经在各个领域满足了人们的需求，随着技术的发展人们对视觉处理技术提出了更高的要求，例如利用指纹、人脸、虹膜等识别技术来处理个人事务。利用视觉自动监控系统监视老年人的异常行动、陌生人的入侵，利用自动识别技术帮助盲人等。再如计算机视觉技术还可以用于解决军事目的的自动目标检测、视频检索、智能交通管理系统等问题。人类眼睛是自然环境和社会环境中不可缺少的感知器官，机器视觉技术与之类似，它成为计算机学科中不可或缺的一门学科。

与计算机视觉有关的学科包括计算机图形学、人工智能、模式识别、图像处理、数学、神经生理学及人工神经网络^[2]。

1.3.2 机器视觉技术的应用

随着计算机运算速度的提升，机器视觉技术不断地拓展它的应用领域，并且已成为自动化流水线和许多机器不可缺少的重要环节。它现在不仅应用在需要人眼观察才能完成的工作中，还能用在许多人眼无法观察或观察不到的情况下。机器视觉得到应用的领域有：遥感图像的分析、机器人的移动导航、生产线上零件的识别与定位、安防系统

等等。下面举几个常见的、必须用到机器视觉系统任务。

(1) 识别目标, 用来分辨不同的物体, 根据不同的识别结果采取不同的应对措施, 或者用来识别具有个体特征的物体, 常见的有字符串、条形码等。

(2) 探测位置, 比如识别流水线的物体位置, 从而进行安装等操作, 既可以平面探测也可以在空间探测。

(3) 检测完整性, 比如说在流水线的最后几个工位, 用来检测装配是否完整或者是否符合标准等。

(4) 形状和尺寸检测, 检验使用过程中的零件是否和使用标准, 或者用来检测刚生产的零部件是否达到精度和形状要求^[3]。

1.3.3 机器视觉技术的发展趋势

制造业的发展, 带来了机器视觉需求的提升, 促使机器视觉的应用越来越广泛, 而不仅仅是过去单纯的采集、分析、传递数据、判断动作, 这也预示着它与自动化的结合将更加紧密。在中国, 未来机器视觉发展主要表现为: (1) 随着产业化发展, 半导体和电子行业将成为机器视觉发展的主要空间。据相关数据显示全球集成电路产业将迎来复苏, 但是在全球经济危机的背景下, 使该产业在中国的发展面临着很大优势, 如成本优势、人才回流等优势、市场优势等; (2) 机器视觉将朝着实现标准化、一体化解决方案的方向发展。再者, 机器视觉包含在自动化之中, 在协作生产制造过程中机器视觉软硬件产品正逐渐成为不同阶段的核心系统, 生产线上的信息收集工作逐渐由机器视觉产品来完成, 这就需要机器视觉产品进行标准化生产。现在自动化企业要求生产厂商提供一体化解决方案的集成系统而不仅仅是单个产品 (3) 板卡式产品将被基于嵌入式的产品取代, 从产品本身看, PC 技术为机器视觉提供更多的支持。在微电子技术和计算机技

术迅速发展的背景下,各领域越来越广泛的应用嵌入式系统,因为其低功耗的特点深受人们青睐。另外,嵌入式系统应用C高级语言进行开发对是一项带有基础性的工作,可以缩短开发周期,提高工作效率,并且产品可维护性好、便于不断完善和升级换代、可靠性高。

1.4 图像处理技术

图像处理与机器视觉是两个不同的概念,“图像处理”在于要使图像经处理后变得更好,图像处理系统的输出仍然是一幅图像,而“机器视觉”系统的输出确是与图像内容有关的信息。图像处理系统的功能包括编码、压缩、增强、重构与复原。

图像增强

图像在经过图像增强系统处理后使人们感觉图像效果更好,其典型的操作运算包括亮度放缩、边缘锐化、对比度增强等。

图像编码

图像经过编码处理后其信息具有更经济有效的表达方式,比如冗余消除、量化方法等就是图像编码技术。研究图像信息的方式以达到其在存储或传输过程中出现错误时仍具有鲁棒性也是属于图像编码的范畴。

图像压缩

压缩有许多技术与编码中的技术相同,但其目的在于减少存储与传输图像的比特数量。

图像复原

复原关注的是对图像中错误进行修复。它与图像增强不同,增强只是关注使图像看上去更好些。而要“修正”一幅图像,需要有图像退化的模型。在复原的应用中常常假

设有一个确定性的模糊操作，并附有添加性的随机噪声。

图像重构

重构通常指从若干局部图像重构成一幅完整图像的过程。例如，在计算机层析 X 射线摄像技术 (CT) 中从受试者中得到数量很大 (如 360 幅) 的 X 射线投影。从这组一维信号中计算出二维图像中每一点的 X 射线吸收率，相同的方法还用在 PET (正电子发射层析摄像技术), 以及在某些 “shape-from-X” (从 X 恢复形状) 的算法中。

在弧焊过程中由于存在弧光、电弧热、飞溅以及烟雾等多种强烈的干扰，对获得的焊缝图像的影响很大，因此图像处理技术对整个视觉伺服控制的精度有着直接的影响，本文中用到的图像处理技术包括图像预处理、图像分割、图像边缘提取。

图像预处理

大量噪声信号存在于图像的采集过程中，为了降低干扰信号的影响需要对采集到的原始图像进行预处理，达到增强图像特征信息的效果。预处理有频域和空间域两种方法。图像取傅立叶变换后形成的复数像素的集合体的方法是频域方法，直接对图像像素进行运算的方法是空间域方法。因为空间域方法的计算量相对较小所以具有更为广泛的应用。图像预处理技术主要包括图像平滑、边缘细化和图像增强等技术。

图像分割

选择适当的阈值，把图像分成各具特性的区域，并提取某些特征的方法为图像分割。常用的对图像进行分割的方法有二值化、三值化分割。分割的重要环节是选择合适的分区阈值^[4]。

1.5 人工神经网络

人工神经网络 (ANNS) 简称为神经网络 (NNS) 或称作连接模型

(ConnectionistModel)，它的分布式并行信息处理的算法处理方法类似于动物的神经网络。它将单个处理单元以并行的方式组合在一起，类似于神经节间的连接，根据一定的训练样本反复训练网络修改连接点间的权重来构建能完成一定功能的网络。

人工神经网络中处理单元的类型分为三类：输入单元、输出单元和隐单元。接受外来信号与数据的是输入单元；实现系统处理结果输出的是输出单元；处在输入和输出单元之间的是隐单元。单元间的连接强度用神经元间的连接权值来表示，网络处理单元的连接关系体现了信息的表示和处理。通过动力学行为和网络的变换得到一种并行分布式的信息处理功能是神经网络的本质。

神经网络具有可调节性，也就是可训练性，通过一个特定的输入便可得到要求的输出。如图 1-1 所示，神经网络根据目标和输出的比较而调整，到达匹配的效果。在有监督模式中许多输入/目标对应的方法已成为训练神经网络的典型。

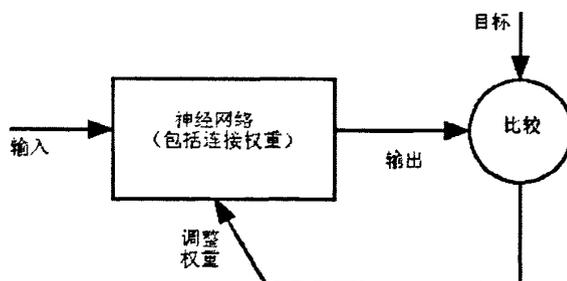


图 1-1 神经网络训练图

现在在很多领域中为了实现各种复杂的功能，都使用到了神经网络。这些领域包括：控制系统、翻译、语音、分类、鉴定和模式识别。现在计算机和人难以解决的常规问题都能够用神经网络来解决。

1.6 课题研究内容

现代化生产制造对焊接工艺提出了更高的自动化和智能化的需求，但是现在应用于

工业现场的大多数是示教再现型焊接机器人，对作业条件要求严格，缺少应变能力。本文将计算机视觉技术和神经网络技术应用到开放式控制体系的焊机机器人中，脱离了示教再现的工作方式，对从真正意义上实现焊接的自动化和智能化具有重要意义。本文的主要研究内容如下：

(1) 本文在现有焊接机器人技术的基础上，增加了视觉伺服控制系统，实现焊接工艺的自动化和智能化。

(2) 针对 CCD 摄像头获得的焊缝图像，本文提出了一套新的提取焊缝中心线的方法，简化了繁琐图像处理步骤。

(3) 设计了基于神经网络的无标定视觉伺服控制系统，这样无需对系统进行标定，消除了标定误差，同时也利用神经网络替代了复杂的雅克比矩阵的计算，从而简化了系统，通过 MATLAB 软件仿真，达到了预期的效果。

第二章 工业机器人运动系统分析

工业机器人一般由机械本体（手臂、手腕）、控制器、测量系统、驱动系统及传感器等组成。图 2-1 是工业机器人的典型结构。工业机器人的手臂决定了机器人作业空间，它具有 3 个自由度也就是说有 3 个运动坐标轴；工业机器人的手腕有 3 个自由度，是机器人工具（如夹爪、喷嘴、焊枪、机加工刀具）与主构架的连接机构；控制器用于控制机器人各部件的运动（位置、速度和加速度），使机器人末端或机器人工具的中心点以给定的速度沿着给定轨迹到达目标点；测量系统用于机器人运动部件的位移、速度和加速度的测量；驱动系统为机器人各运动部件提供力、力矩、速度、加速度；传感器能够获得搬运对象和机器人本身的状态信息，如工件及其位置、障碍物的识别，抓举工件的重量是否过载等。

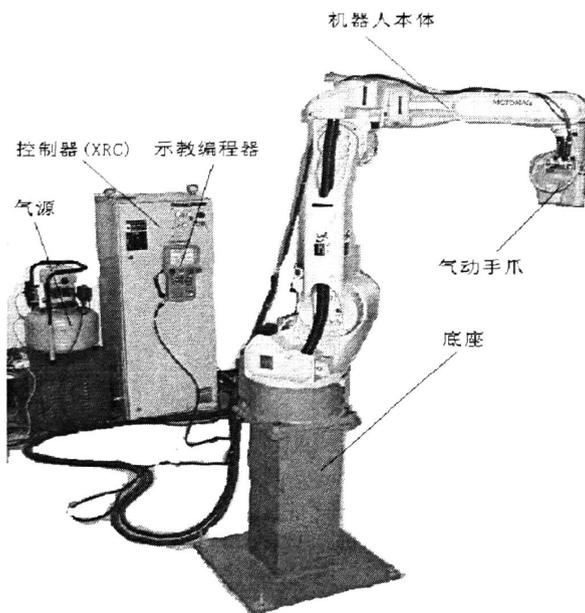


图 2-1 工业机器人的典型结构

2.1 工业机器人运动空间

2.1.1 机器人位姿描述

(1) 刚体位姿描述

我们可以把工业机器人的每个连杆都看成是一个刚体，为了在空间中完全确定一个刚体，需要确定刚体上某一点的位置和该刚体在空间的姿态。当建立了一个固定坐标系后，可以用某个 3×1 的矢量量来描述这一点在空间中的位置，设该坐标系为 $\{A\}$ ，空间任意一点 P 可以用列矢量 ${}^A P$ 来表示： ${}^A P = [P_x, P_y, P_z]$ 。

只要知道了刚体的方位和刚体上某一点的位置，才能够描述刚体的运动。可由一个坐标系和刚体固接来描述刚体的方位，比如和刚体固接在一起的这一直角坐标系为 $\{B\}$ ，用坐标系 $\{B\}$ 的 X_B 、 Y_B 、 Z_B 的轴相对于参考坐标系 $\{A\}$ 的方向余弦来描述刚体的方位，此方向余弦组成了一个的 3×3 矩阵：

$${}^A R_B = \begin{bmatrix} {}^A x_B, {}^A y_B, {}^A z_B \end{bmatrix} = \begin{pmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{pmatrix} \quad (2-1)$$

${}^A R_B$ 称为旋转矩阵，它表示在坐标系 $\{A\}$ 中刚体 B 的方位。式(2-1)中，下标 B 和上标 A 表示的意思是被描述的坐标系和参考坐标系。 ${}^A R_B$ 是正交的，因为 ${}^A R_B$ 中 ${}^A x_B$ ， ${}^A y_B$ ， ${}^A z_B$ 两两相互垂直，并且都是单位矢量。

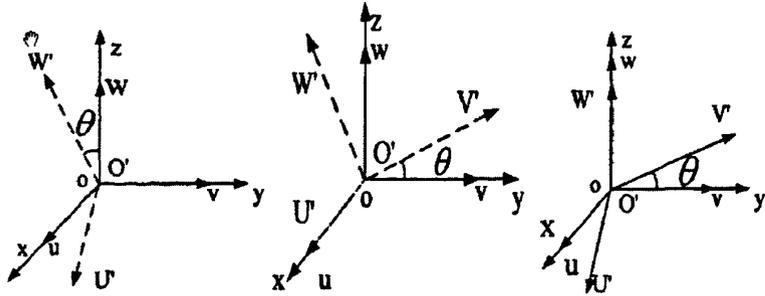


图 2-2 旋转矩阵的表示

如图 2-2 所示，绕 X、Y、Z 三轴旋转 θ 角的旋转矩阵分别为：

$$R(x, \theta) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\theta & -\sin\theta \\ 0 & \sin\theta & \cos\theta \end{bmatrix};$$

$$R(y, \theta) = \begin{bmatrix} \cos\theta & 0 & \sin\theta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin\theta & 0 & \cos\theta \end{bmatrix};$$

$$R(z, \theta) = \begin{bmatrix} \cos\theta & -\sin\theta & 0 \\ \sin\theta & \cos\theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

由上可知，刚体 B 的位姿可以用刚体 B 在坐标系 {A} 中的位置矢量 ${}^A p$ 和旋转矩阵 ${}^A R$ 来描述，此描述可以表示为坐标系 {B}：

$$\{B\} = \{ {}^A R {}^A p \}$$

2.1.2 坐标变换

相对于不同的坐标系，空间中的一点 P 的描述是不同的，但是在不同的坐标系中点 P 的描述可以相互转换，下面就将来介绍这种变换关系^{[17][18][19]}。

1. 平移变换

如果坐标系{A}和{B}具有相同的方位,但坐标原点不重合,如图 2-3 所示。坐标系{B}相对于坐标系{A}的位置用位置矢量 ${}^A p_B$ 来描述,则在坐标系{A}中物体 ${}^A P$ 的位置矢量可由矢量相加得出:

$${}^A P = {}^B P + {}^A p_B \quad (2-2)$$

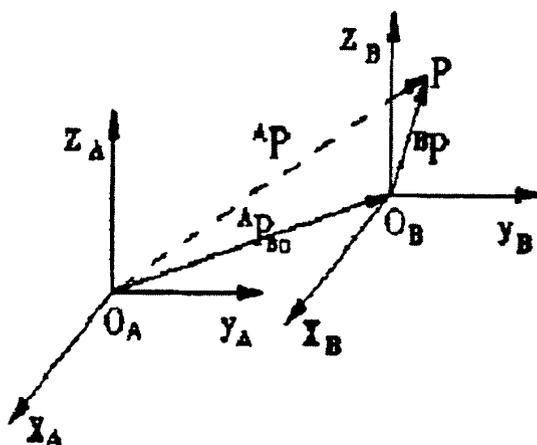


图 2-3 坐标平移变换

2. 旋转变换

如果坐标系{A}和{B}具有相同的坐标原点,但是方位不同,如图 2-4 所示。坐标系{B}相对于坐标系{A}的位置用旋转矢量 ${}^A R^B$ 来描述,则在坐标系{A}中物体 ${}^A P$ 的位置矢量可下式 2-3 得出:

$${}^A P = {}^A R^B P \quad (2-3)$$

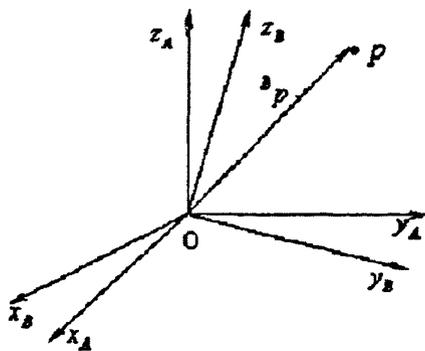


图 2-4 坐标旋转变换

3. 复合变换

在大多数情况下, 坐标系{A}和{B}的坐标原点不会重合, 并且方位也不相同, 如图 2-5 所示。这时候任意点 P 在{A}和{B}的坐标中的位置 ${}^A P$ 和 ${}^B P$ 间的关系, 可以用坐标系{B}相对于坐标系{A}的位置矢量和旋转矢量来描述, 如式 2-4:

$${}^A P = {}^A R {}^B P + {}^A P_B \quad (2-4)$$

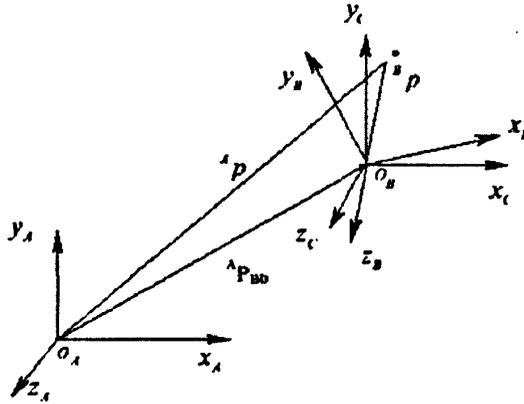


图 2-5 复合变换

2.1.3 齐次坐标变换

式 (2-4) 是非齐次的, 为了将复合变换表示为齐次坐标的形式, 式 (2-4) 可以用下式 (2-5) 表示:

$$\begin{bmatrix} {}^A P \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} {}^A R & {}^A P_{B0} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} {}^B P \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2-5)$$

式 (2-5) 中两边的两个列向量表示三维空间的点的齐次坐标, 描述的是点在坐标系{A}和{B}下的位置, 记为 ${}^A P$ 和 ${}^B P$ 。这样, 式 (2-5) 可以写为

$${}^A P = {}^A T {}^B P \quad (2-6)$$

式 (2-6) 中 ${}^A T$ 综合了旋转矩阵和位移矢量, 称为齐次坐标变换矩阵。

2.2 工业机器人运动学

2.2.1 机械臂数学模型

一般对于工业机器人来说，可以看作是有通过关节连接起来的一组连杆，即具有空间弯曲轴线的广义连杆^[8]。为了能用齐次变换矩阵来描述任意相邻两连杆的几何关系，我们可以取任意相连的两个连杆 $i-1$ 与 i ，以及连杆上的关节 $i-1$ 、 i ，如图 2-6 所示：

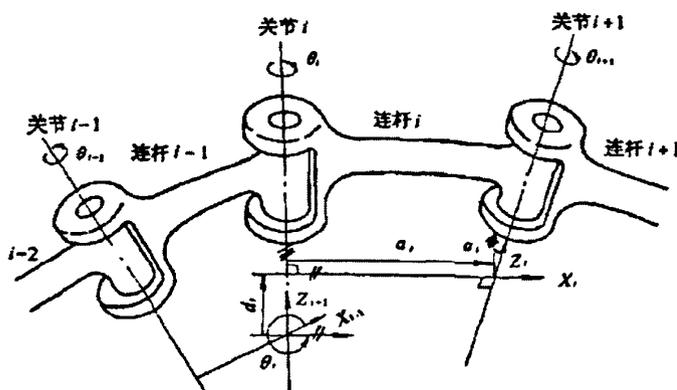


图 2-6 广义连杆变换的特征参数

首先将每一个连杆看成是一个刚体，在其上建立一个参考坐标系，如图 2-6 所示，连杆 i 的参考坐标系 $\{i\}$ 的定义如下： i 轴与关节 $i-1$ 和关节 i 的两轴线的公共法线的交点是坐标原点；关节 i 的轴线就是坐标系的 z_i 轴；关节 i 和关节 $i+1$ 的两轴线的公共法线是坐标系的 x_i 轴，方向由关节 i 指向关节 $i+1$ 。

通常用矩阵 A 来描述相邻两连杆间相对关系的齐次变换，所以 A 矩阵描述的是连杆坐标系间相对平移和旋转的齐次变换。如果第一个连杆相对于基坐标系的位置和姿态用 0A_1 表示，第二个连杆相对于第一个连杆的位置和姿态用 1A_2 表示，以此类推，第 i 个连杆相对于第 $i-1$ 个连杆的位置和姿态用 ${}^{i-1}A_i$ ，因此，第 i 个连杆在基坐标系中的位置和姿态变换矩阵 iA_0 可由下式求得：

$${}^iA_0 = {}^0A_1 {}^1A_2 \cdots {}^{i-1}A_i \quad (2-7)$$

六轴工业机器人是具有 6 自由度的空间连杆机构，大多数情况下用 Denavit-HartenBerg 法(D-H 法)来描述末端执行器的空间位置及姿态。各个连杆相对于固定参考坐标系的空间几何关系用齐次变换来描述，相邻两连杆的空间关系用一个 4×4 的齐次变换矩阵来描述，因此就能推导出末端执行器坐标系相对于基坐标系的等价齐次坐标变换矩阵，建立操作臂的运动方程。

定义连杆参数如下：

- (1) 沿 x_n 轴方向 z_{n-1} 轴与 z_n 轴之间的距离用 a_n 表示；
- (2) 绕 x_n 轴线 z_{n-1} 轴到 z_n 轴所旋转的角度用 α_n 表示；
- (3) 沿 z_n 轴方向 x_{n-1} 轴与 x_n 轴的距离用 d_n 表示；
- (4) 绕 z_n 轴由 x_{n-1} 轴到 x_n 轴所旋转的角度用 θ_n 表示。

则相邻两坐标系之间的关系 ${}^{n-1}T_n$ 可以表示为式 (2-8)：

$$\begin{aligned}
 {}^{n-1}T_n &= A_n = Rot(z, \theta_n) \times Trans(0, 0, d_n) \times Trans(a_n, 0, 0) \times Rot(x, \alpha_n) \\
 &= \begin{bmatrix} \cos \theta_n & -\sin \theta_n \cos \alpha_n & \sin \theta_n \sin \alpha_n & a_n \cos \theta_n \\ \sin \theta_n & \cos \theta_n \cos \alpha_n & -\cos \theta_n \sin \alpha_n & a_n \sin \theta_n \\ 0 & \sin \alpha_n & \cos \alpha_n & d_n \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (2-8)
 \end{aligned}$$

2.2.2 运动学正解

对一个给定的机械手在已知关节角矢量 $\theta_{(t)} = (\theta_{1(t)} + \dots + \theta_{n(t)})T$ 和杆件几何参数的条件下 (n 是自由度数)，求得手末端执行器相对于参考系的位姿的问题称为机械手运动学正问题亦称直接问题。根据连杆的变化通式和连杆参数表，可以得到各连杆变化矩阵如下：

$${}^1_0T = \begin{bmatrix} C\theta_1 & 0 & S\theta_1 & 0 \\ S\theta_1 & 0 & -C\theta_1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$${}^2_1T = \begin{bmatrix} C\theta_2 & -S\theta_2 & 0 & a_2C\theta_2 \\ S\theta_2 & C\theta_2 & 0 & a_2S\theta_2 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$${}^2_3T = \begin{bmatrix} C\theta_3 & 0 & S\theta_3 & a_3C\theta_3 \\ S\theta_3 & 0 & -C\theta_3 & a_3S\theta_3 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$${}^3_4T = \begin{bmatrix} C\theta_4 & 0 & -S\theta_4 & 0 \\ S\theta_4 & 0 & C\theta_4 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & d_4 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$${}^4_5T = \begin{bmatrix} C\theta_5 & 0 & S\theta_5 & 0 \\ S\theta_5 & 0 & -C\theta_5 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$${}^5_6T = \begin{bmatrix} C\theta_6 & -S\theta_6 & 0 & 0 \\ S\theta_6 & C\theta_6 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

式中 $C\theta_i$ 代表 $\cos\theta_i$, $S\theta_i$ 代表 $\sin\theta_i$ 。根据运动学正解得定义, 将上述坐标变化矩阵代入公式(2-8), 可以得到机器人末端相对参考坐标系的位置和姿态^[21] 即:

$${}^0_6T = {}^0_1T {}^1_2T {}^2_3T {}^3_4T {}^4_5T {}^5_6T \quad (2-8)$$

$${}^0_6T = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & P_X \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & P_Y \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & P_Z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

式中:

$$r_{11} = S_1(C_5C_6S_4 + C_4C_6) + C_1(-C_6S_{23}S_5 + C_{23}(C_4C_5C_6 - S_4S_6))$$

$$r_{12} = C_6(C_4S_1 - C_1C_{23}S_4) - S_6(C_5S_1S_4 + C_1(C_{23}C_4C_5 - S_{23}S_5))$$

$$r_{13} = S_1S_4S_5 + C_1(C_5S_{23} + C_{23}C_4C_5)$$

$$P_X = C_1(a_2C_2 + a_3C_{23} + d_4S_{23})$$

$$r_{21} = -C_6S_1S_{23}S_5 - C_1(C_5C_6C_4 + C_4S_6) + C_{23}S_1(C_4C_5C_6 - S_4S_6)$$

$$r_{22} = C_1(-C_4C_6 + C_5S_4S_6) - S_1(-S_{23}S_5S_6 + C_{23}(C_6C_4 + C_4C_5C_6))$$

$$r_{23} = C_5 S_1 S_{23} + (C_{23} C_4 S_1 - C_1 S_4) S_5$$

$$P_y = S_1 (a_2 C_2 + a_3 C_{23} + d_4 S_{23})$$

$$r_{31} = C_4 C_5 C_6 + C_{23} C_6 C_5 - S_{23} S_4 S_6$$

$$r_{32} = -C_6 S_{23} S_4 - S_6 (C_4 C_5 S_{23} + C_{23} S_5)$$

$$r_{33} = -C_{23} C_5 + C_4 S_{23} S_5$$

$$P_z = -d_4 C_{23} + a_2 S_2 + a_3 S_{23}$$

其中 $C_{23} = \cos(\theta_2 + \theta_3)$ ，其他同理。式中 0T 描述了末端连杆的坐标系，既是机械手相对基坐标的位姿。

2.2.2 运动学逆解

运动学正解是根据 D-H 方法建立的运动学模型，通过变换矩阵求得末端在基坐标下的唯一坐标值（包括位置和姿态），相对而言比较简单。逆运动学的求解过程是根据已知的末端抓持器相对于参考坐标系的位姿，求关节变量 $\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4, \theta_5, \theta_6$ 的过程，它是机器人运动规划和轨迹控制的基础，也是运动学最重要的部分。

运动学逆解是在给定已知的满足某工作要求时末端执行器位置和姿态以及各杆的结构参数的情况下，求解对应的关节运动量。在机器人控制中，只有使各关节移动(或转动)逆解中的值，才能使末端执行器达到工作所要求的位置和姿态，所以运动学逆解是机器人控制的关键环节之一^[22]。

关节变量的耦合关系表达式组成了机器人的总变化矩阵，直接通过总变化矩阵得到需要的各个关节变量值比较困难。一种可行的求解方法是通过在总变化矩阵左边乘以坐标变化矩阵的逆矩阵消除复杂的耦合关系表达式，比较矩阵相应元素相等逐个求解出关节变量值，具体为在 ${}^0T = T_1 T_2 T_3 T_4 T_5 T_6$ 两边左乘 T_1 的逆： $T_1^{-1} {}^0T = T_2 T_3 T_4 T_5 T_6$ ， T_1 的逆

等于 T_1 的转置，即：

$$T_1^{-1} = T_1' = \begin{bmatrix} C\theta_1 & S\theta_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ S\theta_1 & -C\theta_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

将 T_1' 代入得：

$$\begin{bmatrix} C\theta_1 & S\theta_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ S\theta_1 & -C\theta_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & p_x \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & p_y \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = T_2 T_3 T_4 T_5 T_6$$

2.3 工业机器人轨迹规划

机器人求得完成自身任务解决方案的过程称为轨迹规划。这里所指的任务是指机器人某个动作（比如手部或关节的某个规定的运动等）或者机器人要完成的某一具体任务。机械臂位姿关于时间的函数是轨迹。根据驱动元件约束条件和机器人动力学方程，求出沿一条无冲突路径机械臂的姿势和位置的时间经历称为轨迹规划。轨迹规划有点位作业（PTP, point-to-point motion）和连续路径作业（CP, continuous-path motion）两种形式。

在关节空间和笛卡儿空间中都可以进行轨迹规划。在关节空间中进行轨迹规划容易做到控制的实时性，因为其规划轨迹时使用运动时的受控关节变量，但是这样的不足之处是末端抓持器和各杆的位置不好确定，而在笛卡儿坐标空间可以做到这一点，但目前还没有一种传感器可以将末端的抓持器在笛卡儿坐标中的位置测量出来，因此所有的运算都是在关节坐标系中进行的，这样就需要过求解雅克比逆矩阵在关节和直角坐标之间进行实时变化，但这样工作量非常大，用时长。

2.3.1 关节空间中进行轨迹规划

要在关节空间进行轨迹规划，首先要搭建路径上的点和关节的角度值之间的关系，这里要用到逆运动学方程，然后分别用一个函数来描述关节的变化，使之从起始点开始依次通过所有路径点直至到目标点^[24]。每个关节有相同的运动变化时间，但描述它们变化的时间函数之间没有任何关联。常用的光滑时间函数有三次多项式以及五次多项式时间函数，本节采用了三次多项式时间函数对关节空间中的轨迹规划进行介绍。

三次多项式及其一阶导函数的通式见式 (2-9)、(2-10)。

$$\theta_{(t)} = C_0 + C_1 t + C_2 t^2 + C_3 t^3 \quad (2-9)$$

$$\dot{\theta}_{(t)} = C_1 + 2C_2 t + 3C_3 t^2 \quad (2-10)$$

为确定未知的系数 C_0 , C_1 , C_2 , C_3 , 同时对起始位置点和目标位置给出约束条件列出四个方程式, 见式 (2-11) (2-12) (2-13) (2-14):

$$\theta_{(t_0)} = C_0 + C_1 t_0 + C_2 t_0^2 + C_3 t_0^3 \quad (2-11)$$

$$\theta_{(t_f)} = C_0 + C_1 t_f + C_2 t_f^2 + C_3 t_f^3 \quad (2-12)$$

$$\dot{\theta}_{(t_0)} = C_1 + 2C_2 t_0 + 3C_3 t_0^2 \quad (2-13)$$

$$\dot{\theta}_{(t_f)} = C_1 + 2C_2 t_f + 3C_3 t_f^2 \quad (2-14)$$

式中 $\theta_{(t_0)}$, $\theta_{(t_f)}$ 表示起始位置的关节角, $\theta_{(t_f)}$ 表示目标位置的关节角, $\dot{\theta}_{(t_0)}$ 表示起

始位置的关节角速度, $\dot{\theta}_{(t_f)}$ 目标位置的关节角速度。如果设 $t_0=0$, 解得系数见式 (2-15)

(2-16) (2-17) (2-18) 所示:

$$C_0 = \theta_{(t_0)} \quad (2-15)$$

$$C_1 = 0 \quad (2-16)$$

$$C_2 = \frac{3(\theta_{(t_f)} - \theta_{(t_0)}) - (2\dot{\theta}_{(t_0)} + \dot{\theta}_{(t_f)})t_f}{t_f^2} \quad (2-17)$$

$$C_3 = \frac{-2(\theta_{(t_f)} - \theta_{(t_0)}) + (\dot{\theta}_{(t_0)} + \dot{\theta}_{(t_f)})t_f}{t_f^3} \quad (2-18)$$

假设在起始位置速度为零, 既 $\dot{\theta}_{(t_0)} = 0$, 目标位值的起始位置速度为零, $\dot{\theta}_{(t_f)} = 0$

得到特解如下式 (2-19)、(2-20)、(4-21)、(2-22)。

$$C_0 = \theta_{(t_0)} \quad (2-19)$$

$$C_1 = 0 \quad (2-20)$$

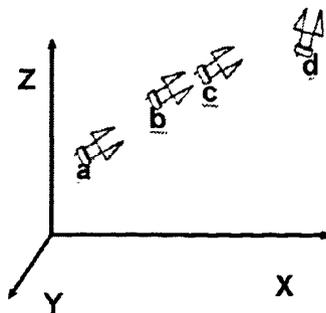
$$C_2 = \frac{3(\theta_{(t_f)} - \theta_{(t_0)})}{t_f^2} \quad (2-21)$$

$$C_3 = \frac{-2(\theta_{(t_f)} - \theta_{(t_0)})}{t_f^3} \quad (2-22)$$

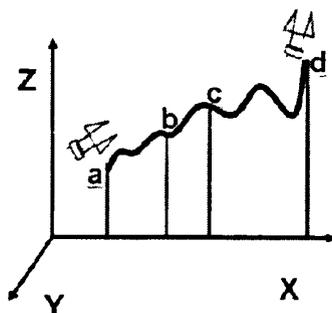
如上所述, 在已知始末位置的关节角度和角速度的情况下求解多项式的系数比较简单, 但是对于路径中间的位置其角速度并非已知, 需要通过机械手末端的运动经过雅克比矩阵的逆变换才能得到, 这样计算量就很大, 为了简化运算提高速度, 一般中间点的瞬时速度用相邻两段轨迹角速度平均值来代替。

2.3.2 笛卡尔空间中进行轨迹规划

在笛卡尔空间有四个点如图 2-7 所示, 由上节可知, 关节空间进行轨迹规划仅能保证机械手经过四个点, 并不能让其按照一定的轨迹在四个点之间运动, 也不能确定在运动过程中的姿态, 要想使机械手按照图 2-8 所示的轨迹运动, 只有在笛卡尔空间进行规划才能完成^[25]。空间直线、圆弧轨迹规划法是笛卡儿坐标常用的规划算法, 下面是空间直线规划算法的设计。



2-7 关节空间中进行轨迹规划图



2-8 笛卡儿空间中进行轨迹规划图

2.3.2.1 空间直线插补算法

根据给定直线两个端点的位姿求出直线上的中间点的位姿的方法就是空间直线插补。在插补的过程中，机械手的姿态从初始位置的姿态开始，按照一定的步长均匀的变化到末端位置的姿态，机械臂的姿态变化按照给定的步长从初始姿态均匀向末端点姿态变化。假设初始位置的坐标为 $A(X_1, Y_1, Z_1)$ ，终点位置的坐标为 $B(X_2, Y_2, Z_2)$ ，如图 2-9。

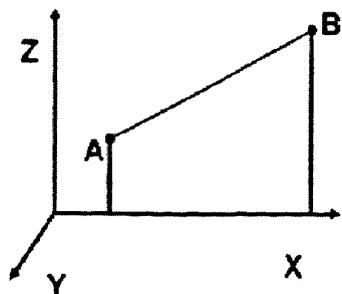


图 2-9 空间直线插补

直线插补的具体过程如下所示:

- (1) 确定插补周期 T_s 和沿直线运动的速度 v 。
- (2) 计算出插补点间的距离。
- (3) 计算出插补过程用的时间 T 。
- (4) 求出插补需用次数 N 。
- (5) 计算插补的增量:

$$\Delta x = (X_2 - X_1) / N$$

$$\Delta y = (Y_2 - Y_1) / N$$

$$\Delta z = (Z_2 - Z_1) / N$$

- (6) 求出插补点 j 的坐标:

$$X_j = X_1 + j \times \Delta x$$

$$Y_j = Y_1 + j \times \Delta y$$

$$Z_j = Z_1 + j \times \Delta z$$

(7) 利用齐次变换矩阵把新坐标下的点转换的基坐标系下。但最终还要经过运动学反解求出各个关节的角度。所以说在笛卡尔空间的轨迹规划最终还是细化的到在关节空间的轨迹规划。

2.4 本章小结

本章介绍了工业机器人的基本原理, 首先讲述了机器人的运动空间, 以及运动空间的坐标变换; 然后讲述了机器人的运动学原理, 即通过各关节角的大小求得机械手末端相对于基坐标系的位姿, 以及如何在已知机械手末端位姿的情况下求得各关节角的大小; 最后讲述了工业机器人的轨迹规划, 即如何在关节坐标系和笛卡尔坐标系进行轨迹规划, 本章对理解视觉伺服系统在工业机器人中的作用有重要意义。

第三章 焊缝图像采集及预处理

3.1 视觉传感技术

由于计算机技术处理速度的不断提高, 机器视觉技术应用于焊接机器人伺服控制变为可能, 从而焊接技术的智能化变得间的有效。焊缝的信息如果用视觉传感技术来解决有许多长处: 丰富的信息量、离强热区和电弧弧光比较远、能抗较强的电磁干扰、精确度和灵敏度都很高、不与工件接触及高的自动化程度等, 在各种各样形状坡口下都能使用, 可同时进行焊缝自动跟踪控制和焊接的质量控制, 在传感技术领域是非常具有发展前途。

主要的固体视觉传感器有 MOS 图像传感器、电耦合器件(CCD)、电荷注入器件(CID)^[26]三种类型。在焊接机器人的各种视觉传感器中, CCD 传感器因其价格低、性能可靠、体积小、图像清晰直观而得到了广泛的应用。它有线阵和面阵两种类型, 它们分别获取的是一维和二维图像, 面阵 CCD 能够提供很大的信息量, 是比较先进的传感技术, 应用日益广泛。

根据照明光源的不同, 在焊接机器人上应用的视觉传感器按照工作方式可以分为被动视觉和主动视觉两种。其中, 照明光源为普通光源或电弧的视觉系统为被动视觉, 其在图像中成像的为被检测物体本身。使用具有特定结构的光源与摄像机组成的视觉传感系统的为主动视觉, 其特点为包含特征信息的图像由激光点或结构光在被检测物体表面上形成的光斑产生。主动视觉系统虽然可以获得更为清晰的图像, 但是由于其系统组成比较复杂, 体积较大, 价格昂贵, 在实际生产中应用的比较少。随着被动视觉系统的不断发展, 避免弧光干扰的效果越来越好, 被动视觉系统凭其简单的系统特性得到了越来越

越广泛的应用。本文是通过被动视觉系统而获得图像，其图像相对于主动视觉系统而言较为复杂，因此图像处理技术就显得尤为重要。

在被动视觉传感方法中，弧光对焊缝图像的影响很大，所以为了获得比较好的焊缝图像应尽量减小弧光的影响。为此选择合适的电流波形、取像时刻、基值电流和滤光系统可以有效的减小弧光的影响，可以获得较为清晰地焊缝图像。

3.2 图像对比度增强

3.2.1 图像增强原理

图像增强对图像进行处理的目的是得到对具体应用来说更“有用”、视觉效果更“好”的图像。效果的好坏要因具体的应用目的和要求而异，并且也可具体用不同的图像增强技术。

根据其处理所进行的空间不同目前常用的增强技术可分为基于变换域的方法和基于图像域的方法。前者对图像的处理是通过在图像的变换域而间接进行的，而后者直接在像素组成的空间（图像空间）里直接对像素进行操作。另外，在基于图像域的图像增强技术还可以分为基于模板和基于像素点的两组：前者对图像的每次处理是对小的子图像（模板）进行的，而后者对图像的每次处理是对每个像素进行的，对每个像素的处理与其它像素无关^[6]；

3.2.2 图像对比度增强

实际上通过增加原图中某两个灰度值之间的动态范围以增强原图的各部分的反差就是增强对比度。因为焊接过程中的条件比较恶劣，所以获得的图像比较模糊，所以增加图像的对比度在一定程度上能起到锐化边缘的目的。常用的增强对比度的方法有分段线

性灰度变换和直方图均衡化。因为直方图均衡化对图像中看不清的细节有较强的分辨能力，对焊缝边缘提取的作用不是很大，所以本文用分段线性灰度变换的方法来增强对比度，典型的增强对比度的变换曲线如图 3-1 所示：

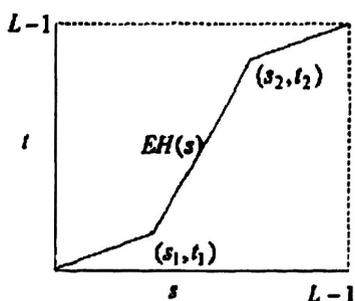


图 3-1 分段线性灰度变换示意图

从图 3-1 中可以看出，通过这样的变换原图中灰度值在 0 至 S_1 和 S_2 至 $L-1$ 间的动态范围减少了，而灰度值在 S_1 至 S_2 的动态范围增加了，因此增强了这个范围内的对比度。在实际中，可以通过对 S_1 、 T_1 、 S_2 、 T_2 取不同的值进行组合，得到不同的效果。

图 3-2 中显示了利用 MATLAB 工具箱中的函数 `imadjust()` 增强对比度后的图像，通过与原图像进行对比可知，对比度增强后焊缝边缘变得更清晰。

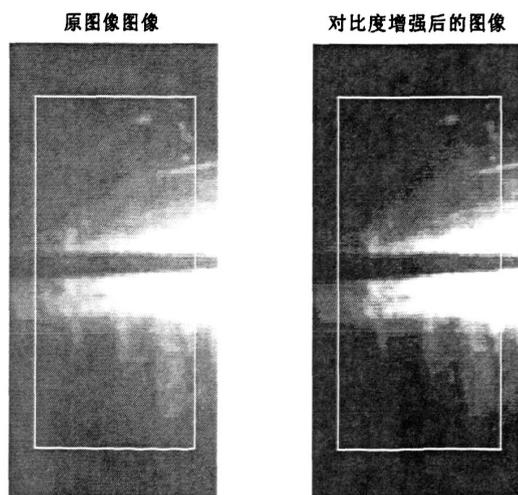


图 3-2 对比度增强处理后的图像

3.3 图像平滑

每幅图像都有某种程度的噪声，为了解方便，我们将噪声看作是多种原因造成的灰度值的变化，比如光子通量的随机性而产生的噪声。在焊接过程中磁场干扰、强烈的弧光、焊接电流变换、飞溅、工件反光等因素，使得采集的图像存在很多的噪声点，因此首先要进行滤波将图像中存在的各种噪声有效的去除，然后才能进行下一步的处理。消除图像噪声的工作称之为图像平滑或滤波。图像平滑有抽出对象特征和改善图像质量两个目的。平滑可以在空间域进行也可以在频率域进行，由于在频率域中计算量大，实时性不强，所以在本文中在空域中进行图像平滑。

在空间域法中，采用均值滤波或中值滤波是图像平滑的常用方法。均值滤波是在图像上一个有奇数点的滑动窗口在滑动，用窗口内所有像素的平均值来代替窗口中心点对应像素的灰度值，其中加权均值滤波为在窗口内规定了各像素点的权重。中值滤波是用窗口内所有像素的中间值来代替窗口中心点对应像素的灰度值。

均值滤波把噪音去除的同时还常模糊图像的边缘，从而造成视觉上的失真，而中值滤波则不同，其不仅能把干扰消除，而且不会模糊图像的边缘。所以为了更好的获得焊缝信息，本文中采用中值滤波。

从中值滤波的信号处理方法来看它是一种非线性的，中值滤波器也是一种非线性的滤波器，1971年 J.W.Jukey 首先提出了中指滤波器的概念，开始时用来处理一维信号，后来被用来处理二维图像技术。线性滤波器如平均值滤波、最小均方滤波等可能会造成图像细节的模糊，在一定的条件下，中值滤波器可以克服这些缺点，并且对滤波脉冲干扰及图像扫描噪声的处理最为有效，原因是这些干扰值和邻近像素的灰度值的差距很大，因此干扰值在中值滤波窗口内和邻近像素值排序后不会是中值，所以干扰值会被邻近像素的灰度值代替，从而达到去除干扰值的效果。中值滤波在在实际的运算过程中另一个

优点是不需要图像的统计特性，但是中值滤波方法一般不用在一些线、尖顶、点细节多的图像。

一般的，设有一个一维序列 $f_1, f_2, f_3 \cdots f_n$ ，取窗口长度（点数）为 m (m 为奇数)，中值滤波用在一维序列中就是从序列中抽取 $f_{i-v}, \cdots, f_{i-1}, f_i, f_{i+1}, \cdots, f_{i+v}$ 共 m 个数 ($v=(m-1)/2$)，其中窗口中心处的值为 f_i 。再按大小顺序将这 m 个点进行排列，将排序中间值赋值给窗口中心点位置，数学表达式为：

$$y_i = \text{med}\{f_{i-v}, \cdots, f_{i-1}, f_i, f_{i+1}, \cdots, f_{i+v}\} \text{ 其中 } i \in Z, v=(m-1)/2。$$

中值滤波时选取的窗口的点数一般有奇数个，窗口的中心点的灰度值用窗口中各点灰度值的中值来替代。如果窗口内 5 点的值为 $[2, 5, 7, 1, 8]$ ，按从小到大的顺序排列后为 $[1, 2, 5, 7, 8]$ ，则 $\text{med}[1, 2, 5, 7, 8]=5$ 。如果此窗口用均值滤波进行处理则输出为：

$$(1+2+5+7+8) \div 5=4.6$$

二维中值滤波可有以下式表示：

$$y_i = \text{med}\{f_y\}$$

滤波的效果受二维中值滤波的窗口形状和尺寸设计的影响很大，往往采用不同的尺寸和形状来满足不同的图像内容和不同的应用要求。常用的二维中值滤波窗口有十字星、圆形、线状、方形及圆环形等，窗口的尺寸逐步增大，以达到理想的滤波效果。大多数情况下，一般采用圆形或方形的窗口处理轮廓线较长缓慢变化的物体的图像，一般用十字形的窗口处理包含有尖顶角的物体的图像。选择的滤波窗口的大小应该小于所有要检测的图像中有效物体的尺寸^[5]。

中值滤波的特点有：

- (1) 非线性：两序列 $f(r), g(r)$

$$\text{med}\{f(r)+g(r)\} \neq \text{med}\{f(r)\} + \text{med}\{g(r)\}$$

(2) 对尖峰性型的干扰有较强的处理能力,在不改变边缘的坡度的同时又能较好的去除噪声,但对高斯噪声处理能力差;

(3) 对噪声范围小于处理窗口尺寸一般的噪声有较好的处理能力。

常用的二维中值滤波窗口形状有线状、方形、圆形、十字形等。

图 3-3 中是调用 $B=\text{ordfilt2}(A,\text{order},\text{domain})$ 函数来实现中值滤波,其中选取了尺寸为 3、4、5 的三种窗口:

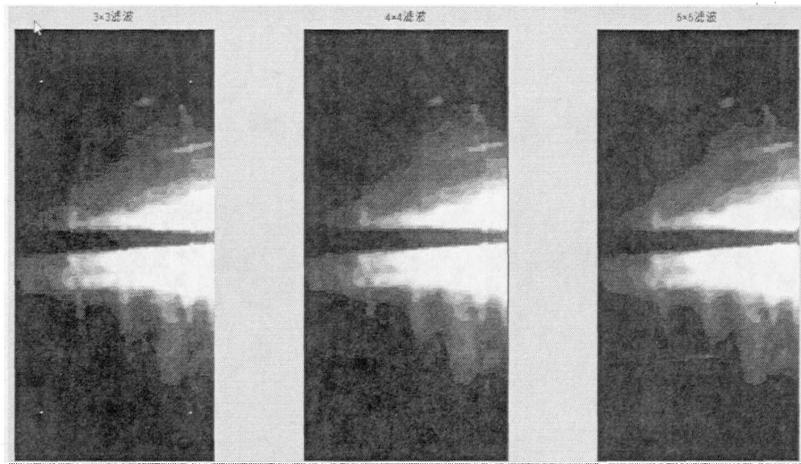


图 3-3 中值滤波后图像

由图像可知经过中值滤波后图像中噪声明显减少了,焊缝边缘变得更为清晰。通过对三种尺寸的滤波窗口进行对比可知,当选取 5×5 窗口尺寸时滤波效果最好。

3.4 本章小结

本章讲述了图像的采集过程及预处理,利用 CCD 摄像机被动视觉的方式获得焊缝图像,为了获得更为容易处理的图像需要选择合适的电流波形、取像时刻、基值电流和滤光系统。本章对焊缝图像进行了预处理,为进一步图像处理奠定了基础。

第四章 焊缝图像处理

焊缝图像经过预处理后,虽然人眼能很容易的识别焊缝,但是对于计算机来说要把焊缝从背景中分离出来,进而识别出焊缝还比较困难,还要经过图像分割、图像边缘提取等步骤才能获得焊缝信息。

4.1 图像分割处理

图像分割将图像分成一些有意义的区域,然后描述这些区域,也就是将某些目标区域图像的特征提取出来,进而判断感兴趣的目标是否在图像中。像素间的跳变性和相似性是图像分割的基础。在某个区域内像素具有某种相似的特性(纹理相同,灰度一样)称为“相似性”;特性不连续(如灰度图突变等)就是“跳变性”。整体而言,把图像分割成若干有意义的互不交迭区域的处理技术就是图像分割。图像特征在不同区域内有明显差别,某种特性或特征每一个区域内部相近或相同,也就是说同一区域内部特性相对一致,变化平缓,而区域边界处则特性变化比较剧烈。一个区域内是像素的连通集,是一个所有像素都有相邻或相接触像素的集合。

图像分割的方法有多种,传统的分割方法有基于区域的分割方法和基于边界的分割方法,近些年来有新出现了一些分割方法,比如基于区域和边界技术相结合的分割方法、基于特定理论的分割方法。对于本文中提取焊缝信息,由于噪声和其它因素的影响,无论是区域分割方法还是边缘检测方法,都不能提供完整的信息,因此文首先对焊缝图像进行阈值分割,然后对其进行边缘检测,以便更好的获得图像信息。

阈值法是一种最常用的图像分割技术,区分不同目标的灰度值用的是阈值。假如只有背景和目标两种类型存在于图像中,那么可用单阈值分割(只需选取一个阈值)。这种

方法是比较阈值与图像中每个像素的灰度值，一类为阈值大于灰度值的像素，另一类为阈值小于灰度值的像素。多阈值分割为选取多个阈值将图像中多个目标一一分隔开。阈值又可分为动态阈值、局部阈值和全局阈值。

阈值的选取决定着阈值法分割的结果，阈值法分割的关键是确定阈值，按照某个准则求出最佳阈值的过程就是阈值分割。图像灰度直方图的峰谷法、最大熵自动阈值法、最大类间方差法、最小误差法等是全局阈值常用的选取方法。运算效率较高、计算简单、速度快等是阈值分割的优点。灰度相差很大的不同背景和目标能利用全局阈值进行有效的分割，局部阈值或动态阈值分割法用在不同目标的灰度值范围有重叠或图像的灰度差异不明显时效果明显。但是，这种方法对噪声很敏感，因为其一般不考虑空间特征，只考虑像素本身的灰度值。

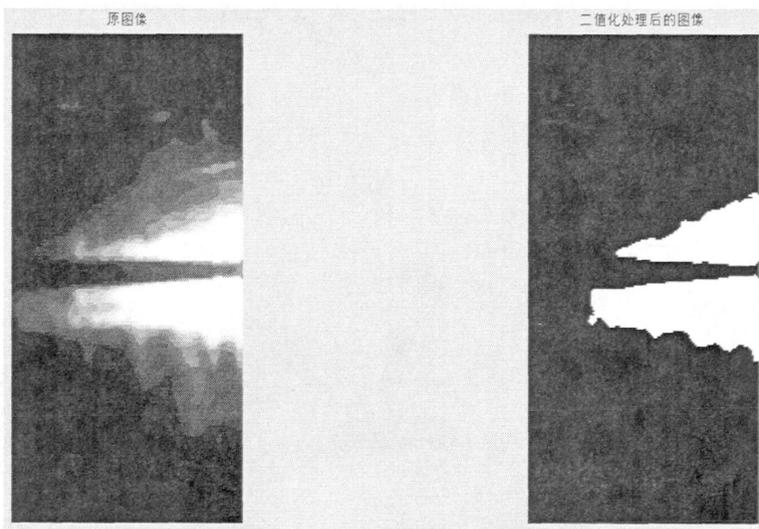


图 4-1 图像二值化处理前后对比图

图 4-1 是用 MATLAB 函数 $BW=im2bw(I,level)$ 进行二值化处理后的效果图，通过实验可知当 $level=0.45$ 时效果最好。通过对比可见通过二值化处理后消除了噪声的影响，简化了图像，便于以后进行边缘检测。

4. 2 图像边缘检测方法

图像边缘检测是提取出图像中焊缝信息最为关键的一步。图像边缘提取首先检测出图像中局部特性的不连续性,然后再将这些不连续的处于边缘的像素连成完整的边界。沿着边缘走向像素是否变化平缓而垂直边缘方向的像素是否变化剧烈,是检测边缘特性的基本方法。因此,按照这样的方法,能检测出符合边缘特性的边缘像素的数学算子就能用来当做提取边缘的算法。

最基本的一类边缘检测算子微分算子类,包括:梯度算子、prewitt 算子、Robert 梯度算子、Sobel 边缘检测算子,laplacian 算子、Krisch 边缘检测算子等。这些算子除了laplacian 外基于的变化规律都是一阶方向导数在边缘处取最大值。按照经验 Robert 算子在图像处理的实际效果上来看检测边缘较好,它采用的方法是对角方向相邻的两个像素之差。Prewitt 算子定位的精度不是很高,对噪声有一定的抑制作用,检测边缘的方法是利用在边缘处相邻点的灰度差达到最大这一特性。Sobel 算子能对边缘的走向有较强的检测能力,能抑制一定的噪声,但是对边缘的定位不够准确。检测边缘的方法是利用在边缘处相邻点的灰度加权差达到最大这一特性。当对精度要求不是很高时,是一种较为常用的边缘检测方法。Laplace 算子比较容易检测噪声和灰度突变,有较高的定位精度,同时不具方向性,且不能获得边缘方向等信息,检测边缘的方法是利用边缘点处二阶导函数出现零交叉这一原理。

4.2.1 边缘检测算子

1. Roberts 边缘检测算子

Roberts 边缘检测算子根据任意一对互相垂直方向上的差分可用来计算梯度的原理,采用对角线方向相邻两像素之差,即

$$g(x,y) = [\sqrt{f(x,y)} - \sqrt{f(x+1,y+1)}]^2 + [\sqrt{f(x+1,y)} - \sqrt{f(x,y+1)}]^2 \quad (4-1)$$

它的卷积算子为如图 4-2 所示:

$$\begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -1 & 0 \end{bmatrix} \quad \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{bmatrix}$$

图 4-2 Roberts 算子模板

Roberts 算子难以消除对噪声的影响, 本文中使用的焊缝图像, 有大量信号是噪声产生的, 因此 Roberts 算子并不适合。

2. Sobel 边缘检测算子

对数字图像 $\{f(i,j)\}$ 的每个像素, 考察它上、下、左、右邻点灰度的加权差, 与之接近的邻点的权大。据此, 定义 Sobel 算子如下:

$$S = (dx^2 + dy^2)^{1/2} \quad (4-2)$$

它的算子模板如图 4-3 所示:

$$\begin{bmatrix} -1 & 0 & 1 \\ -2 & 0 & 2 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad \begin{bmatrix} -1 & -2 & -1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 2 & 1 \end{bmatrix}$$

图 4-3 Sobel 算子模板

Sobel 算子可以消除部分噪声的干扰, 但用 Sobel 算子会存在许多的伪边缘, 并且得到较厚的边缘, 因此在本文中并不适合应用。

3. Prewitt 边缘检测算子

对数字图像 $\{f(i,j)\}$ 的每个像素, 考察它上、下、左、右邻点灰度之差。据此, 定义 Prewitt 算子如下:

$$S_p = (dx^2 + dy^2)^{1/2} \quad (4-3)$$

它的算子模板如图 4-4 所示:

$$\begin{bmatrix} -1 & 0 & 1 \\ -1 & 0 & 1 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ -1 & -1 & -1 \end{bmatrix}$$

图 4-4 Prewitt 算子模板

Prewitt 算子是 3×3 算子模板。图 3-5 所示的 2 个卷积核 dx 、 dy 形成了 Prewitt 算子。与 Sobel 算子的方法一样，图像中的每个点都用这 2 个核进行卷积，取最大值作为输出值。Prewitt 算子也产生 1 幅边缘幅度图像。

4. Laplace 边缘检测算子

Laplace 算子是二阶微分算子，它是一个标量，不是向量，也进行各向同性的运算。它对灰度突变敏感。在数字图像中，可用差分来近似，定义 Laplace 算子如下：

$$\Delta^2 f(x,y) = f(x+1,y) + f(x-1,y) + f(x,y+1) + f(x,y-1) - 4f(x,y) \quad (4-4)$$

它的算子模板如图 4-5 所示：

$$\begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 \\ -1 & 4 & -1 \\ 0 & -1 & 0 \end{bmatrix}$$

图 4-5 Laplace 算子模板

该算法具有对点噪声放大的特性，因此在检测边缘的同时也引入了大量的噪声，而且不具有方向性，不能获得边缘方向等信息，因而该算子的边缘检测效果不是很好。

4.2.2 各种边缘算子检测效果比较

图 4-6 中显示的是分别用 Robert 算子、Sobel 算子、prewitt 算子、laplacian 算子检测焊缝图像的边缘。

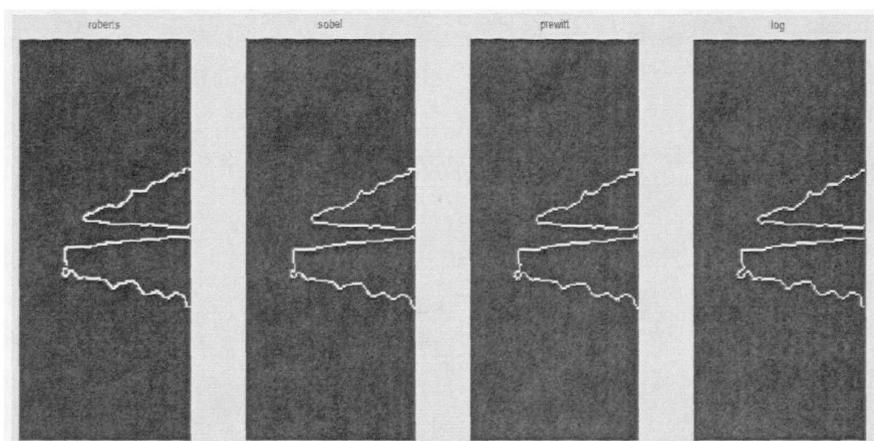


图 4-6 各边缘检测算子的效果图

经过二值化处理后各种边缘检测技术的检测效果都比较好，相比较而言用 `prewitt` 算子检测的焊缝图像边缘较为平滑，所以本文采用 `prewitt` 检测算子检测边缘的焊缝图像。

4.3 直线拟合

通过 `prewitt` 算子检测的焊缝图像边缘获得的图像存在上下两条曲线，即伪边缘，所以为了正确提取焊缝边缘线必须先去除伪边缘。根据现在获得的边缘均是单像素的特点，从图像左边开始逐列扫描图像，每一列先从上往下扫描，将扫描到的第一个 1 变为 0，再从下往上扫描，也将扫描到的第一个 1 变为 0。并且每次扫描的时候如果该列 1 的个数超过四个则将该列全部变为 0，这样做的目的是尽可能的去除噪音的影响。处理后的效果如图 4-7 所示。

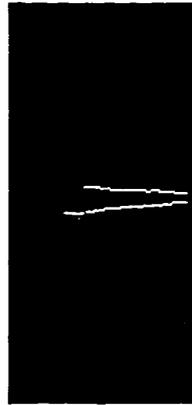


图 4-7 去除伪边缘效果图

下一步就是要提取焊缝中心线，这里两种做法：第一种是分别对以上两条焊缝边沿进行直线拟合，然后求出两个拟合直线的中心线^[36]；另一种做法先取两焊缝中间位置的坐标点，然后再对这些坐标点进行直线拟合。本文采用第二种做法，因为第二种只进行了一次拟合，结果比较准确。其具体做法是根据图像焊缝边缘是单个像素的特点，先逐列对图像进行扫描，求出像素值为 1 的坐标点，一般每列有两个这样的坐标点，然后通过编程使两坐标点中间的位置像素为 1，而原来两坐标点的像素变为 0。从图 4-7 中可以看出只有焊缝末尾少数几列只有一个坐标点像素为 1，所以可以通过编程直接将其去除，处理后的效果图如图 4-8 所示：



图 4-8 提取焊缝中心线效果图

最后对图像进行直线检测，拟合出焊缝中心线。本文用 Hough 变换来检测图像中直线，通过编写 MATLAB 程序来实现，处理后的效果图如图 4-9 所示：



图 4-9 中心线拟合效果图

这样经过这几步成功的提取出了焊缝中心线的位置和方向，为伺服系统能准确的提取图像特征误差信号奠定了坚实的基础。

4. 5 本章小结

本章对预处理后焊缝图像进行进一步处理，经过二值化处理、图像边缘提、直线拟合等步骤最终得到了焊缝中心线在图像中的位置。通过与原图像比较得知，本章的得到的焊缝中心线位置非常准确，达到了预期效果。

第五章 视觉伺服控制系统设计

5.1 视觉伺服系统

机器人视觉伺服系统可分为基于位置的视觉伺服系统、基于图像的视觉伺服系统以及混合视觉伺服系统。基于位置视觉伺服系统的误差信号定义在三维笛卡尔空间，而基于图像的的误差信号定义在二维图像空间。下面重点介绍这几种伺服控制系统。

5.1.1 基于位置的视觉伺服控制系统

此依据所得到的目标图像，通过摄像机的和目标的模型计算出摄像机与目标间的相对位置，从而得到机器人末短的控制误差，其反馈误差定义在机器人工作空间，通过笛卡尔空间控制器控制机械手的运动，形成闭环反馈控制。基于位置的视觉伺服的结构如图 5-1 所示。基于位置的视觉伺服的优点是误差信号和关节控制器的输入信号都是空间位姿，直接在笛卡尔空间控制机器人的运动，实现起来比较容易。设计过程直观，不易产生奇异性。在这种方法中，能否从图像信号中准确提取机器人的位姿信息非常关键，机器人的运动学模型误差和摄像机的标定误差都直接影响系统的控制精度。

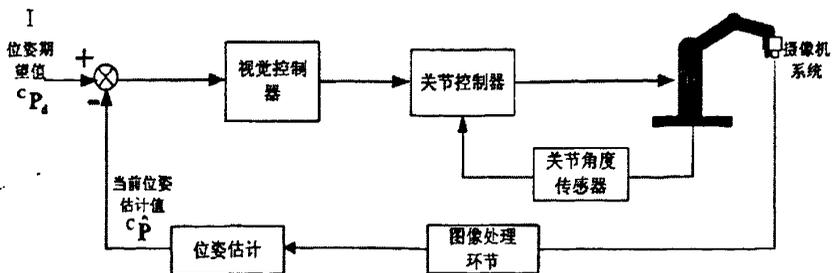


图 5-1 基于位置的视觉伺服系统结构框图

5.1.2 基于图像的视觉伺服控制系统

基于图像的视觉伺服先将采集到的图像进行特征提取，然后与期望的图像特征进行比较，比较产生的偏差直接经过视觉控制器控制机械手运动。该方法不需要三维重建，但需要计算图像雅可比矩阵，该矩阵依赖于视觉系统的内部、外部参数，由于跟踪误差是基于获取图像来连续估计的，因此该方法对标定误差不太敏感。基于图像的视觉伺服的结构如图 5-2 所示。

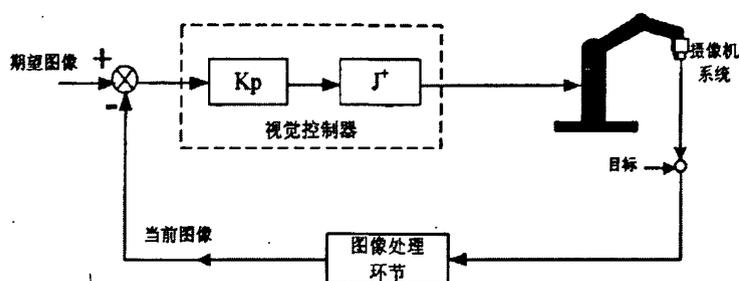


图 5-2 基于图像的视觉伺服系统结构框图

基于图像的视觉伺服的主要优点有：不需要对机器人进行位姿估计；摄像机等标定误差对系统的动态稳定性影响不大^[13]，所以这一特点使之广泛的应用于机器人视觉伺服系统来跟踪图像的平面轨迹^[14]，可在控制在图像平面内的特征点使其沿着直线轨迹运动^[15]。

这种伺服结构还存在以下不足之处^[15]：求解图像的 Jacobian 矩阵要经过机器视觉中最难的一个步骤，即目标深度的估计；整个系统只是局部渐近稳定的；跟踪过程中图像雅可比矩阵可能存在奇异值，使系统不稳定。

5.1.3 混合视觉伺服方法

由于基于位置和基于图像的视觉伺服方法都具有一些难以克服的缺点，近些年来，人们提出了混和视觉伺服方法，其中以 Malis 提出的 2.5D 结构视觉伺服结构最具有代表

性^[16]，其结构图如图 5-3 所示。不依赖于笛卡尔空间模型以及能保证对于标定误差的鲁棒性，并且可以避免直接估计深度信息设计解耦的控制率是这种控制方法的优点。但是这种方法计算量大，因为需要在线实时计算图像间的单应性矩阵并且还要对其分解，并且对噪声敏感。

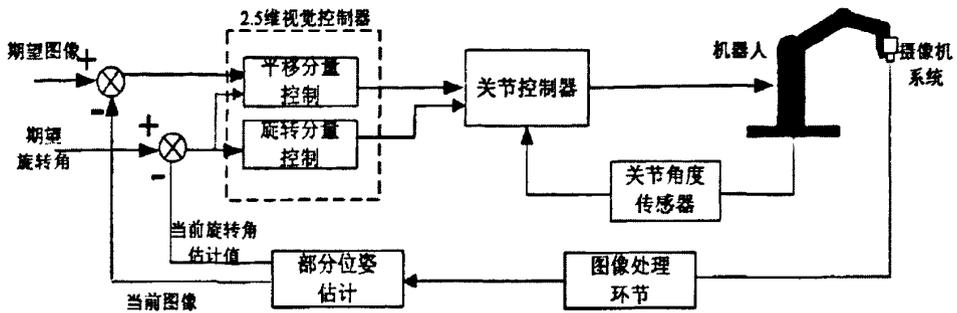


图 5-3 混合视觉伺服结构图

5.1.4 无标定视觉伺服控制系统

传统的基于图像的或基于位置的视觉伺服控制系统都是基于一定的模型，包括工作环境模型、机器人模型、摄像机模型和目标物体模型，其运动控制精度直接受各种模型及其参数的影响，即对标定的精度依赖性很大。但是在实际应用中，这种基于标定的视觉伺服系统受到以下因素的限制^[30]：（1）基于标定的视觉伺服系统控制和系统性能需要的模型条件苛刻，即使是理论上高精度标定算法也很难达到；（2）摄像机的标定区域一般较小，不能适应较大的机器人工作区域；（3）当各种模型的参数发生变化时，系统标定的结果将失效，需要再次标定；（4）有些标定需要在试验条件下有参照物的情况下才能进行标定，在某些特定环境下标定很难进行。（5）只有在进行标定的区域及邻近范围内标定的结果才会有效，一旦离开了标定区域其伺服控制精度将会下降^[27]。这样的缺点使得机器人在工作一段时间后累积的系统误差将变得非常大而影响使用^[28]，甚至可能导致伺服任务的失败^[39]。

无标定视觉伺服，不需要建立各种模型，也不用确定机械手末端与摄像机的关系，直接将采集的图像中的特征误差反馈给机器人控制系统，然后控制机器人进行相应的运动，完成伺服功能。

5. 2 基于图像的视觉伺服控制系统

在机器人视觉伺服控制方法中，使用最多的是基于图像的视觉伺服的方法，因为它不用在三维空间中建立模型，而是直接利用从图像中提取的信息来控制机器人进行相应的运动，具有鲁棒性强和控制精度高的优点。基于图像的伺服控制系统的主要问题是获得机械手位姿变换与图像特征变化量之间的对应关系，也就是求出图像雅克比矩阵^[33]。

5.2.1 坐标系的定义

在求取图像的雅克比矩阵时用到的坐标系有以下几种： $\{W\}$ -世界坐标系（工作环境中的基准坐标系，在机器人控制中一般以机器人的基坐标系作为世界坐标系）； $\{C\}$ -摄像机坐标系（以摄像机中心为原点的坐标系，摄像机光轴作为z轴）； $\{O\}$ -目标坐标系（级联于目标的坐标系）； $\{T\}$ -末端执行器坐标系（定义在机器人手部末端的坐标系）； $\{I\}$ -图像平面坐标系（摄像机内的像平面坐标系统，与摄像机坐标系的xy 平面平行，且两坐标系的x 轴和y轴重合），如图5-4所示^[42]。

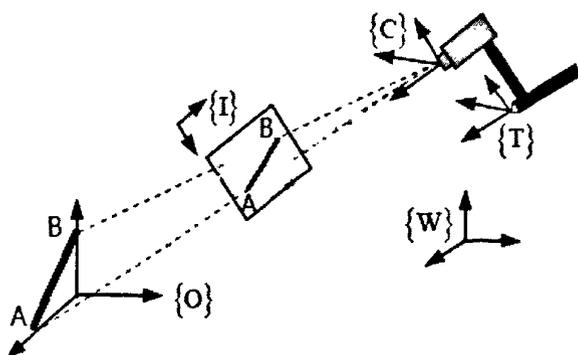


图5-4 坐标系的定义

5.2.2 图像的雅克比矩阵

设焊缝的图像特征向量为 $f=[f_1, f_2 \cdots f_{m-1}, f_m]$ ，机械手相对于世界坐标系的位姿为 $r=[r_1, r_2 \cdots r_{p-1}, r_p]$ ， f 与 r 之间的空间线性变换为 J_1 ，所以有式 $f=J_1 r$ ，则 J_1 就是图像的雅克比矩阵，可以表示为^[29]：

$$J_1 = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial r_1} & \cdots & \frac{\partial f_1}{\partial r_p} \\ \vdots & & \vdots \\ \frac{\partial f_m}{\partial r_1} & \cdots & \frac{\partial f_m}{\partial r_p} \end{bmatrix}$$

另外，设机器人关节角向量为 $q=[q_1, q_2 \cdots q_{n-1}, q_n]$ ， q 与 r 之间的空间线性变换为 J_2 ，

所以有式 $q=J_2 r$ ，则 J_2 就是机器人雅克比矩阵，可以表示为：

$$J_2 = \begin{bmatrix} \frac{\partial r_1}{\partial q_1} & \cdots & \frac{\partial r_1}{\partial q_n} \\ \vdots & & \vdots \\ \frac{\partial r_p}{\partial q_1} & \cdots & \frac{\partial r_p}{\partial q_n} \end{bmatrix}$$

由上可知，机器人关节角速度和图像特征变化率之间也可以建立雅克比关系，

$f=J q$ ， J 可由下式求得^[34]：

$$J = J_1 * J_2 = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial q_1} & \cdots & \frac{\partial f_1}{\partial q_n} \\ \vdots & & \vdots \\ \frac{\partial f_m}{\partial q_1} & \cdots & \frac{\partial f_m}{\partial q_n} \end{bmatrix}$$

其中, J_1 就是图像的雅克比矩阵; J_2 就是机器人雅克比矩阵, J 为复合雅克比矩阵。

5.2.3 视觉控制器

上图 5-2 中显示了基于图像的视觉伺服系统的结构, 其在图像特征空间定义了伺服误差, 误差 e 是期望图像的特征 δ_d 与当前图像的特征 δ 的差值, 见式 (5-1):

$$e = \delta_d - \delta \quad (5-1)$$

由上节可知, 可以用复合雅克比矩阵表示机器人关节角和图像特征变化率之间的关系, 则视觉控制器可见式 (5-2) [41]:

$$\dot{q} = K_p J^+ e \quad (5-2)$$

\dot{q} 为关节角速度, K_p 为选取的比例系数, J^+ 为复合雅克比矩阵的伪逆。通过李雅普诺夫函数 $V = \frac{1}{2} e^T e$ 可知, 此函数是正定的, 并且通过对李雅普诺夫函数求导可得 $\dot{V} \leq 0$, 所以该控制率能够保证在系统在李雅普诺夫意义下的稳定 [35]。

5. 3 神经网络视觉控制器设计

由上节可知, 基于图像图像的视觉伺服系统在伺服过程中要计算图像的雅克比矩阵, 要经过繁琐的运算才能获得雅克比矩阵的解析解。为了避免复杂计算, 可以利用BP神经

网络学习非线性关系的能力将图像特征的变化率和机器人关节角速度之间的关系建立起来，这样就能替代复合雅克比矩阵的计算^[40]。

把期望的图像特征与采集到的图像特征之间的差值当做网络的输入，把期望的关节角与当前的关节角之间的差当做网络的输出。训练样本是通过移动机械手末端的过程中记录各关节角的变化和对应的图像特征的变化来获得的，得到的样本一部分用来训练网络，一部分用来测试网络，然后可以利用训练好的神经网络代替上节中的视觉控制器。

由上一章可知，本系统中提取的图像特征是焊缝中心线的位置，此中心线可以用其上的两个特征点P、Q来描述。P、Q是在图像坐标空间的描述，分别用坐标 (X_p, Y_p) 、 (X_q, Y_q) 来表示，这样就组成了一个四维的向量，所以BP神经网络的输入点为四个，四个输入点表示的是期望图像与当前图像中特征点的坐标差。神经网络的输出为期望的关节角与当前关节角的差值，本系统中选用的工业机器人模型是PUMA560，有六个关节角（自由度），所以神经网络的输出点数为6个，隐含层的点数取30个。

神经网络训练样本是通过仿真数据来获得的，具体过程为在MATLAB软件simulink环境下，利用Robot toolbox，搭建利用图像雅克比矩阵来计算特征点的变化和关节角变化之间关系的视觉伺服系统，并且将此伺服系统中期望图像特征与当前图像特征的差值和关节角的变化值输出，分别作为神经网络的输入和输出来作为神经网络的训练样本和测试样本^[37]。

神经网络是通过 MATLAB 软件中的 Neural net 工具箱来建立的，利用上面获得的数据训练 BP 神经网络就能获得基于神经网络的控制器，网络的训练结果如图 5-5 所示：由图可知，再经过644次训练后训练误差达到 10^{-5} ，满足精度要求。

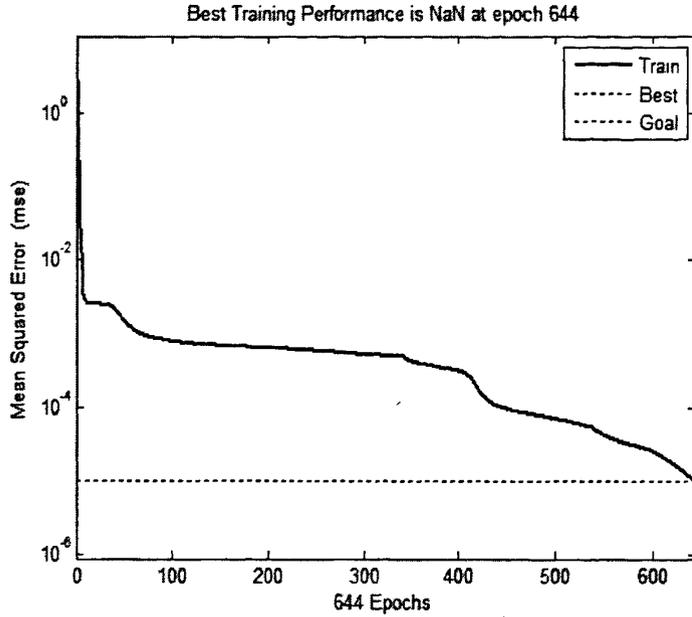


图 5-5 神经网络训练结果

然后将测试样本输入 BP 神经网络，并将其与基于雅克比矩阵的视觉伺服控制器进行比较，比较图如图 5-6 所示：

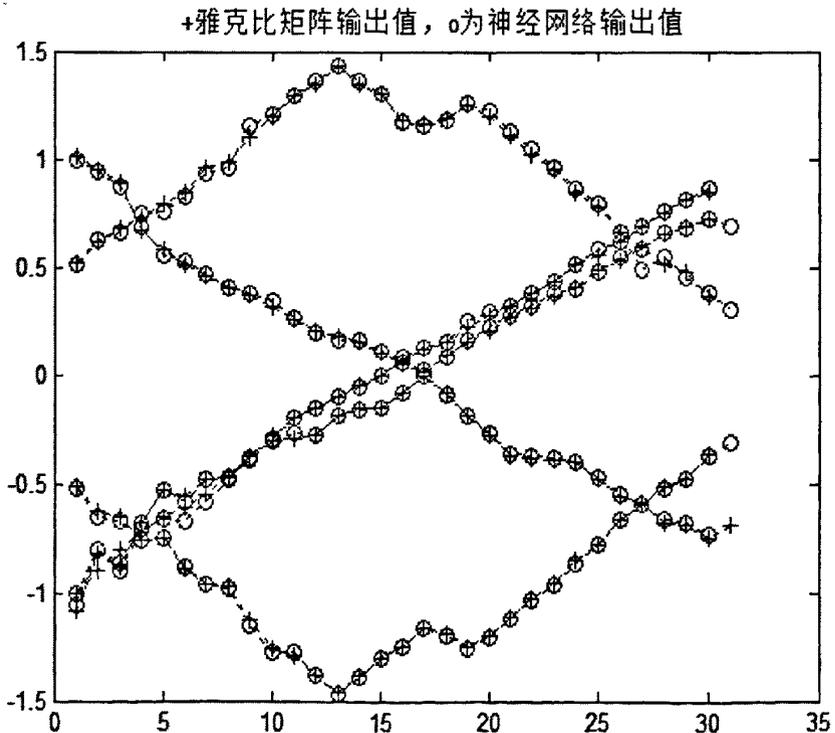


图 5-6 神经网络与雅克比矩阵的对比图

从图 5-6 可以看出利用神经网络可以代替图像雅克比矩阵的复杂运算，利用此神经网络控制器可以简化伺服系统的结构，提升运算速度。

5.4 本章小结

本章首先介绍了三种视觉伺服控制系统：基于图像的视觉伺服控制系统、基于位置的视觉伺服控制系统和混合视觉伺服控制系统，然后提出了无标定视觉伺服的概念及其优越性，然后分别分析了基于雅克比矩阵与神经网络的图像视觉伺服，通过仿真比较可知神经网络能替代复杂的雅克比矩阵完成伺服任务，简化了系统的同时提高了运算速度。

结论

伴随着中国制造业的产业升级以及劳动力的短缺，工业机器人的应用越来越广泛，尤其是焊接机器人被广泛的应用于各个领域，但是现有的焊接机器人技术不能适应复杂结构的工件，因为现在大部分焊接机器人都按照事先编好的程序进行焊接，但在焊接过程中工件的变形以及工件安装误差等因素会使焊枪偏离焊缝路径，所以迫切需要提高焊接机器人的智能化水平，即按照具体的操作环境实时对机器人进行控制。将机器视觉技术引入焊接机器人刚好能解决这一难题，所以本文将视觉伺服控制系统应用于焊接机器人以提高它的智能化水平。本文的具体工作如下：

- (1) 讲述了工业机器人的运动学原理以及轨迹规划方法。
- (2) 针对 CCD 摄像头获得的焊缝图像，本文提出了一系列图像处理技术，实现了对焊缝中心线的提取。
- (3) 设计了基于神经网络的视觉伺服系统，并用 MATLAB 软件进行仿真，达到了预期的效果。

下面还需要进一步完善的工作有：

- (1) 对算法或硬件结构进行进一步优化，以提高视觉伺服控制系统的运算速度。
- (2) 优化神经网络的结构，进一步提高神经网络控制器的控制精度。

致谢

本文是在导师杨坤怡副教授的悉心指教下完成的，杨老师严谨的治学态度、认真负责的作风使我受益匪浅！从论文研究内容的选择、具体的研究步骤到文章的撰写、初稿的选择都渗透着杨老师的心血！读研期间多亏杨老师在生活和学习上的帮助，我才能顺利完成学业，值此论文完成之际，首先向杨坤怡导师表示深深的敬意和衷心的感谢！

感谢杜海若副教授、叶贤东副教授在学术和生活上的帮助，感谢他们对本论文撰写过程中的大力帮助和支持！

感谢和我一起生活和学习的同学们，他们在论文的撰写过程中给予我极大地帮助和鼓励。

最后感谢我的所有家人，他们在我写论文的过程中给予了我极大地帮助！

攻读硕士学位期间发表的学术论文

唐家凯, 杨坤怡, 杜海若, 基于 PLC 的轨道车换向安全控制系统设计, 铁路计算机应用,

2011.10

参考文献

- [1] Wesley E. Snyder Hairong Qi, Machine Vision, China Mashion Press,2005.9
- [2] 马颂德,计算机视觉——计算原理与算法基础.北京:北京科学技术出版社,1998,1-10
- [3] Carsten Steger, Markus Ulrich,Christian Wiedemann,机器视觉算法与应用,清华大学出版社,2008.11
- [4] 黄石生,毛鹏军,薛家祥等.基于焊缝视觉跟踪的图像阈值化研究[J].电焊机,2001,31(8):20~22
- [5] 杨淑莹,边奠英,VC++图像处理程序设计,清华大学出版社,北方交通大学出版社,2003.11
- [6] 飞思科技研发中心, MATLAB 6.5 辅助图像处理,电子工业出版社,2003.1
- [7] 吕学勤,张轲,吴毅雄.焊缝自动跟踪的发展现状与展望.机械工程学报.2003.12.
- [8] 熊有伦,丁汉机器人动力学性能指标及其优化[J]机械工程学报,1989
- [9] 陈善本,林尚扬,李成桐,焊接机器人及其应用.北京:机械工业出版社,2000
- [10] 王麟琨,徐德,谭民,机器人视觉伺服研究进展.机器人.2004.05
- [11] Malis E, Chaumette F. Multi-cameras visual servoing[A]. Pro-ceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Au-tomation[C]. San Francisco, CA, USA: 2000. 3183-3188.
- [12] Dixon W E, Zergeroglu E, Fang Y. Object tracking by a robot ma-nipulator: a robust cooperative visual servoing approach[A]. Pro-ceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Au-tomation[C]. Washington, DC, USA: 2002. 211-216.
- [13] G. Chesi, K. Hashimoto. Effects of camera calibration errors on static-eye and hand-eye
-

- visual servoing. *Advanced Robotics*, 2003,17(10):1023-1039
- [14] M. Youcef, F. Chaumette. Path planning for robust image-based control. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 2002,18(4):534-549
- [15] F. Chaumette. Potential problems of stability and convergence in image-based and position-based visual servoing. *The Confluence of Vision and Control*.
- [16] F. Chaumette, E. Malis. 2 1/2 D visual servoing: A possible solution to improve image-based and position based visual servoings. *IEEE international conference on Robotics and Automation*, 2000:630-635
- [17] 郭洪红, 工业机器人技术, 西安电子科技大学出版社, 2006, 68-79
- [18] 负超, 机器人学导论, 机械工业出版社, 2005, 14-57
- [19] 吴振彪, 王正家, 业机器人, 华中科技大学出版社, 2006 年 2 月第二版, 22-47
- [20] 陈善本, 吴林. 我国机器人焊接技术研究与应用概况. 第八次全国焊接会议论文集(第一册), 北京, 1997
- [21] 殷际英, 何广平. 关节型机器人[M]. 北京: 化学工业出版社, 2003.
- [22] 徐凯. 防人机器人步态规划算法及其实现研究[D]. 北京: 清华大学, 2004, 20~35
- [23] Avis H. Cohen and Mitral Hartmann. Toward Biomorphie Control Using Custom a VLSI CPG Chips, 2000.
- [24] Jae Mu Yun, Jang Myung Lee. Time Optimal Trajectory Planning for a Robot System Under Torque and Impulse Constraints. *Industrial Electronics*. 2004,1(2): 259~26
- [25] Rong-Jong Wai, Kuan-Yun Hsieh. Tracking Control Design for Robot Manipulator Via Fuzzy Neural Network. *Robotics and Automation*. 2002,2(2):1422~142
-

- [26] 王伟, 邹奇仕, 朱六妹, 宋国军. 视觉传感焊缝跟踪技术的发展状况及实施方案探讨. 电焊机. 2002.5
- [27] 莘菁, 机器人无标定视觉伺服控制系统研究, 西安理工大学, 2007.10
- [28] 潘且鲁, 苏剑波, 席裕庚基于神经网络的机器人手眼无标定平面视觉跟踪, 自动化学报, 2007, 27(2):194-199
- [29] 徐国英, 陈平, 罗晶, 基于图像的机器人视觉伺服系统, 机器人技术, 2007.09
- [30] 陈华东, 无标定机器人视觉运动模仿研究, 博士论文, 上海同济大学, 2007
- [31] 向立志, 史运涛, 高东杰基于支持向量机辨识模型的非线性预测控制控制与决策, 2007, 22 (5), 549~553
- [32] Hsu C M, Chen M S. Subspace Clustering of High Dimensional Spatial Data with Noises[A]. Advances in Knowledge Discovery and Data Mining: 8th Pacific Asia Conference on Knowledge Discovery in Data Mining[C]. Heidelberg: Springer, 2006: 312-40.
- [33] Hill J, Park W T. Realtime control of a robot with a mobile camera. Proc 9th International Symposium on Industrial Robots[C]. 1979, 233-246.
- [34] 宗晓萍, 基于图像的PUMA560机器人视觉伺服系统仿真, 机床与液压, 35 (10), 2007.10
- [35] 谢冬梅, 曲道奎, 徐方, 基于神经网络的机器人视觉伺服控制, 微计算机信息, 2006.04
- [36] 孙慰, 基于CCD视觉传感的焊缝跟踪技术的研究, 上海交通大学, 硕士论文, 2008.02
- [37] 薛艳敏, 刘宏昭, 基于BP神经网络的机器人视觉控制方法, 西安理工大学学报, 2009.02
- [38] 李牧, 机器人无标定视觉伺服关键技术的研究, 工学博士学位论文, 哈尔滨工业大

学, 2008.9

[39] 苏剑波, 席裕庚机器人视觉系统非标定的平面运动跟踪口系统工程与电子技术, 1999, 21(6), 51~53

[40] oscar Nasisi, Ricardo Careili.Adaptive servo visual robot control .Robotics and Autonomous.43, 2003; 51~78

[41] 谢冬梅, 曲道奎, 徐方, 基于神经网络的机器人视觉伺服控制, 2006.02

[42] 钟金明, 徐刚, 张海波, 基于图像的机器人视觉伺服系统仿真, 机床与液压, 2005.06