

分类号\_\_\_\_\_

密级\_\_\_\_\_

UDC \_\_\_\_\_

编号\_\_\_\_\_

# 中国科学院研究生院 博士学位论文

基于工业焊接机器人的视觉伺服控制研究

王麟琨

指导教师 谭民 研究员 中国科学院自动化研究所

徐德 副研究员 中国科学院自动化研究所

申请学位级别 博士 学科专业名称 控制理论与控制工程

论文提交日期 2005. 4. 30 论文答辩日期 \_\_\_\_\_

培 养 单 位 中国科学院自动化研究所

学位授予单位 中国科学院研究生院

答辩委员会主席 \_\_\_\_\_

## 摘 要

焊接机器人是在工业机器人基础上发展起来的先进焊接设备,能够提高焊接质量和生产率,改善工人劳动条件。目前,以示教-再现工作方式为主的焊接机器人缺乏灵活性,也不适用于复杂工件,无法满足工业生产的需要。因此,研制基于视觉传感器并具有焊缝自动跟踪能力的焊接机器人具有广阔的应用前景和重要研究意义,本文针对焊接机器人视觉控制系统的设计和视觉伺服控制算法开展了研究工作。

第一,本文首先总结了机器人视觉伺服控制的结构和主要研究内容,比较了几种主要的视觉伺服方法,分析了视觉伺服控制所面临的主要问题,详细阐述了近期提出的一些解决方法。其次,回顾了焊接机器人的发展过程以及当前的研究热点并对今后的发展趋势进行了展望。

第二,设计了焊接机器人的视觉传感器系统,提出了有效的结构光参数标定算法。针对六自由度工业机器人,提出一种多层次结构的控制框架,并在此框架基础上设计并开发了弧焊机器人控制系统和多机器人视觉控制系统。

第三,提出了强噪声干扰环境下焊缝图像特征抽取算法和焊缝参数估计算法。图像特征抽取算法由目标区域确定算法、基于自适应阈值的去噪算法以及基于数据集分割的特征抽取算法组成。焊缝参数估计算法由直线焊缝方向的鲁棒拟合算法、基于 RANSAC 方法的焊件法线估计算法以及局部加权的曲线焊缝方向拟合算法组成。

第四,针对六自由度焊接机器人跟踪直线焊缝过程中存在的问题,本文提出了一种初始姿态自调整算法和混合的视觉伺服控制算法。初始姿态自调整算法通过建立目标坐标系和当前工具坐标系,计算需要调整的运动量。混合的视觉伺服控制算法采用基于位置的视觉伺服控制使焊枪沿焊缝方向运动,采用基于图像的视觉伺服控制来消除图像偏差。

第五,提出了曲线焊缝跟踪的视觉伺服协调控制方法,设计了一种控制量论域动态确定的双层模糊视觉伺服控制器,在保证焊枪运动准确的同时,保证视觉跟踪过程中图像特征处在视场有效范围内。为了准确确定控制量论域,建立了特征点的数学模型,并在此基础上设计了带模型动态补偿的 Kalman 滤波器以实现特征坐标的准确预测。

第六,针对工业焊接小车执行折线焊缝视觉跟踪所面临的主要问题,

本文提出了自适应视觉伺服控制结构，以提高跟踪精度和鲁棒性。这种自适应结构在线检测焊缝方向，并能够在焊缝方向发生变化时对控制参数进行相应的调整。为了实现该控制结构，建立了视觉特征的控制模型，设计了错误数据的检测算法、焊缝方向变化检测算法、参考像素坐标调整算法及混合结构的视觉伺服控制算法。

最后，本文对所取得的研究成果进行了总结，并指出需继续开展的工作。

**关键词：**焊接机器人，视觉传感器，机器人视觉控制系统，视觉伺服控制，参数估计，特征提取

## ABSTRACT

Welding robots are advanced welding devices and developed based on industrial robots. They can be applied to enhance quality and productivity of welding and improve working condition for worker. Teaching is the main work mode of welding robots, but it is unfitted for complicated workpieces. So research on automatic welding robots based on vision sensor has widely potential applications and study significance. In this dissertation research work is focused on designing visual control systems of robots and visual servoing control algorithms.

Firstly, structures of robot visual servoing control are summarized and several visual servoing methods are compared. Some methods to solve main problems for visual servoing control are discussed in detail. Then, the study status of welding robots is reviewed and tendency of welding robots is predicated.

Secondly, a vision sensor system is designed and algorithms are proposed to calibrate parameters of the vision sensor system. A control framework with multi-layers structures for industrial robots is given. Vision control systems for arc welding robots and multi-robots are designed and developed based on the framework.

Thirdly, a feature extraction algorithm and parameter estimation algorithms for welding seams are proposed. The feature extraction algorithm consists of getting target area, deleting noise with adaptive thresholds and feature extraction based on separating data sets. Parameters estimation algorithms consist of robust fitting method for weld seams shaped line, estimating normal line based on RANSAC and fitting direction of weld seams shaped curve with locally weighted values.

Fourthly, an algorithm to get appropriate initial pose and a hybrid visual servoing control method are proposed to track weld seams shaped line. A target coordinate framework and a tool coordinate framework must be established in the algorithm, then motion values are computed according to the two coordinate frameworks. The hybrid visual servoing control method divides the motion control for welding robots into two parts: motion along

direction of weld seams controlled by visual servoing control based on pose and motion to delete image error controlled by visual servoing control based on image.

Fifthly, a harmonious visual servoing control method is proposed to track weld seams shaped curve. A fuzzy visual servoing controller with two layer structures whose limits of control output are computed dynamically is designed to make torch at proper position and keep image features in permitted range of vision fields during tracking. In order to get exact limits of control output, a math model depicting relation of motion and features is established and then a Kalman filter with compensation for model uncertainty is designed to predict status of features.

Sixthly, an adaptive structure of visual servoing control is proposed to improve tracking precision and robustness during a industrial welding vehicle tracking weld seams shaped zigzag line. The adaptive structure can detect real-time variance of direction of weld seams and then adjust control parameters. In order to achieve the adaptive structure, a control model is established and measurement method is designed for data with coast error, then a detection method for direction of welds seams and an adjusting algorithm for reference pixel are proposed.

Finally, the obtained research results are summarized and future work is addressed.

**Key words:** Welding Robot, Vision Sensor, Robot Visual Control System, Robot Visual Servoing Control, Parameter Estimation, Feature Extraction.

## 独创性声明

本人声明所提交的论文是我个人在导师指导下进行的研究工作及取得的科研成果。尽我所知，除了文中特别加以标注和致谢的地方外，论文中不包含其他人已经发表或撰写过的研究成果。与我一同工作的同志对本研究所做的任何贡献均已在论文中作了明确地说明并表示了谢意。

签名： 王麟 日期： 2005.4.30

## 关于论文使用授权的说明

本人完全了解中国科学院自动化研究所有关保留、使用学位论文的规定，即：中国科学院自动化研究所有权保留送交论文的复印件，允许论文被查阅和借阅；可以公布论文的全部或部分内容，可以采用影印、缩印或其他复制手段保存论文。

签名： 王麟 导师签名： 梁民 日期： 2005.4.30

## 第一章 绪 论

焊接机器人是在工业机器人基础上发展起来的先进焊接设备，是从事焊接(包括切割与喷涂)的工业机器人。其主要优点在于稳定性高，能够提高焊接质量和生产率，改善工人劳动条件等<sup>[1]</sup>。目前，焊接机器人的工作方式以示教-再现为主，这种方式缺乏灵活性，不适用于复杂工件。而工业生产正向着更高柔性的方向发展，要求焊接机器人具有一定的通用性和灵活性，提高焊接机器人的智能将是今后发展的方向<sup>[2]</sup>。焊缝自动跟踪是提高焊接机器人智能程度以及通用性的前提，也是当前所面临的主要问题之一。由于视觉传感器具有获取信息量大，非接触测量等优点，所以视觉传感器在焊缝检测中具有广泛的应用前景。目前，国际上已有视觉传感器在焊缝检测领域成功应用的实例。除传感器之外，基于视觉引导的焊接机器人所面临的主要问题是机器人的视觉伺服控制问题。

### 1.1 机器人视觉伺服研究进展

随着科学技术的发展以及机器人应用领域的扩大，人们对机器人技术提出了更高的要求，希望机器人具有更高的智能和更强的适应环境的能力，能够在一些人所不能或不方便涉足的环境下完成复杂的任务。这就要求机器人具有充分感知环境的能力，机器人视觉伺服研究正是为了满足这一要求而展开的。

机器人视觉伺服系统由视觉传感系统向机器人的控制环节提供外部信息，调整机器人的位置和姿态。机器人视觉伺服最早出现于20世纪80年代，在90年代中后期发展迅速。一方面是因为机器人应用领域的不断扩大，另一方面是因为计算机硬件技术的突飞猛进，极大的提高了图像处理的速度，大幅度降低了专用图像处理设备的费用。视觉伺服控制相对传统的机器人关节控制具有比较明显的特点：可以获取更多外部环境信息，具有更高的灵活性，对机器人标定误差和摄像机标定误差具有强的鲁棒性。机器人视觉伺服控制是机器人研究领域

中的热点之一，在工业生产、海洋探测、军事技术等众多领域有广阔的应用前景。

### 1.1.1 机器人视觉伺服研究的主要内容

机器人视觉伺服研究涉及到图像处理、机器视觉、控制理论、运动学、动力学等多个领域，其中机器视觉和图像处理是制约机器人视觉伺服研究发展的关键因素。机器人视觉伺服研究的主要内容可以归纳如下：视觉伺服系统结构，快速有效的图像处理算法，以及视觉伺服控制器的设计等几个主要方面。

#### 1.1.1.1 机器人视觉伺服系统的结构

##### A 视觉伺服系统的分类：

按照系统结构，根据不同的标准，机器人视觉伺服系统可以被划分为不同的类型。根据摄像机数目的不同，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。单目视觉无法直接得到目标的三维信息，一般通过移动获得深度信息。单目视觉适用于工作任务比较简单且不太要求深度信息的工作环境。多目视觉伺服可以观察到目标的不同部分，可以得到更为丰富的信息，但视觉控制器的设计比较复杂，相对于双目视觉伺服更加难以保证系统的稳定性<sup>[3]</sup>。目前视觉伺服系统采用较多的是双目视觉。

根据摄像机放置位置的不同，可以分为手眼系统和固定摄像机系统。手眼系统的摄像机放置在机器人的末端，同机器人一起运动。固定摄像机系统的摄像机放置在环境中某一固定位置。手眼系统能得到目标的精确位置，可以实现精确控制，但只能得到小的工作空间场景，而且有些手眼系统只能观察到目标而无法观察到机器人末端。因此，需要通过已知的机器人运动学模型来求解目标与机器人末端的位置关系，对标定误差以及运动学误差比较灵敏。固定放置的摄像机既可以观察到目标也可以观察到机器人末端，并且可以得到大的工作空间场景，能得到机器人末端相对于目标的相对速度，但很难得到目标的准确信息，且机器人关节运动可能造成目标图像的遮挡。为了克服两种方式的不足，可以采用两种方式的协作使用，如文献[4][5]。

根据视觉控制器作用的不同，可以将视觉伺服分为 *look-and-move* 系统和直接视觉伺服系统。*look-and-move* 系统的视觉控制器向关节控制器提供目标点位置，而直接视觉伺服系统提供关节控制量。目前，实际应用的视觉伺服系统多数是基于 *look-and-move* 的系统，这主要是因为图像采集速度和关节控制采样速度的差别较大，以及 *look-and-move* 系统的视觉控制器设计更加简单。

根据误差信号定义的不同，还可以将视觉伺服分为基于位置 (IBVS) 的视觉伺服、基于图像 (PBVS) 的视觉伺服和混合视觉伺服。基于位置的视觉伺服是根据得到的图像特征，由目标的几何模型和摄像机模型估计目标相对于摄像机的位置，得到当前机器人末端位姿和估计的目标位姿的误差，通过视觉控制器进行调节；基于图像的视觉伺服将二维空间的图像误差作为视觉控制器的输入信号，产生相应的控制信号。

**B 基于位置与基于图像的视觉伺服方法：**

基于位置的视觉伺服需要通过图像进行三维重构，在三维笛卡儿空间计算误差，这种方法的优点在于误差信号和关节控制器的输入信号都为空间位姿，实现起来容易。但由于根据图像估计目标的空间位姿，没有对图像进行控制，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。基于位置的视觉伺服的结构如图 1-1 所示。

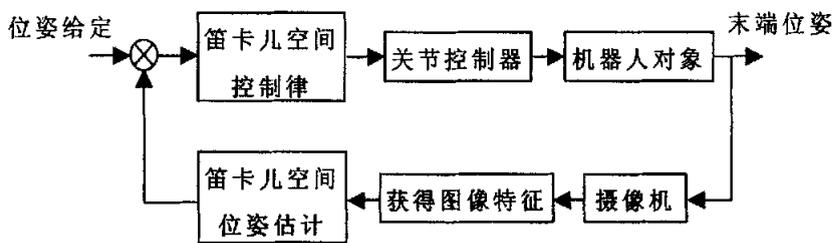


图 1-1 基于位置的视觉伺服结构框图

基于图像的视觉伺服直接在二维图像空间计算误差，不需要三维重建，但一般需要计算图像 Jacobian 矩阵。基于图像的视觉伺服的结构如图 1-2 所示。基于图像视觉伺服的优点是对标定误差和空间模型误差不敏感，缺点是设计控制器困难，伺服过程中容易进入图像

Jacobian 矩阵的奇异点，一般需要估计目标的深度信息，而且只在目标位置附近的邻域范围内收敛且稳定性分析比较困难。求解图像 Jacobian 矩阵是基于图像视觉伺服的一个主要任务，数学描述如下：

$$\dot{f} = J(f, r)\dot{r} \quad (1-1)$$

$f$  为特征的图像坐标， $J$  为图像 Jacobian 矩阵， $r$  为机器人末端坐标。

求解图像 Jacobian 矩阵主要有三种方法：直接估计方法、深度估计方法、常数近似方法。直接估计的方法不考虑图像 Jacobian 的解析形式，在摄像机运动过程中直接得到数值解。典型的直接估计方法是采用神经网络和模糊逻辑逼近的方法<sup>[6][7]</sup>。深度估计的方法需要求出图像 Jacobian 矩阵的解析式，在每一个控制周期估计深度值，代入解析式求值。这种方法实时在线调整 Jacobian 矩阵的值，精度高，但计算量较大。常数近似方法是简化的方法，图像 Jacobian 矩阵的值在整个视觉伺服过程中保持不变，通常取理想图像特征下的图像 Jacobian 矩阵的值。常数近似的方法只能保证在目标位置的一个小邻域内收敛。直接估计的方法和常数近似的方法更容易使目标离开视场。

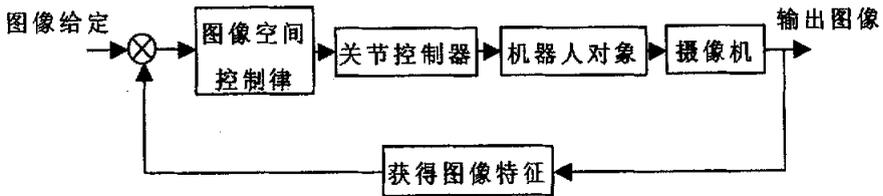


图 1-2 基于图像的视觉伺服结构框图

### C 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有一些难以克服的缺点，有人提出了基于位置和基于图像的混和视觉伺服方法。混合视觉伺服的主要思想是采用图像伺服控制一部分自由度，余下的自由度采用其他技术控制，不需要计算图像 Jacobian 矩阵。混合视觉伺服以 Malis 提出的 2.5D 视觉伺服方法最具有代表性<sup>[8]</sup>，2.5D 视觉伺服的结构图如图 1-3 所示：

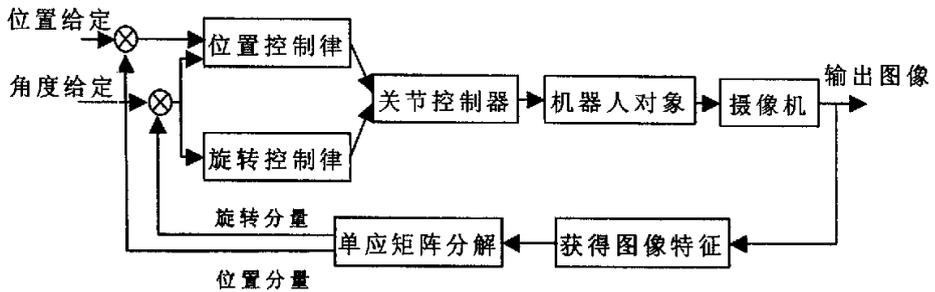


图 1-3 2.5D 视觉伺服的结构框图

2.5D 的视觉伺服方法，是在已知摄像机内参数的前提下，计算当前图像特征与理想图像特征的单应矩阵  $H$  (homography matrix)。在 epipolar 几何中，单应矩阵  $H$  满足如下关系：

$$\tilde{f} = H\tilde{f}^* \quad (1-2)$$

其中  $\tilde{f}$  为当前图像特征  $f$  的齐次坐标， $\tilde{f}^*$  为理想图像特征的齐次坐标。将单应矩阵  $H$  分解为旋转部分和平移部分，对应摄像机的旋转控制和位移控制，它的误差信号  $e$  定义为：

$$e = [u - u^*, v - v^*, \log(z/z^*), \theta \omega^T] \quad (1-3)$$

其中  $u, v$  为特征的当前图像坐标， $u^*, v^*$  为特征的理想图像坐标， $\theta$  和  $\omega^T$  为根据分解的旋转矩阵得到的旋转角和旋转轴， $z$  和  $z^*$  为当前深度和理想深度信息。这样就实现了在图像空间控制平移运动，在笛卡儿空间实现转动控制。除了这种方法，Deguch<sup>[9]</sup>和 Morel<sup>[10]</sup>也提出了混合视觉伺服方法，思想与 2.5D 方法是一致的，只是在单应矩阵分解上采用不同的方法。混合的视觉伺服方法继承了基于位置和基于图像视觉伺服的优点，保证了对于标定误差的鲁棒性以及不依赖于笛卡儿空间模型的特点，避免了直接估计深度信息，设计解耦的控制律，可以达到全局稳定。这种方法虽然避免了直接计算图像 Jacobian 矩阵，但需要在线实时计算图像间的单应矩阵以及对其进行分解，计算复杂、计算量大。在计算单应矩阵时，为了减少计算量，常采用线性最小二乘估计的方法，对图像噪声敏感。

另外，鉴于图像视觉伺服失败与  $Z$  轴的运动有密切的关系，Corke 和 Hutchinson 提出了新颖的基于图像伺服的分解方法<sup>[11]</sup>，只将末端  $Z$

轴的运动，包括旋转与平移运动，与其他轴的运动分离。数学描述如下：

$$\dot{f} = J_{xy}\dot{r}_{xy} + J_z\dot{r}_z \quad (1-4)$$

其中  $f$  为特征点的图像坐标， $J_{xy}$  为图像 Jacobian 矩阵的 1、2、4、5 列， $J_z$  为 Jacobian 矩阵的 3、6 列， $r_{xy}$  为  $x$ 、 $y$  轴的运动速度， $r_z$  为  $z$  轴的运动速度。 $z$  轴速度专门由两个特征计算，角度特征和区域面积特征。这种方法的优点在于既加强了对  $z$  轴运动的控制又避免了复杂的计算。不足之处在于当摄像机光轴不垂直目标平面以及当目标偏离光轴过大时，误差较大。

#### D 无标定视觉伺服

机器人的无标定视觉伺服是指机器人运动学以及摄像机内外参数都不需标定的视觉伺服。目前已提出的无标定视觉伺服方法可以概括为：基于估计的无标定视觉伺服；基于极线约束方法（Epipolar Geometry）的弱标定视觉伺服。

对于一般的基于估计的无标定视觉伺服方法，一种主要的思想是直接或间接估计图像 Jacobian 矩阵。它的系统方框图如图 1-4 所示。

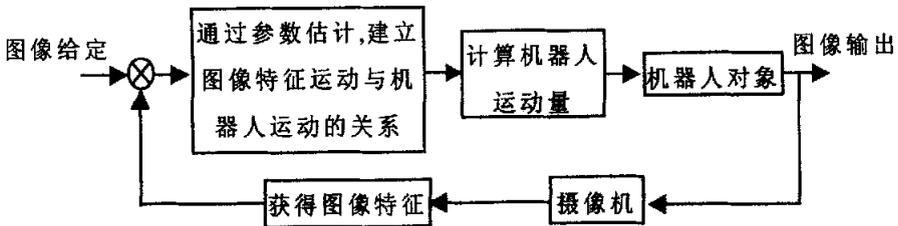


图 1-4 基于估计的无标定视觉伺服的典型框图

Jenelle 等<sup>[12]</sup>提出了基于拟牛顿优化方法的动态 Jacobian 估计，不需要机器人和摄像机的标定，可以跟踪动态目标。在文献[12]中提出了如下的迭代算法：

$$\hat{J}(k+1) = \hat{J}(k) + \frac{(\Delta f(k) - \hat{J}(k)h_\theta(k))h_\theta(k)^T}{h_\theta(k)^T h_\theta(k)} \quad (1-5)$$

其中  $\hat{J}(k)$  为估计的图像 Jacobian 矩阵； $\Delta f(k)$  为图像特征差值； $h_\theta(k) = \theta_k - \theta_{k-1}$ ，为关节差值。

$$\theta_{k+1} = \theta_k - (J_k^T J_k)^{-1} J_k^T f_k \quad (1-6)$$

此外 Kanako<sup>[13]</sup>提出了基于单纯形优化的无标定视觉伺服方法，Flandin<sup>[14]</sup> [15]等提出的基于模糊方法和神经网络方法建立关节运动与图像特征之间联系的方法。但这些方法均受限于特定的视觉伺服任务，不具备通用性。

基于估计的视觉伺服方法是对无标定视觉伺服方法的有益探索，是系统辨识思想在解决视觉伺服问题的体现。但这种方法还存在许多不完善的问题，例如：初始值对估计性能的影响较大，如何选择估计的初始值，以及如何提高收敛速度。此外基于估计的视觉伺服方法往往只是分析了估计算法的稳定性以及收敛性，没有分析整个视觉伺服系统的稳定性以及收敛性。

基于极线约束方法的弱标定视觉伺服的典型例子就是 Malis 提出的 2.5D 视觉伺服方法。极线约束方法已经被用于多视几何中的三维重建，其基本的关系如图 1-5 所示。

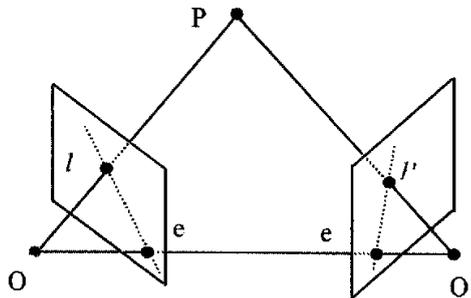


图 1-5 基于几何方法的弱标定视觉伺服原理图

图 1-5 中，P 为一空间点，O 与 O' 为摄像机中心点，e 与 e' 为极点，l 与 l' 为极线。有如下关系式成立：

$$x' F x = 0, \quad (1-7)$$

$$x' = H x, \quad (1-8)$$

$$F = e \times H \quad (1-9)$$

其中  $x'$ 、 $x$  为不同图像中的对应图像特征的齐次坐标,  $F$ (Fundamental matrix)为基本矩阵,  $H$  为单应矩阵 (homography matrix),  $e$  为极点 (epipole)。Malis 将极线几何引入视觉伺服, 利用单应矩阵  $H$  的分解将单应性矩阵  $H$  分解为旋转部分和平移部分, 对应摄像机的旋转控制和位移控制, 这样就实现了在图像空间控制平移运动, 在笛卡儿空间实现转动控制。这种方法的主要不足之处在于计算比较复杂, 需要估计基本矩阵和进行矩阵的分解算法。并且这种方法对图像噪声比较敏感。

混合视觉伺服需要对图像进行弱标定, 以得到摄像机的内参数, 不是严格意义下的无标定的视觉伺服方法。在基于极线约束的弱标定视觉伺服方法的基础上, 又发展了基于不变点的无标定视觉伺服。这种方法的主要思想如下<sup>[16]</sup>:

$$p = km \quad (1-10)$$

$p$  为图像特征的像素坐标,  $m$  为图像特征在摄像机平面的坐标,  $k$  为摄像机内参数

$$S_p = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n p_i p_i^T \quad (1-11)$$

$n$  为图像特征数

$$S_m = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n m_i m_i^T \quad (1-12)$$

得出

$$S_p = k S_m k^T \quad (1-13)$$

可以对正定矩阵  $S_p$  和  $S_m$  进行分解:

$$S_p = T_p T_p^T \quad (1-14)$$

$$S_m = T_m T_m^T \quad (1-15)$$

则有

$$T_p = k T_m \quad (1-16)$$

对于任一个图像特征的像素点  $p$  的不变点  $q$  为:

$$q = T_p^{-1} p = T_m^{-1} k^{-1} k m = T_m^{-1} m \quad (1-17)$$

通过求图像特征像素坐标的不变点, 不通过标定建立了图像像素坐标与图像平面坐标的对应关系, 结合混合视觉伺服方法建立了基于

几何方法的无标定视觉伺服方法。

对于无标定的视觉伺服，相比标定的视觉伺服方法面临更严重的鲁棒性问题：基于估计的无标定的视觉伺服方法需要从包含噪声的图像数据估计参数或重建图像空间到关节空间的关系矩阵；基于几何的视觉伺服方法一般也需要估计基本矩阵（Fundamental Matrix）以及进行矩阵的分解。这种基于在线估计的问题必然面临更多的噪声干扰问题。当前无论是基于估计的无标定视觉伺服还是针对几何方法的无标定及弱标定视觉伺服方法，在如何保证整个视觉伺服系统的稳定性方面考虑的较少，主要集中于无标定视觉伺服的实现方法上。总的来讲，当前机器人的无标定视觉伺服研究已经取得了一定进展，但还处于探索阶段，所取得的研究成果大多通过实验与仿真验证，在实际中的应用较少。

### 1.1.1.2 特征选择

高效、快速的图像处理算法是实施视觉伺服的前提，对于视觉伺服系统，图像处理过程可以概括为：目标检测、图像与目标的匹配，对于运动目标跟踪的视觉伺服系统还应包括目标运动的估计。目前视觉伺服中的图像处理主要集中在目标识别和图像特征的选择，本节主要讨论图像特征选择的研究进展。不合适的特征选择可能使特征离开视场，或者不能提供充分的目标信息而导致视觉伺服的失败。所以图像特征的选择对于视觉伺服系统的性能具有重要的影响，甚至可以直接影响到系统的稳定性。图像特征的选择应具有一些基本的原则：识别容易，对目标的位置灵敏，可控。图像特征的数量对系统性能也具有重要的影响，它的最小值应使视觉伺服系统建立起由二维图像空间到三维笛卡儿空间的映射关系，例如建立图像 Jacobian 矩阵。合适的增加图像特征，即冗余特征，可以增加视觉伺服系统性能的灵敏度，可以构成满秩的图像 Jacobian 矩阵。但图像特征的数量也不宜过多，否则会造成图像处理的负担过重<sup>[17]</sup>。视觉伺服研究所用到的图像特征大多采用简单的几何特征：点、直线等，以及几何参数，例如点之间的距离、直线斜率、椭圆的轴长等等。此外，也常采用基于目标轮廓的特征选择和基于区域的特征选择<sup>[18][19]</sup>。简单几何特征属于局部特

征，对于摄像机运动的视觉伺服，容易造成图像特征在一些情况下无法观察到。基于区域的特征选择不要求特殊的图像结构，对图像的畸变具有鲁棒性，但对背景变化敏感。

以上提到的几种图像特征的主要缺点就是鲁棒性差，这也是当前视觉伺服的图像特征选择所面临的主要问题之一。基于活动轮廓的特征选择在一定程度上提高了鲁棒性，但对于复杂任务仍无法得到满意的结果。针对鲁棒性问题，当前特征选择的一个趋势是避免采用单一类别的图像特征，而采用多个图像特征类别的组合，以提高鲁棒性，例如由特征点、特征点组成直线间的角度以及所构成区域的面积所组成特征集<sup>[15]</sup>。此外，还有一种视觉特征信息融合的方法，它的思想与机器人的多传感器信息融合的思想一致，综合了多个反映目标特征的视觉信息，例如：颜色、边缘、图像的运动等等，它通过采用模糊逻辑和加权的方法做出判断，相对于以往的特征选择方法具有更强的鲁棒性<sup>[20]</sup>。此外，对于一些比较复杂的任务和目标，必须要保证相当数量的图像特征。这种情况下图像的特征选择比较复杂，为了减少计算量提高图像特征的效率，需要采用图像特征的自动选择。图像特征的自动选择就是根据视觉伺服系统以及任务对象的状态，动态地在视觉特征集中选择含信息量高、稳定的视觉特征子集<sup>[21][22]</sup>。在文献[22]中，引入了任务约束来减少候选图像特征的数量，然后采用优化的方法在图像特征集中得到理想的图像特征。这种方法能够满足实时性方面的要求，同时提高了视觉伺服的鲁棒性，但需要预先得到运动的轨迹。

#### 1.1.1.3 视觉控制器的设计

机器人视觉伺服系统相对于其它机器人控制系统的不同是引入视觉信息作为反馈传感信号，视觉信息虽然具有包含信息量大、可以非接触地感知环境等优点，但其缺点也是很明显的：相对低的采样速度，固有的时滞特性，容易受到外界噪声的干扰等。视觉伺服系统的这些特点对控制系统的设计提出了更高的要求。目前视觉伺服系统的控制结构大都采用级联的方式，整个系统的控制一般由两部分组成：机器人的视觉控制器和关节控制器，这种视觉控制器可以被称为视觉运动学控制，该控制结构的优点在于：将视觉控制器与机器人的运动学奇

异点分开来，可以将机器人看作一个理想的笛卡儿空间运动设备，降低了控制器的设计难度。如果对视觉伺服系统提出更高的动态性能指标，则有必要引入视觉的动力学控制，但视觉伺服的时滞以及系统内采样速度的不同增加了视觉动力学控制的难度<sup>[23]</sup>。

视觉伺服系统的控制结构一般是典型的反馈控制结构，Colombo等在基于图像轮廓的视觉伺服中，引入前馈控制策略，作为反馈控制的补充，提高了系统的响应速度和性能<sup>[24]</sup>。针对视觉伺服的控制结构具有变速特性，即在这个系统中存在多个采样速度，图像的采集频率与控制信号的发出频率是不一样的，在文献[25]中提出了一种多采样速度控制器同时采用前馈误差补偿来获得理想的效果。针对视觉伺服过程中存在的图像噪声问题，Yasunobu等提出了一种带有观测器的控制结构，这个观测器同其它的状态观测器具有相同的结构，只是建立在图像空间，对图像噪声进行补偿，提高系统的性能<sup>[26]</sup>。鉴于不同的视觉伺服方法在不同的条件下，例如图像噪声的大小，具体的工作任务等，系统的性能差别很大，Nicholas R.G提出了视觉伺服的切换控制方法<sup>[27]</sup>，这种方法借鉴了控制系统中的混杂动态系统理论，由一个以上的视觉伺服控制器组成子控制系统，以及一个上层的决策控制器组成，决策控制器通过一组切换规则来选择视觉伺服控制器，使系统得到更好的伺服效果。可以用简单的数学方法描述如下：

$$\dot{x} = f_n(x, u_n) \quad n \in \{1, \dots, N\} \quad (1-18)$$

$f_n$ 为第  $n$  个视觉控制律， $u_n$ 为第  $n$  个视觉控制律的输入信号， $x$ 为图像信号。在文献[27]，实现了实时切换混合视觉伺服控制器和基于仿射近似的视觉控制器，充分利用了基于仿射近似视觉控制器计算量小和对图像噪声的鲁棒性以及混合视觉伺服控制器控制转动的有效性，但还无法给出系统的稳定性分析。

视觉伺服系统所采用的视觉控制方法较多，经典控制方法、现代控制方法以及智能控制方法在视觉伺服控制中都己得到了成功的应用。例如极点配置方法、PID方法等在视觉伺服中得到应用<sup>[28]</sup>，经典控制方法在静态目标视觉伺服中应用的较多。现代控制方法的应用首先需要在状态空间建立视觉伺服控制模型，不同的伺服方法建立的状态空间控制模型也不同<sup>[29][30]</sup>。基于状态空间模型的较为复杂控制算法

可以使系统具有比古典控制方法更好的性能,例如预测控制<sup>[31]</sup>。此外视觉伺服的现代控制方法可以更加有效的分析视觉伺服系统的稳定性问题,例如:基于 Lyapunov 方法的稳定性分析及控制器的设计<sup>[32]</sup>。以模糊逻辑方法和神经网络为代表的智能控制方法也广泛的应用于机器人的视觉伺服控制,主要应用在两个方面:视觉控制器的设计以及视觉伺服参数的估计与逼近。例如:基于模糊逻辑的控制器<sup>[33]</sup>,直接进行图像空间到关节空间转换的神经网络自学习控制器<sup>[34]</sup>,采用梯度方法可以自调整模糊逻辑的控制算法,直接产生关节输出的模糊控制器<sup>[35]</sup>等应用。为了解决神经网络的小工作空间逼近问题, Wu, Q.M. 等采用模块化的神经网络方法计算 Jacobian 矩阵,训练多个神经网络,模糊神经网络决策当前工作空间,在多个神经网络间进行切换<sup>[36]</sup>。模糊控制方法所具有的鲁棒性和神经网络方法良好的非线性函数逼近能力,使得智能控制方法在视觉伺服控制中具有较好的应用前景,但仍面临解决模糊规则的提取以及神经网络的泛化等问题。视觉伺服系统控制方法的选择和是否能得到准确的视觉信息有密切的关系,如图像噪声的强弱、基于位置的视觉伺服的摄像机标定情况等等都是选择控制方法的依据。例如:如果可以得到准确的视觉信息,则简单 PID 方法即可解决问题,否则必须采用其他复杂算法以满足性能要求。

## 1.1.2 视觉伺服所面临的主要问题及解决方法

### 1.1.2.1 实时性

对于机器人视觉伺服控制系统,实时性问题是一个重要但困难的问题。图像采集速度较低以及图像处理需要较长时间给系统带来明显的时滞,此外视觉信息的引入也明显增大了系统的计算量,例如计算图像 Jacobian 矩阵、估计深度信息等等。图像处理速度是影响视觉伺服系统实时性的主要瓶颈之一,在此不作讨论。下面主要从控制的角度,阐述实时性问题的解决办法。现有的方法可以简单归纳为基于 Smith 预估器的补偿方法和基于滤波器预测目标运动的方法。在 Yasushi 等提出的基于位置的视觉伺服控制中,考虑图像处理的延时,采用 Smith 方法补偿时滞,改善了系统的控制品质,增强了稳定性<sup>[37]</sup>。

Sim 等采用改进的 Smith 方法用于运动目标的跟踪也取得了满意的效果<sup>[38]</sup>。在采用视觉伺服跟踪运动目标时, 另一种更为常用的方法是采用具有预测作用的滤波器来估计运动目标的将来位姿。这种用来估计将来运动的滤波器常采用 Kalman 滤波器<sup>[39]</sup>, 以及其他自适应滤波器<sup>[40]</sup>等。文献[41]对 Kalman 滤波器和两种采用最小二乘的自适应滤波器进行了比较, 自适应滤波器得到了更好的预测结果, Kalman 滤波器则对运动目标的速度改变更加灵敏。

### 1.1.2.2 稳定性

稳定性是所有控制系统首先考虑的问题, 对于视觉伺服控制系统, 无论是基于位置、基于图像或者混合的视觉伺服方法都面临着如下问题: 当初始点远离目标点时, 如何保证系统的稳定性, 即增大稳定区域和保证全局收敛; 为了避免伺服失败, 如何保证特征点始终处在视场内。

对于这些问题, 近年来已提出了一些解决方法, 例如: 图像伺服的轨迹规划方法、势能切换方法。在介绍这些方法之前, 先简单介绍广泛应用于机器人路径规划与导航问题的势场方法 (potential fields)<sup>[42]</sup>。势场方法的基本思想是定义人工势场  $U$ , 包含吸引势场  $U_a$  和排斥势场  $U_r$ , 人工驱动力  $F$ , 机器人的工作空间  $R$ , 在力  $F$  的驱动下, 吸引势场将机器人拉向目标位置, 排斥势场将机器人阻挡在障碍物之外, 这样就实现了具有避障功能的路径规划。力与势场的数学关系一般定义为:

$$F = -\nabla U \quad (1-19)$$

Mezouar 提出了一种图像伺服的轨迹规划方法, 将势场方法引入到基于图像的视觉伺服中<sup>[43]</sup>。吸引势场  $U_a$  简单定义为图像误差范数的平方, 排斥势场  $U_s$  定义在图像空间, 排斥势场  $U_q$  定义在关节空间, 力  $F$  定义为

$$F = F_a + \gamma F_s + \chi F_q \quad (1-20)$$

$\gamma$ 、 $\chi$  为权值。这种方法在进行图像伺服的同时引入图像空间以及关节空间的约束, 保证图像特征始终存在视场中, 改善了图像视觉伺服的弱点。这种方法虽然可以防止特征点离开视场, 但排斥势场可能使系统具有较低的运动效率。Jae 和 Myung 也提出了一种基于图像伺服的路

径规划方法<sup>[44]</sup>，该方法的核心思想是使机器人的笛卡儿空间的运动轨迹沿着起始位置和目标位置的直线运动，这样就能保证图像特征始终存在视场中，并具有高的运动效率。

势能切换方法（Potential Switching）也是一种克服图像视觉伺服缺点的方法，它的思想和人工势场方法有些相似。首先定义一个势能函数，一般定义为图像误差的非负函数，可以描述为：

$$V(q) = (\xi_d - \xi(q))^T (\xi_d - \xi(q)) \quad (1-21)$$

其中  $q$  为摄像机在当前坐标系下的坐标， $\xi_d$  为理想的图像特征向量， $\xi(q)$  为当前的图像特征向量。

于是，可以将视觉伺服的收敛问题转化为求势能函数的全局最小值。Chaumette 分析了基于位置和基于图像的视觉伺服中存在局部收敛问题<sup>[45]</sup>，对于视觉伺服的势能方法意味着存在局部极小点，将视觉伺服中所出现的初始点远离目标点造成不能收敛问题，转化为进入了局部极小点。Hashimoto 等采用势能切换的方法<sup>[46]</sup>，重新定义一个人工势能函数  $V''$ ，并满足该函数的最小点为局部的最大值，通过切换两个势能函数防止进入到局部极小点，这种方法可以增大视觉伺服的稳定区域，但不能保证全局收敛。

除了上面所介绍的几种方法，Cowan 等提出了通过导航函数的视觉伺服<sup>[47]</sup>，可以保证全局收敛，但适用于平面特征。Kojima 等采用模糊补偿的方法，防止基于特征的视觉伺服特征点不在摄像机视野中<sup>[48]</sup>。从上面的介绍可以看出对于保证视觉伺服稳定性问题，已经取得了一定的进展，但还有待完善。

### 1.1.3 机器人视觉伺服研究展望

从近年视觉伺服的发展情况可以看出，视觉伺服所取得的进展，例如混合的视觉伺服方法，很多都来源于对三维空间到二维空间投影几何关系的深入分析，所以更深的理解图像空间与笛卡儿空间的投影几何关系会有助于视觉伺服的研究。

图像处理，包括特征的选择及匹配，仍然是视觉伺服在实际应用中的重要瓶颈。而对于特征的选择和匹配，如何提高其鲁棒性仍然是面临的主要问题。多视觉信息融合的方法以及自动特征选择的方法具

有良好的发展前景。

在视觉伺服系统的控制器设计中引入动力学控制，而不是把机器人对象作为一个位移发生器，并克服时滞的不利影响，将会使机器人视觉伺服具有更好的动态性能。

如何更有效的分析和解决视觉伺服系统的稳定性问题，仍然是视觉伺服所面临的主要问题之一。

实验及仿真结果已经表明，相比基于位置与基于图像的视觉伺服，混合的视觉伺服方法可以得到更好的结果，这种方法的优势在于控制不是建立在单纯的图像空间或笛卡儿空间上。在今后的研究过程中，从图像空间与笛卡儿空间统一的角度考虑问题，会有助于视觉伺服的研究。

## 1.2 基于视觉的焊接机器人研究进展

### 1.2.1 焊接机器人的发展过程

焊接机器人的发展与工业机器人技术发展的历程密切相关。1954年美国的戴沃尔发表了“通用重复型机器人”的专利论文，第一次提出“工业机器人”和“示教再现”的概念。1959年美国 UMimat50n 公司推出第一台工业机器人。1967年日本从美国引进 Unimate 和 Versatran 等类型的工业机器人以后，结合国情，面向中小企业，采取一系列鼓励使用工业机器人的措施，率先在汽车制造业的喷涂、焊接、装配等重要工序中得到应用。并以此为契机，向其它产业渗透。日本仅用了10年左右的时间，便形成了自己的机器人产业，成为世界上应用和生产机器人最多的国家，其工业机器人的安装数量约占全世界的60%。据国际机器人联合会及联合国欧洲经济委员会统计，1996年到2000年期间，工业机器人的需求量以每年13%的速度增长，2002年，全世界近140万台机器人投入使用。从世界上工业机器人应用的统计结果来看，主要应用领域是焊接，尤其是在汽车生产国，焊接机器人已占总数的40%以上。

我国开发工业机器人晚于美国和日本,但也已有 20 多年的发展历史,并在“七五”期间对工业机器人进行了攻关,经过“八五”、“九五”和“十五”的持续努力,在机器人的基础技术、控制技术、关键元器件等方面取得了重大进展,并形成了适合我国国情的工业机器人应用领域<sup>[49]</sup>。

截止到 20 世纪末,我国实际使用工业机器人约 3500 台,分布在全国 700 多家企业,其中用于焊接作业的机器人总量在 1400 多台。和世界其它国家一样,汽车、摩托车、工程机械制造业是焊接机器人的最大用户群,电子行业有一些应用,其它行业目前应用数量较少。在焊接机器人中,弧焊机器人与点焊机器人的应用范围最广、使用数量也最多。弧焊机器人和点焊机器人相比较,弧焊机器人的使用数量略多于点焊机器人的装备数量。近年来机器人激光焊接、机器人钎焊等其它机器人焊接也得到应用<sup>[50]</sup>。

### 1.2.2 基于视觉的焊接机器人技术发展现状与趋势

当前焊接机器人的技术发展主要围绕焊接智能化展开。具体体现在焊缝跟踪技术,智能传感器与多传感器信息融合技术,焊接机器人与周边焊接设备的柔性集成,专用弧焊电源等方面<sup>[51]</sup>。在这些技术中焊缝跟踪技术是实现焊接自动化的关键技术之一,焊缝跟踪所用的传感器主要有红外、超声以及视觉传感器<sup>[52]</sup>。同其它焊接传感器相比,视觉传感器与焊接回路无关,具有提供的信息丰富,灵敏度和测量精度高,动态响应特性好,抗强电场和强磁场的干扰能力强,与工件无接触等优点。它适用于各种坡口形状,可以同时进行焊缝的跟踪和对焊接条件的实时控制,因此是最有发展前途的焊接传感技术。目前,视觉传感器及图像处理技术已经在焊缝跟踪、焊接熔透、熔宽、保护效果、熔池行为、弧长、焊速、焊丝的干伸长及熔滴的过渡形态、频率的控制、温度场监控、电弧诊断等领域得到应用。但视觉传感器成本相对较高,易受焊接弧光的干扰。为此一般使用滤光片,也有利用短路或基值期间弧光消失或很弱时进行取像的研究<sup>[53]</sup>。

基于视觉传感器的焊缝跟踪技术已经取得了较大的进展,主要的成果体现在焊缝图像处理、焊缝跟踪控制算法。其中 Kuo 等<sup>[54]</sup>将模糊

方法用于焊缝的识别取得了好的识别效果，Jae 等<sup>[55]</sup>采用模糊方法用于克服图像噪声的影响。清华大学对弧焊跟踪系统中的传感器和其中的控制系统分别进行了研究，并提出了一种基于焊缝 CCD 图像特征的焊缝轨迹识别的算法<sup>[56]</sup>。华南理工大学将神经网络和模糊控制应用到焊缝跟踪系统中，提出一种基于自适应共振理论 (AdaPtive ResonanceTheory)神经网络的焊缝跟踪算法，即把焊缝横截面方向上的灰度分布归为若干种空间模式，并使之记忆在 ART 神经网络中、在实际焊接中获取的图像空间模式与之进行匹配程度检测，根据模式分布情况确定出焊炬与焊缝中心的偏差，以此偏差为模糊变量设计了自调整 PID 模糊控制器<sup>[57]</sup>。华北石油管理局为了提高厚壁管的焊接效率，完成自动跟踪纠偏，利用 CCD 面阵摄像机做为焊缝检测传感器，STD 工控机作图像数字处理与识别，确定焊缝位置，并抑制焊头移动机构来实现焊缝在线自动跟踪实时纠偏<sup>[58]</sup>。

从基于视觉传感器的机器人焊缝跟踪技术的发展情况可以看出，今后的研究仍将主要集中于两个方面：一是提高图像处理技术，在噪声以及其他外界干扰情况下提高图像处理技术的鲁棒性和精度；二是提高视觉伺服控制技术的智能性。

### 1.3 本文的主要研究工作与论文结构安排

本文的研究是结合国家863计划机器人技术主题项目(2002AA422160)：“人机和谐的智能机器人开放式控制平台”，中国科学院知识创新工程领域前沿项目(2F02J02)：“基于开放式机器人控制器的结构光视觉伺服控制”以及与山大华天的合作项目“焊接小车视觉传感器”展开的。主要研究工作可概括为：视觉传感器系统与视觉控制系统的设计与开发；设计在强噪声环境下的图像特征提取算法和参数估计算法，提高特征提取和参数估计的精度以及鲁棒性；基于六自由度工业焊接机器人进行焊缝跟踪的视觉伺服控制研究；基于工业焊接小车的视觉伺服控制算法。

论文的结构如下：

第一章首先对机器人视觉伺服控制的主要研究内容、研究热点、

面临的问题以及解决策略进行总结，介绍了基于视觉传感器的焊接机器人的研究进展，最后给出了本文的研究背景和主要研究内容。

第二章介绍了视觉测量的基本知识，在此基础进行了结构光视觉传感器的原理设计，并提出了有效的结构光参数标定算法。设计了焊接机器人视觉控制平台的基本框架，在此基础上设计并实现了弧焊机器人视觉控制系统和多机器人视觉控制系统，并详细介绍其软硬件构成。

第三章主要包含两部分研究内容，一是焊缝图像特征提取算法，二是焊缝参数估计算法。首先，针对焊缝图像的特点设计了在较强噪声环境下的图像预处理算法以及焊缝特征点提取算法。然后，根据提取的特征点设计焊缝参数估计算法，包括焊缝方向的鲁棒拟合、法线向量拟合以及基于局部加权的曲线拟合方法。

第四章分析了六自由度焊接机器人在执行直线和曲线焊缝视觉跟踪任务中所面临的主要问题，提出了焊缝跟踪的视觉伺服控制方法。首先，设计了基于视觉引导的焊接机器人初始位姿自动调整算法。其次，提出一种混和的视觉伺服方法，将机器人的运动分为两部分，沿焊缝方向的移动采用笛卡儿空间的位置视觉控制，焊缝跟踪中的纠偏采用图像空间的视觉控制。最后，针对曲线焊缝自动跟踪问题，提出了一种曲线焊缝跟踪的视觉伺服协调控制，通过协调焊枪运动与图像特征运动，提高焊枪运动的精度和视觉跟踪鲁棒性。

第五章分析了工业用焊接小车执行折线焊缝视觉跟踪中所面临的问题，设计了具有较强鲁棒性的视觉伺服控制算法。建立了视觉特征的状态模型，设计了错误数据的检测方法以消除其对系统性能的不利影响。为了实现折线焊缝的准确跟踪，采用了一种自适应视觉伺服控制结构。这种自适应结构在线检测焊缝方向，并能够在焊缝方向发生变化时对控制参数进行相应的调整。

## 第二章 六自由度焊接机器人视觉控制平台设计

设计并建立六自由度机器人视觉控制平台是开展基于视觉传感器的焊接机器人研究的基础与前提，设计视觉控制平台主要包含两个方面的工作，一是设计视觉传感器系统，包括原理、结构设计以及视觉传感器参数的标定；二是视觉控制平台整体设计，包括整个框架的设计以及软、硬件的设计。

### 2.1 视觉传感器系统设计

结构光视觉具有测量精度高、实时性好、抗干扰能力强等特点，采用结构光视觉传感器，被认为是有发展前途的一种视觉测量方式，也是目前应用比较多的一种视觉测量方式<sup>[59]</sup>。采用激光结构光和一台摄像机进行三维信息测量，通过对结构光和摄像机进行标定获得摄像机内外参数以及结构光平面方程。

#### 2.1.1 视觉测量基本原理

视觉测量是利用摄像机获取的图像信息，计算三维环境物体的位置形状等几何信息。在进行视觉测量过程中需要确定摄像机成像几何模型，可通过实验与计算确定模型参数，最简单也是常采用的是线性摄像机模型，也称为小孔模型(pin-hole model)<sup>[60]</sup>，如图 2-1 所示。

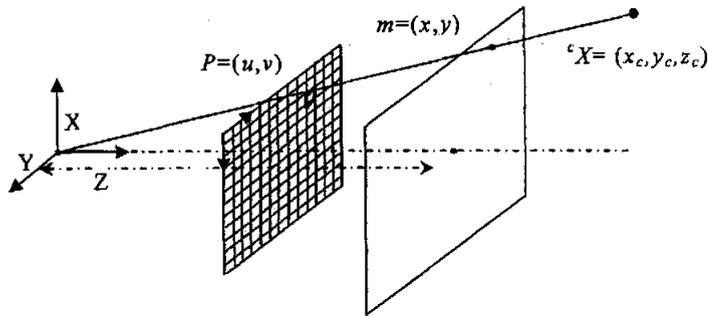


图 2-1 小孔摄像机模型

图中  $P$  为空间点的像素坐标,  $m$  为空间点在摄像机平面的坐标,  ${}^cX$  为空间点在摄像机坐标系的坐标,  ${}^wX=(x_w, y_w, z_w)$  为空间点在世界坐标系的坐标。则有如下的关系式。

$$\begin{pmatrix} u \\ v \\ 1 \end{pmatrix} = K_1 \begin{pmatrix} x \\ y \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} f_x & 0 & u_0 \\ 0 & f_y & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \\ 1 \end{pmatrix} \quad (2-1)$$

$$z_c \begin{pmatrix} x_c \\ y_c \\ 1 \end{pmatrix} = K_2 \begin{pmatrix} x_c \\ y_c \\ z_c \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} f & 0 & 0 & 0 \\ 0 & f & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_c \\ y_c \\ z_c \\ 1 \end{pmatrix} \quad (2-2)$$

由式(2-1)、(2-2)可得:

$$z_c \begin{pmatrix} u \\ v \\ 1 \end{pmatrix} = K_1 K_2 \begin{pmatrix} x_c \\ y_c \\ z_c \\ 1 \end{pmatrix} = K_1 K_2 \begin{pmatrix} R & T \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_w \\ y_w \\ z_w \\ 1 \end{pmatrix} \quad (2-3)$$

其中  $M_i=K_i K_2$  为摄像机内参数矩阵,  $M_o = \begin{pmatrix} R & T \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$  为外参数矩阵。

### 2.1.2 机器人视觉传感器系统原理设计

图 2-2 为线结构光测量原理示意图。利用激光器经平凸柱面镜形成激光面, 照射到工件上形成条纹, 摄像机采集该条纹图像, 提取特征点进行视觉控制。为了减少弧光及反射光的干扰, 在摄像机镜头前

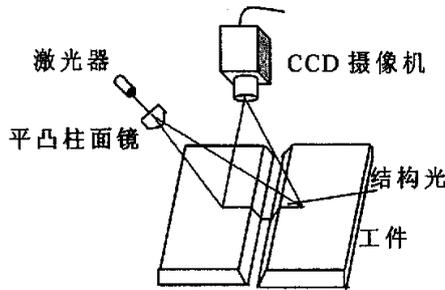


图 2-2 线结构光测量原理示意图

装有滤光片, 这样可以在较强弧光干扰下得到比较理想的图像。

单摄像机无法得到特征点的三维信息, 可结合使用结构光得到深

度信息，具体过程如下。

假设已对摄像机进行内外参数的标定以及结构光参数的标定，令摄像机的内参数为  $M_i$ ，当前得到的像素坐标为  $P_i(u_i, v_i)$ 。摄像机坐标系下的结构光平面方程为：

$$ax_c + by_c + cz_c = 1 \quad (2-4)$$

根据式(2-3)、(2-4)，可得特征点的  $z$  轴坐标为：

$$z_c = \frac{1}{ax'_c + by'_c + c} \quad (2-5)$$

$$\begin{pmatrix} x'_c \\ y'_c \\ 1 \end{pmatrix} = K_1^{-1} \begin{pmatrix} u \\ v \\ 1 \end{pmatrix} \quad (2-6)$$

图 2-3 为机器人与摄像机坐标系示意图，其中  $\Sigma B$  为基坐标系， $\Sigma E$  为机器人末端坐标系， $\Sigma C$  为摄像机坐标系。摄像机坐标系的  $Z$  轴方向为光轴方向， $X$  轴方向与图像空间的横轴相同。根据摄像机的标定参数以及标定的结构光平面参数就可以得到特征点的三维信息。 $\Sigma E$  与  $\Sigma C$  的相对关系固定，为摄像机外参数矩阵。对摄像机的内外参数进行了标定， $M_i$  为内参数矩阵， $M_o$  为摄像机坐标系相对于末端坐标系

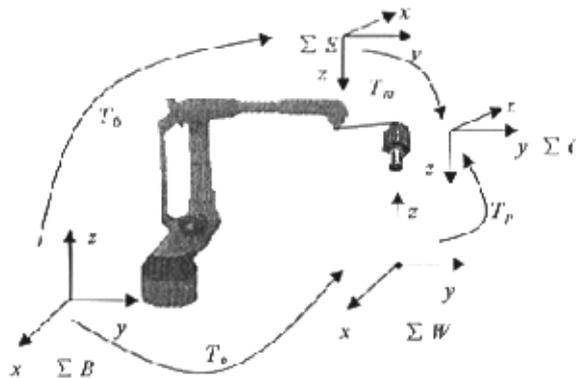


图 2-3 坐标系与坐标变换示意图

的外参数矩阵， $T_o$  为末端坐标系相对于基坐标系的转移矩阵。设  $X_p$  为特征点的像素齐次坐标， $X_e$  为空间点在末端坐标系的齐次坐标。则有如下关系式成立：

$$X_p = M_i M_o X_e \quad (2-7)$$

### 2.1.3 机器人视觉传感器参数标定

#### 2.1.3.1 基于单特征点的摄像机参数标定原理

鉴于机器人本身重复定位精度较高的特点，采用一种简单易行的手-眼系统摄像机标定方法，利用机器人末端带动摄像机相对于环境中任一点进行相对运动，则相对于摄像机来说，相当于摄像机不动而具有了多个特征点<sup>[61]</sup>。该方法使用摄像机视野中的任意一点作为特征点，以机器人在初始位置时摄像机视野中的某点作为特征原点，控制机器人做相对于特征原点的运动。在保持姿态不变的前提下，当机器人末端多次运动后，相当于机器人不动但具有多个特征点，各个特征点之间的相对位置即机器人相对运动的位置。

$$\text{令 } M = M_i M_o = \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} & m_{13} & m_{14} \\ m_{21} & m_{22} & m_{23} & m_{24} \\ m_{31} & m_{32} & m_{33} & m_{34} \end{bmatrix}, \text{ 由式(2-3)得:}$$

$$\begin{bmatrix} x_{w1} & y_{w1} & z_{w1} & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & -u_1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & x_{w1} & y_{w1} & z_{w1} & 1 & -v_1 \\ \vdots & \vdots \\ x_{wn} & y_{wn} & z_{wn} & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & -u_n \\ 0 & 0 & 0 & 0 & x_{wn} & y_{wn} & z_{wn} & 1 & -v_n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} m_{11} \\ m_{12} \\ m_{13} \\ m_{14} \\ m_{21} \\ m_{22} \\ m_{23} \\ m_{24} \\ m_{31} \\ m_{32} \\ m_{33} \\ m_{34} \\ m_{34} \\ m_{34} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -u_1 x_{w1} & -u_1 y_{w1} & -u_1 z_{w1} \\ -v_1 y_{w1} & -v_1 y_{w1} & -v_1 z_{w1} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ -u_n x_{wn} & -u_n y_{wn} & -u_n z_{wn} \\ -v_n x_{wn} & -v_n y_{wn} & -v_n z_{wn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} m_{31} \\ m_{32} \\ m_{33} \end{bmatrix} = 0 \quad (2-8)$$

根据上式可计算出  $M$  阵，由  $M$  阵可以得出  $M_i$  和  $M_o$  阵，其中  $M_i$  即为内参数矩阵， $M_o$  的逆矩阵为相对于特征原点的外参数矩阵<sup>[60]</sup>。内参数矩阵， $M_o$  的逆矩阵为相对于特征原点的外参数矩阵<sup>[60]</sup>

得到相对于特征原点的摄像机内外参数，下一步需要对特征原点进行标定进而得到摄像机相对于机器人末端的外参数。

下式为进行特征原点标定所使用的基本关系式：

$$T_b T_{p0} = T_{60} T_m \quad (2-9)$$

令  $\Sigma C$  与  $\Sigma W$  之间的变换矩阵为  $T_p$ ，将采集特征原点图像时机器人末端位姿记为  $T_{60}$ ，此时  $T_p$  记为  $T_{p0}$ 。由式(2-9)可推导如下公式：

末端位姿记为  $T_{60}$ ，此时  $T_p$  记为  $T_{p0}$ 。由式(2-9)可推导如下公式：

$$T_{ci} = T_{6i}T_m = T_{6i}T_{60}^{-1}T_bT_{p0} \quad (2-10)$$

$T_{ci}$  为机器人再第  $i$  次改变姿态后摄像机的位姿， $T_{6i}$  为第  $i$  次改变姿态后机器人末端位姿。根据式(2-10)可以得到摄像机光轴中心在机器人基坐标系中的位姿，以及成像平面上的成像点在机器人基坐标系中的坐标。

由摄像机光轴中心和成像平面上的成像点，可以得到一条空间直线，特征原点必然在该直线的延长线上。在机器人处在不同位姿时，可获得多条空间直线，这些直线的交点即为特征原点。

得到特征原点后，通过公式(2-10)可求得摄像机相对于机器人末端的外参数。

### 2.1.3.2 结构光参数标定

针对线形结构光标定问题，可以通过机器人的运动，利用摄像机小孔模型、激光结构光平面和目标平面约束，构造出含有激光结构光平面参数的线性方程组，求解得到激光平面的两个参数。利用目标平面上的激光束长度约束，求解其余的一个参数。

设空间点  $P$  在摄像机坐标系下的坐标  $[x_c, y_c, z_c]$ ， $P$  在基坐标系下的坐标  $[x_w, y_w, z_w]$ ，则有

$$\begin{bmatrix} x_w & y_w & z_w & 1 \end{bmatrix}^T = T_6 T_m \begin{bmatrix} x_c & y_c & z_c & 1 \end{bmatrix}^T \quad (2-11)$$

其中， $T_6$  为机器人末端在基坐标系下的位姿， $T_m$  为摄像机坐标系在机器人末端坐标系下的位姿，即摄像机的外参数。

$$\text{令 } T_6 T_m = \begin{bmatrix} n_x & o_x & a_x & p_x \\ n_y & o_y & a_y & p_y \\ n_z & o_z & a_z & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{n} & \bar{o} & \bar{a} & \bar{p} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \text{ 由式(2-11), 有}$$

$$\begin{cases} x_w = n_x x_c + o_x y_c + a_x z_c + p_x \\ y_w = n_y x_c + o_y y_c + a_y z_c + p_y \\ z_w = n_z x_c + o_z y_c + a_z z_c + p_z \end{cases} \quad (2-12)$$

在激光结构光照射到的平面工件上时，激光束上的点满足平面方程：

$$Ax_w + By_w + Cz_w + 1 = 0 \quad (2-13)$$

其中,  $A$ 、 $B$ 、 $C$  是工件平面方程参数。

将式(2-11)代入式(2-12), 有:

$$A(n_x x_c + o_x y_c + a_x z_c) + B(n_y x_c + o_y y_c + a_y z_c) + C(n_z x_c + o_z y_c + a_z z_c) + Ap_x + Bp_y + Cp_z + 1 = 0 \quad (2-14)$$

令  $D = Ap_x + Bp_y + Cp_z + 1$ 。若  $D=0$ , 说明摄像机光轴中心点  $[p_x, p_y, p_z]$  处在工件平面上。保持摄像机与工件平面具有一定的距离, 可以保证摄像机光轴中心点不在工件平面上, 即保证  $D \neq 0$ 。式(2-13)除以  $D$  及  $z_c$  得:

$$A_1(n_x x'_c + o_x y'_c + a_x) + B_1(n_y x'_c + o_y y'_c + a_y) + C_1(n_z x'_c + o_z y'_c + a_z) - ax'_c - by'_c - c = 0 \quad (2-15)$$

$$\text{其中, } A_1 = \frac{A}{D}, B_1 = \frac{B}{D}, C_1 = \frac{C}{D}.$$

只要结构光平面与摄像机光轴不垂直, 则  $c \neq 0$ 。若结构光平面与摄像机光轴垂直, 则摄像机观察不到结构光图像。因此, 实际应用中结构光平面与摄像机光轴不会垂直,  $c \neq 0$  成立。对上式除以  $c$ , 有:

$$A_2(n_x x'_c + o_x y'_c + a_x) + B_2(n_y x'_c + o_y y'_c + a_y) + C_2(n_z x'_c + o_z y'_c + a_z) - a_1 x'_c - b_1 y'_c = 1 \quad (2-16)$$

$$\text{其中, } A_2 = \frac{A_1}{c}, B_2 = \frac{B_1}{c}, C_2 = \frac{C_1}{c}, a_1 = \frac{a}{c}, b_1 = \frac{b}{c}.$$

对于照射到的平面工件上激光结构光, 摄像机得到的图像也是一条直线。在同一条直线上取两个以上的点, 代入式(2-14)得到方程组是线性相关的。因此, 可在该直线上任取两点, 代入式(2-15)得到两个含有激光平面参数的方程。保持摄像机光轴中心点的位置  $[p_x, p_y, p_z]$  不变, 每改变一次视觉传感器姿态, 在焦距归一化成像平面的结构光图像上取两个点, 代入式(2-15)得到两个方程。经过三次以上改变视觉传感器姿态, 得到  $n$  个方程 ( $n \geq 5$ ) 构成的线性方程组, 可利用最小二乘法求解出  $A_2$ 、 $B_2$ 、 $C_2$ 、 $a_1$ 、 $b_1$ , 见式(2-14)。

$$MX = N \Rightarrow X = (M^T M)^{-1} M^T N \quad (2-17)$$

其中  $M$  为式(2-15)中各参数的系数构成的  $n \times 5$  矩阵,  $N$  是所有元素为 1 的  $n \times 1$  矩阵,  $X$  为参数矩阵,  $X = [A_2 \ B_2 \ C_2 \ a_1 \ b_1]^T$ 。

照射到的平面工件的激光束上两点间的距离为:

$$d = \sqrt{(x_{w1} - x_{w2})^2 + (y_{w1} - y_{w2})^2 + (z_{w1} - z_{w2})^2} = \sqrt{d_x^2 + d_y^2 + d_z^2} \quad (2-18)$$

其中， $d_x$ 、 $d_y$ 、 $d_z$ 为 $d$ 的分量。

将式(2-11)、式(2-12)代入上式中的 $d_x$ 、 $d_y$ 、 $d_z$ ，有：

$$\begin{aligned} d_x &= n_x(x_1 - x_2) + o_x(y_1 - y_2) + a_x(z_1 - z_2) \\ &= \frac{1}{c} \left[ n_x \left( \frac{x'_{c2}}{a_1 x'_{c2} + b_1 y'_{c2} + 1} - \frac{x'_{c1}}{a_1 x'_{c1} + b_1 y'_{c1} + 1} \right) + o_x \left( \frac{y'_{c2}}{a_1 x'_{c2} + b_1 y'_{c2} + 1} - \frac{y'_{c1}}{a_1 x'_{c1} + b_1 y'_{c1} + 1} \right) \right. \\ &\quad \left. + a_x \left( \frac{1}{a_1 x'_{c2} + b_1 y'_{c2} + 1} - \frac{1}{a_1 x'_{c1} + b_1 y'_{c1} + 1} \right) \right] \\ &= \frac{1}{c} d_{x1} \end{aligned}$$

同理， $d_y = \frac{1}{c} d_{y1}$ ， $d_z = \frac{1}{c} d_{z1}$ 。于是，有：

$$d = \frac{1}{c} \sqrt{d_{x1}^2 + d_{y1}^2 + d_{z1}^2} = \frac{1}{c} d_1 \Rightarrow c = \frac{d_1}{d} \quad (2-19)$$

其中， $d_1$ 为利用参数 $a_1$ 、 $b_1$ 计算出的激光束上两点间的距离， $d$ 为利用尺子测量出的激光束上两点间的距离。由 $c$ 可以直接计算出 $a$ 、 $b$ ：

$$\begin{cases} a = a_1 c \\ b = b_1 c \end{cases} \quad (2-20)$$

### 2.1.3.3 实验结果

图 2-4 所示为机器人视觉传感器，视觉传感器主要由三部分构成：摄像机，激光器，传感器支架。

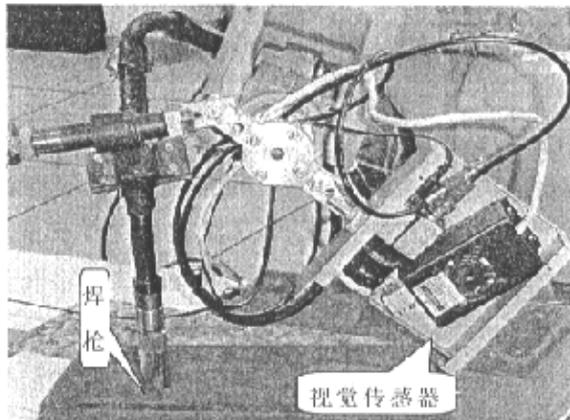
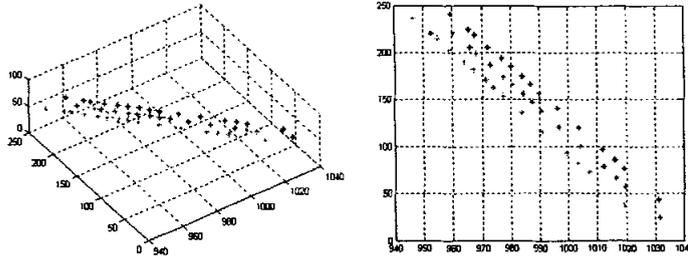


图 2-4 焊接机器人视觉传感器系统



(a) 三维空间数据图 (b) XOY 平面数据图

图 2-5 V 型焊缝视觉测量结果图

图 2-5 为 V 型焊缝视觉测量结果图，图 2-5a 为焊缝的三维空间数据图，图 2-5b 为焊缝 XOY 平面数据图。通过分析知，测量误差约为  $\pm 0.2\text{mm}$ ，标定精度可满足实际需要。

## 2.2 六自由度焊接机器人视觉控制平台设计

### 2.2.1 机器人控制平台框架设计

针对六自由度工业机器人，提出了一种多层次结构的控制框架，如图 2-6 所示。该平台采用多层次的控制结构，由智能人机交互层、运动规划层、运动控制层和伺服控制层构成。

- 智能人机交互层。用于进行人机交互、任务规划、与 CAD 系统的联接以及视觉、语音等信号的处理。该层形成机器人运动所需的空间直线、圆弧的特征参数，其中空间直线需要起点和终点的位姿参数，空间圆弧需要起点、终点和一个中间点的位姿参数。

- 运动规划层。根据空间直线、圆弧的特征参数，进行在线运动规划、逆运动学求解、得到控制解等，形成各关节电机的位置。

- 运动控制层。以从运动规划层接收到的关节电机位置作为给定，以测量到的关节电机的实际位置作为反馈，通过插值和 D/A 转换形成模拟量的速度信号。运动控制层实现位置闭环控制。

- 伺服控制层。以运动控制层的速度信号作为给定，以测量到的关节电机的实际速度作为反馈，由伺服控制与放大器实现速度伺服控制。

运动规划层、运动控制层和伺服控制层构成机器人的本地实时控制器。由于智能人机交互层对实时性的要求相对较低，而对界面的要求较高，所以该层利用 Windows 操作系统，由一台中央控制协调计算机和多台数据处理计算机实现。运动规划层对实时性要求较高，该层利用实时操作系统进行实时控制。运动控制层采用多轴运动控制器，作为一个功能卡集成到运动规划层的 PC 机中。智能人机交互层和运动规划层之间通过局域网进行数据交换，从而构成基于网络的实时控制系统。中央控制协调计算可以控制多台本地实时控制器，而每台本地实时控制器控制一台工业机器人的运动，工业机器人的状态实时的返回给中央控制协调计算机。中央控制协调计算机根据要实现的任务、各台工业机器人的当前状态、操作员输入的命令与参数等外部输入，进行任务规划，形成各台工业机器人运动所需的空间直线、圆弧的特征参数，从而实现多台工业机器人的运动协调控制。由于中央控制协调计算机与各台本地实时控制器的数据交换量很小，利用局域网进行

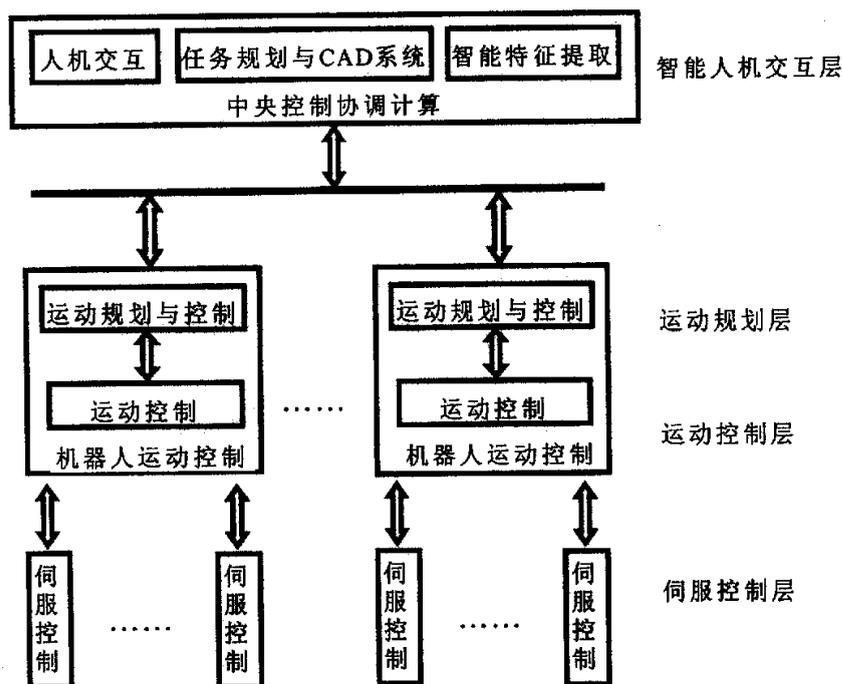


图 2-6 具有智能人机交互功能的机器人控制系统框架

通讯的速度又较高，所以图 2-6 所示系统的实时性能满足实际应用的需要。

### 2.2.2 弧焊机器人视觉控制系统的设计与实现

通过对弧焊机器人系统进行需求分析，本节设计了具有焊缝识别与跟踪功能的弧焊机器人视觉控制系统。其硬件由上位控制计算机、开放式机器人本地控制器、Yaskawa K10 机器人本体、摄像机、激光器、电焊机、送丝机、焊枪、CO<sub>2</sub> 气瓶等构成，见图 2-7。

按照功能的不同，可将系统硬件归结为机器人系统、视觉系统、焊接系统。机器人系统由上位控制计算机、开放式机器人本地控制器和 Yaskawa K10 机器人本体机构；视觉系统由上位控制计算机、摄像机和激光器组成；焊接系统由电焊机、送丝机、焊枪、CO<sub>2</sub> 气瓶构成。在机器人系统中，上位控制计算机与开放式机器人本地控制器构成基于局域网的机器人控制器。在视觉系统中，摄像机和激光器构成结构

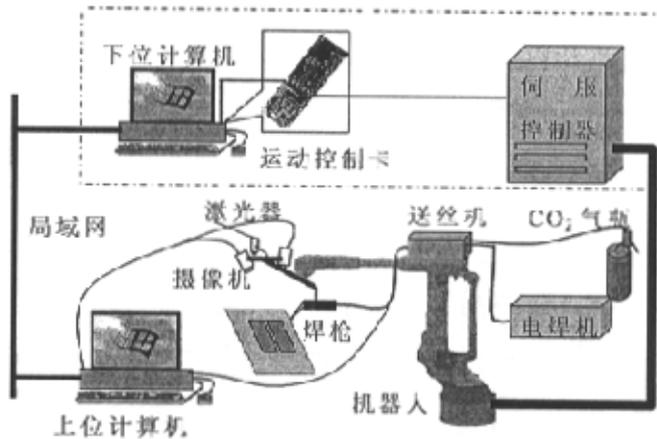


图 2-7 弧焊机器人视觉控制系统硬件构成

光视觉传感装置，视频信号通过图像采集卡输入上位计算机。在焊接系统中，控制焊机工作的启动/停止等信号通过 I/O 卡输入上位计算机。综上所述，在弧焊机器人控制系统中，由上位计算机将机器人系统、视觉系统、焊接系统集成为一体，图 2-8 为其硬件结构框图。

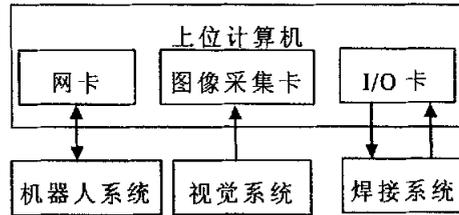


图 2-8 弧焊机器人视觉控制系统硬件结构框图

弧焊机器人视觉控制系统的控制功能框图如图 2-9 所示。

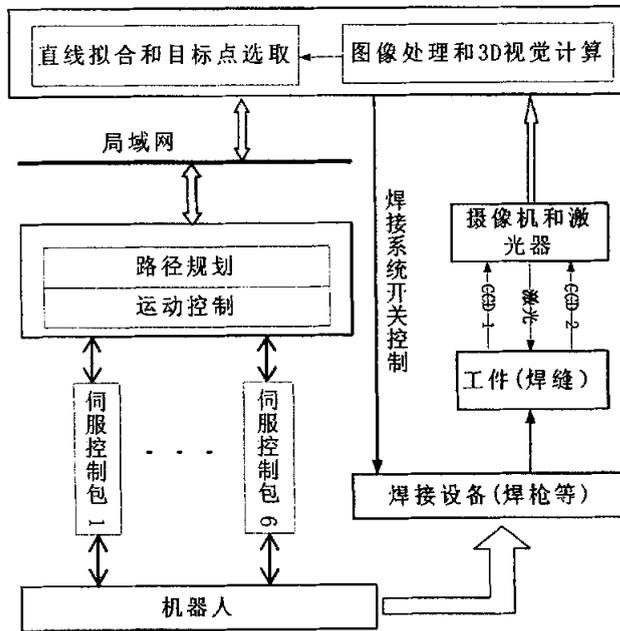


图 2-9 弧焊机器人视觉控制系统控制功能框图

图 2-10 为具有焊缝自动识别与跟踪功能的智能弧焊机器人实验平台全景。



图 2-10 弧焊机器人实验系统

### 2.2.3 多机器人视觉控制系统的设计与实现

#### 2.2.3.1 多机器人视觉控制系统的结构设计

图 2-11 所示为多机器人视觉控制系统方框图；框图体现了具有智能交互功能的机器人控制系统的三层结构。图 2-12 所示为多机器人控

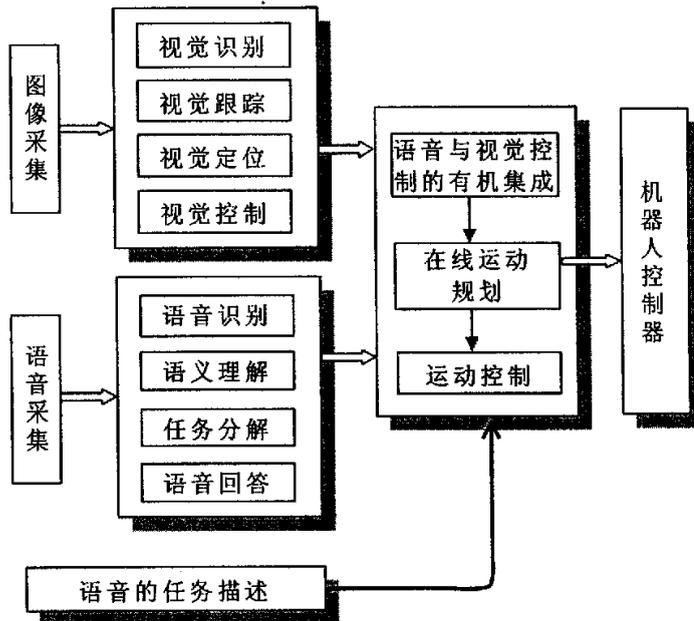


图 2-11 多机器人视觉控制系统方框图

制系统一个实例，它由两台工业机器人 K10，UP6 及其本地控制器和上层的智能人机交互计算机构成。机器人语音控制系统是整个机器人控制系统其中的一个辅助控制系统，机器人在操作人员的语音提示下完成特定的任务。为了实现机器人的语音控制，首先需要让机器人能够听懂操作人员的语音命令，即通过现有的语音识别技术来识别说话人的语音命令。采用软件方式进行语音识别，只需要将语音识别引擎安装在处理器所在的计算机上，根据预设的语音识别关键字或词，语音识别的准确率可以达到 95%以上，而且在程序的调试的过程当中可以根据需要修改，非常方便。但是增大了控制系统的计算负担。

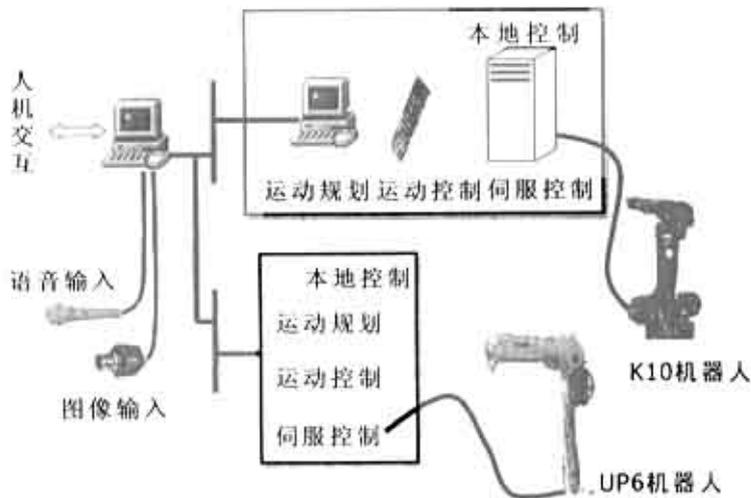


图 2-12 多机器人视觉控制系统实现实例

### 2.2.3.2 多机器人视觉控制系统的软件设计

多机器人视觉控制系统的软件结构主要由 5 部分组成：用户界面模块，系统功能模块，图像处理模块，机器人控制模块和语音识别模块。多机器人视觉控制系统的详细软件结构如图 2-13 所示。

设计用户界面时主要考虑人机交互的方便，同时兼顾具有一定的通用性及直观性。系统功能模块完成两个机器人的初始化工作，图像采集卡的初始化工作以及完成与两台机器人的通讯。其中通讯模块用

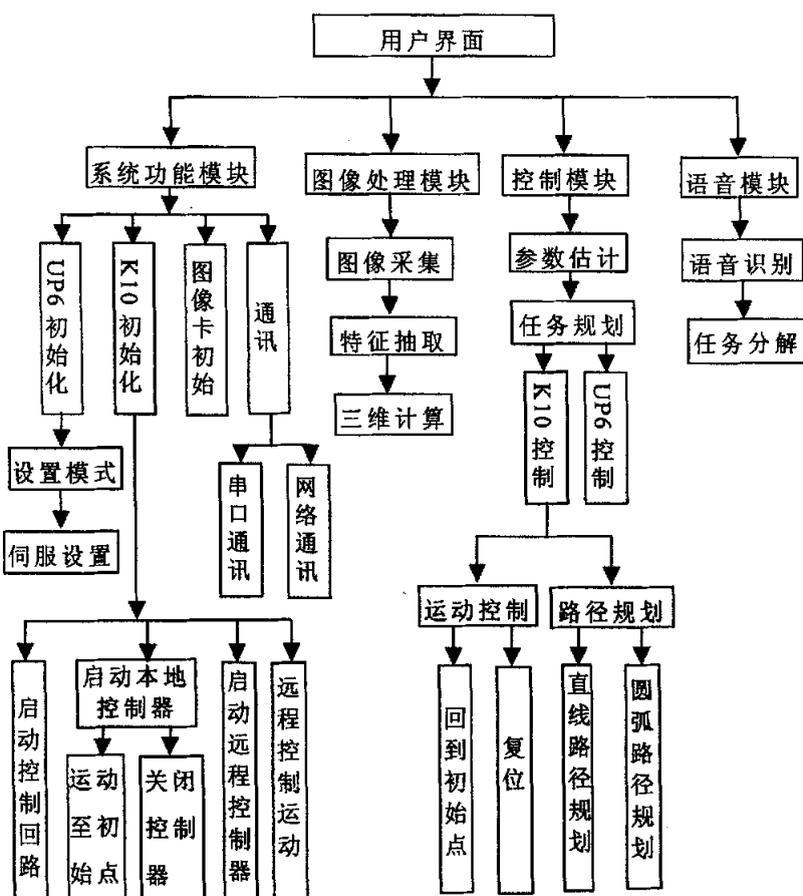


图 2-13 多机器人视觉控制系统软件

于与安装在机器人系统的下位计算机交换数据，包括向下位计算机发出运动命令和读取机器人位姿命令，接收下位计算机返回的机器人位姿等。两台机器人的通讯方式不同，与 UP6 采用串口通讯，与 K10 采用网络通讯。在设计该模块时主要考虑软件的可靠性，尽可能多的得到对硬件设置后的反馈信息并进行分析，避免程序出错。

图像处理模块与机器人控制模块是该系统的核心模块。图像处理模块用于采集焊缝图像，并对采集到的激光结构光图像进行焊缝识别，检测焊缝的起点、终点，并进行焊缝特征点的图像坐标求取。在得到了特征的像素坐标基础上，根据激光器参数和机器人的位姿，求取这些特征点的三维空间坐标。机器人控制模块分为两部分，分别为上位

计算机软件和下位计算机软件，均工作于 Windows 操作系统。无论是控制 K10 还是 UP6，上位机软件主要完成参数估计以及任务规划，参数估计是根据一系列测量点，拟合出焊缝的方向，包含直线和曲线拟合，以及焊接工件的法线方向等参数。然后根据焊接工件的参数以及工艺设定进行任务级分解。下位机控制程序根据上位机任务分解进行底层的路径规划与运动控制。在设计这两个模块时一方面从算法的角度提高可靠性另一方面从软件的角度对机器人运动的速度，步长进行限制。在设计控制软件时更多考虑软件的通用性和可维护性，具体的方法包括多层次的函数调用方法，例如对于外部输入响应主要由窗口类调用，具体控制算法的实现由文档类完成，同时将控制算法与硬件的交互分离。

语音模块与机器人控制模块配合可完成机器人语音控制，是整个机器人控制系统中的一个辅助控制功能，机器人在操作人员的语音提示下完成特定的任务。主要分为两部分，语音识别与任务分解，在设计任务分解程序时以安全性作为首要考虑原则，需要考虑前后语音命令的简单逻辑关系。

### 2.3 本章小结

本章研究了机器人视觉传感器系统以及结构光参数的标定算法，提出了机器人视觉控制系统设计的多层结构，设计并实现了六自由度弧焊机器人视觉控制系统和多机器人视觉控制系统。主要结论如下：

(1) 提出的结构光参数标定算法实现简单，便于机器人自动完成，并且不需要制作特定的标定物，适合于工业环境下的视觉控制方面的应用。标定精度可以满足弧焊机器人焊缝测量的需要。

(2) 由上位计算机将机器人系统、视觉系统集成为一体，较好地解决了机器人焊缝识别、测量与跟踪的协调问题。

(3) 视觉系统对光照的变化不敏感，适应能力强，能够满足工业应用环境的需要。

(4) 系统工作安全可靠，实时性好，焊接过程中机器人运动平稳。

(5) 该视觉控制系统不需要机器人的当前位姿，可应用于所有能够接受基于末端相对运动的机器人，实现视觉测量与跟踪。

### 第三章 焊缝特征提取与参数估计

焊缝图像处理与焊缝参数的估计对于视觉引导的机器人焊缝跟踪具有重要意义，是能够以较高精度执行自动焊接的基础。基于视觉传感器的自动焊接的关键技术之一就是焊缝图像的处理技术。由于焊接过程中的飞溅、烟尘、反光、电弧光和 CCD 摄像头本身的影响，所获取的图像噪声很大，尽管很多学者在焊缝图像处理方面做了大量的工作<sup>[62][63][64]</sup>，但是如何提高图像处理算法的鲁棒性仍是当前所面临的一个重要问题。

焊缝参数估计主要包括焊缝的空间走向以及焊件的法线方向估计。焊缝参数的估计对于视觉伺服控制的意義在于：对于直线和折线类焊缝的跟踪，需要在线拟合直线焊缝的方向；对于曲线焊缝的跟踪，需要在线拟合分段曲线的方程；此外，对于复杂焊缝跟踪和初始位姿的自动调整，需要实时估计焊件的法线方向以调整机器人的姿态。

特征提取与参数估计的精度，直接影响到焊接质量，甚至能决定焊缝跟踪与自动焊接的成败。由于焊接作业的环境产生了大量噪声，如何消除这些因素的影响，提高特征抽取与焊缝参数估计的精度和鲁棒性是自动焊接所面临的关键技术问题。对于焊缝参数估计在工程应用中比较常用是基于最小二乘的参数估计方法，在噪声服从高斯分布时，这种方法会得到较好的估计结果。但由于焊缝图像处理所面临的强噪声干扰，拟合数据集中可能存在不服从高斯分布的数据甚至是错误数据。这种情况下，最小二乘拟合的结果会出现较大的偏差。

本章针对特征提取提出了基于自适应阈值与数据集分类的特征提取算法，针对焊缝参数估计提出了具有较强鲁棒性的估计算法，对拟合数据进行判断，希望能够区分出哪些是有效数据，哪些是可能的错误数据，在此基础上采用有效数据进行参数估计就会得到比较满意的拟合结果。

### 3.1 问题分析

焊缝图像处理的主要任务是抽取条纹图像的特征点，例如在图3-1a中为“V”形焊缝图像，图3-1b中为“U”形焊缝图像。对于“V”形

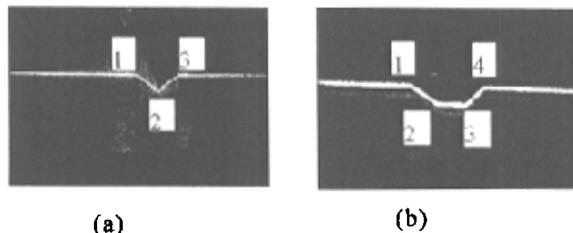


图 3-1 焊缝特征点

焊缝图像，主要得到点2；对于“U”形焊缝一般得到特征点1和4。焊缝图像处理主要特点就是干扰噪声很强。如图3-2a所示为带有弧光干扰的焊缝图像，图3-2b所示为带有反光干扰的焊缝图像。由上两图可见干扰的强度很高，几乎与目标图像的强度相差无几，造成噪声很难完全滤去，且干扰位置离目标特征很近。图3-2c、图3-2d所示为特征点不明显的焊缝图像。上述图像特点为特征抽取增加很多困难。

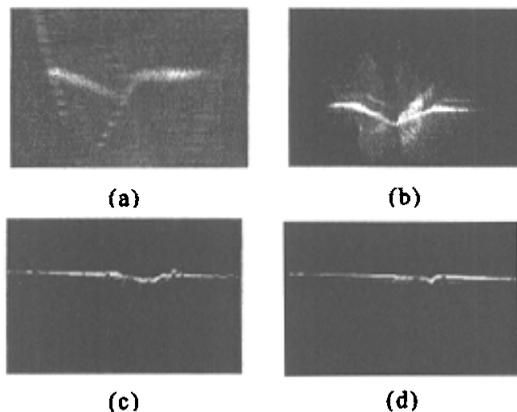


图 3-2 带有弧光和反射光干扰的焊缝图像

## 3.2 焊缝特征点抽取算法

### 3.2.1 图像预处理

### 3.2.1.1 目标区域的确定

基于焊缝图像具有图像特征所在的区域相对稳定，因此可以将图像分别向水平和垂直方向以固定的间隔  $S_h$  和  $S_w$  进行投影并计算投影方向上各个像素点的灰度的累加值。计算公式见式(3-1)。

$$\begin{aligned} Bw_i &= \frac{1}{M_h} \sum_{j=1}^{M_h} I(i, S_h j), \quad i=1, \dots, M_w \\ Bh_j &= \frac{1}{M_w} \sum_{i=1}^{M_w} I(S_w i, j), \quad j=1, \dots, M_h \end{aligned} \quad (3-1)$$

其中， $W$  为图像宽度， $H$  为图像高度， $M_h = \text{Int}(H/S_h)$ ， $M_w = \text{Int}(W/S_w)$ ， $I(x,y)$  为像素点  $(x,y)$  的灰度。

$XMax$ ,  $XMin$ ,  $YMax$ ,  $YMin$  构成矩形目标区域，鉴于理想目标区域的边缘两侧相邻的灰度累加值的差别最大，为了提高算法的鲁棒性，采用长度为  $T_s$  的邻域数据窗中灰度累加差值的和来判断。可通过下式确定。

$$\begin{aligned} XMax &= i + S_w : \text{Min} \sum_{h=1}^{T_s} (Bw_{i+h-1} - Bw_{i-h}), \quad i=1, \dots, M_w \\ XMin &= i - S_w : \text{Max} \sum_{h=1}^{T_s} (Bw_{i+h-1} - Bw_{i-h}), \quad i=1, \dots, M_w \\ YMax &= j + S_h : \text{Min} \sum_{h=1}^{T_s} (Bh_{j+h-1} - Bh_{j-h}), \quad j=1, \dots, M_h \\ YMin &= j - S_h : \text{Max} \sum_{h=1}^{T_s} (Bh_{j+h-1} - Bh_{j-h}), \quad j=1, \dots, M_h \end{aligned} \quad (3-2)$$

### 3.2.1.2 图像去噪与增强

将目标区域划分为若干子区域，灰度划分为 25 个等级，在各子区域中计算各个灰度等级出现的频率，如式(3-3)。

$$\begin{cases} F(k, h) = \sum_{i=XMin}^{XMax} \sum_{j=YMin}^{YMax} P(k, h) \\ P(k, h) = \begin{cases} 1 & k = \text{Int}(i/5), h = \text{Int}(I(i, j)/10) \\ 0 & \text{others} \end{cases} \end{cases} \quad (3-3)$$

考虑到激光条纹与背景对比度的不同，在一个子区域中高等级灰度累计出现一定频率或者一个等级灰度达到一定频率时，将此时的灰度值

作为图像增强的阈值  $T_2(k)$ 。

$$T_2(k) = 10K, \text{ iff } \left( \sum_{h=25}^k F(k, h) > P_1 \right) \vee (F(k, K) > P_2) \quad (3-4)$$

其中,  $P_1$  为高等级灰度累计频率阈值,  $P_2$  为高等级灰度频率阈值,  $K$  为灰度等级,  $1 \leq K \leq 25$ 。利用各子区域的阈值, 对目标区域进行高通滤波和图像增强, 然后再进行 Gauss 滤波和二值化处理。图 3-3 为一幅焊缝图像及其目标分割结果, 其中图 3-3a 为反色后的原始图像, 图 3-3b

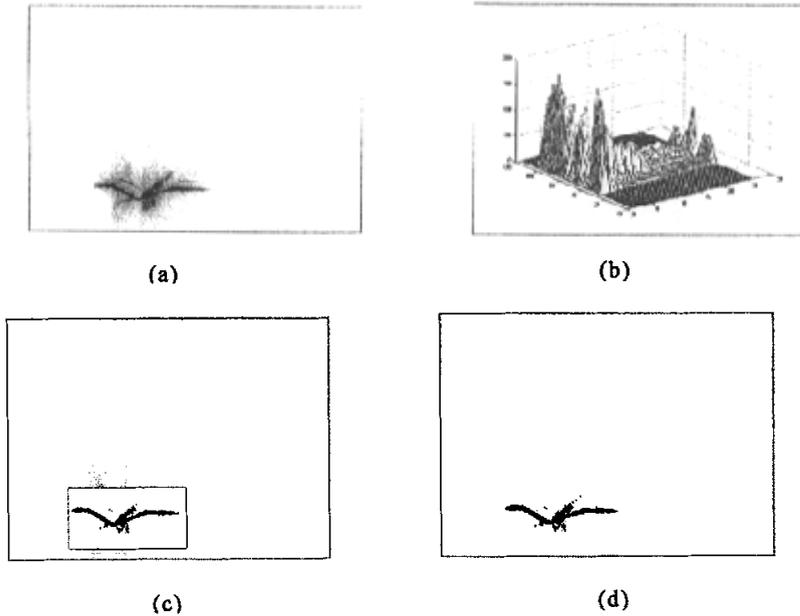


图3-3 经过去噪及二值化处理的图像比较图

为灰度频率分布图, 图 3-3c 为分割出的目标区域及经过去噪后的图像, 图 3-3d 为二值化后图像。

### 3.2.2 图像特征抽取

焊缝特征抽取主要抽取点特征, 例如图 3-1 中的点 1, 2, 3, 4。由于使用焊接工艺以及焊缝类型的不同, 焊缝表面的粗糙程度和噪声强弱相差较大, 例如弧焊的噪声大但一般焊件表面比较光滑, 而埋弧焊的干扰较小但焊件表面颗粒很多比较粗糙。在设计特征抽取算法时要考虑算法具有一定的通用型, 还要兼顾算法的复杂度。我们设计的

特征点抽取算法的思想是将不同形状和粗糙度的焊缝看作是几个首尾顺次连接的直线，每条直线看作是一类数据点的集合，将不同数据点归为不同的数据集，然后计算不同数据集的直线参数。

### 3.2.2.1 获取焊缝图像的上下边缘

在对焊缝图像去躁及二值化的基础上，抽取焊缝图像的上下边缘点。同时满足式(3-5),(3-6)的  $Xu_i, Yu_i$  是特征点的上边缘坐标值，将第  $i$  个上边缘特征点记为  $Eu_i(Xu_i, Yu_i)$ 。同时满足式(3-7),(3-8)的  $Xl_i, Yl_i$ ，是特征点的下边缘坐标值，将第  $i$  个下边缘特征点记为  $El_i(Xl_i, Yl_i)$ 。其中  $Xu_i, Xl_i \in [XMin, Xmax]$ ;  $Yu_i, Yl_i \in [YMin, YMax]$ 。

$$\sum_{j=Yu_j-T_h}^{Yu_j-1} I(Xu_i, j) = 0 \quad (3-5)$$

$$\sum_{j=Yu_j}^{Yu_j+T_h} I(Xu_i, j) = T_h + 1 \quad (3-6)$$

$$\sum_{j=Yl_j}^{Yl_j+T_h} I(Xu_i, j) = 0 \quad (3-7)$$

$$\sum_{j=Yl_j-T_h}^{Yl_j-1} I(Xu_i, j) = T_h + 1 \quad (3-8)$$

计算上下边缘点 Y 轴坐标差值的平均值和方差。

$$\mu_{Mh} = \frac{1}{N_e} \sum_{i=1}^{N_e} (Yu_i - Yl_i) \quad (3-9)$$

$$\sigma_{Mh} = \sqrt{\sum_{i=1}^{N_e} (Yu_i - Yl_i - \mu_{Mh})^2 / (N_e - 1)} \quad (3-10)$$

计算上下边缘点的中值点。

$$M_i = (Xu_i, (Yu_i + Yl_i) / 2), \quad i=1, \dots, N_e \quad (3-11)$$

### 3.2.2.2 划分数据集

用于描述焊缝图像的直线的数目决定了数据集的数目，通过如下算法划分数据集。

(1) 得到初始数据集  $S_i, i=1$ , 包含  $N$  个数据。初始数据集的直线方程可以通过加权最小二乘方法拟合得到，然后计算像素 y 坐标的均值和方

差。加权值  $\rho_j, j=1, \dots, N$ , 可根据下式计算得到:

$$\rho_j = \begin{cases} 0 & Yu_j - Yl_j > 5\mu_{Mh} \\ \frac{\mu_{Mh}}{Yu_j - Yl_j} & \mu_{Mh} < Yu_j - Yl_j < 5\mu_{Mh} \\ 1 & Yu_j - Yl_j < \mu_{Mh} \end{cases} \quad (3-12)$$

根据数据集  $S_i$  拟合的直线方程如下:

$$y = \hat{a}_i x + \hat{b}_i \quad (3-13)$$

$\hat{a}_i, \hat{b}_i$  是采用加权最小二乘方法拟合的直线参数,  $x, y$  为像素的坐标值。

根据式(3-14),(3-15)计算实际观测数据与拟合的直线方程偏差的均值与方差。

$$\mu_i = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N (y_j - \hat{a}_i x_j - \hat{b}_i) \quad (3-14)$$

$$\sigma_i = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^N (y_j - \hat{a}_i x_j - \hat{b}_i - \mu_i)^2}{N-1}} \quad (3-15)$$

(2) 沿着图像  $x$  轴的正方向得到相邻的边缘中值点  $M_j(x_j, y_j), j=N+1$ 。

如果  $|y_j - \hat{a}_i x_j - \hat{b}_i| > 3\sigma_i$ , 则沿着图像  $x$  轴的正方向依次得到  $m$  个中值点。

如果  $\sum_{k=1}^m \rho_k (y_{j+k} - \hat{a}_i x_{j+k} - \hat{b}_i) > T_{set}$ , 令  $i=i+1$ , 得到新数据集  $S_i$ , 包含  $m$  个数据  $d_p, p=j+1, \dots, j+m$ ,  $T_{set}$  是阈值用于判断当前  $m$  个数据是否偏离直线过大。

如果  $\sum_{k=1}^m \rho_k (y_{j+k} - \hat{a}_i x_{j+k} - \hat{b}_i) < T_{set}$ , 将  $m$  个数据  $d_p, p=j+1, \dots, j+m$ 。加入到当前数据集中  $S_i$ , 计算新的拟合直线方程以及数据点偏离直线方程的均值和方差。

如果  $|y_{j+1} - \hat{a}_i x_{j+1} - \hat{b}_i| \leq 3\sigma_i$ , 将边缘中值点  $M_j(x_j, y_j)$  加入到当前数

据集  $S_i$ , 根据加权最小二乘的迭代公式计算偏差的均值与方差。

(3) 如果  $y_j \leq XMax, j=j+1$ , 重复步骤(2)。

(4) 理想的数据集数目是大于等于 3 并小于等于 5, 但是根据上面的算法经常会得到多于 5 个数据集, 必须对得到的数据集进行必要的合并以得到合适的数据集数目。

计算每个数据集中观测值与直线方程偏差的方差, 这个方差可以认为反映了焊缝图像在每段的粗糙程度。

$$C_k = \sqrt{\sum_{j=1}^{N_k} (y_{j,k} - \hat{a}_k x_{j,k} - \hat{b}_k)^2 / N_k}, k=1, \dots, N_c \quad (3-16)$$

$N_c$  是数据集的数目,  $N_k$  是第  $k$  个数据集中包含数据的数目。可采用后面的方程对相似数据集进行合并,  $F_k$  反映了相邻数据集拟合的直线方程斜率的变化程度。

$$F_k = |\hat{a}_k - \hat{a}_{k+1}|, k=1, \dots, N_c \quad (3-17)$$

### 3.2.2.3 抽取特征点

根据焊缝图像粗糙度的不同, 可以采用两种方法得到准确的特征点。设  $T_c$  为粗糙度阈值, 如果  $C_k < T_c$  并且  $C_{k+1} < T_c$ , 则通过计算两条直线的交点来确定特征点可以得到较高的精度。如果  $C_k \geq T_c$  或者  $C_{k+1} \geq T_c$ , 则可以确定一个用圆来描述的区域, 其中原点为相邻直线的交点, 半径为  $\sigma_{Mh}$ , 然后在该区域内以导数的变化和与相邻直线的距离为标准, 搜索理想的特征点。

## 3.3 焊缝参数估计

### 3.3.1 鲁棒参数估计方法

鲁棒估计方法是当前应用较多的参数估计方法, 相对于传统的基于最小二乘的估计方法, 具有更强的鲁棒性。如果数据中的噪声服从高斯分布, 则最小二乘方法是一种线性最优估计方法。但在实际中大量存在服从不同分布的噪声, 例如: 特征匹配所产生的噪声。鲁棒估计方法可以概括为将数据集分为内部数据 (inlying data) 和外部数据

(outlying data)，最终由内部数据进行参数的估计以减少噪声影响。它实现的主要思想：一是忽略在某特定范围外的数据，二是通过建立有效数据与噪声的模型来区分内外数据集。鲁棒估计方法可以认为是参数估计方法的扩展。

鲁棒估计方法主要有三种：M 估计方法，删除诊断方法 (Case Deletion Diagnostics) 以及随机采样方法。M 估计方法首先建立类似最大似然表达式形势的价值函数，价值函数采用数据和数据的加权值作为变量，通过权系数优化来选择内部数据的方法。该方法对初始值要求较高，否则很容易进入局部最优<sup>[65]</sup>。删除诊断方法属于一种影响检测方法，通过分析删除单个数据对整个数据集的影响来区分内部数据和外部数据<sup>[66]</sup>。随机采样算法是一种比较有效的鲁棒估计方法，RANSAC (Random sampling consensus) 是其中一个代表性的随机采样算法。RANSAC 算法可分成三步完成：随机抽取用于拟合模型的最小数据集；以该最小数据集为基础得到可行集，根据拟合模型的阈值 T 来判断数据是否属于可行集，总的可行集中数据越多表示该拟合模型越接近理想模型；重复 N 次随机采样，可行集中数据最多的模型就是鲁棒性最强的拟合<sup>[67]</sup>。

### 3.3.2 焊缝方向的鲁棒拟合方法

机器人的轨迹控制和位姿调整必须得到焊缝的方向向量。采用鲁棒估计方法估计焊缝方向，是基于删除诊断(case deletion diagnostics)的思想，根据对最小二乘拟合的总误差产生影响的大小将数据分为外部数据集和内部数据集，只对内部数据集进行拟合。

在实际应用中用于直线拟合的数据存于一个固定长度  $N$  的动态数据窗中，数据集  $D_a$  包含当前数据窗中的所有数据。空间直线方程如下：

$$\frac{x-x_0}{m} = \frac{y-y_0}{n} = \frac{z-z_0}{k} \quad (3-18)$$

参数  $\theta$  可以用如下的最小二乘计算公式得到：

$$\theta = (\Phi_N^T \Phi_N)^{-1} \Phi_N^T Y_N \quad (3-19)$$

$\theta, \Phi_N, Y_N$  定义如下：

$$\Phi_N = \begin{bmatrix} x_1 & \dots & x_N & 0 & \dots & 0 \\ 1 & \dots & 1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \dots & 0 & z_1 & \dots & z_N \\ 0 & \dots & 0 & 1 & \dots & 1 \end{bmatrix}^T; \theta = \begin{bmatrix} a \\ b \\ c \\ d \end{bmatrix}; Y_N = [y_1 \dots y_N \quad y_1 \dots y_N]^T$$

$$a = n/m; b = -nx_0/m + y_0; c = n/k; d = -nz_0/k + y_0;$$

鲁棒估计算法的具体步骤如下:

(1) 采用整个数据窗中的数据通过最小二乘方法来拟合焊缝方向  $\theta_N$ ，然后根据下式计算总的拟合误差  $E_N$ 。

$$E_N = (Y_N - \Phi_N \theta_N)^T (Y_N - \Phi_N \theta_N) \quad (3-20)$$

(2) 从数据窗中移去一个数据，采用最小二乘方法对剩余的  $N-1$  个数据进行拟合，共需要拟合  $N$  次。则焊缝方向  $\theta_{N-1}^i$  和拟合误差  $E_{N-1}^i$  可以根据下式计算:

$$E_{N-1}^i = (Y_{N-1}^i - \Phi_{N-1}^i \theta_{N-1}^i)^T (Y_{N-1}^i - \Phi_{N-1}^i \theta_{N-1}^i) \quad (3-21)$$

其中  $\Phi_{N-1}^i$  为从  $\Phi_N$  中移去第  $i$  行和第  $N+i$  行后的矩阵;  $Y_{N-1}^i$  为从  $Y_N$  中移去第  $i$  行和第  $N+i$  行后的矩阵。

(3) 将数据窗中的数据分为内部数据和外部数据。如果不等式(3-22)成立,则认为第  $i$  个数据为外部数据,否则认为第  $i$  个数据为内部数据。

$$|E_N - E_{N-1}^i| > \lambda \cdot \frac{E_N}{N} \quad (3-22)$$

$\lambda$  为比例系数,可以通过实验确定。一般取  $\lambda \in [1.5 \ 3]$ 。

由上述算法可知,需要执行  $N$  次拟合过程,计算量较大。下面给出了一个减少计算量的算法,假设数据窗中所有  $N$  个数据的拟合已经完成,并保留了必要的中间结果,如何根据已有的结果,比较容易的得到  $N-1$  数据的拟合结果。

假设一个被移去的数据记为  $D_k=(x_k, y_k, z_k)$ ,则参数  $\theta_{N-1}^k$  可以由下式计算:

$$\theta_{N-1}^k = (\Phi_{N-1}^{kT} \Phi_{N-1}^k)^{-1} \Phi_{N-1}^{kT} Y_{N-1}^k \quad (3-23)$$

$$\Phi_{N-1}^{kT} \Phi_{N-1}^k = \Phi_N^T \Phi_N - (\tilde{X}_k \tilde{X}_k^T + \tilde{Z}_k \tilde{Z}_k^T) \quad (3-24)$$

$$\Phi_{N-1}^k Y_{N-1}^k = \Phi_N^T Y_N - y_k (\tilde{X}_k + \tilde{Z}_k) \quad (3-25)$$

$\tilde{X}_k, \tilde{Z}_k$  的定义如下:

$$\tilde{X}_k = (x_k \ 1 \ 0 \ 0)^T; \quad \tilde{Z}_k = (0 \ 0 \ z_k \ 1)^T$$

将式(3-24), (3-25) 代入式(3-23), 可得

$$\theta_{N-1}^k = (\Phi_N^T \Phi_N - (\tilde{X}_k \tilde{X}_k^T + \tilde{Z}_k \tilde{Z}_k^T))^{-1} (\Phi_N^T \Phi_N \theta_N - y_k (\tilde{X}_k + \tilde{Z}_k)) \quad (3-26)$$

令  $\tilde{M}_k = -(\tilde{X}_k \tilde{X}_k^T + \tilde{Z}_k \tilde{Z}_k^T)$  及  $\tilde{m}_k = -y_k (\tilde{X}_k + \tilde{Z}_k)$ , 可得

$$\theta_{N-1}^k = (\Phi_N^T \Phi_N + \tilde{M}_k)^{-1} (\Phi_N^T \Phi_N \theta_N + \tilde{m}_k)$$

$$\theta_{N-1}^k = [(\Phi_N^T \Phi_N)^{-1} - (\Phi_N^T \Phi_N)^{-1} \tilde{M}_k (I + (\Phi_N^T \Phi_N)^{-1} \tilde{M}_k)^{-1} (\Phi_N^T \Phi_N)^{-1}] (\Phi_N^T \Phi_N \theta_N + \tilde{m}_k) \quad (3-27)$$

令  $Q_N = (\Phi_N^T \Phi_N)^{-1}$ ,

则式(3-27)可整理为如下结果:

$$\theta_{N-1}^k = \theta_N - Q_N \tilde{M}_k (I + Q_N \tilde{M}_k)^{-1} \theta_N - Q_N \tilde{m}_k - Q_N \tilde{M}_k (I + Q_N \tilde{M}_k)^{-1} Q_N \tilde{m}_k \quad (3-28)$$

### 3.3.3 焊件平面法线的拟合方法

在执行焊缝跟踪过程中, 常需要得到焊件平面的法线向量, 以便进行机器人位姿的调整。由于用于拟合平面法线向量的数据较多, 为了提高计算速度采用基于 RANSAC (Random sampling consensus) 的拟合算法。

用于拟合的数据由一个固定长度的动态数据窗提供, 采用 RANSAC 方法进行拟合。由于随机抽取的平面点数据彼此间的距离可能会很近, 而且实际中的焊件平面不太可能为一标准平面, 更多为分段平面或渐变曲面。因此, 在拟合之前对采样数据进行判断, 如果数据彼此距离过小则重新进行采样。同时在拟合过程中将遗忘因子引入算法, 以反映拟合参数的渐进变化。

(1) 对最小数据集进行随机采样, 这个最小数据集用于计算法线向量。令  $n$  是最小数据集的数据数,  $n=3$ 。  $\theta = [A \ B \ C]^T$ ,  $X = [x, y, z]^T$ 。焊件平面等式方程如下:

$$Ax + By + Cz = 1 \quad (3-29)$$

(2) 计算最小数据集中数据之间的距离，公式如下：

$$R_k = \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2 + (z_i - z_j)^2} \quad (3-30)$$

$$i=1,2,3, j=1,2,3, i \neq j.$$

如果  $R_k \leq T$ ， $T$  为阈值， $k=1,2,3$ ，执行步骤(1)重新采样，避免最小数据集中的数据由于过于接近，而使计算的法线向量产生较大的偏差。如果  $R_k > T$ ，执行步骤(3)。

(3) 得到基于当前最小数据集的可行数据集，根据不等式(3-31)来判断当前的检测数据是否属于可行集。

$$\frac{|Ax + By + Cz - 1|}{\sqrt{A^2 + B^2 + C^2}} < \varepsilon \quad (3-31)$$

如果上式成立，认为检测数据属于可行集。可以通过实验来确定  $\varepsilon$ 。

(4) 将步骤(1)-(3)重复执行  $N$  次， $N$  可以通过式(3-32)计算得到：

$$N = \frac{\log(1-p)}{\log(1-(1-q)^s)} \quad (3-32)$$

其中  $p$  为至少一次采样完全属于内部数据的概率， $q$  为数据属于外部数据的概率， $s$  为最小数据集包含数据的数量。一般令  $p=0.99$ ，经验确定  $q=0.1$ ，对于法线方向拟合  $s=3$ ，可行数据集的长度为  $m_i, i=1, \dots, N$ 。

在随机抽样中找到最合适的可行集，可转化为找到使下式取得最大值的可行集。 $f(X_i)$  判断当前数据的采样先后顺序。

$$\text{Max} \sum_{i=1}^{m_i} \lambda^{f(X_i)} y(X_i) \quad (3-33)$$

$$y(X_i) = \begin{cases} 0 & X_i \in \text{outlying} \\ 1 & X_i \in \text{inlying} \end{cases} \quad (3-34)$$

为了保证跟踪过程中的动态性能，采用遗忘因子  $\lambda$ ，它的取值一般在  $[0.7, 1]$ ， $X_i$  用于拟合平面法向量的数据窗中的第  $i$  个数据。

(5) 设通过上述算法得到的最大可行集为  $C$ ，该可行集包含的数据个数为  $M$ ，通过最小二乘拟合法线方向。

### 3.3.4 局部加权曲线拟合方法

焊枪的运动由焊缝的方向矢量来确定，这就需要根据获得的一系列离散的特征点来准确地确定曲线焊缝在不同段的方向矢量。显然，提高空间曲线的测量精度就可以提高焊缝方向矢量的准确性。为此，本节提出一种基于最小二乘方法的局部加权曲线拟合方法，来拟合焊缝曲线。拟合过程中，将待拟合的数据加入动态数据窗，将待评估数据的相邻数据加入一个局部动态数据窗，用于评估待拟合数据的有效性，进而确定数据的加权值。假设空间焊缝曲线具有一阶连续导数，并以此作为判断数据有效性的依据。根据评估结果将待拟合的数据赋予不同的权值，然后采用加权最小二乘进行参数的拟合，以提高拟合的鲁棒性。

采用最小二乘法拟合空间曲线时，将空间曲线的拟合转换为两条二维曲线的拟合。假设拟合数据窗长度为  $N$ ，局部动态数据窗为  $2n+1$ ，两个三次多项式函数作为空间曲线的逼近函数，可以表示如下：

$$\begin{cases} y = a_1 + a_2x + a_3x^2 + a_4x^3 \\ z = b_1 + b_2x + b_3x^2 + b_4x^3 \end{cases} \quad (3-35)$$

将两条平面曲线的拟合统一表示为最小二乘的标准形式。

$$Y_N = [y_1 \ \dots \ y_N \ z_1 \ \dots \ z_N]^T, \quad \theta = [a_1 \ a_2 \ a_3 \ a_4 \ b_1 \ b_2 \ b_3 \ b_4]^T$$

$$\Phi_N = \begin{bmatrix} x_1 & \dots & x_N & 0 & \dots & 0 \\ 1 & \dots & 1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \dots & 0 & z_1 & \dots & z_N \\ 0 & \dots & 0 & 1 & \dots & 1 \end{bmatrix}^T$$

则有

$$\theta = (\Phi_N^T \Phi_N)^{-1} \Phi_N^T Y_N \quad (3-36)$$

局部加权曲线拟合方法的过程如下：

(1)  $D_i$  为数据窗中的第  $i$  数据，记为  $D_i = (x_i, y_i, z_k)$ ，得到局部动态数据窗  $L$ ，其中数据  $L_{n+1} = D_i$ 。

(2) 设  $s_i = \frac{D_{i+1} - D_i}{r_i}$ ， $r_i = \sqrt{(x_{i+1} - x_i)^2 + (y_{i+1} - y_i)^2 + (z_{i+1} - z_i)^2}$ ，

计算  $\mu_i = \frac{1}{2n} \sum_{j=1}^{2n} s_j$ ,  $\sigma_i = \sqrt{\sum_{j=1}^{2n} (s_j - u_i)^2 / 2n - 1}$ ; 计算

$$\mu_i = \frac{1}{2n-2} \sum_{j=1; j \neq n, n+1}^{2n} s_j, \sigma_i = \sqrt{\sum_{j=1; j \neq n, n+1}^{2n} (s_j - u_i)^2 / 2n - 2}.$$

(3) 计算数据的加权值  $w_i = f\left(\frac{\sigma_i}{\sigma_i}\right)$ ,

$$f(x) = \begin{cases} \frac{1}{x^2} & x \geq 3 \\ \frac{1}{x} & 3 \geq x \geq 1 \\ 1 & x < 1 \end{cases} \quad (3-37)$$

(4) 重复上面三个过程对每个数据  $D_i$ , 计算权值  $w_i$ ,  $i=1, 2, \dots, N$ 。

(5) 设  $W = \text{diag}[w_1 \ w_2 \ \dots \ w_{N-1} \ w_N]$ , 则有

$$\theta_w = (\Phi_N^T (W^T W) \Phi_N)^{-1} \Phi_N^T (W^T W) Y_N \quad (3-38)$$

### 3.4 实验结果

#### 3.4.1 特征抽取

针对粗糙表面和存在不明显的焊缝特征情况下, 进行特征提取实验, 实验结果如图 3-4 所示。图 3-4a 所示为具有粗糙表面和不明显特征的焊缝原始图像。图 3-4b 所示为得到的图像上下边缘和上下边缘的中线, 从图中可见特征点不是很明显。图 3-4c 所示为没有进行数据集合并的分段直线拟合结果, 数据被分为 6 个数据集。图 3-4d 所示为经过合并后最后的处理结果。

#### 3.4.2 参数估计

图 3-5 为采用鲁棒估计算法与基于最小二乘方法估计直线焊缝方向的效果比较图。图 3-6 为采用鲁棒估计算法与基于最小二乘方法估计法线方向的效果比较图。从图中可以看出鲁棒估计方法可以得到更好的效果, 估计的参数波动很小。

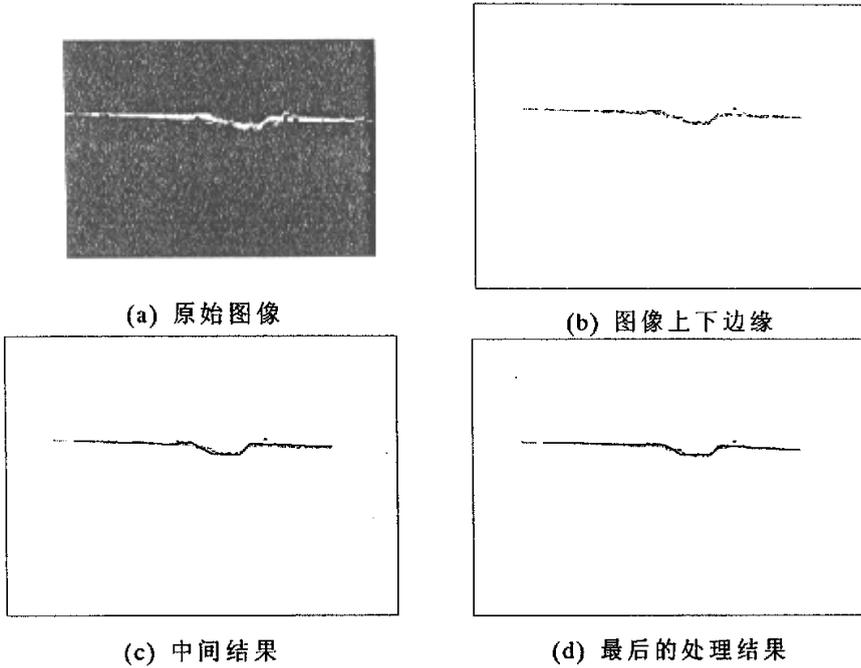


图 3-4 焊缝特征点抽取

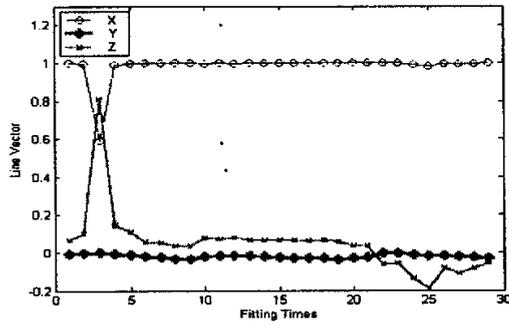


图3-5a 采用直接最小二乘方法的拟合结果

图 3-7 为局部加权曲线拟合方法的实验结果，图中离散的圆点是在跟踪过程中所采集到的一系列特征点的空间坐标。粗线为采用局部加权曲线拟合方法的拟合结果，细线为一般最小二乘方法的拟合结果。从图中可以看出对于一些具有较大偏差的数据点，最小二乘受到的影

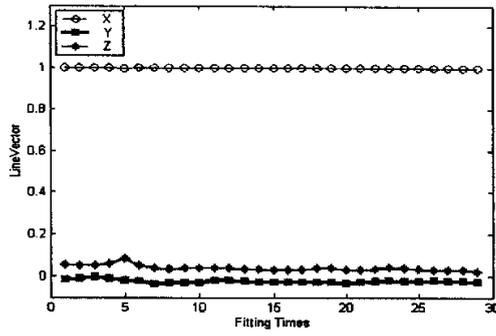


图3-5b 采用鲁棒拟合方法的拟合结果

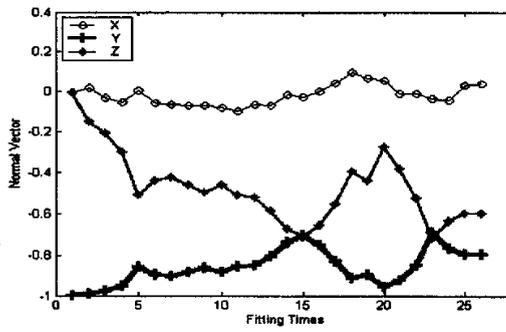


图3-6a 采用直接最小二乘方法的拟合结果

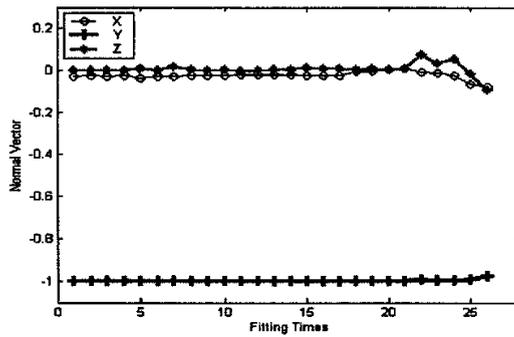


图3-6b 采用RANSAC方法的拟合结果

响较大，而改进的加权最小二乘拟合方法对这些点具有较强的鲁棒性。

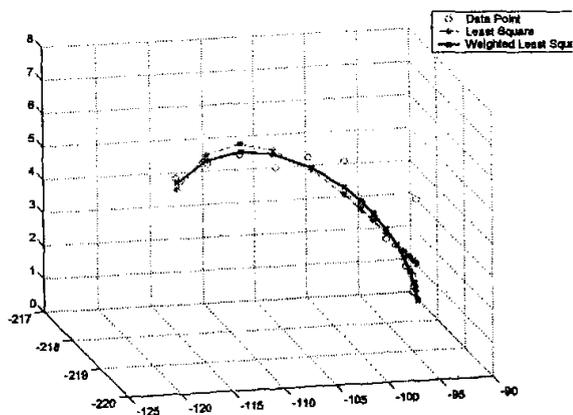


图 3-7 局部加权曲线拟合方法

### 3.5 本章小结

本章主要研究了在噪声环境下如何提高特征提取和焊缝参数估计的精度和鲁棒性，通过实验可以得出如下结论：

- (1) 目标区域确定算法可以得到较“小”的区域，减少计算量。
- (2) 基于数据集分割的特征提取算法具有一定的通用性。

(3) 采用基于鲁棒估计思想的算法进行参数拟合时，无论是直线焊缝方向的估计，渐变的焊件平面法线还是曲线的拟合相比单纯采用最小二乘方法具有更好的精度。

## 第四章 基于六自由度焊接机器人的焊缝视觉跟踪研究

工业机器人已经广泛应用在工业生产的各个领域，其中焊接仍然是最主要的应用领域之一。工业机器人在焊接领域的应用，有助于提高生产率，保证焊接质量并避免焊接作业对人健康的损害，因此对焊接机器人的研究具有重要的实际应用价值。焊接机器人的工作方式以示教或离线编程为主，其加工过程只是简单地重复预先设定的动作，这种方式效率低、缺乏灵活性，而且不适用复杂工件，并且在加工对象的状态发生变化时，加工质量一般不能满足要求。工业生产正向着更高柔性的方向发展，要求焊接机器人具有一定的通用性和灵活性，所以提高焊接机器人的智能是发展的方向<sup>[1]</sup>。焊缝自动跟踪是提高焊接机器人智能程度的前提，也是当前所面临的主要问题之一。

近年来，视觉传感器已用于焊缝检测以提高性能，利用视觉传感器的机器人焊缝跟踪技术，不需要预先对工业机器人的运动轨迹进行示教或离线编程，可节约大量的编程时间，并提高生产效率和加工质量<sup>[1,2]</sup>。针对直线焊缝的自动跟踪，已取得了令人满意的跟踪精度<sup>[2]</sup>。而实际中存在较多的曲线焊缝，所以研究较复杂的曲线焊缝的视觉跟踪在实际生产中具有重要意义<sup>[68,69,70,71]</sup>。

对于基于视觉传感器的焊接机器人，当前面临的一个重要问题是如何提高自动焊接机器人的鲁棒性，目前主要是通过提高图像处理的性能来提高目标识别的准确性，此外智能方法也广泛地应用到自动焊接系统的控制和目标识别<sup>[54][55]</sup>。

本章以六自由度机器人为背景，分析了直线和曲线焊缝视觉跟踪任务中所面临的主要问题，针对直线焊缝视觉跟踪提出了位姿自动调整算法和一种混合的视觉伺服方法；针对曲线焊缝视觉跟踪提出了协调焊枪运动和视觉跟踪的视觉伺服控制方法。

### 4.1 基于视觉引导的焊接机器人初始位姿自动调整方法

焊接工艺对焊枪相对于焊接工件的相对位置有要求，要求焊枪与

焊接工件的法线成  $15^\circ$  角，且要求焊枪与焊缝方向共面。对于基于视觉引导的六自由度焊接机器人，除了上述的工艺要求外还要求焊缝图像特征在视场中的合适位置，理想初始位姿如图 4-1 所示。为了使焊接机器人的初始位姿满足上述要求，需要使用机器人控制盒进行多次操作，对于不了解机器人的工作人员还需进行培训。为了方便视觉引导的焊接机器人的使用，本节设计了焊接机器人初始位姿自动调整算法。

初始位姿自动调整算法是建立一个基于工艺要求的理想坐标系，根据机器人当前位姿建立工具坐标系，在此基础上计算机器人的运动量，使两个坐标系重合。

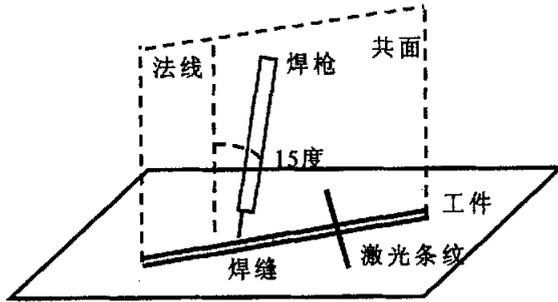


图 4-1 理想初始位姿示意图

理想坐标系  $\Sigma T_t$  和工具坐标系  $\Sigma T_c$  的建立如图 4-2，工具坐标系  $\Sigma T_c$  的坐标轴为虚线，理想坐标系  $\Sigma T_t$  的坐标轴为实线。

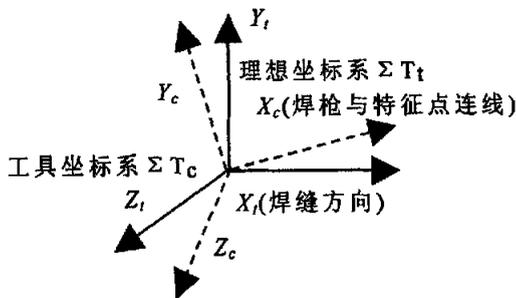


图 4-2 理想坐标系与工具坐标

- 采用如下方法建立理想坐标系  $\Sigma T_t$ ：

以焊缝方向作为理想坐标系  $\Sigma T_t$  的  $X$  轴矢量  $X_t$ ，可通过特征点的直线拟合确定。设  $N$  为工件平面的法线矢量。利用下式计算理想坐标系  $\Sigma T_t$  的  $Z$  轴矢量  $Z_t$ 。

$$Z_t = X_t \times N \quad (4-1)$$

通过下式确定理想坐标系  $\Sigma T_t$  的  $Y$  轴矢量  $Y_c$ ：

$$\begin{cases} X_t \cdot Y_t = 0 \\ Z_t \cdot Y_t = 0 \end{cases} \quad (4-2)$$

· 采用如下方法建立工具坐标系  $\Sigma T_c$ ：

设 *TorchPoint* 为焊枪枪尖的空间坐标， $N$  为工件平面的法线矢量，*Torch* 为焊枪矢量， $F$  为图像特征点的空间坐标。向量  $L$  为定义在工具坐标系  $\Sigma T_c$  的辅助向量，由下式得到：

$$L = \frac{F - TorchPoint}{\|F - TorchPoint\|} \quad (4-3)$$

工具坐标系  $\Sigma T_c$  的  $Z$  轴矢量  $Z_c$  由下式得到：

$$Z_c = L \times N \quad (4-4)$$

通过下式确定工具坐标系  $\Sigma T_c$  的  $Y$  轴矢量  $Y_c$ ：

$$\begin{cases} \langle Y_c, Torch \rangle = 15^\circ \\ Z_c \cdot Y_c = 0 \end{cases} \quad (4-5)$$

通过下式确定  $X$  轴矢量：

$$\begin{cases} X_c \cdot Y_c = 0 \\ X_c \cdot Z_c = 0 \end{cases} \quad (4-6)$$

计算机器人运动控制量：

$T_t$  为建立在机器人末端的目标坐标系， $T_c$  为建立在机器人末端的当前坐标系， $T_6$  为机器人末端相对于基坐标系的关系矩阵。设  $R_m$ ， $t_m$  为相对于机器人末端的调整旋转矩阵和平移量，则有

$$T_6 \cdot T_t = T_6 \cdot R_m \cdot T_c \quad (4-7)$$

$$R_m = T_t T_c^{-1} \quad (4-8)$$

当前图像特征的空间坐标记为  $X_F$ ，保证调整前后图像特征在基坐标系的位置不变，则有

$$t_m = (I - R_m) X_F \quad (4-9)$$

其中  $I$  为单位矩阵。

## 4.2 混和视觉伺服方法

本节提出一种混和的视觉伺服方法，在内环采用笛卡儿空间的位置控制，外环分为两部分，沿焊缝方向的移动采用笛卡儿空间的位置视觉控制，焊缝跟踪中的纠偏采用图像空间的视觉控制。

### 4.2.1 图像空间到机器人末端笛卡儿空间的 Jacobian 矩阵

将笛卡儿空间点  $P$  在机器人末端坐标系中的坐标记为  $[x_w, y_w, z_w]$ ，在摄像机坐标系中的坐标记为  $[x_c, y_c, z_c]$ ，在图像空间中的坐标记为  $[u, v]$ 。当  $z_c=1$  时， $[x'_c, y'_c, 1]$  即为点  $P$  在成像平面上的坐标。由摄像机的小孔成像模型，有：

$$z_c \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = M_i \begin{bmatrix} x_c \\ y_c \\ z_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_x & 0 & u_0 \\ 0 & a_y & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_c \\ y_c \\ z_c \end{bmatrix} \quad (4-10)$$

其中， $M_i$  为内参数矩阵， $[a_x, a_y]$  为成像平面坐标到图像坐标的放大系数， $[u_0, v_0]$  为光轴中心的图像坐标。

$$\begin{bmatrix} x'_c \\ y'_c \\ 1 \end{bmatrix} = M_i^{-1} \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} \quad (4-11)$$

激光条纹上的点  $P$  在过光轴中心与点  $[x'_c, y'_c, 1]$  的直线上。因此，有下式成立：

$$\begin{cases} x_c = x'_c t \\ y_c = y'_c t \\ z_c = t \end{cases} \quad (4-12)$$

同时，激光条纹上的点  $P$  在激光平面上。设在摄像机坐标系下激光平面方程为：

$$ax + by + cz + 1 = 0 \quad (4-13)$$

由式(4-12)和式(4-13)，得：

$$\begin{bmatrix} x_c \\ y_c \\ z_c \end{bmatrix} = - \left( \begin{bmatrix} a & b & c \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x'_c \\ y'_c \\ 1 \end{bmatrix} \right)^{-1} \begin{bmatrix} x'_c \\ y'_c \\ 1 \end{bmatrix} \quad (4-14)$$

点  $P$  在机器人末端坐标系中的坐标为：

$$\begin{bmatrix} x_w \\ y_w \\ z_w \\ 1 \end{bmatrix} = M_0 \begin{bmatrix} x_c \\ y_c \\ z_c \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m_x & n_x & o_x & p_x \\ m_y & n_y & o_y & p_y \\ m_z & n_z & o_z & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_c \\ y_c \\ z_c \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R & \bar{p} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_c \\ y_c \\ z_c \\ 1 \end{bmatrix} \quad (4-15)$$

其中， $M_0$  为摄像机相对于机器人末端的外参数矩阵， $R$  为旋转变换矩阵， $\bar{p}$  为位置矢量。

将式(4-15)对时间求导数，有：

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_w \\ \dot{y}_w \\ \dot{z}_w \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R & \bar{p} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{x}_c \\ \dot{y}_c \\ \dot{z}_c \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{x}_c \\ \dot{y}_c \\ \dot{z}_c \\ 0 \end{bmatrix} \Rightarrow \begin{bmatrix} \dot{x}_w \\ \dot{y}_w \\ \dot{z}_w \\ 0 \end{bmatrix} = R \begin{bmatrix} \dot{x}_c \\ \dot{y}_c \\ \dot{z}_c \\ 0 \end{bmatrix} \quad (4-16)$$

将式(4-11)代入式(4-14)，并对时间求导数，得：

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \dot{x}_c \\ \dot{y}_c \\ \dot{z}_c \end{bmatrix} &= - \left( \begin{bmatrix} a & b & c \\ & & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_c \\ y_c \\ z_c \\ 1 \end{bmatrix} \right)^{-1} \begin{bmatrix} \dot{x}_c \\ \dot{y}_c \\ \dot{z}_c \\ 0 \end{bmatrix} + \left( \begin{bmatrix} a & b & c \\ & & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_c \\ y_c \\ z_c \\ 1 \end{bmatrix} \right)^{-2} \left( \begin{bmatrix} a & b & c \\ & & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{x}_c \\ \dot{y}_c \\ \dot{z}_c \\ 0 \end{bmatrix} \right) \begin{bmatrix} x_c \\ y_c \\ z_c \\ 1 \end{bmatrix} \\ &= \frac{1}{\left[ \frac{a}{a_x}(u-u_0) + \frac{b}{a_y}(v-v_0) + c \right]^2} \begin{bmatrix} -\frac{b}{a_x a_y}(v-v_0) - \frac{c}{a_x} & \frac{b}{a_x a_y}(u-u_0) & 0 \\ \frac{a}{a_x a_y}(v-v_0) & -\frac{a}{a_x a_y}(u-u_0) - \frac{c}{a_y} & 0 \\ \frac{a}{a_x} & \frac{b}{a_y} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{u} \\ \dot{v} \\ 0 \end{bmatrix} \\ &= \frac{1}{D^2} \begin{bmatrix} -\frac{b}{a_x a_y}(v-v_0) - \frac{c}{a_x} & \frac{b}{a_x a_y}(u-u_0) \\ \frac{a}{a_x a_y}(v-v_0) & -\frac{a}{a_x a_y}(u-u_0) - \frac{c}{a_y} \\ \frac{a}{a_x} & \frac{b}{a_y} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{u} \\ \dot{v} \end{bmatrix} \\ &= J_c(u,v) \begin{bmatrix} \dot{u} \\ \dot{v} \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (4-17)$$

其中， $J_c(u,v)$  即从图像空间到摄像机坐标系笛卡儿空间的 Jacobian 矩阵， $D = a(u-u_0)/a_x + b(v-v_0)/a_y + c$  为结构光的平面方程约束。

将式(4-17)代入式(4-16)，即可得到从图像空间到机器人末端笛卡儿空间的 Jacobian 矩阵：

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_w \\ \dot{y}_w \\ \dot{z}_w \end{bmatrix} = J(u, v) \begin{bmatrix} \dot{u} \\ \dot{v} \end{bmatrix} \Rightarrow \begin{bmatrix} dx_w \\ dy_w \\ dz_w \end{bmatrix} = J(u, v) \begin{bmatrix} du \\ dv \end{bmatrix} \quad (4-18)$$

其中， $d$  表示微分。

$$J(u, v) = RJ_c(u, v) = \frac{1}{D^2} R \begin{bmatrix} -\frac{b}{a_x a_y} (v - v_0) - \frac{c}{a_x} & \frac{b}{a_x a_y} (u - u_0) \\ \frac{a}{a_x a_y} (v - v_0) & -\frac{a}{a_x a_y} (u - u_0) - \frac{c}{a_y} \\ \frac{a}{a_x} & \frac{b}{a_y} \end{bmatrix} \quad (4-19)$$

式(4-19)是图像平面上的一个特征点的微分运动与机器人末端平移微分运动之间的 Jacobian 矩阵。其中， $[a_x, a_y]$ 为成像平面坐标到图像坐标的放大系数， $[u_0, v_0]$ 为光轴中心的图像坐标， $R$ 为摄像机相对于机器人末端的外参数中的旋转变换矩阵， $a$ 、 $b$ 、 $c$ 为激光平面方程参数。这些参数可以通过摄像机标定和激光器标定获得。

#### 4.2.2 机器人弧焊混合视觉伺服控制模型

机器人弧焊混合视觉伺服控制框图如图 4-3 所示，由沿焊缝移动控制、焊缝纠偏控制、机器人位置控制、图像特征提取部分构成。

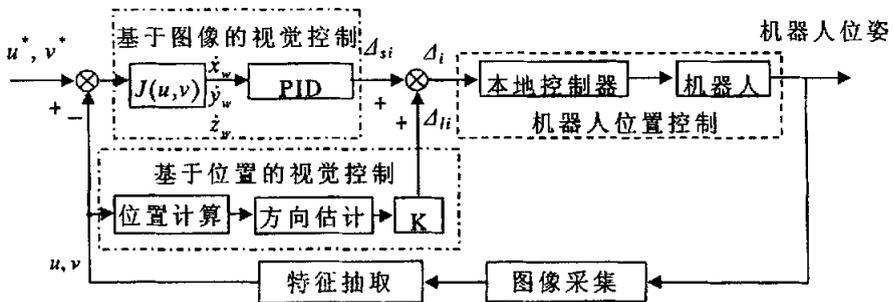


图4-3 混和视觉伺服控制方框图

沿焊缝移动采用笛卡儿空间的位置视觉控制。根据第  $i$  时刻采集到的结构光图像，获得激光条纹上的特征点  $P_i$  的图像坐标  $u_i'$  和  $v_i'$ ，由式(4-11)、式(4-14)和式(4-15)可以计算出点  $P_i$  在机器人末端坐标系下

的坐标  $[x_{wi}, y_{wi}, z_{wi}]$ 。根据上次机器人末端的运动量  $\Delta l_i$ ，可以计算出  $P_{i-1}$  在当前机器人末端坐标系下的坐标  $[x_{wi-1}, y_{wi-1}, z_{wi-1}]$ 。由  $[x_{wi-1}, y_{wi-1}, z_{wi-1}]$  和  $[x_{wi}, y_{wi}, z_{wi}]$  可以确定出焊缝方向。为降低随机因素的影响，可以采用  $n+1$  个特征点  $P_{i-n} \sim P_i$  在当前机器人末端坐标系下的坐标，拟合出焊缝方向。对焊缝方向矢量乘以比例系数  $K$ ，作为机器人末端的运动量  $\Delta l_i$ 。沿焊缝移动控制将测量的焊缝方向作为给定值，控制机器人的运动，沿焊缝移动过程中，必然会产生偏差，利用图像空间的视觉伺服控制进行焊缝纠偏。根据给定的图像坐标  $[u, v]$  和特征点  $P_i$  的图像坐标  $[u_i', v_i']$ ，计算图像坐标偏差  $[du_i, dv_i]$  和当前图像 Jacobian 矩阵的估计值  $\hat{J}(u, v)$ ，利用式(4-19)计算出  $[d\hat{x}_w, d\hat{y}_w, d\hat{z}_w]$ 。以其作为机器人末端的位置误差，利用 PID 控制算法求得机器人末端的微分运动量  $\Delta s_i$ 。将  $\Delta s_i$  与控制沿焊缝移动的机器人末端运动量  $\Delta l_i$  叠加，作为机器人末端的运动量  $\Delta_i$ ，即  $\Delta_i = \Delta s_i + \Delta l_i$ 。机器人位置控制根据机器人末端的运动量  $\Delta_i$  控制机器人运动，首先计算机器人末端在基坐标系下的位姿，经逆运动学求解获得各个关节的位置值，由关节控制器控制各个关节的运动。机器人位置控制由机器人本身的控制装置完成。沿焊缝移动控制、焊缝纠偏控制和图像特征提取由计算机完成。

$$\Delta l_i = K \cdot \vec{l} \quad (4-20)$$

其中， $\vec{l} = [l_x \ l_y \ l_z \ 0 \ 0 \ 0]$ ， $l_x$ ， $l_y$ ， $l_z$  为拟合直线向量的分量。 $K$  为比例系数， $K$  的大小决定了机器人运动快慢。

$\Delta s_i$  可根据下面公式计算

$$\Delta e_i = J(u_i, v_i) \Delta(u_i, v_i) \quad (4-21)$$

$$\Delta s_i = K_p \cdot \Delta e_i + K_i \cdot \sum_{j=1}^i \Delta e_j \quad (4-22)$$

$$\Delta_i = \Delta s_i + \Delta l_i = K \cdot \vec{l} + K_p \Delta e_i + K_m \sum_{j=1}^i \Delta e_j \quad (4-23)$$

其中  $\Delta(u_i, v_i) = [u_i^* - u_{li} \quad v_i^* - v_{li} \quad \dots \quad u_N^* - u_{Ni} \quad v_N^* - v_{Ni}]$ ， $(u_i^*, v_i^*)$ ， $i=1, \dots, N$  为第  $i$  个特征点的参考坐标， $(u_{ij}, v_{ij})$ ， $i=1, \dots, N$ ， $j=1, \dots, M$  为第  $i$  个特征点第  $j$  次控制周期的观测坐标。

### 4.3 曲线焊缝跟踪的视觉伺服协调控制

本节提出了协调焊枪运动和视觉跟踪的视觉伺服控制方法，首先对运动与图像特征变化关系进行了分析，并依此关系来确定旋转轴。其次，设计了模糊视觉伺服控制器，建立了运动与图像特征的数学模型，设计了带有模型动态补偿的 Kalman 滤波器对图像特征进行准确预测以确定控制输出论域。

#### 4.3.1 曲线焊缝视觉跟踪所面临的主要问题

图 4-4 所示为曲线焊缝的外观形状，图 4-5 所示为曲线焊缝跟踪的工作过程。曲线焊缝视觉跟踪需要完成两个任务，一是要保证焊枪点

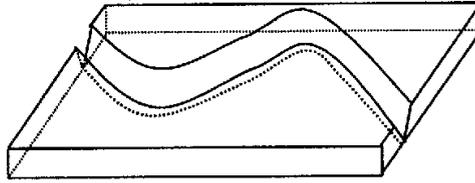


图 4-4 曲线焊缝示意图

以高的精度跟踪焊缝，二是要保证跟踪过程中获得连续、稳定的视觉信息，即保证激光条纹沿着焊缝移动以及图像特征始终存在于摄像机视场内。任务一直接决定了焊接的质量，任务二决定了能否得到连续的视觉信息，决定了视觉跟踪的成败。这样就需要协调两个任务以保

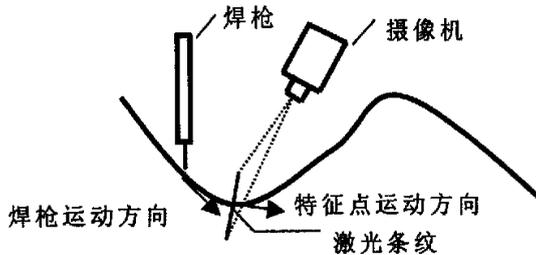


图 4-5 曲线焊缝跟踪示意图

证曲线焊缝视觉跟踪任务的完成。对于第一个任务，可以根据所得的一系列图像特征点在末端坐标系下的坐标拟合出在当前焊枪所处位置下的曲线，进而得到在下一时刻焊枪点的运动位置。由于在这一过

程中无法引入反馈控制，这样对曲线拟合的精度要求较高。对于第二个任务要保证图像特征始终存在于摄像机视场内，并且要保证激光条纹与焊缝成一个合适的角度，以便通过图像处理算法获得正确的图像特征。在执行第二个任务时还应该兼顾跟踪过程中机器人运动的平滑性。在实际焊接中，采用视觉方法获取信息，不可避免的存在大量的噪声，图 4-6 所示为存在噪声的图像。因此在实现上述两个任务时必须考虑如何降低噪声的不利影响，针对此类问题，采用的策略是：将机器人的运动分解为旋转运动和平移运动，通过旋转运动实现视觉跟踪的连续，通过平移运动保证焊枪的运动精度。

由于平移运动和旋转运动同样作用于图像特征控制以及焊枪位置控制，所以需要分析平移与旋转运动的关系。在已知旋转运动的前提下，可以通过平移运动来保证焊枪的运动位置。

设  $Torch=[Torch_x \quad Torch_y \quad Torch_z]^T$  为焊枪末端点在坐标系下的坐标。 $\Delta Torch=[\Delta Torch_x \quad \Delta Torch_y \quad \Delta Torch_z]$  为焊枪末端点在当前工具坐标系下的相对运动。 $I$  为单位矩阵。 $R$ 、 $T$  为相对于当前工具坐标系的旋转矩阵和平移向量。经过相对于工具坐标系的旋转和平



图 4-6 带有噪声干扰的焊缝特征图像

移，焊枪末端点在移动前的工具坐标系中的位置为：

$$Torch + \Delta Torch = RTorch + T \quad (4-24)$$

整理得到平移向量以及平移运动与旋转运动的关系：

$$(I - R)Torch + \Delta Torch = T \quad (4-25)$$

#### 4.3.2 曲线焊缝跟踪的视觉伺服协调控制

对机器人的运动控制需要计算机器人的平移以及旋转矩阵。根据上面的分析，旋转矩阵用于保证视觉跟踪过程中图像特征处在视场有效范围内，平移向量用于保证焊枪的沿着焊缝向前运动。通过式(4-25)

可以确定平移与旋转的关系，这样可以将问题转化为机器人旋转矩阵的求解。利用机器人运动与特征点坐标变化的关系，可以确定旋转运动的旋转轴。根据曲线焊缝视觉跟踪对控制的要求，采用动态确定控制量输出论域的模糊控制器来实现以上的控制目标。

#### 4.3.2.1 旋转轴的确定

由图 4-5 可知理想的曲线焊缝跟踪应为焊枪向前运动  $\Delta Torch$ ，通过结构光视觉得到的图像特征点也相应的在焊缝方向上运动  $\Delta Feature$ 。在机器人系统中，焊枪和摄像机的位置相对于机器人末端是固定的。因此，需要分析能否通过机器人的运动来满足这些要求。

设  $X_k = (x_k, y_k, z_k)^T$  为特征点在工具坐标系下的坐标， $P = (p_x, p_y, p_z)$  为结构光平面上某点的坐标。设结构光的平面方程为

$$a(x_k - p_x) + b(y_k - p_y) + c(z_k - p_z) = 0 \quad (4-26)$$

$N = (a, b, c)^T$ ，则在当前工具坐标系下结构光平面方程可表示为：

$$N^T \cdot (X_k - P) = 0 \quad (4-27)$$

$X_k$  为特征点在工具坐标系下的坐标，满足(4-27)。如果相对于当前末端坐标系运动  $R_k$  和  $T_k$ ，得到新的特征点  $X_{k+1}$ ，则满足如下方程：

$$(R_k N)^T \cdot (X_{k+1} - R_k P - T_k) = 0 \quad (4-28)$$

将式(4-25)代入可得，

$$(R_k N)^T \cdot (X_{k+1} - R_k P - (I - R_k)Torch - \Delta Torch) = 0 \quad (4-29)$$

设  $X_{k+1} = X_k + \Delta Feature$ ，带入上式

$$N^T \cdot (R_k^{-1} X_k + R_k^{-1} \Delta Feature - P - (R_k^{-1} - I)Torch - R_k^{-1} \Delta Torch) = 0 \quad (4-30)$$

将式(4-27)带入上式可得：

$$N^T \cdot (R_k^{-1} X_k + R_k^{-1} \Delta Feature - X_k + (I - R_k^{-1})Torch - R_k^{-1} \Delta Torch) = 0 \quad (4-31)$$

$N$  为常数向量，若使上式成立，则有

$$(X_k - Torch + \Delta Feature) - R_k (X_k - Torch + \Delta Torch) = 0 \quad (4-32)$$

设  $\vec{F} = X_k - Torch$ ，则有

$$\vec{F} + \Delta Feature - \Delta Torch = R_k \vec{F} \quad (4-33)$$

旋转矩阵为正交矩阵不改变向量的模长，则运动量满足如下的约束：

$$\|\vec{F}\| = \|\vec{F} + \Delta Feature - \Delta Torch\| \quad (4-34)$$

根据旋量理论<sup>[72]</sup>，任意一个旋转矩阵  $R$  可表示为

$$R = e^{\hat{\omega}\theta} = I + \hat{\omega}\sin\theta + \hat{\omega}^2(1 - \cos\theta) \quad (4-35)$$

其中  $\omega$  为旋转轴， $\theta$  为旋转角度。

$$\hat{\omega} = \begin{bmatrix} 0 & -a_3 & a_2 \\ a_3 & 0 & -a_1 \\ -a_2 & a_1 & 0 \end{bmatrix},$$

$$\omega = [a_1 \ a_2 \ a_3]^T,$$

取  $\omega = (\vec{F}) \otimes (\vec{F} + \Delta Feature - \Delta Torch)$ ， $\otimes$  为叉乘算子。

### 4.3.2.2 模糊视觉伺服控制器的设计

在曲线焊缝视觉跟踪过程中，控制的目标是将特征点的像素坐标控制在以理想像素坐标为中心的一个矩形区域内，还要保证激光条纹与焊缝成一个合适的角度以得到比较理想的图像，同时要兼顾跟踪过程中运动的平滑。由上述控制要求可知视觉伺服控制器完成两个目标的协调，由于这一过程难以建立一个有效的数学模型，故采用模糊控制策略来实现以上控制目标。模糊视觉伺服控制器的鲁棒性通过控制

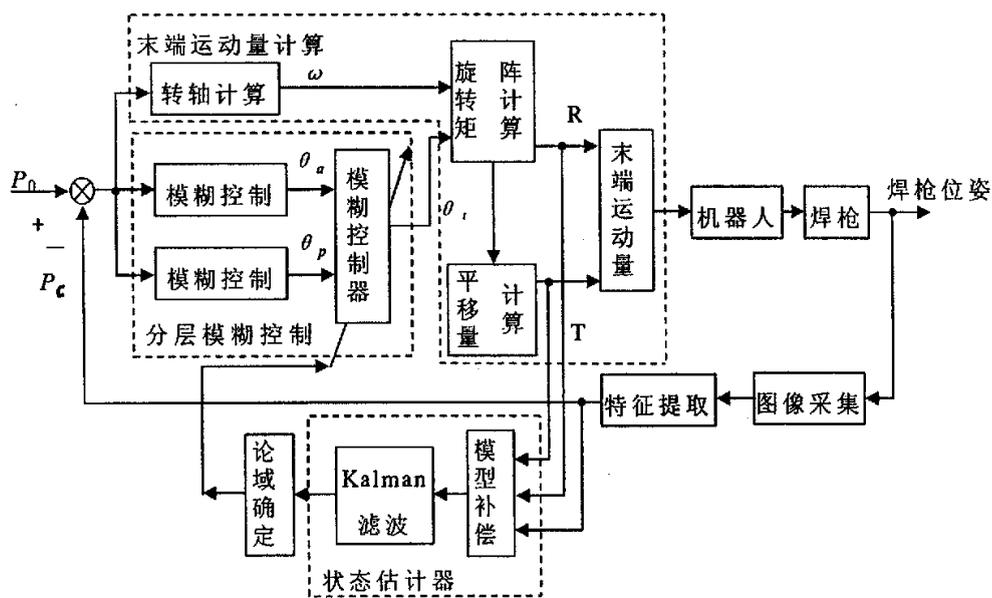


图 4-7 视觉伺服协调控制方框图

量论域的动态确定来实现,由两部分组成,首先建立运动与图像特征的数学模型,其次设计带有模型不确定补偿的 Kalman 滤波器对状态进行预测。由于得到的控制量论域为有效的可行范围,这就保证了视觉特征始终存在于视场中。

图 4-7 为视觉伺服控制器的控制方框图,整个视觉伺服控制器主要由分层模糊控制器、状态估计器和末端运动量计算三个部分组成。分层模糊控制器结合状态估计器,根据当前图像特征的位置计算一个合适的旋转角度。末端运动量计算首先计算旋转轴,然后根据旋转角度确定旋转矩阵和平移量。

### A 模糊控制器的基本结构

基于上面的分析,模糊控制器要控制机器人在两个目标间进行协调。由于两个目标具有相对的独立性,采用一种分层模糊控制结构。下层结构分别根据每个目标计算控制量的模糊输出,模糊控制器的上层结构负责协调两个目标,得出合适的控制量。下层结构由两部分组成:调节像素位置的规则集  $R_p$  和调节激光条纹与焊缝夹角的规则集  $R_a$ 。特征点理想的像素坐标为  $P_0$ ,当前特征点的像素坐标为  $P_c$ ,取当前特征点相对于理想坐标的偏差  $e$  及偏差变化  $\dot{e}$  作为  $R_p$  规则集的输入,机器人旋转角度  $\theta_p$  作为输出。激光条纹与焊缝所成夹角  $\alpha$  作为规则集  $R_a$  的输入,机器人旋转角度  $\theta_a$  作为输出。其中  $e$  模糊集合中采用 5 个模糊化量级,表示为 {NB, NS, ZO, PS, PB},  $\dot{e}$  模糊集合中采用三个模糊化量级,表示为 {N, Z, P}。 $\alpha$  模糊集合中采用 5 个模糊化量级,表示为 {NB, NS, ZO, PS, PB}。 $\theta_p, \theta_a$  在输出模糊集合中采用 5 个模糊化量级,表示为 {NB, NS, ZO, PS, PB}。所有输入输出语言变量的隶属度函数均定义在  $[-1, 1]$  区间内。输入的模糊归一化等级分别设定为  $\{e\} = \{-1, -0.7, 0, 0.7, 1\}$ ,  $\{\dot{e}\} = \{-1, 0, 1\}$ 。上层结构的规则集  $R_t$  的输入量为  $\theta_p, \theta_a$ , 输出量为  $\theta_t$ ,  $\theta_t$  与  $\theta_p, \theta_a$  具有相同的模糊化量级和模糊归一化等级,  $\{\theta_p = \theta_a = \theta_t\} = \{-1, -0.5, 0, 0.5, 1\}$ 。

模糊控制器使用的控制规则如下:

调节像素位置的规则集  $R_p$ :

If  $e$  is PS and  $\dot{e}$  is Z, then  $\theta_p$  is ZO.

.....

If  $e$  is PB and  $\dot{e}$  is N, then  $\theta_p$  is NS.

调节激光条纹与焊缝所成夹角的规则集  $R_p$ :

If  $\alpha$  is PB, then  $\theta_s$  is NB.

If  $\alpha$  is ZO, then  $\theta_s$  is ZO.

.....

If  $\alpha$  is NB, then  $\theta_s$  is PB.

上层结构的规则集  $R_i$ :

If  $\theta_p$  is PB and  $\theta_s$  is PB, then  $\theta_i$  is PB.

If  $\theta_p$  is PS and  $\theta_s$  is NB, then  $\theta_i$  is ZO.

.....

If  $\theta_p$  is ZO and  $\theta_s$  is PB, then  $\theta_i$  is PB.

输入偏差  $e$  和  $\dot{e}$  的隶属函数采用三角形隶属度函数, 输入角度  $\alpha$  的隶属函数采用梯形隶属度函数。采用最大隶属度法解模糊。输入偏差  $e$  的论域为  $[-|P_{max}-P_0|, |P_{max}-P_0|]$ ,  $P_{max}$  计算得到。输入偏差变化  $\dot{e}$  的论域为  $[E_{min}, E_{max}]$  以及角度  $\alpha$  的论域  $[\alpha_{min}, \alpha_{max}]$  可以通过实验设定。输出角度  $\theta_i$  的论域在跟踪过程中动态确定。

## B 模糊控制器控制量论域的动态确定

### (a) 建立图像特征与机器人运动的数学模型

根据结构光三维测量的原理, 特征点可以看作基于工具坐标系下的结构光平面与曲线焊缝交点。由于焊缝为一空间曲线, 为了简化模型可在局部采用直线近似, 直线的斜率为空间曲线的切线。

设  $X(k) = (x_k, y_k, z_k)^T$  为特征点在工具坐标系下的坐标, 直线方程为:  $\frac{x-x_0}{m} = \frac{y-y_0}{n} = \frac{z-z_0}{k}$ , 设  $L_k = (m, n, k)^T$ ,  $P_k = (p_x, p_y, p_z)$  为空间直线上某点的坐标。设结构光的平面方程为  $ax+by+cz=1$ ,  $N = (a, b, c)^T$ , 则特征点坐标可以表示为:

$$X(k) = (N^T L_k)^{-1} (1 - N^T P_k) L_k + P_k \quad (4-36)$$

相对于工具坐标系进行平移  $T_k$  和旋转  $R_k$  操作后, 得到新的状态变量为:

$$X(k+1) = (N^T (R_k L_k))^{-1} (1 - N^T (R_k P_k) + N^T T_k) R_k L_k + R_k P_k + T_k \quad (4-37)$$

其中  $Torch=[Torch_x \quad Torch_y \quad Torch_z]^T$  为焊枪末端点在工具坐标系下的坐标。 $\Delta Torch$  为焊枪末端点在工具坐标系下的相对运动。 $I$  为单位矩阵。

$$c_k = (N^T L_k)^{-1} (1 - N^T P_k) \quad (4-38)$$

$$c_{k+1} = (N^T (R_k^{-1} L_k))^{-1} (1 - N^T (R_k^{-1} P_k) + N^T R_k^{-1} T_k) \quad (4-39)$$

整理可得

$$X_{k+1} = R_k^{-1} X_k + B_k U_k \quad (4-40)$$

$$Y_{k+1} = X_{k+1} \quad (4-41)$$

令  $B_k = R_k^{-1}$ ,  $U_k = (c_{k+1} - c_k) L_k - T_k$ 。

### (b) 状态估计器的设计

在视觉伺服控制回路中, 普遍存在大量的噪声, 以及由此产生的参数误差, 例如摄像机和激光平面的标定误差, 曲线拟合所带来的噪声以及不可避免的图像噪声, 图像处理的误差等等。这些误差和噪声的存在必然会对曲线焊缝跟踪的鲁棒性造成影响, 甚至会造成跟踪失败。对式 (4-40), (4-41) 进行分析可知, 主要的不确定性来自于  $U_k$ 。通过曲线拟合所产生的  $\Delta Torch$  和  $L_k$  必然存在误差, 这将给状态模型带来时变的不确定性。为此, 这里设计了可以对模型不确定性进行补偿的状态估计器。首先对时变的模型不确定进行估计, 将估计补偿到模型中, 然后采用 kalman 滤波器进行准确的状态预测。

设  $Mu_k$  为模型不确定值, 可以得到如下表达式:

$$Mu_k = X_{k+1} - R_k^{-1} X_k - B_k \hat{U}_k \quad (4-42)$$

设  $\hat{U}_k = \Delta \hat{Torch}_k + \hat{t}_k \hat{L}_k$ ,  $\hat{t}_k = \hat{c}_{k+1} - \hat{c}_k$ , 则有

$$Mu_k = B_k (U_k - \hat{U}_k) = B_k (\Delta Torch_k - \Delta \hat{Torch}_k + t_k L_k - \hat{t}_k \hat{L}_k) \quad (4-43)$$

其中  $\Delta \hat{Torch}_k$ ,  $\hat{L}_k$  为通过曲线拟合获得的方向向量。由式 (4-42), (4-43) 可知拟合的误差对  $c_{k+1}$ ,  $c_k$  同样具有影响, 鉴于  $Torch$ ,  $P_k$  以及  $N$  的值比较准确, 以及  $1 - N^T (R_k^{-1} P_k) + N^T ((R_k^{-1} - I) Torch) \gg N^T R_k^{-1} \Delta Torch$ , 由于  $N^T$  为常数向量, 可以认为拟合误差对  $c_{k+1}$ ,  $c_k$  的分母项  $N^T (R_k^{-1} L_k)$ ,  $N^T L_k$  产生影响。在实验过程中  $\hat{t}_k$  的波动最为剧烈对模型的影响最大, 可以做如下假设: 模型的不确定由  $\hat{t}_k$  的波动造成, 将其他对模型不确定的

影响因素和状态噪声统一归为均值为零的高斯噪声。可以对式 (4-43) 简化为:

$$Mu_k = B_k(t_k L_k - \hat{t}_k \hat{L}_k) \quad (4-44)$$

可以得到如下递推公式:

$$Mu_{k+1} = B_{k+1} B_k^{-1} Mu_k + B_{k+1}(t_{k+1} L_{k+1} - t_k L_k) - B_{k+1}(\hat{t}_{k+1} \hat{L}_{k+1} - \hat{t}_k \hat{L}_k) \quad (4-45)$$

由于理想的  $t_k$ ,  $L_k$  为慢时变参数, 可以将上式化简为

$$Mu_{k+1} \approx \tilde{M}u_{k+1} = B_{k+1} B_k^{-1} Mu_k - B_{k+1}(\hat{t}_{k+1} \hat{L}_{k+1} - \hat{t}_k \hat{L}_k) \quad (4-46)$$

对模型不确定进行补偿后, 采用 Kalman 滤波进行状态预测, 则有

$$\hat{X}_{k+1|k} = R_k \hat{X}_{k|k} + B_k U_k + \tilde{M}u_k \quad (4-47)$$

$$P_{k+1|k} = R_k P_{k|k} R_k^T + Q \quad (4-48)$$

$$K_{k+1} = P_{k+1|k} (P_{k+1|k} + R) \quad (4-49)$$

$$\hat{X}_{k+1|k+1} = \hat{X}_{k+1|k} + K_{k+1}(Y_k - \hat{X}_{k|k}) \quad (4-50)$$

$$P_{k+1|k+1} = (I - K_{k+1})P_{k+1|k} \quad (4-51)$$

### (c) 控制量论域的动态确定

控制量论域的动态确定就是根据当前的运动状态以及图像信息, 在数学模型的基础上求出机器人下一时刻可行的运动范围, 以保证视觉跟踪的鲁棒性。

由式 (4-25) 可知, 如旋转运动确定, 则可确定相应的平移运动。于是, 旋转运动成为视觉跟踪的关键, 而输出论域确定决定了旋转角度的求取。将式 (4-25) 带入式 (4-40), 可得新的数学模型为:

$$\tilde{X}_{k+1} = R_k^{-1} \tilde{X}_k - R_k^{-1} \Delta Torch + (c_{k+1} - c_k) R_k^{-1} L_k \quad (4-52)$$

$$Y_{k+1} = \tilde{X}_{k+1} - Torch \quad (4-53)$$

其中  $\tilde{X}_{k+1} = X_{k+1} + Torch$ 。

设  $DP_{k+1}$  为总的噪声补偿值, 包含模型补偿值和 Kalman 观测补偿。

$$DP_{k+1} = Mu_{k+1} + K_{k+1}(Y_k - \hat{X}_{k|k}) \quad (4-54)$$

设  $P^*$  为理想像素坐标,  $\varepsilon$  为矩形边长,  $T_R, T_t$  为变换矩阵,  $T_R X_k + T_t = P_k$ , 其中  $P_k$  为对应  $X_k$  的像素坐标, 则有如下不等式成立:

$$\|T_R(R_k^{-1}\tilde{X}_k - R_k^{-1}\Delta Torch + (c_{k+1} - c_k)R_k^{-1}L_k - DP_{k+1}) - T_RTorch + T_i - P^*\| < \frac{\varepsilon}{2} \quad (4-55)$$

$$\begin{aligned} & \|T_RT_R^{-1}(\tilde{X}_k - \Delta Torch + (c_{k+1} - c_k)L_k - DP_{k+1})\| - \|T_RTorch - T_i + P^*\| \\ & \leq \|T_R(R_k^{-1}\tilde{X}_k - R_k^{-1}\Delta Torch + (c_{k+1} - c_k)R_k^{-1}L_k - DP_{k+1}) - T_RTorch + T_i - P^*\| < \frac{\varepsilon}{2} \end{aligned} \quad (4-56)$$

令  $m = [\varepsilon/2 \quad \varepsilon/2]^T$ ，则有：

$$\begin{aligned} & -m + T_RTorch + P^* - T_i + T_RDP_{k+1} < T_RT_R^{-1}(\tilde{X}_k - \Delta Torch + (c_{k+1} - c_k)L_k) \\ & < m + T_RTorch + P^* - T_i + T_RDP_{k+1} \end{aligned} \quad (4-57)$$

根据旋量理论,任意一个旋转矩阵  $R = e^{\hat{\omega}\theta} = I + \hat{\omega}\sin\theta + \hat{\omega}^2(1 - \cos\theta)$ , 其中  $\omega$  为旋转轴,  $\theta$  为旋转角度。

$$\begin{aligned} & \frac{[1 - N^T P_k + N^T \Delta Torch + 2 \sin \frac{\theta}{2} N^T (-\hat{\omega} \cos \frac{\theta}{2} + \hat{\omega}^2 \sin \frac{\theta}{2})(P_k - Torch - \Delta Torch)]^T}{[N^T L_k + 2 \sin \frac{\theta}{2} N^T (-\hat{\omega} \cos \frac{\theta}{2} + \hat{\omega}^2 \sin \frac{\theta}{2})L_k]} \\ & - \frac{1 - N^T P_k}{N^T L_k} = c_{k+1} - c_k \end{aligned} \quad (4-58)$$

鉴于  $\|P_k - Torch - \Delta Torch\|_2 \gg \|L_k\|_2$ ,  $|1 - N^T P_k + N^T \Delta Torch| \gg |N^T L_k|$ ,  $c_{k+1} - c_k$  是旋转角度  $\theta$  的慢时变单调函数, 则用  $c_{k+1} - c_k = (c_{k+1} - c_k)|_{\theta=0} = C_k$  近似逼近真实值。

设  $u_k = C_k L_k - \Delta Torch$ , 则有

$$\begin{aligned} & -m + T_RTorch + P^* - T_i + T_RDP_{k+1} + T_R(\tilde{X}_k + u_k) < T_R(\hat{\omega}^2(1 - \cos\theta) - \hat{\omega}\sin\theta)(\tilde{X}_k + u_k) \\ & < m + T_RTorch + P^* - T_i + T_RDP_{k+1} + T_R(\tilde{X}_k + u_k) \end{aligned} \quad (4-59)$$

其中  $\omega$  为单位向量, 则可将  $\hat{\omega}^2(1 - \cos\theta) - \hat{\omega}\sin\theta$  近似为  $\hat{\omega}^* \sin\theta$ , 可得

$$\hat{\omega}^* = \begin{bmatrix} -(a_3^2 + a_2^2) & a_3 & -a_2 \\ -a_3 & -(a_1^2 + a_3^2) & a_1 \\ a_2 & -a_1 & -(a_1^2 + a_2^2) \end{bmatrix}$$

$$\begin{aligned} & -m + T_RTorch + P^* - T_i + T_RDP_{k+1} + T_R(\tilde{X}_k + u_k) < \sin\theta T_R \hat{\omega}^*(\tilde{X}_k + u_k) \\ & < m + T_RTorch + P^* - T_i + T_RDP_{k+1} + T_R(\tilde{X}_k + u_k) \end{aligned} \quad (4-60)$$

设  $T_RTorch + P^* - T_i + T_RDP_{k+1} + T_R(\tilde{X}_k + u_k) = q_k$ ,  $T_R \hat{\omega}^*(\tilde{X}_k + u_k) = q_0$ , 鉴于在跟踪过程中像素坐标的  $y$  轴分量变化很小, 则可得  $\theta$  的一个可行的取值范围为:  $(-m + q_k)_1 / (q_0)_1 < \sin\theta < (m + q_k)_1 / (q_0)_1$ 。

#### 4.4 实验结果

实验系统由上位计算机、机器人本地控制器、Yaskawa UP6 机器人本体、摄像机、激光器、电焊机、送丝机、焊枪、CO<sub>2</sub> 气瓶等构成。由上位计算机进行图像特征提取，根据视觉伺服控制算法输出机器人末端的运动量  $\Delta_i$  给机器人本地控制器，由机器人本地控制器控制机器人运动。摄像机、激光器和焊枪均安装于机器人的末端，激光束在焊缝上形成的条纹在焊点前方，距离焊枪尖约 25mm。采集的图像幅度为 768×576 像素。在对摄像机和激光器进行标定后，可求得摄像机的内参数和外参数以及激光平面在摄像机坐标系中的平面方程。实验焊缝分别为直线和曲线焊缝，形状为搭接焊缝和 V 形焊缝，焊丝直径 1mm，焊接收弧电流设定为 15A。采用 CO<sub>2</sub> 保护焊，雨滴过渡。摄像机加装窄带滤光片，只允许选定波长的激光透过。

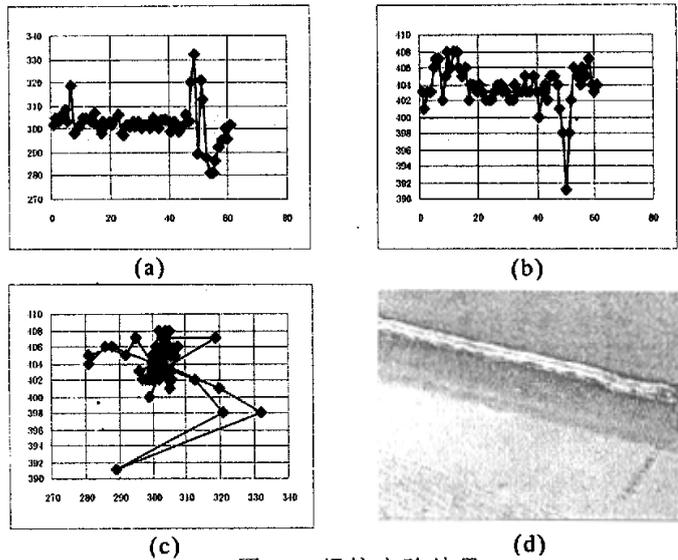


图 4-8 焊接实验结果

图 4-8 为采用混和视觉伺服方法进行搭接焊缝焊接的实验结果。图 4-8 (a)为实验过程中  $u'$  的变化情况，纵坐标为  $u'$  的图像坐标，横坐标为时间，单位为 s。图 4-8 (b)为  $v'$  的变化情况，纵坐标为  $v'$  的图像坐标，横坐标为时间，单位为 s。图 4-8 (c)为特征点坐标  $[u', v']$  的变化情况，纵坐标为  $u'$  的图像坐标，横坐标为  $v'$  的图像坐标。图 4-8 (d)

为焊接出的焊缝，焊接轨迹结束段附近的跑偏，是由于在焊缝上有一小块杂物，导致提取的特征点坐标存在较大偏差。

图 4-9、图 4-10、图 4-11 为采用曲线焊缝跟踪视觉伺服协调控制方法的实验结果，实验中所用的数据都是在实际焊缝跟踪中采集得到的。图 4-9 为直接根据数学模型计算出的坐标值与实际观测值之间的偏差。图 4-10 为采用 Kalman 滤波器得到的状态估计值与实际观测值之间的偏差。图 4-11 为带有模型补偿的 Kalman 滤波器得到的状态估计值与实际观测值之间的偏差。由图 4-9 可以看出直接采用模型计算方法得到的状态与测量值差距很大，在实际中焊枪点单步移动步长为 2mm，所以直接采用模型计算方法无法起到状态预测的作用。由图 4-10 可知 kalman 滤波方法比较有效，相比图 4-12，误差减少了一个数量级。在对图 4-11 和图 4-10 进行对比可以发现，采用模型动态补偿的状态预测相比直接采用 Kalman 进行状态估计，从与测量值偏差的数量级来看是一致的，但误差的波动幅值较小，比较平滑。

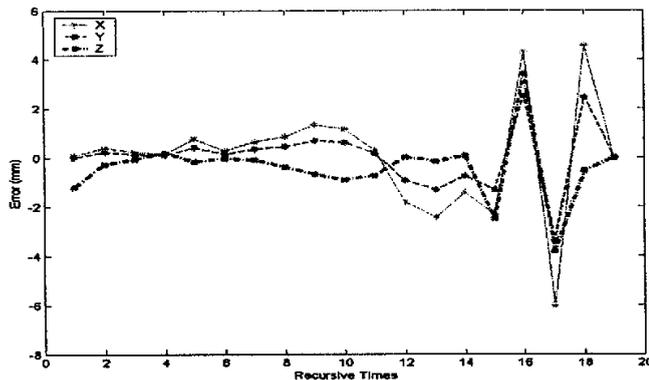


图 4-9 采用模型计算值与实际测量值的偏差

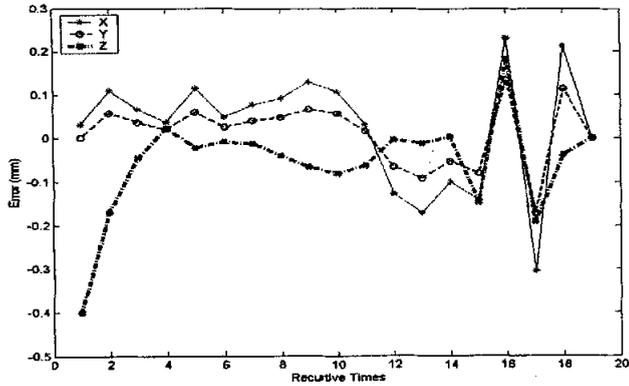


图 4-10 采用 Kalman 状态估计值与实际观测值之间的偏差

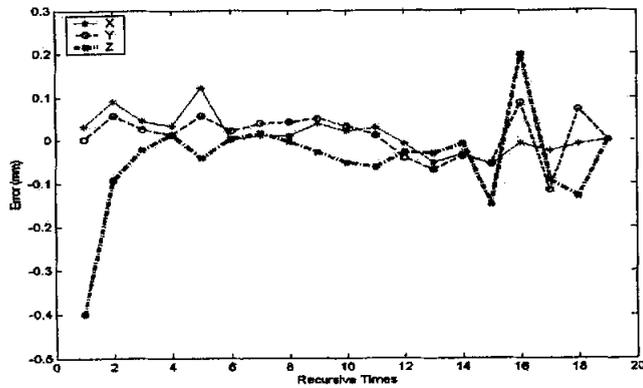


图 4-11 带有模型补偿的 Kalman 状态估计值与实际观测值之间的偏差

图 4-12 展示了跟踪过程中动态确定的旋转角度有效范围。设置的像素坐标变化的有效范围为  $x$  轴  $[200,568]$ ,  $y$  轴  $[200,476]$ , 图像大小为  $768 \times 576$ 。求出的有效旋转角度的上下限与实际量测值的最大差值相比小于  $0.6^\circ$ 。通过下述方法进行实际量测：记录当前机器人的绝对位置，试探一个角度，计算机器人的运动量并下发。量测运动后的像素位置是否达到设定范围的边缘，如果没有达到或超出，返回原位置，重新试探。

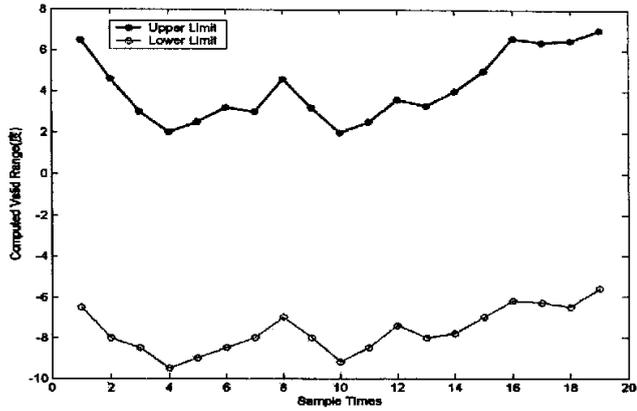


图 4-12 动态确定的旋转角度有效范围

图 4-13 展示了图像特征的像素坐标变化情况。图中  $y$  轴像素坐标变化很小，这是由于通过选择合适的旋转轴使得特征点的深度信息变化很小。图中  $x$  轴像素坐标的变化体现了控制策略，当像素坐标靠近安全范围的中心时，可以增加旋转的角度，当接近安全范围的边界时，平移运动或适当反向旋转，将像素坐标控制在一个安全范围内。

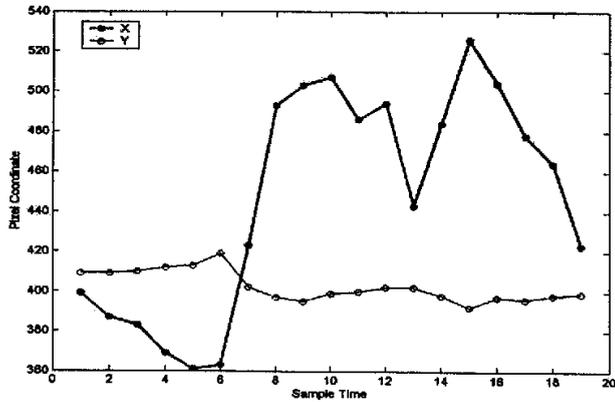


图 4-13 跟踪过程中的像素变化

## 4.5 本章小结

本章分析了 6 自由度焊接机器人在执行焊缝视觉跟踪任务中所面临的主要问题，针对直线焊缝提出的一种混合视觉伺服控制，在内环采用笛卡儿空间的位置控制，外环分为位置控制和图像控制，沿焊缝方向的移动采用笛卡儿空间的位置视觉控制，焊缝跟踪中的纠偏采用图像空间的视觉控制。此外为了方便基于视觉传感器焊接机器人的使用，设计了初始位姿自动调整算法。针对曲线焊缝，提出了协调焊枪运动和视觉跟踪的视觉伺服控制方法。采用平移运动保证焊枪运动的准确性，采用旋转运动保证视觉跟踪过程中图像特征处在视场有效范围内。实验验证了方法的有效性。

通过本章的研究可以得到如下结论：

- (1) 基于视觉引导的焊接机器人初始位姿自动调整算法可以比较准确的调整机器人的初始位姿，减少人的参与。
- (2) 混和的视觉伺服控制方法可有效控制机器人沿着焊缝方向运动并进行准确的调整。
- (3) 视觉伺服协调控制可将视觉跟踪以及焊枪的调整结合起来，有效跟踪曲线焊缝。
- (4) 在预测特征点坐标过程中采用模型补偿结合 kalman 滤波器可以取得比较好的预测效果。
- (5) 模糊控制器的控制变量论域的动态确定可以起到提高视觉伺服鲁棒性的作用。

## 第五章 基于工业焊接小车的视觉伺服控制算法研究

随着工业领域技术水平的不断提高,焊接自动化技术日益受到产业界的关注。经过多年的研究开发,自动焊接设备的运行机构已发展成下列五种形式:平焊位置的焊接小车,全位置焊接行走机构,横梁轨道行走机构,立柱横梁操作机,龙门式操作机以及工业机器人<sup>[74]</sup>。焊接小车成本低,操作空间大,是直线焊缝焊接方面应用比较广泛的运行机构,已经大量应用于船舶制造以及石油储罐制造等领域。但是焊接小车在工作过程中仍需要人的参与,不能完成自动焊接的任务。因此,研究与开发视觉传感器引导的具有自动焊缝跟踪能力的焊接小车,具有广泛的应用前景。

采用视觉传感器的焊缝自动跟踪在实际应用中已经取得了一些进展,但如何提高自动焊接设备的鲁棒性,以保证在强外界噪声干扰下仍能准确地跟踪焊缝,依然是自动焊接所面临的一个重要问题。通过提高图像处理的性能来提高目标识别的准确性,是采取的主要措施之一。例如,Kuo等将模糊方法用于焊缝的识别,取得了好的识别效果<sup>[54]</sup>;Jae等采用模糊方法有效地克服图像噪声的影响<sup>[55]</sup>。但由于焊接环境下的外部噪声很强,很难保证图像处理算法在任何时候都能得到满意的图像特征,所以在设计视觉伺服控制系统过程中,需要赋予系统一定的容错能力。

本章以工业用焊接小车为研究背景,针对折线焊缝的自动跟踪与焊接中的技术难题,提出了提高跟踪精度和鲁棒性的视觉伺服方法。

### 5.1 焊接小车视觉控制系统

#### 5.1.1 系统组成及原理

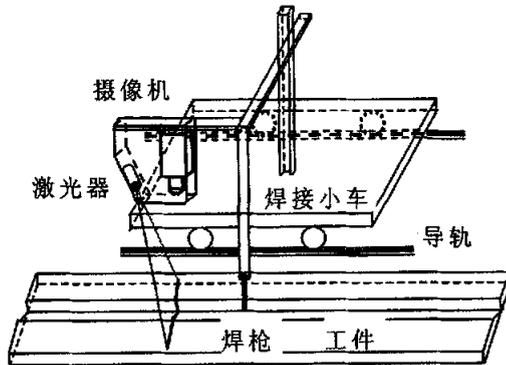


图 5-1 焊接小车结构组成

焊接小车视觉伺服控制系统由一个工业用焊接小车，机头，焊接电源，视觉传感器以及控制计算机等组成。工业用焊接小车包含车体，一个驱动小车前进的直流电机等组成。机头由焊枪，自动送丝装置，以及两自由度位置调节装置构成。位置调节装置由两个步进电机，以及滚珠丝杠传动装置构成，可实现对焊枪位置上下、左右两个方向的调整。视觉传感器包含 1 个摄像机，图像采集卡，激光器等。控制计算机装有图像采集卡和 I/O 等外围板卡。图 5-1 所示为焊接小车视觉控制系统的结构组成示意图。安装摄像机时，使摄像机的光轴中心线平行于位置调节装置的上下调节轴，并使图像的水平轴方向平行于位置调节装置的左右调节轴。焊接小车作为运行机构带动焊枪运动，图像采集卡用于采集焊缝的激光结构光图像，工业计算机进行图像处理得到图像特征，并控制步进电机进行相应的调整。

焊接小车视觉伺服控制系统的工作过程可以描述如下：首先调整好焊枪和激光束的初始位置，保证焊枪对准焊缝，结构光图像处在摄像机视场的合适位置。此时，经图像处理获得初始位置的焊缝特征像素坐标，作为参考像素坐标。当焊接小车在直流电机的驱动下沿着导轨向前运动时，图像采集卡不断将当前图像采集到计算机，通过图像处理算法得出特征点的像素坐标，根据图像特征的像素坐标与参考像素坐标的差值计算步进电机的控制量，保证焊枪始终在理想的焊接位置。该系统没有对摄像机进行内外参数的标定，只是通过简单测量建立起像素坐标差值与控制脉冲之间的粗略关系。

### 5.1.2 面临的主要问题

焊缝视觉跟踪所面临的一个主要问题，是如何克服工作环境中存在的大量噪声干扰，并使视觉伺服控制系统具有一定的容错能力，即使出现错误数据，仍能保证系统运行的稳定性和精度。其次，实际的焊接作业需要进行复杂焊缝的焊接，很多复杂焊缝由分段直线焊缝组成。由图 5-1 和图 5-2 可见，激光束与焊枪之间存在位置延迟，在实现折线焊缝的自动视觉跟踪时，应避免焊枪没有到达另一直线焊缝之前进行调整而产生偏差。该系统中已知信息较少，仅有步进电机的控

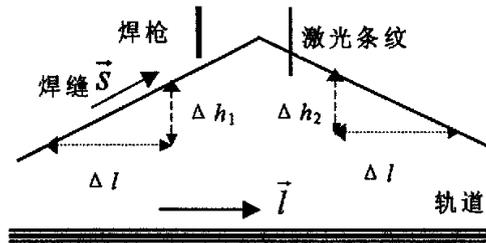


图 5-2 焊缝跟踪原理图

制脉冲数，以及图像特征的像素坐标。需要解决的主要问题可以概括为：如何对特征的图像数据进行有效的处理，避免由于错误的图像数据所导致的跟踪精度降低。如何进行模型检测，在存在图像噪声以及错误数据的情况下，根据图像坐标的变化和输入的控制量辨识焊缝方向的变化。如何提高控制精度，减少震荡。

## 5.2 数据处理算法

### 5.2.1 系统模型建立

由图 5-2 可知，在小车沿导轨方向  $\vec{l}$  前进单位长度  $\Delta l$  时，焊缝特征点发生的偏移  $\Delta h_1$  或  $\Delta h_2$  反映了焊缝  $\vec{s}$  方向与导轨方向的偏差，可以据此建立视觉伺服系统的模型。像素坐标的变化和两个因素有关：焊缝特征点发生的偏移和控制量。设  $p_k = (x_k \ y_k)$  为  $k$  时刻图像特征的像素坐标。设在  $k$  时刻  $x$  轴控制量为  $Ux_k$ ， $y$  轴控制量为  $Uy_k$ 。设在一个

采样周期内, 由于焊缝方向  $\bar{s}$  与小车前进方向  $\bar{l}$  不一致产生的像素偏差为  $e_x$ , 由于焊接工件的法线与小车移动平面的法线不一致产生的像素偏差为  $e_y$ 。  $\Delta h_1$ ,  $\Delta h_2$  与  $e_x$  具有对应关系, 如果焊缝为一条直线, 则  $e_x$ ,  $e_y$  为常值, 如果焊缝由不同直线组成, 则  $e_x$ ,  $e_y$  发生改变。  $\gamma_x$ ,  $\gamma_y$  为控制脉冲相对于像素坐标的比例系数。则系统模型可以建立如下:

$$x_{k+1} = x_k + \gamma_x Ux_k + e_x \quad (5-1)$$

$$y_{k+1} = y_k + \gamma_y Uy_k + e_y \quad (5-2)$$

整理可得:

$$X_{k+1} = X_k + BU_k \quad (5-3)$$

$$Y_k = X_k \quad (5-4)$$

其中,  $X_k = \begin{pmatrix} x_k \\ y_k \end{pmatrix}$ ,  $B = I$ ,  $U_k = \begin{pmatrix} \gamma_x & 0 \\ 0 & \gamma_y \end{pmatrix} \begin{pmatrix} Ux_k \\ Uy_k \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} e_x \\ e_y \end{pmatrix}$

$x_k$ ,  $x_{k+1}$ ,  $y_k$ ,  $y_{k+1}$ ,  $Ux_k$ ,  $Uy_k$  为已知量, 需要估计  $\gamma_x$ ,  $\gamma_y$ ,  $e_x$ ,  $e_y$ 。

式(5-1)为  $x$  轴模型, 令  $Ex_k = x_{k+1} - x_k$ ,

可得

$$\hat{X}_x = (A_x^T A_x)^{-1} A_x^T Y_x \quad (5-5)$$

其中  $Y_x = \begin{pmatrix} Ex_1 \\ Ex_2 \\ \dots \\ Ex_{N-1} \end{pmatrix}$ ,  $A_x = \begin{pmatrix} Ux_1 & 1 \\ Ux_2 & 1 \\ \dots & 1 \\ Ux_{N-1} & 1 \end{pmatrix}$ ,  $X_x = \begin{pmatrix} \gamma_x \\ e_x \end{pmatrix}$

式(5-2)为  $y$  轴模型, 其参数估计同上。

### 5.2.2 错误数据检测算法

一般地，可以假设图像数据包含的随机误差服从均值为零的高斯分布。但是，由于图像处理本身算法的不完善以及工作环境中光照条件的突然变化，有时图像数据中会包含有错误数据。在这种情况下，基于最小二乘理论的参数估计方法无法得到一个比较理想的模型，也不能保证跟踪的精度。因此，需要设计一种算法，尽可能的消除错误数据对系统性能的影响。假设错误数据出现的频率较低，为一短暂的数据尖峰。设存放像素坐标的数据窗长度为  $N$ ，数据为  $P_i, i=1, 2, \dots, N$ ， $P_{ref}=(x_{ref}, y_{ref})$  为参考像素坐标。 $w_i, i=1, 2, \dots, N$ ，为数据的加权系数。为了提高错误数据检测算法的鲁棒性，根据当前像素坐标的变化以及控制脉冲的变化，对数据进行判断。以图像特征的  $x$  轴像素坐标为例，错误数据的检测算法如下：

(1) 计算  $Px_i = x_i - x_{ref}$ ，如果  $|Px_i| > Px_T$ ，执行步骤(2)，否则  $w_i = 1$

(2) 计算  $Cx_i = Ux_i - (x_i - x_{i-1} - e_x) / \gamma_x$ ，如果  $|Cx_i| > Cx_T$ ，执行步骤(3)，否则  $w_i = 1$

(3) 计算检测数据点的二阶导数  $Ex_i = (x_{i+2} - x_{i+1}) - (x_{i+1} - x_i)$ ，如果  $|Ex_i| < Ex_T$ ， $w_i = 1$ ，否则  $w_i = 0$ 。

(4) 计算统计特征，
$$\mu_p = \frac{1}{\sum_{i=1}^N w_i} \sum_{i=1}^N w_i \cdot x_i,$$

$$\sigma_p = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N w_i \cdot (x_i - \mu)^2}{(\sum_{i=1}^N w_i - 1)}}, \quad \mu_t = \frac{1}{\sum_{i=1}^N w_i} \sum_{i=1}^N w_i \cdot [Ux_i - (x_i - x_{i-1} - e_x) / \gamma_x],$$

$$\sigma_c = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N w_i \cdot [Ux_i - (x_i - x_{i-1} - e_x) / \gamma_x - \mu_t]^2}{(\sum_{i=1}^N w_i - 1)}},$$

(5) 自适应阈值的确定， $Px_T = 3\sigma_p$ ， $Cx_T = 3\sigma_c$

### 5.3 视觉伺服控制算法研究

为解决焊枪与激光束之间的位置迟滞给跟踪折线焊缝带来的偏差过大问题，这里采用一种自适应在线调整的方法，将不同的直线焊缝看成不同的模型，在跟踪过程中实时在线辨识焊缝模型，根据辨识的结果对参考像素坐标和控制量进行实时调整，图 5-3 所示为视觉伺服控制的方框图。

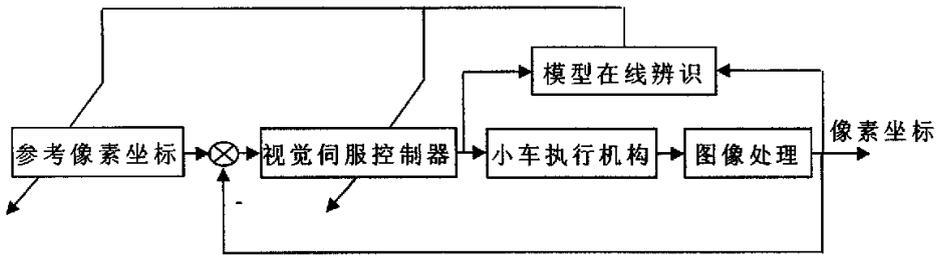


图 5-3 视觉伺服控制方框图

#### 5.3.1 基于 Kalman 滤波器的焊缝方向变化观测器

为了实现折线焊缝的跟踪，需要在线辨识模型，并判断焊缝方向是否发生变化。本节设计了一个基于 Kalman 滤波器的焊缝方向变化观测器，这种方法是在采用 Kalman 滤波器对一个已辨识模型进行预测，当焊缝方向发生变化时，相应的  $e_x$ ,  $e_y$  也会发生变化。如果按原来模型进行状态预测时，预测结果同观测值会产生较大的变化，且差值近似为线性关系。

$$\text{设 } Sx_N = \begin{pmatrix} X_k \\ X_{k+1} \\ \dots \\ X_{k+N-1} \end{pmatrix}, \quad \hat{Sx}_N = \begin{pmatrix} \hat{X}_k \\ \hat{X}_{k+1} \\ \dots \\ \hat{X}_{k+N-1} \end{pmatrix}$$

$\hat{X}_{k+i}$  由式(5-6), (5-7), (5-8), (5-9), (5-10)得到。

$$\hat{X}_{k+i|k+i-1} = \hat{X}_{k+i-1|k+i-1} + B_{k+i-1}U_{k+i-1} \quad (5-6)$$

$$P_{k+i|k+i-1} = P_{k+i-1|k+i-1} + Q \quad (5-7)$$

$$K_{k+i} = P_{k+i|k+i-1}(P_{k+i|k+i-1} + R)^{-1} \quad (5-8)$$

$$\hat{X}_{k+i|k+i} = \hat{X}_{k+i|k+i-1} + K_{k+i}(Y_{k+i} - \hat{X}_{k+i-1|k+i-1}) \quad (5-9)$$

$$P_{k+i|k+i} = (I - K_{k+i})P_{k+i|k+i-1} \quad (5-10)$$

$$U_{k+i-1} = \begin{pmatrix} \gamma_x & 0 \\ 0 & \gamma_y \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \sum_{j=1}^{i-1} Ux_{k+j} \\ \sum_{j=1}^{i-1} Uy_{k+j} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} (i-1)^* e_x \\ (i-1)^* e_y \end{pmatrix} \quad (5-11)$$

计算累计偏差  $E_s$ ,

$$E_s = \sum_{i=1}^N (X_{k+i} - \hat{X}_{k+i}) \quad (5-12)$$

计算偏差向量  $E_l$ ,

$$E_l = Sx_N - \hat{S}x_N \quad (5-13)$$

计算偏差向量的线性度判别函数:

$$\rho_x = \frac{\text{cov}(E_l, M)}{\sqrt{D(E_l)} \cdot \sqrt{D(M)}} \quad (5-14)$$

其中  $M = (1, 2, \dots, N)$ 。

计算焊缝方向变化检测算法的判断向量:

$$\bar{F} = W_s i + \rho_x j \quad (5-15)$$

如果  $|E_s| > E_T$ , 则  $W_s = 1$ , 否则  $W_s = 0$ 。  $E_T$  为阈值。

通过计算向量  $\bar{F}$  的角度来判断焊缝方向是否发生变化。

### 5.3.2 参考像素坐标的调整算法

参考像素坐标的调整量可以通过两种方法得到。假设已知焊枪与激光束的距离  $L$ , 设小车沿着导轨的运动速度为  $v$  (cm/min)。

第一种方法是通过计算延时时间来得到新的参考像素坐标  $P'_{ref} = P_{kn}$ , 其中  $P_{k0}$  为记录的折线转折点。设采样时间为  $t_k$ 。满足下面两

个条件:

$$\left(\sum_{i=k_0}^{k_1} t_i\right) \geq \frac{L}{v}, \quad \left(\sum_{i=k_0}^{k_1-1} t_i\right) < \frac{L}{v};$$

第二种方法通过焊缝方向与小车前进方向的偏差计算参考像素坐标。设初始的参考像素坐标为  $P_{ref}$ , 则有新的参考像素坐标  $P'_{ref}$  计算如下:

$$P'_{ref} = P_{ref} + \frac{L}{v} \cdot \begin{pmatrix} e_x \\ e_y \end{pmatrix} \quad (5-16)$$

参考像素坐标对系统性能影响很大, 第一种方法比较准确但易受噪声数据的干扰, 第二种方法鲁棒性强但精度不高。鉴于此本节设计了带有加权因子  $\zeta$  的参考像素坐标调整算法,  $\zeta$  用于判断实时测量数据的可信度, 然后再采用 Kalman 滤波器进行状态估计。假设通过观测得到的像素坐标与基于模型计算得到的像素坐标的偏差服从均值为零的高斯分布, 计算统计特征。设当前数据窗长度为  $M$ ,  $p_k$  为第  $k$  个测量特征点的像素坐标,  $p'_k$  为通过模型计算的第  $k$  个特征点的像素坐标。

$$\mu = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M (p_i - p'_i) \quad (5-17)$$

$$\sigma = \sqrt{\sum_{i=1}^M (p_i - p'_i - \mu)^2 / (M - 1)} \quad (5-18)$$

设  $p_c$  为测量特征点的像素坐标,  $p'_c$  为通过模型计算的像素坐标。则有

$$\zeta = \begin{cases} \frac{1}{[(p_c - p'_c)/\sigma]^2} & (p_c - p'_c)/\sigma \geq 3 \\ \frac{1}{(p_c - p'_c)/\sigma} & 3 \geq (p_c - p'_c)/\sigma \geq 1 \\ 1 & (p_c - p'_c)/\sigma < 1 \end{cases} \quad (5-19)$$

用上式分别确定  $x$  轴与  $y$  轴的加权因子  $\zeta_x$  和  $\zeta_y$  后, 可得加权矩阵  $K_\zeta$

$$K_{\zeta} = \text{diag}[\zeta_x \ \zeta_y]$$

采用 Kalman 滤波器对参考像素坐标进行估计,  $K_{\zeta}$  反映了当前测量值的可信度。

$$\hat{X}_{k+1|k+1} = \hat{X}_{k+1|k} + K_{k+1} K_{\zeta} (Y_k - \hat{X}_{k|k}) \quad (5-20)$$

其他计算公式同式(5-7), (5-8), (5-9), (5-10)。

### 5.3.3 混和结构控制算法

由于图像数据不可避免存在较多的噪声, 为了减少随机的图像特征偏差对跟踪性能的影响, 我们采用预测与实时调整相结合的控制结构, 实时调整采用 PI 控制, 预测部分根据已发出控制脉冲和图像特征坐标的变化确定。两部分在整个控制量的比重通过加权系数调整。

设  $UPx_k$  为根据预测得到的控制量,  $\alpha$  为加权系数。以  $x$  轴控制量的计算为例, 可得:

$$Ux_k = \alpha \cdot UPx_k + (1 - \alpha) \cdot [K_p \cdot (x_k - x_{ref}) + K_i \cdot \sum_{j=1}^k (x_k - x_{ref})] \quad (5-21)$$

鉴于控制对象模型为线性结构, 采用带有遗忘因子的加权最小二乘来拟合每个控制周期的理想控制量。设数据窗长度为  $N$ , 遗忘因子为  $\rho$ 。则有:

$$UPx_k = [A^T (W^T W) A]^{-1} A^T (W^T W) Y \quad (5-22)$$

$$\text{其中 } Y = \begin{pmatrix} \sum_{i=k-N+1}^k Ux_i - \gamma_x (x_k - x_{ref}) \\ \sum_{i=k-N+1}^{k-1} Ux_i - \gamma_x (x_{k-1} - x_{ref}) \\ \dots \\ Ux_{k-N+1} - \gamma_x (x_{k-N+1} - x_{ref}) \end{pmatrix}, \quad A = \begin{pmatrix} N & 1 \\ N-1 & 1 \\ \dots & \dots \\ 1 & 1 \end{pmatrix}, \quad W = \text{diag}[1 \ \rho \ \dots \ \rho^{N-1}]。$$

## 5.4 实验结果

实验系统由一个工业用焊接小车，视觉传感器和工业计算机组成。视觉传感器包含一个 CCD 摄像机，滤光片，图像采集卡，激光器。由工业计算机进行图像特征提取，根据视觉伺服控制算法输出步进电机的控制脉冲。图 5-4 所示为实验所使用的工业焊接小车，摄像机、激光器和焊枪的安装位置如图 5-4 和图 5-1 所示，激光束在焊缝上形成的条纹在焊点前方，距离焊枪尖约 125mm。采集的图像幅度为 768×576 像素。

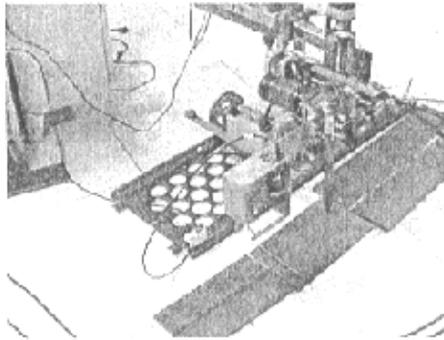


图 5-4 焊接小车结构图

当跟踪一条直线焊缝时，得到像素坐标将围绕参考坐标上下波动。跟踪折线焊缝时存在一过渡过程，即从激光束扫到另一条直线焊缝到焊枪也到达新的直线焊缝。在这个过程中像素坐标将渐变或同参考像素坐标具有较大差异。当焊枪也到达新的直线焊缝后，过渡过程结束，像素坐标将围绕新的参考像素坐标上下波动。

实验一验证了错误数据检测算法，实验结果如图 5-5a 和图 5-5b。图 5-5a 为跟踪过程中像素坐标的变化过程，从图中可见有三个采样点为错误数据。图 5-5b 为采样数据的权值，1 为有效数据，0 为错误数据，同图 5-5a 相对应。由此可知错误数据检测算法对于抑制错误数据对焊缝跟踪的影响是有效的。

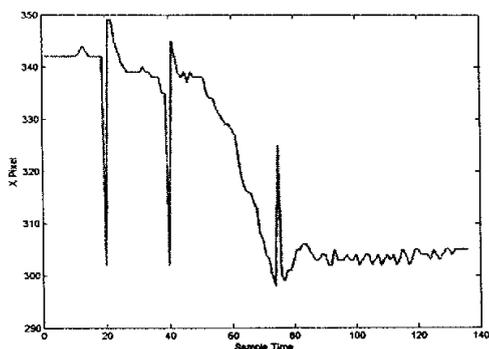


图 5-5a 折线焊缝跟踪过程中  
像素坐标变化曲线

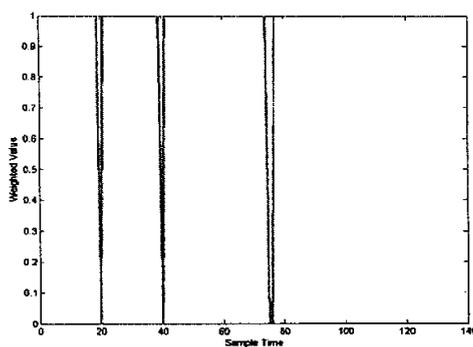


图 5-5b 折线焊缝跟踪过程中数据  
的加权值曲线

实验 2 验证了焊缝方向变化检测算法, 实验结果如图 5-6a, 图 5-6b, 图 5-6c, 图 5-6d 所示。从图中可见在第 70 个采样点附近模型发生了变化, 从第 70 个采样点开始到第 84 个采样点大约 15 个数据来

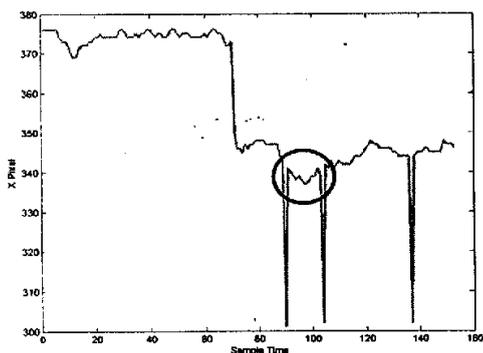


图 5-6a 模型变化检测过程中  
像素坐标变化

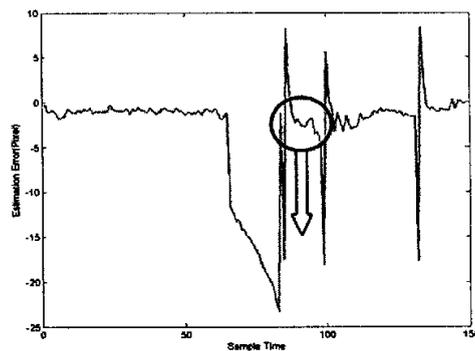


图 5-6b Kalman 滤波器预测像素坐标  
与实际观测的差值

检测模型是否发生变化。由图 5-6b 可以看出近似为直线的大约 15 个采样点即为检测阶段, 预测与实际观测的像素坐标成线性关系。图 5-6b 中后段估计值与实际测量值偏差较大是由于错误数据的影响。由于错误数据的存在容易误判焊缝方向发生变化, 图 5-6a 中存在两个相邻很近的错误数据, 第 90 个采样点和第 104 个采样点。图 5-6c 所示为第 91 个采样点到 100 个采样点的估计值与实际观测的偏差。图 5-6d 所示

为第 91 个采样点到 105 个采样点的估计值与实际观测的偏差。图 5-6d 相比较图 5-6c 多了 5 个采样点且第 104 个采样点为错误数据。根据式 (5-12), (5-13), (5-14), 计算第 70 个采样点开始到第 84 个的采样点累计偏差  $E_s$  为 234.3701, 偏差向量的线性度为 0.9277, 第 90 个采样点和第 100 个采样点累计偏差  $E_s$  为 35.5341, 偏差向量的线性度为 0.6018, 第 90 个采样点和第 104 个采样点累计偏差  $E_s$  为 93.0223, 偏差向量的线性度为 0.3761。在实际中取  $4.0 \times N$  做为累计偏差的阈值,  $N$  为检测数据个数。取 0.5 为线性度判断的阈值。根据以上数据可以得出第 70 个采样点开始到第 84 个的采样点焊缝方向发生变化, 第 91 个采样点到 105 个采样点焊缝方向没有发生变化。有此可知, 基于 Kalman 滤波器的焊缝方向变化检测算法具有较强的鲁棒性。

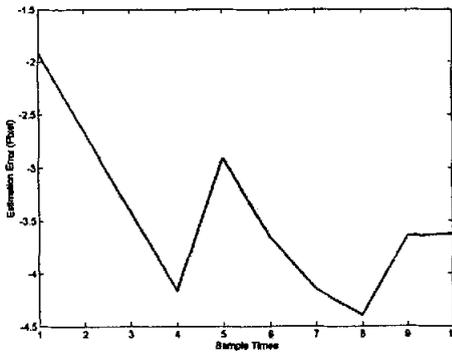


图 5-6c 检测段 1 估计像素坐标  
与实际观测的差值

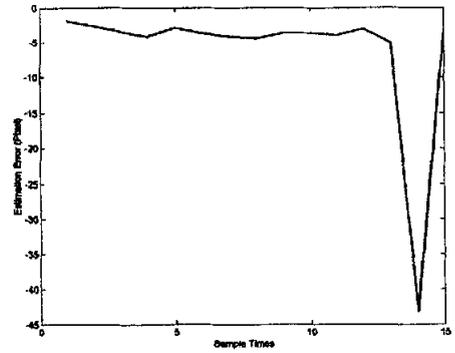


图 5-6d 检测段 2 估计像素坐标  
与实际观测的差值

实验三验证了参考像素坐标调整算法, 实验结果如图 5-7a, 图 5-7b 所示。为了更有效的说明问题, 在参考像素坐标调整阶段为测量结果上加入一些人为噪声, 如图 5-7a 所示。图 5-7b 记录了从检测到焊缝方向发生变化到开始调整参考像素坐标期间的 25 个采样点, 对应于图 5-7a 为第 74 点到 101 点。图 5-7b 中波动小的实线曲线为采用本文的参考像素坐标调整算法的跟踪结果, 计算的参考像素  $x$  坐标为 425。图 5-7b 中波动较大的虚线曲线为直接采用 Kalman 滤波器预测的结果, 最后的参考像素坐标为 429。未更改前的实际测量结果为 424。实线曲线中有三个点的预测偏差较大主要是由于三个点为加入人为干

扰的数据。由此可知，参考像素坐标调整算法在具有干扰数据的情况下仍可以得到满意的结果。

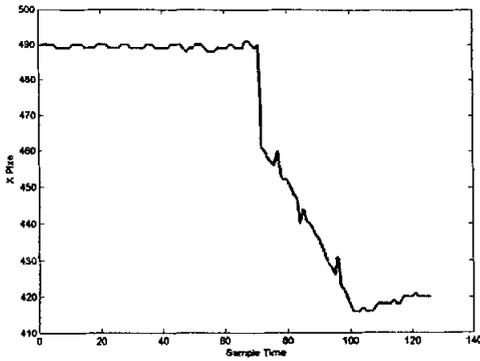


图 5-7a 调整参考像素坐标过程中  
像素坐标变化

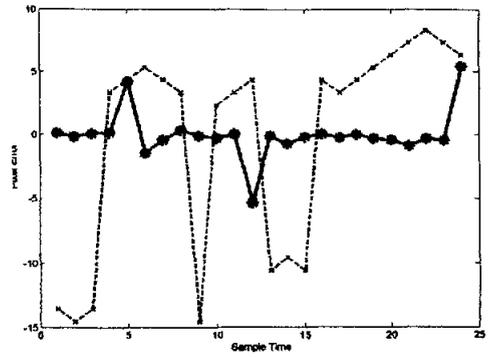


图 5-7b 参考像素坐标调整算法与  
一般 Kalman 预测方法的比较

实验四验证了混和结构的控制算法，实验结果如图 5-8a，图 5-8b 所示。控制脉冲的累加值展示了焊接小车的调节过程，图 5-8a，图 5-8b 比较了两种不同的控制方法对调节过程的影响，从图中可见，采用混和结构的调节过程相比较直接采用 PI 控制器更平滑。

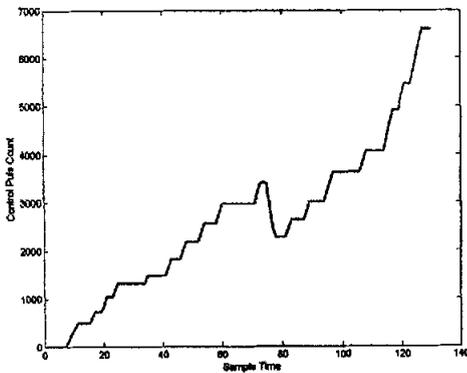


图 5-8a 采用直接 PI 控制  
的控制脉冲累加值

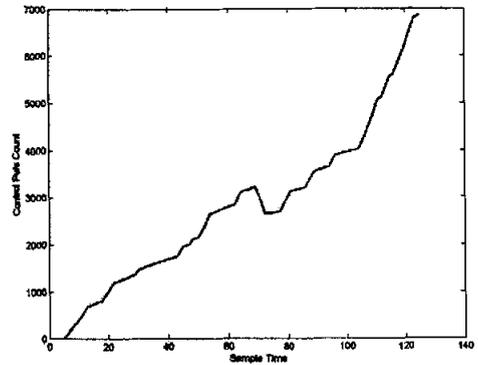


图 5-8b 采用混和控制的  
控制脉冲累加值

## 5.5 本章小结

本章分析了工业用焊接小车在执行折线焊缝视觉跟踪任务中的关键技术问题，提出了提高焊接小车跟踪精度和鲁棒性的视觉伺服控制方法，实验验证了方法的有效性。本章得到了如下主要结论：

1. 对得到的原始图象特征坐标进行错误数据的检测并剔除，然后进行参数拟合，可以得到更好的控制结果。
2. 基于 Kalman 滤波器的焊缝方向检测算法可以准确地判断焊缝的方向是否变化。
3. 参考像素坐标调整算法相对于直接通过观测得到参考像素坐标具有更强的鲁棒性。
4. 将控制量预测与 PI 控制律相结合可以使控制过程更加平滑。

## 第六章 结论

本文结合国家 863 计划机器人技术主题项目(2002AA422160):“人机和谐的智能机器人开放式控制平台”,中国科学院知识创新工程领域前沿项目(2F02J02):“基于开放式机器人控制器的结构光视觉伺服控制”,以及与山大华天的合作项目“焊接小车视觉传感器”,对焊接机器人视觉控制平台和视觉伺服控制方法进行了研究,取得的主要研究成果如下:

(1) 根据结构光视觉的基本原理,设计了焊接机器人的视觉传感器系统,并提出了简单有效的算法,对视觉传感器系统的结构光参数进行标定。针对六自由度工业机器人,提出一种多层次结构的控制框架,该控制结构由智能人机交互层、运动规划层、运动控制层和伺服控制层构成。在该框架基础上设计并实现了弧焊机器人视觉控制系统和多机器人视觉控制系统。在焊缝跟踪以及焊接实验中,视觉传感器具有较高的测量精度,系统稳定性及实时性较高,可以满足实际焊接的需要。

(2) 提出了焊缝图像特征抽取算法和焊缝参数估计算法。图像特征抽取算法由目标区域确定算法、基于自适应阈值的去噪算法以及基于数据集分割的特征抽取算法组成。焊缝参数估计算法由直线焊缝方向的鲁棒拟合算法、基于 RANSAC 方法的焊件法线估计算法以及局部加权的曲线焊缝方向拟合算法组成。上述方法具有较强的鲁棒性和较高的精度,在焊缝跟踪实验中得到了验证。

(3) 针对机器人跟踪直线焊缝过程中存在的问题,提出了一种初始姿态自调整算法和混合的视觉伺服控制算法。初始姿态自调整算法建立目标坐标系和当前工具坐标系,计算由当前姿态调整到理想姿态的运动量。混合的视觉伺服控制算法,将机器人运动分为两部分:沿焊缝方向的移动采用笛卡儿空间的位置视觉控制,焊缝跟踪过程中的纠偏采用图像空间的视觉控制。实验结果表明该方法具有较高的鲁棒性。

(4) 针对焊接机器人跟踪曲线焊缝过程中存在的问题,提出了一种协调焊枪运动和视觉跟踪的视觉伺服控制方法。采用平移运动保证焊

枪运动的准确性,采用旋转运动保证视觉跟踪过程中图像特征处在视场有效范围内。首先,通过分析运动与图像特征的变化关系确定旋转轴。其次,针对跟踪过程中控制的特点,设计了一种模糊视觉伺服控制器,来实现曲线焊缝视觉跟踪。模糊控制器的控制量论域是实时动态确定的,以保证图像特征始终处在视场中。为了准确确定控制量论域,建立了运动与图像特征的数学模型,并在此基础上设计了带模型动态补偿的 Kalman 滤波器以实现图像特征的准确预测。曲线焊缝的自动跟踪实验验证了所提方法的有效性。

(5) 通过分析工业用焊接小车执行折线焊缝视觉跟踪存在的主要问题,提出了一种自适应视觉伺服控制结构,以提高跟踪精度和鲁棒性。这种自适应结构在线检测焊缝方向,并能够在焊缝方向发生变化时对控制参数进行相应的调整。为了对焊缝方向进行准确检测,建立了视觉特征的状态模型,设计了错误数据的检测方法以消除其对系统性能的不利影响,在此基础上设计了基于 Kalman 滤波器的焊缝方向变化检测算法。针对参考像素坐标对系统的跟踪精度影响较大的问题,设计了具有较强鲁棒性的参考像素坐标调整算法。为了减少随机图像特征偏差对跟踪性能的影响,采用预测与实时调整相结合的控制方法以提高控制性能。折线焊缝自动跟踪实验表明了所提方法的有效性。

在本文已有的工作基础上,可以进一步开展的工作:

(1) 尽管已经基本实现了直线、折线、曲线焊缝的自动视觉跟踪,但仍然存在一些问题,主要为如何克服外界的干扰问题,例如图像处理算法本身的抗干扰能力等。需要进一步完善具有强噪声干扰和粗糙表面的焊缝图像特征提取算法,使其具有强鲁棒性和一定通用性。对“U”型、“V”型以及其他常用焊缝类型都可以得到全部特征点,并能给出对当前特征点准确程度的评价,供上层算法进行决策。

(2) 执行曲线焊缝视觉跟踪任务时,要求比较准确地得到曲线焊缝的方向,可进一步提高曲线焊缝方向拟合算法的精度。对于大多数曲线焊缝,方向变化比较缓慢。当使用动态数据窗中的数据曲线进行拟合时,前一时刻与当前时刻的焊缝方向变化较小,将这一条件作为曲线拟合的一个约束,较少波动。

(3) 视觉传感器系统的参数标定工作比较繁琐，计算量大，使其在实际工程应用中受到一定的限制。可以尝试无标定或弱标定的视觉伺服控制算法，避免或减少标定的工作量。考虑将状态估计方法用于图像 Jacobian 矩阵的逼近，实现弱标定的视觉伺服控制。

(4) 针对工业焊接小车，尝试新的方法解决折线焊缝跟踪问题。目前采用的方法是间接控制焊枪，可通过重新设计视觉传感器系统来实现直接控制焊枪，例如：增加激光器，使点状激光光斑与焊枪位置具有某种对应关系。

## 参考文献

- [1] Gunnar B; Magnus O, Per C. Robotic arc welding - trends and developments for higher autonomy, *Industrial Robot*, 2002, 29(2): 98-104
- [2] Wilson M, The role of seam tracking in robotic welding and bonding, *Industrial Robot*, 2002, 29(2):132-137
- [3] Malis E, Chaumette F. Multi-cameras visual servoing. *IEEE International Conference on Robotics and Automation*. San Francisco, CA, USA: 2000,vol 4: 3183-3188
- [4] Dixon W E, Zergeroglu E Fang, Y Dawson DM. Object tracking by a robot manipulator: A robust cooperative visual servoing approach. *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Washington, DC, USA, 2002, vol 1:211-216
- [5] Flandin G., Chaumette F, Marchand E. Eye-in-hand/eye-to-hand cooperation for visual servoing. *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 2000,vol 3: 2741-2746
- [6] Wu Jonathan, Kevin S. Modular neural-visual servoing using a neural-fuzzy decision network, *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 1997,vol 4: 3238-3243
- [7] Yang, Yan-Xi; Liu, Ding; Liu, Han, Robot self-learning visual servoing algorithm using neural networks, *2002 International Conference on Machine Learning and Cybernetics*, 2002,vol 2: 739-742
- [8] Malis E, Chaumette F, Boudet S. 2-1/2-d visual servoing. *IEEE Transaction on Robot and Automation*, 1999,15(2): 238-250
- [9] K Deguchi. Optimal motion control for image-based visual servoing by decoupling translation and rotation. *IEEE Conference on Intelligent Robots and Systems*, 1998, vol 2:705-711
- [10] Morel G, Liebezeit T, Szewczyk J, Boudet S, Pot J. Explicit incorporation of 2d constraints in vision based control of robot manipulators. *Experimental Robotics VI*, Berlin, Germany: Springer-Verlag, 2000, vol. 250: 99-108.
- [11] Corke P, Hutchinson S. A new partitioned approach to image-based visual servo control. *IEEE Transaction On Robotics and Automation*, 2001,17(4):507-515

- [12] Jenelle P, McMurray A, Gary V, Harvey L. Dynamic quasi-Newton method for uncalibrated visual servoing. IEEE International Conference on Robotics and Automation, 1999, vol 2: 1595-1600
- [13] Kanako M, Jacques G A, Mathelin De, Michel F. Robust and uncalibrated visual servoing without Jacobian using a simplex method. IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems, 2002, vol 1: 311-316
- [14] Choi Gyu-Jong, Lee Kyung-Soo, Ahn Doo-Sung. Visual servoing system based on ANFIS(Adaptive Neuro Fuzzy Inference System). The International Society for Optical Engineering, 2001, vol 4572: 211-218
- [15] Yang Yan-Xi, Liu Ding, Liu Han. Robot self-learning visual servoing algorithm using neural networks. 2002 International Conference on Machine Learning and Cybernetics, 2002, vol 2: 739-742
- [16] Malis E, Uncalibrated Visual Servoing, EURON Summer School on visual servoing 2001
- [17] Hashimoto K, Noritsugu T. Performance and sensitivity in visual servoing, IEEE International Conference on Robotics and Automation, 1998, vol 3: 2321-2326
- [18] 夏利民,谷士文,樊晓平,罗大庸. 基于活动轮廓的机器人视觉伺服. 机器人, 2000,22(5):359-364
- [19] Maniere C, Couvignou E, Philippe K, Pradeep K. Visual servoing in the task-function framework: a contour following task. Journal of Intelligent and Robotic Systems: Theory & Applications, 1995,12(1):1-21
- [20] Kragic D, Henrik I. Cue integration for visual servoing. IEEE Transactions on Robotics and Automation, 2001,17(1):18-27
- [21] Feddema J T, Lee C S, Mitchell O R. Weighted selection of image features for resolved motion rate visual feedback control. IEEE Transaction on Robot and Automation, 1991,7(1):31-47
- [22] Sharifi J, Wilson F, W J. Automatic selection of image features for visual servoing. IEEE Transactions on Robotics and Automation, 1997, 13(6): 890-903
- [23] Corke P, Malcolm C. Dynamic effects in visual closed-loop systems. IEEE Transactions on Robots and Automation, 1996,12(5.):671-683
- [24] Colombo C, Allotta B, Dario P. Affine Visual Servoing: a framework for relative positioning with a robot. IEEE International Conference on Robotics and Automation, 1995, vol 1: 464-471

- [25] Fujimoto H, Hori Y. Visual servoing based on multirate sampling control - Application of perfect disturbance rejection control. IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2001, vol 1: 711-716
- [26] Yasunobu T, Naoki O, Toshiyuki M, Kouhei O. Construction of observer-based visual servo controller. IECON Proceedings (Industrial Electronics Conference), 1998, vol 2: 1109-1113
- [27] Nicholas G, Seth H. A switching approach to visual servo control. 2002 IEEE International Symposium on Intelligent Control, 2002, 770-776
- [28] Bachiller M, Cerrada JA, Cerrada C. A modular scheme for controller design and performance evaluation in 3D visual servoing. Journal of Intelligent and Robotic Systems: Theory and Applications, 2003, 36(3):235-264
- [29] Fabio C, Benedetto A, Valentina C. Global asymptotic stabilization of visually-servoed manipulators. IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics, 1999, 926-93
- [30] Delphine B, Patrick D. Handling visual servoing schemes through rational systems and LMIs. IEEE Conference on Decision and Control, 2001, vol 4:3601-3606
- [31] Jacques G, Mathelin M D, A Gabriel. 6 DOF high speed dynamic visual servoing using GPC controllers. IEEE International Conference on Robotics and Automation, 1998, vol 3: 2008-2013
- [32] Fabio C, Benedetto A, Pradeep K. Image-based visual servoing of nonholonomic mobile robots. IEEE Conference on Decision and Control, 1999, vol 4: 3496-3501
- [33] Giuseppe R De., Taurisano F, Distanto A C. Visual servoing of a robotic manipulator based on fuzzy logic control. IEEE International Conference on Robotics and Automation, 1999, vol 2: 1487-1494
- [34] Kim Joo Gon, Cha Dong Hyuk, Cho Hyung Suck, Kim, Seung Ho. Auto-tuning fuzzy rule-based visual servoing algorithm for a slave arm. IEEE International Symposium on Intelligent Control - Proceedings, 1995, 177-182
- [35] Yang Yan-Xi, Liu Ding, Liu Han. Robot self-learning visual servoing algorithm using neural networks. 2002 International Conference on Machine Learning and Cybernetics, 2002, vol 2: 739-742
- [36] Wu Q, Jonathan M., Kevin S. Modular neural-visual servoing using a neural-fuzzy decision network, IEEE International Conference on Robotics and

- Automation, 1997,vol 4:3238-3243
- [37] Yasushi I, Toshiyuki M, Kouhei O. Approach of visual servoing control considering compensation of time delay. IEEE International Symposium on Industrial Electronics, 1997,vol 2: 723-728
- [38] Sim T P, Hong, G S Lim, K B S. A pragmatic 3D visual servoing system. IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2002, vol 4: 4185-4190
- [39] Jenelle A P, George W. Tracking a moving target with model independent visual servoing: A predictive estimation approach. IEEE International Conference on Robotics and Automation, 1998,vol 3: 2652-2657
- [40] Ficocelli M, Janabi-Sharifi F. Adaptive filtering for pose estimation in visual servoing. IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems, 2001, vol 1: 19-24
- [41] Gortcheva E, Garrido R., Gonzalez, E. Predicting a moving object position for visual servoing: Theory and experiments. International Journal of Adaptive Control and Signal Processing, 2001,15(4): 377-392
- [42] Khatib O. Real time obstacle avoidance for manipulators and mobile robots. International Journal of Robotics Research, 1986,5(1):90-98
- [43] Mezouar Y, Chaumette F. Path Planning For Robust Image-based Control. IEEE Transactions on robotics and automation, 2002,18(4):534-549
- [44] Park Jae Seok, Chung Myung Jin. Path planning with uncalibrated stereo rig for image-based visual servoing under large pose discrepancy. IEEE Transactions on robotics and automation, 2003,19(2):250-258
- [45] Chaumette F, Hager G, Morse A S. Potential problems of stability and convergence in image-based and position-based visual servoing. The Confluence of Vision and Control, LNCIS Series, Springer-Verlag,1998, 66-78
- [46] Koichi H, Toshiro N. Potential switching control in visual servo. IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2000, vol 3: 2765-2770
- [47] Cowan N J, Weingarten J D, Daniel K E. Visual servoing via navigation functions. IEEE Transactions on Robotics and Automation, 2002, 18(4): 521-533
- [48] Hirohisa K, Naohiro A. Feature based visual servoing with fuzzy compensation, Nippon Kikai Gakkai Ronbunshu, C Hen/Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Part C, v 68, n 4, April, 2002, p 1119-1126
- [49] 林尚扬. 我国机械制造业中焊接机器人的应用现状与发展趋势(上). 机械

- 工人：热加工, 1999, 5:3-5
- [50] 林青松, 陈献. 焊接机器人在我国的应用概况. 机械产品与科技, 1998, 2:2-5
- [51] 毛鹏军, 黄石生, 李阳, 薛家祥. 焊接机器人技术发展的回顾与展望. 焊接, 2001, 8:6-10
- [52] 何方殿, 王克争, 苏勇. 视觉传感器焊接跟踪系统的研究与发展. 电焊机, 1993, 4:8-13
- [53] 陈强, 孙振国. 计算机视觉传感技术在焊接中的应用, 焊接学报, 2001, 22(1):83-90
- [54] Kuo Hsing-Chia, Wu Li-Jen. An image tracking system for welded seams using fuzzy logic. *Journal of Materials Processing Technology*, 2002, 120(1): 169-185
- [55] Seon Kim Jae, Tak Son Young, Suck Cho Hyung. Robust method for vision-based seam tracking in robotic arc welding. *The 10th IEEE International Symposium on Intelligent Control*, 1995, 363-368
- [56] 张华, 陈强, 潘际奎. 基于焊缝 CCD 图像模式特征的焊缝轨迹识别. 机械工程学报, 1996, 32(6): 31-36
- [57] 黄石生, 钱迎雪. 基于 ART 人工神经网络的焊缝跟踪检测算法. 机械工程学报, 1994, 30(2):93-97
- [58] 董德祥, 陶伯华. 双丝窄间隙埋弧焊微机控制系统的研究. 电焊机, 1994, 2:12-16
- [59] Ma S D. A Self-calibration Technique for Active Vision System. *IEEE Trans on Robot Automat*, 1996, 12(1): 114-120
- [60] 马颂德, 张正友. 计算机视觉—计算理论与算法基础, 科学出版社, 1997
- [61] 徐德, 赵晓光, 涂志国, 谭民. 基于单特征点的手眼系统摄像机标定. 高技术通讯, 2005, 15(1):32-36
- [62] Zhu S, Qiang X. Analysis of 3-D coordinate vision measuring methods with feature points on workpiece. *Optics and Precision Engineering*, 2000, 8(2):192-197
- [63] Kuo H C, Wu L. An image tracking system for welded seams using fuzzy logic. *Journal of Materials Processing Technology*, 2002, 120(2):169-185
- [64] Kim J S, Son Y T, Cho H S. Robust method for vision-based seam tracking in robotic arc welding. in *Proceedings of the 10th IEEE International Symposium on Intelligent Control*, (Monterey, USA), 1995, 363- 368
- [65] Maronna R. Robust M-Estimators of Multivariate Location and Scatter. In *The*

- Annals of Statistics, 1976, vol4: 51—67
- [66] Torr P, Zisserman A. MLESAC: A new robust estimator with application to estimating image geometry, *Computer Vision and Image Understand*, 2000, vol 78 :138-156
- [67] Fischler M A, Bolles R C. Random sample consensus: A paradigm for model fitting with applications to image analysis and automated cartography. *Communications of the ACM*, 1981, 24(6): 381-395
- [68] 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*, 2002,32(5):1-8
- [69] 席文明,郑梅生,颜景平. 视觉引导下的机器人跟踪复杂焊缝的研究. *东南大学学报*, 2000, 3(2):79-83
- [70] Bauchspiess A, Alfaro S C. Predictive Seam-Tracking Optimization. *Fifth International Conference on Trends in Welding Research, Atlanta/USA*,1998, 1-6
- [71] Yu Je-Yong; Na Suck-Joo. Study on vision sensors for seam tracking of height-varying weldment Part 1: mathematical model, *Mechatronics*. 1997, 7(7): 599-612
- [72] Richard M. Murray, Zexiang Li, S Shankar Sastry. *A mathematical introduction to robotic manipulation*. CRC press, New York,1994
- [73] 王彬. 我国焊接自动化技术的现状与发展趋势. *电焊机*, 2001, 6(31): 3-7
- [74] 佟欣. 焊接自动化技术的开发. *焊接技术*, 2000, 9(29): 41-43
- [75] 毛鹏军, 张慧, 黄石生等. 计算机视觉及其在焊接中的应用. *电焊机*, 2002, 32(7): 1-4
- [76] 陈强, 孙振国. 计算机视觉传感技术在焊接中的应用, *焊接学报*, 2001, 22(1):83-90
- [77] Hutchinson S, Hager G D, Corke P I. Tutorial on visual servo control, *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 1996,12(5):651-670
- [78] 林靖, 陈辉堂, 王月娟, 蒋平. 机器人视觉伺服系统的研究. *控制理论与应用*, 2000,17(4):476-481
- [79] 赵清杰,连广宇,孙增圻. 机器人视觉伺服综述. *控制与决策*,2001,16(6):849-853
- [80] Kalman R E. A New Approach to Linear Filtering and Prediction Problems. *Transaction of the ASME—Journal of Basic Engineering*, 1960, 35-45
- [81] Bauchspiess A, Alfaro S C. Predictive Seam-Tracking Optimization. *Fifth International Conference on Trends in Welding Research, Atlanta/USA*,1998, 1-6

- [82] 孙迪生,王炎. 机器人控制技术机械工业出版社, 1997
- [83] Chen Huitang, Lin Jing, Wang Yuejuan. Integration of vision and control for robot curve tracking. *Zidonghua Xuebao/Acta Automatica Sinica*, 1999,25(1): 18-24
- [84] Ping Jiang, Chen Hui-tang, Wang Yue-juan, Lin Jing. Decomposed control scheme for vision-guided manipulators curve tracking. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 1999,46(3): 667-669
- [85] Kang Dong Jung. Visual tracking algorithm by integrating rigid model and snakes. *IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems*, 1996, v 2, 777-784
- [86] Park S B, Ryu C S, Lee K . Multiple target angle tracking algorithm using predicted angles. *IEEE Transactions on aerospace and electronic systems*, 1994,30(2):643-648
- [87] Lee S H, Kim Y H, Baek S E. Discrete-Time robust tracking control using a state space disturbance observer. *The American control conference 2000*,4194-4198
- [88] Lee S H, Chung C C. Robust control using a state space disturbance observer. *The 42<sup>nd</sup> IEEE conference on decision and control 2003*, 1297-1302
- [89] Shaked U, Carlos E. Robust Minimum Variance Filtering. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 1995,43(11):2474-2483
- [90] SU Jian , QIU WenBin. Robotic Calibration-Free Hand-Eye Coordination Based on Auto Disturbances Rejection Controller. *ACTA AUTOMATICA SINICA*, 2003, 29(2):160-166
- [91] 孙增圻等编著. 智能控制理论与技术. 北京: 清华大学出版社, 2000.
- [92] 蔡自兴. 机器人原理与应用. 中南工业大学出版社. 1998
- [93] 章毓晋. 图像理解与计算机视觉(上),清华大学出版社, 2000
- [94] 盛骤,谢式千,潘承毅. 概率论与数理统计, 高等教育出版社,1989

## 个人简历与研究成果

出生日期：1974年9月24日

### 教育背景：

工学博士，中国科学院自动化所，2002.9-2005.6

工学硕士，东北大学，1999.9-2002.3

工学学士，辽宁工程技术大学，1993.9-1997.7

### 已发表及录用文章：

1. 王麟琨, 徐德, 谭民, 机器人视觉伺服研究进展, 机器人, 2004 Vol. 26 No. 3, 272-277
2. 王麟琨, 徐德, 谭民, 基于工业焊接小车的视觉伺服控制算法研究, 高技术通讯, (录用)
3. Linkun Wang, De Xu, Min Tan. Robust Detection For The Weld Seam Shaped Zigzag Line, IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics 2004 (IEEE ROBIO 2004), Shenyang, China, August 22-26, 2004.
4. 徐德, 王麟琨, 涂志国, 谭民, 基于结构光的机器人弧焊混合视觉伺服控制, 自动化学报(录用)
5. 徐德, 王麟琨, 谭民. 基于运动的手眼系统结构光参数标定, 仪器仪表学报, (录用)
6. De Xu, Linkun Wang, and Min Tan. Image Processing and Visual Control Method for Arc Welding Robot, IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics 2004 (IEEE ROBIO 2004), Shenyang, China, August 22-26, 2004.
7. De Xu, Zemin Jiang, Linkun Wang, Min Tan. Features Extraction for Structured Light Image of Welding Seam with Arc and Splash Disturbance, The Eighth International Conference on Control,

Automation, Robotics and Vision (ICARCV 2004), Kunming, China, 6-9  
December, 2004. EI indexed

8. 江泽民 徐德 王麟琨 谭民. 微操作机器人的研究现状与发展趋势, 机器人, Vol. 25, No. 6, pp554-559, 2003, 11
9. 李原, 徐德, 李涛, 王麟琨, 谭民. 一种基于激光结构光的焊缝跟踪视觉传感器, 传感技术学报, (录用)

**已投递的文章:**

10. 王麟琨, 徐德, 谭民, 曲线焊缝跟踪的视觉伺服协调控制。(已投控制与决策)

## 致 谢

在本论文完成之际，首先向尊敬的导师谭民研究员，副导师徐德副研究员表示感谢。本论文的研究工作是在导师的直接指导、热情关怀下完成的。他们实事求是的工作作风、严谨求实的治学精神、谦虚的为人给我留下了深刻的印象，也使学生终身受益无穷。在此谨向导师表示衷心的感谢和诚挚的敬意。

感谢同课题组的江泽民、李原、沈扬、李恩等同学，与他们的讨论使我受益匪浅，本论文的顺利完成得到了他们热情的帮助，在此表示衷心的感谢。

感谢复杂系统与智能科学重点实验室的其它各位老师和同学，特别感谢赵晓光、梁自泽、侯增广、王硕、曹志强、景奉水、王爱华、闫研等老师，安成万、桑海泉、熊小明、张永谦、杨月泉、李桂芝等同学给予我各方面的关心和帮助。

感谢研究生部的李磊、卜树云等老师的关心和照顾。

最后，我要衷心地感谢我的父母，感谢我的妻子王岩，他们在精神上的支持、鼓励和生活上的关心、帮助，使我能顺利完成本论文的研究工作，本论文也凝结了他们的心血和汗水。

**感谢这三年里所有关心和帮助过我的人们！**

作者: 王麟琨  
学位授予单位: 中国科学院自动化研究所

## 参考文献(94条)

1. Gunnar B. Magnus O. Per C Robotic arc welding - trends and developments for higher autonomy 2002(02)
2. Wilson M The role of seam tracking in robotic welding and bonding[外文期刊] 2002(02)
3. Malis E. Chaumette F Multi-cameras visual servoing 2000
4. Dixon W E. Zergeroglu E Fang. Y Dawson DM Object tracking by a robot manipulator: A robust cooperative visual servoing approach 2002
5. Flandin G. Chaumette F. Marchand E Eye-in-hand/eye-to-hand cooperation for visual servoing 2000
6. Wu Jonathan. Kevin S Modular neural-visual servoing using a neural-fuzzy decision network 1997
7. Yang Yan-Xi. Liu Ding. Liu Han Robot self-learning visual servoing algorithm using neural networks 2002
8. Malis E. Chaumette F. Boudet S 2-1/2-d visual servoing[外文期刊] 1999(02)
9. K Deguchi Optimal motion control for image-based visual servoing by decoupling translation and rotation 1998
10. Morel G. Liebezeit T. Szewczyk J. Boudet S. Pot J Explicit incorporation of 2d constraints in vision based control of robot manipulators 2000
11. Corke P. Hutchinson S A new partitioned approach to image-based visual servo control[外文期刊] 2001(04)
12. Jenelle P. McMurray A. Gary V. Harvey L Dynamic quasi-Newton method for uncalibrated visual servoing 1999
13. Kanako M. Jacques G A. Mathelin De. Michel F Robust and uncalibrated visual servoing without Jacobian using a simplex method 2002
14. Choi Gyu-Jong. Lee Kyung-Soo. Ahn Doo-Sung Visual servoing system based on ANFIS(Adaptive Neuro Fuzzy Inference System) 2001
15. Yang Yan-Xi. Liu Ding. Liu Han Robot self-learning visual servoing algorithm using neural networks 2002
16. Malis E Uncalibrated Visual Servoing 2001
17. Hashimoto K. Noritsugu T Performance and sensitivity in visual servoing 1998
18. 基于活动轮廓的机器人视觉伺服[期刊论文]-机器人 2000(5)
19. Maniere C. Couvignou E. Philippe K. Pradeep K Visual servoing in the task-function framework:a contour following task 1995(01)
20. Kragic D. Henrik I Cue integration for visual servoing[外文期刊] 2001(01)
21. Feddema J T. Lee C S. Mitchell O R Weighted selection of image features for resolved motion rate visual feedback control 1991(01)
22. Sharifi J. Wilson F. W J Automatic selection of image features for visual servoing[外文期刊] 1997(06)

23. [Corke P. Malcolm C Dynamic effects in visual closed-loop systems](#)[外文期刊] 1996(05)
24. [Colombo C. Allotta B. Dario P Affine Visual Servoing: a framework for relative positioning with a robot](#) 1995
25. [Fujimoto H. Hori Y Visual servoing based on multirate sampling control - Application of perfect disturbance rejection control](#) 2001
26. [Yasunobu T. Naoki O. Toshiyuki M. Kouhei O Construction of observer-based visual servo controller](#) 1998
27. [Nicholas G. Seth H A switching approach to visual servo control](#) 2002
28. [Bachiller M. Cerrada JA. Cerrada C A modular scheme for controller design and performance evaluation in 3D visual servoing](#)[外文期刊] 2003(03)
29. [Fabio C. Benedetto A. Valentina C Global asymptotic stabilization of visually-servoed manipulators](#) 1999
30. [Delphine B. Patrick D Handling visual servoing schemes through rational systems and LMIs](#) 2001
31. [Jacques G. Mathelin M D. A Gabriel 6 DOF high speed dynamic visual servoing using GPC controllers](#) 1998
32. [Fabio C. Benedetto A. Pradeep K Image-based visual servoing of nonholonomic mobile robots](#) 1999
33. [Giuseppe R De. Taurisano F. Distanto A C Visual servoing of a robotic manipulator based on fuzzy logic control](#) 1999
34. [Kim Joo Gon. Cha Dong Hyuk. Cho Hyung Suck. Kim Seung Ho Auto-tuning fuzzy rule-based visual servoing algorithm for a slave arm](#) 1995
35. [Yang Yan-Xi. Liu Ding. Liu Han Robot self-learning visual servoing algorithm using neural networks](#) 2002
36. [Wu Q. Jonathan M. Kevin S Modular neural-visual servoing using a neural-fuzzy decision network](#) 1997
37. [Yasushi I. Toshiyuki M. Kouhei O Approach of visual servoing control considering compensation of time delay](#) 1997
38. [Sim T P. Hong G S. Lim K B S A pragmatic 3D visual servoing system](#) 2002
39. [Jenelle A P. George W Tracking a moving target with model independent visual servoing: A predictive estimation approach](#) 1998
40. [Ficocelli M. Janabi-Sharifi F Adaptive filtering for pose estimation in visual servoing](#) 2001
41. [Gortcheva E. Garrido R. Gonzalez E Predicting a moving object position for visual servoing: Theory and experiments](#) 2001(04)
42. [Khatib O Real time obstacle avoidance for manipulators and mobile robots](#) 1986(01)
43. [Mezouar Y. Chaumette F Path Planning For Robust Image-based Control](#)[外文期刊] 2002(04)
44. [Park Jae Seok. Chung Myung Jin Path planning with uncalibrated stereo rig for image-based visual servoing under large pose discrepancy](#)[外文期刊] 2003(02)
45. [Chaumette F. Hager G. Morse A S Potential problems of stability and convergence in image-based and position-based visual servoing](#) 1998
46. [Koichi H. Toshiro N Potential switching control in visual servo](#) 2000

47. [Cowan N J, Weingarten J D, Daniel K E Visual servoing via navigation functions](#)[外文期刊] 2002(04)
48. [Hirohisa K, Naohiro A Feature based visual servoing with fuzzy compensation](#) 2002(04)
49. [林尚扬 我国机械制造业中焊接机器人的应用现状与发展趋势\(上\)](#) 1999(05)
50. [林青松, 陈献 焊接机器人在我国的应用概况](#) 1998
51. [毛鹏军, 黄石生, 李阳, 薛家祥, 王秀媛, 陆沛涛 焊接机器人技术发展的回顾与展望](#)[期刊论文]-[焊接](#) 2001(8)
52. [何方殿, 王克争, 苏勇 视觉传感器焊接跟踪系统的研究与发展](#) 1993(04)
53. [陈强, 孙振国 计算机视觉传感技术在焊接中的应用](#)[期刊论文]-[焊接学报](#) 2001(1)
54. [Kuo Hsing-Chia, Wu Li-Jen An image tracking system for welded seams using fuzzy logic](#)[外文期刊] 2002(01)
55. [Seon Kim Jae, Tak Son Young, Suck Cho Hyung Robust method for vision-based seam tracking in robotic arc welding](#) 1995
56. [张华, 陈强, 潘际釜 基于焊缝CCD图像模式特征的焊缝轨迹识别](#) 1996(06)
57. [黄石生, 钱迎雪 基于ART人工神经网络的焊缝跟踪检测算法](#)[期刊论文]-[机械工程学报](#) 1994(2)
58. [董德祥, 陶伯华 双丝间隙埋弧焊微机控制系统的研究](#) 1994(02)
59. [Ma S D A Self-calibration Technique for Active Vision System](#) 1996(01)
60. [马颂德, 张正友 计算机视觉--计算机理论基础与算法基础](#) 1997
61. [徐德, 赵晓光, 涂志国, 谭民 基于单特征点的手眼系统摄像机标定](#)[期刊论文]-[高技术通讯](#) 2005(1)
62. [Zhu S, Qiang X Analysis of 3-D coordinate vision measuring methods with feature points on workpiece](#) 2000(02)
63. [Kuo H C, Wu L An image tracking system for welded seams using fuzzy logic](#)[外文期刊] 2002(02)
64. [Kim J S, Son Y T, Cho H S Robust method for vision-based seam tracking in robotic arc welding](#) 1995
65. [Maronna R Robust M-Estimators of Multivariate Location and Scatter](#) 1976
66. [Torr P, Zisserman A MLESAC: A new robust estimator with application to estimating image geometry](#)[外文期刊] 2000
67. [Fischler M A, Bolles R C Random sample consensus:A paradigm for model fitting with applications to image analysis and automated cartography](#) 1981(06)
68. [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](#)[期刊论文]-[电焊机](#) 2002(5)
69. [席文明, 郑梅生, 颜景平 视觉引导下的机器人跟踪复杂焊缝的研究](#)[期刊论文]-[东南大学学报\(自然科学版\)](#) 2000(2)
70. [Bauchspiess A, Alfaro S C Predictive Seam-Tracking Optimization](#) 1998
71. [Yu Je-Yong, Na Suck-Joo Study on vision sensors for seam tracking of height-varying weldment Part 1: mathematical model](#) 1997(07)
72. [Richard M Murray, Zexiang Li, S Shankar Sastry A mathematical introduction to robotic manipulation](#) 1994
73. [王彬 我国焊接自动化技术的现状与发展趋势](#)[期刊论文]-[电焊机](#) 2001(6)
74. [佟欣 焊接自动化技术的开发](#)[期刊论文]-[焊接技术](#) 2000(6)
75. [毛鹏军, 张慧, 黄石生, 薛家祥, 曾敏 计算机视觉及其在焊接中的应用](#)[期刊论文]-[电焊机](#) 2002(7)

76. [陈强, 孙振国 计算机视觉传感技术在焊接中的应用](#)[期刊论文]-[焊接学报](#) 2001(1)
77. [Hutchinson S, Hager G D, Corke P I Tutorial on visual servo control](#) 1996(05)
78. [林靖, 陈辉堂, 王月娟, 蒋平 机器人视觉伺服系统的研究](#)[期刊论文]-[控制理论与应用](#) 2000(4)
79. [赵清杰, 连广宇, 孙增圻 机器人视觉伺服综述](#)[期刊论文]-[控制与决策](#) 2001(6)
80. [Kalman R E A New Approach to Linear Filtering and Prediction Problems](#) 1960
81. [Bauchspiess A, Alfaro S C Predictive Seam-Tracking Optimization](#) 1998
82. [孙迪生, 王炎 机器人控制技术](#) 1997
83. [蒋平, 林靖, 陈辉堂, 王月娟 机器人轨线跟踪的视觉与控制集成方法](#)[期刊论文]-[自动化学报](#) 1999(1)
84. [Ping Jiang, Chen Hui-tang, Wang Yue-juan, Lin Jing Decomposed control scheme for vision-guided manipulators curve tracking](#)[外文期刊] 1999(03)
85. [Kang Dong Jung Visual tracking algorithm by integrating rigid model and snakes](#) 1996
86. [Park S B, Ryu C S, Lee K Multiple target angle tracking algorithm using predicted angles](#)[外文期刊] 1994(02)
87. [Lee S H, Kim Y H, Baek S E Discrete-Time robust tracking control using a state space disturbance observer](#) 2000
88. [Lee S H, Chung C C Robust control using a state space disturbance observer](#) 2003
89. [Shaked U, Carlos E Robust Minimum Variance Filtering](#)[外文期刊] 1995(11)
90. [U Jian, QIU WenBin Robotic Calibration-Free Hand-Eye Coordination Based on Auto Disturbances Rejection Controller](#)[外文期刊] 2003(02)
91. [孙增圻, 张再兴, 邓志东 智能控制理论与技术](#) 2000
92. [蔡自兴 机器人原理与应用](#) 1998
93. [章毓晋 图像理解与计算机视觉](#) 2000
94. [盛骤, 谢式千, 潘承毅 概率论与数理统计](#) 1989

本文链接: [http://d.g.wanfangdata.com.cn/Thesis\\_Y804488.aspx](http://d.g.wanfangdata.com.cn/Thesis_Y804488.aspx)