

第1章 绪论

1.1 引言

1.1.1 课题背景与问题的提出

激光焊接技术是现代焊接技术的重要组成部分,其应用范围几乎涵盖了所有焊接领域^[1-5],其中的激光拼焊技术更是在国民经济发展中处于举足轻重的地位。激光拼焊是采用激光能源,将若干不同材质、不同厚度、不同涂层的钢材或铝材进行自动拼焊而形成一块整体板材^[6-10],以满足零部件对材料性能的不同要求,具有高效率、高速度、高精度、强适应性等特点,应用范围广泛^[11-13]。

激光拼焊过程中,普遍采用示教再现^[14, 15]、预编程、工件预装卡和实时检测修正等工艺,由于机器人的示教轨迹误差、预装卡及材料的误差以及焊接过程中热应力产生的变形等因素会造成接头位置和尺寸的变化,因此要求激光拼焊机器人能够检测出这种变化,精确地确定焊炬与焊缝的位置关系^[16],以保证焊接质量。

目前,应用于激光拼焊的机器人主要有两种:直角坐标机器人和多关节式机器人。直角坐标机器人由于具有高精度的特点而被广泛应用在激光拼焊自动化装备中。采用直角坐标机器人进行短直焊缝激光拼焊时,可以满足激光拼焊的精度要求,进行长直焊缝以及多组焊缝激光拼焊时,由于板材的精度影响等原因,已无法满足焊接精度要求;相比直角坐标机器人,采用多关节式机器人进行激光拼焊,可以简化系统,降低成本,充分发挥多关节式机器人柔性化的特点,增强系统的适应性,但如果仅仅应用光纤和多关节式机器人,采用示教-焊接的工作方式,多关节式机器人的位置精度无法满足激光拼焊的精度要求。因此,当采用直角坐标机器人进行长直焊缝、多组焊缝激光焊接,采用多关节式机器人进行激光拼焊时,均需要引入焊缝跟踪系统。

基于机器视觉原理开发的视觉传感器较其他类型的传感器,具有采集信息量大,识别信息丰富,识别精度高等诸多优点^[17-20]。将视觉传感器应用到激光拼焊焊缝跟踪过程中,可以实时获取焊缝图像,通过图像处理,提取偏差,完成焊缝视觉跟踪控制^[21, 22]。国内外研究表明,通过采用视觉传感器对焊缝进行实时跟踪^[23, 24],进行在线焊接轨迹规划,可以实现焊接生产的自动化、智能化,在满足复杂焊接工艺要求的同时,还提高了激光拼焊的生产效率。

然而由于激光拼焊高精度、高速度的要求,视觉传感器在应用到激光拼焊焊缝跟踪过程中还存在一些急需解决的技术难题,例如,视觉传感器的检测精度问

题、跟踪系统的精度以及实时性问题,复杂工件和预装卡误差以及由机器人运动轨迹精度带来的跟踪轨迹误差问题等等。

本课题针对机器人激光拼焊中存在的科学问题和实际应用需求,在基于结构光视觉检测原理,实时图像处理等技术研究的基础上,开展具有检测精度高,抗干扰能力强,实时性好,可应用于机器人激光拼焊系统的焊缝视觉跟踪关键技术和系统集成技术的研究,通过对焊接过程中焊缝位置的实时检测和对跟踪轨迹修正信息的精确提取,实现激光拼焊焊缝自动跟踪。

1.1.2 焊缝跟踪技术在激光焊接中应用的必要性及意义

焊缝跟踪技术应用于焊接中将有助于提高我国焊接的自动化水平。国外焊接生产机械化、自动化程度很高,而我国手工焊的比例却很大^[25, 26],到2004年,我国焊接机械化、自动化率仅能达到35%,世界工业发达国家一般都在60%-70%以上,可见我国的焊接生产总体上说自动化率仍比较低,这足以说明我国只是一个焊接大国,还远不是一个焊接强国。随着我国汽车、石油化工行业和以造船业为代表的制造业的蓬勃发展,焊接的应用范围越来越广泛,对焊接自动化的要求也越来越迫切^[27],而实现焊接自动化的瓶颈之一就是焊缝跟踪技术^[28]。焊缝跟踪技术的研究将有助于提高生产率,降低工人劳动强度,提高我国焊接自动化、智能化水平。

激光焊接技术是一种先进的焊接技术,正被广泛地应用于各领域,激光焊接技术发展的同时,与其相应的焊缝跟踪技术、设备也急需进一步发展。自从1960年世界第一台激光器问世以来,激光在材料加工方面的应用就不断得到发展,激光焊接技术也应运而生,并随之迅速发展,激光焊接因其潜在的优势正逐渐成为高能束焊接的主流,在工业生产中有良好的应用前景。激光焊接同传统焊接方法相比具有独特优势,它的主要特点是能量密度高、焊接质量好、热影响区小、无污染、无任何腐蚀,是一种绿色加工方法,这些独特的优点使激光焊接在一些对焊接质量有特殊要求的构件的焊接上具有无与伦比的优越性。现阶段,国内焊缝跟踪技术虽说种类繁多,但大部分是针对弧焊的^[29-31],而且许多还处于实验室阶段,本课题针对实际需求,开展了应用于激光焊接的焊缝视觉跟踪关键技术研究。该研究是实现焊接过程自动化的重要研究方向之一。

激光焊接中的激光拼焊技术,是近年来发展最为迅速的激光加工技术之一,随着工业焊接生产中对产品质量要求的提高,激光拼焊在工业中的应用越来越广泛,其中,汽车车身将近20块板需要激光拼焊加工^[9, 13, 32, 33]。在激光拼焊过程中应用焊缝视觉跟踪系统,将有助于提高激光的利用率及产品质量,降低产品成本,增强产品市场竞争力,焊缝视觉跟踪系统还可以实现激光拼焊机器人同视觉跟踪

系统的宏微结合,实现激光焊接过程由粗加工向细加工的转化,推动激光拼焊装备技术的发展,实现全自动激光拼焊,具有广阔的应用前景:

目前,商品化结构光视觉传感器多为国外产品,价格昂贵,难以广泛应用于生产,因此从控制产品成本和实用性的角度出发,有必要在充分认识结构光视觉原理的基础上,在保证精度的前提下,自行研发体积小巧、结构紧凑的结构光视觉传感器,这一研究对促进我国焊缝视觉跟踪技术的发展和打破国外产品的技术壁垒都具有重要意义,将直接有利于提高我国焊接生产的自动化程度,并促进我国焊接机器人产业和应用的发展,具有潜在而巨大的应用价值。

1.2 计算机视觉及其在焊接中的应用

1.2.1 计算机视觉发展

计算机视觉是一个发展十分迅速的研究领域,它源于20世纪50年代的统计模式识别。上世纪60年代,Roberts通过计算机程序从数字图像中提取出立方体、楔形体等多面体的三维结构^[34],并对在三维世界坐标系下的物体模型进行了一系列的平移、旋转和投影变换,这些工作被认为开创了以理解三维场景为目的的三维机器视觉的研究。60年代后期,Guzman设计了能够识别部分遮挡物体图像的程序,可以实现对景物图像中用线条画表示的物体进行有意义的分割,从而识别物体。Guzman的工作是将计算机图像理解的研究从统计及数据处理上升到符号推理。70年代中期,B.K.P.Horn教授在麻省理工学院(MIT)正式开设了“机器视觉”课程。80年代初,MIT的Marr教授首次从信息处理的角度综合了图像处理、心理物理学、神经生理学及临床精神病学的研究成果,提出了一套完整的视觉理论框架^[35]。Marr从信息处理的角度出发,认为此系统的研究应分为三个层次,即计算理论层次、表达与算法层次、硬件实现层次。从视觉计算理论的角度出发,将系统分为自上而下的三个阶段,即视觉信息从最初的原始数据(二维图像数据)到最终对三维环境的表达经历了三个阶段的处理。第一阶段构成所谓“要素图”或“基元图”,基元图由二维图像中的边缘点、直线段、曲线、顶点、纹理等基本几何元素或特征组成;第二阶段,Marr称为对环境的2.5维描述,2.5维描述是一种形象的说法,意即部分的、不完整的三维信息描述,就是重建三维物体在观察者为中心的坐标系下的三维形状和位置。这一阶段存在许多并行的相对独立的模块,如立体视觉、运动分析、由灰度恢复表面形状等不同处理单元。第三阶段是3维阶段,即对2.5维描述进行进一步处理,得到物体的完整三维描述,而且必须是物体本身某一固定坐标系下的描述。80年代中期至今,计算机视觉理论获得了蓬勃发展,新方法、新理论不断涌现,许多学者认为3维重建的目标提得太高,视觉任务一般不需要重建,这大大推动了计算机视觉研究的发展,随着科技的进步及人

们对视觉技术研究的不断深入, 计算机视觉技术将会在越来越多的领域得到广泛的应用。

1.2.2 计算机视觉在焊接中的应用

在焊接领域, 随着计算机视觉的发展, 借助图像传感设备和智能化的图像处理方法等, 许多焊接机器人及特定的自动焊机具备了一定的视觉功能, 实现了焊接路径预测规划^[36, 37]、焊缝实时跟踪检测, 焊接质量实时监测^[38, 39]以及焊后质量在线^[40]、离线检测等功能。焊缝的路径预测规划可以通过设置全局摄像机直接获取全局路径, 通过获取的焊缝完成路径规划; 或是在焊枪前方加装随焊枪一起移动的摄像机, 通过已获得的焊缝图像提取出焊缝特征点, 拟合获得焊缝的方向, 进行在线路径规划^[41]。焊缝视觉跟踪是利用 CCD/CMOS 摄像机等设备获取焊缝图像, 实时处理获取的焊缝位置及形状信息, 之后精确确定焊炬与焊缝的位置关系, 实时控制焊炬的焊接位置, 以保证焊接质量^[42-45]。焊接质量实时监测通常是通过高速摄像机直接观察熔池及其附近区域, 获取焊接过程中熔池的图像或等离子体等信息, 实现对焊接状态的在线监控和对焊接缺陷的辨识, 进而实现对焊接过程的闭环控制。焊缝质量检测主要包括焊缝表面质量检测及焊缝内部缺陷检测。传统的焊缝表面质量检测主要由人工识别, 传统的焊缝内部缺陷检测主要是通过 X 光探伤仪将焊缝成像在显示器上, 由检验人员对屏幕上的焊缝依据有关标准进行评判, 这两种传统工作模式均为离线检测, 检测的精度难以得到保证。随着图像处理技术的发展, 可以利用 CCD/CMOS 摄像机等设备直接在线获取焊后焊缝图像, 通过图像实时处理识别检测焊缝表面缺陷, 同时可以依据识别结果实时调整焊接工艺参数, 提高焊接质量, 而焊缝内部缺陷也可以利用红外摄像仪、X 光探伤仪等离线获取, 之后通过图像处理自动识别焊接缺陷。

采用最新的计算机视觉理论, 研究焊接机器人视觉传感与控制技术, 研制能够识别目标环境、实时精确跟踪焊接轨迹并调整焊接参数的智能焊接机器人已经成为焊接领域的重要发展趋势之一。国内外许多研究人员对视觉系统在焊接接头特征识别、焊接参数优化、焊炬位姿调节、焊接路径规划、焊缝跟踪、焊缝熔透控制等方面的应用已经开展了卓有成效的研究^[46-49]。在此基础上, 国外知名的焊接机器人厂家相继开发出装备有新型视觉传感系统的机器人, 国内也开展了具有视觉传感功能的智能化的特种机器人的研究工作。与普通机器人相比, 新型机器人因其具有更为广阔的应用领域、更为强大的功能及更为优越的性能, 而受到市场广泛欢迎, 具有视觉功能的机器人已经应用于汽车、航天和重型构件的生产以及用于锅炉、管道、大型球罐的焊接生产。

计算机视觉在焊接领域的应用, 一方面提高了焊接自动化水平和生产率、降低了工人的劳动强度; 另一方面可应用在人类难以直接作业的特殊场合, 如水下、

空间、核辐射环境等, 以及一些特种焊接, 如激光焊接等的自动焊接施工, 确保了焊缝质量的稳定性和可靠性。

1.3 焊缝视觉跟踪技术研究进展

1.3.1 焊缝视觉跟踪技术概述

视觉传感由于具有与工件无接触、采集信息量大, 识别信息丰富, 识别精度高等诸多优点而成为自动化焊接过程中成为最有前途的方法之一。

应用于焊缝跟踪的视觉传感器根据传感器件的不同主要分为简单光电元器件、集成光电元器件、激光式、红外式、光谱式等, 根据是否使用附加光源可分为“主动视觉”和“被动视觉”两种。

主动视觉法是一种利用辅助光源基于三角测量原理的测量方法。根据使用的辅助光类型, 将主动视觉法分为结构光法和激光扫描法, 其中结构光法采用单激光作为辅助光源, 激光扫描法采用扫描激光束作为辅助光源。激光具有单色性好、方向性好、干涉性好、能量密度高等优点, 以激光作为光源检测信噪比将大大提高, 会获得较好的图像效果, 并且由于光源是可控的, 所获得的图像受环境的干扰可以通过图像处理算法滤除, 图像的底层处理稳定、实时性也较好。

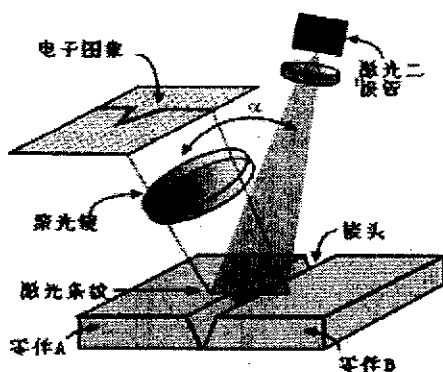


图 1-1 结构光法原理

Fig 1-1 Principle of structured light

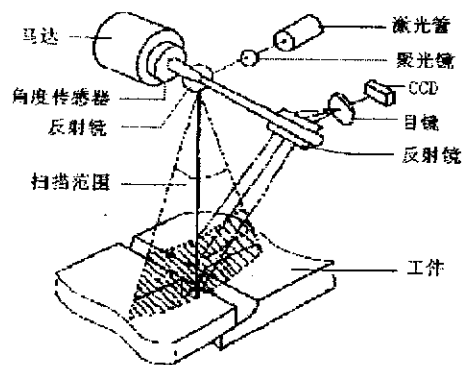


图 1-2 激光扫描视觉传感器原理

Fig 1-2 Principle of laser scanning visual sensor

结构光法如图 1-1 所示, 就是将平面光束照射在物体表面形成光带, 光带的偏转数据反映了物体表面的三维形状信息, 用这种方法可以精确地获取物体的三维信息。结构光三角法由于其成本较低, 实时性好得到了广泛应用, 用于三角法的结构光主要是条状的, 在现有的视觉系统中, 有用一条条带的, 也有用多条条带的。但对于结构光法, 当结构光照射在经过钢丝刷去除氧化膜或磨削过的铝板或其他光滑金属板表面时, 会产生强烈的二次反射, 往往使后续的处理失败; 另外,

由于获取的图像质量要经过较为复杂的后续处理,精度也会降低。所以要在系统硬件和软件的后续处理上采取措施,将其负面影响降低到最小程度。

激光扫描法是将激光束集中于一点,测量时聚焦探测装置拍摄光点图像并使之相对于光点处于聚焦位置,光点的位置信息由聚焦探测装置给出,如图 1-2 所示,测量精度为微米级,信噪比要比结构光大得多。但激光扫描装置精度高,造价昂贵,结构复杂,较难广泛应用。

被动视觉法不需要另加辅助光源,直接通过图像传感器拍摄在弧光或普通光源背景下的焊接区图像,这种方法能获得接头和熔池的大量信息,设备简单,成本低,但被动视觉法存在强光干扰的问题,即在焊接过程中,电弧的辐射光强度远远超过焊接熔池辐射光强,图像噪声经常会把熔池内部的图像信息淹没掉,因此,目前生产实际应用中多采用主动视觉法。

1.3.2 国内外研究进展

70 年代末,国外将视觉传感应用于示教再现后的弧焊机器人,实现了弧焊机器人的自适应控制,但当时的系统是离线的,非实时的。70 年代末—80 年代初,机器人视觉还是基于视觉信息反馈而进行的路径补偿。例如,美国 Unimation 公司和日本 Kawasaki 公司合作开发的 MODEL79A 系统,同时还有英国 W.F.Clocksion 等人开发的产品,其焊接误差低于 $\pm 0.3\text{mm}$,但系统处理速度慢,2s 才能处理一幅图像。1982 年 3 月,美国的 Automatix 公司开发了一种单道视觉系统 Autovision I^[50],能够一边扫描焊缝,一边完成焊接,系统速度达 0.1m/min ,这些焊缝跟踪系统都要预先示教,并不是真正的实时焊接。

80 年代以来,真正不需要任何示教的焊缝视觉跟踪系统是由瑞典 ASEA 公司于 1986 年率先推出的 Laser Trak 视觉跟踪系统^[51],该系统无须对焊缝路径进行预先示教,能自动找到焊缝的起点并跟踪,直到完成焊接,能够跟踪对接、搭接、角接三种焊接形式,焊接精度 $\pm 0.4\text{mm}$,焊接速度 0.12m/min 。1988 年在美国海军部的支持下,美国 MTS System Corporation 也开发了一种叫 LARS 的基于视觉引导的实时焊缝跟踪系统,这种系统也不需要预先示教焊缝所在的工作表面及焊缝路径,采用高能量的激光作为照明源,并用三个摄像机同时摄取各个角度的焊缝图像,焊接速度达 4.90m/min ,所能检测的焊缝类型主要为对接焊,搭接焊以及填丝焊。

目前,国外相关研究机构及公司针对焊缝视觉跟踪技术展开了广泛的研究并取得了突出成果。美国、英国、加拿大、德国等都有激光焊缝跟踪的商业化产品。

美国 Worthington Industries 公司开发一种焊缝跟踪设备对激光焊接进行跟踪,定位精度可达 $\pm 0.05\text{mm}$ 。美国 Midleville 公司采用激光加上光学传感器对长达 4 英里的管线直缝进行焊接跟踪,焊接速度可达 $120\text{--}130\text{in./min}$ 。美国 Motoman 公司的

激光焊缝跟踪器适用于在超过100in./min焊接速度的情况下焊接薄板。美国Jetline公司的MODEL JST Optical Seamtracker精度可达0.1mm，见图1-3。

英国的Meta Vision Systems Ltd 的激光焊缝跟踪系统水平分辨率可达0.02mm，涉及的焊接方法包括MIG焊、TIG焊、埋弧焊、激光焊以及激光—电弧复合焊，见图1-4。



图 1-3 美国 Jetline Seamtracker

Fig 1-3 Seamtracker of Jetline

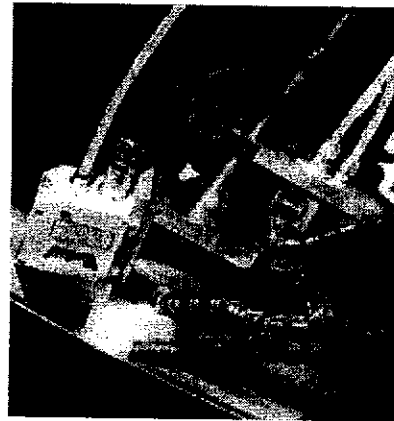


图 1-4 英国 Meta 焊缝跟踪系统

Fig 1-4 Seam tracking system of Meta

加拿大的Servo-Robot公司开发的高分辨率激光焊缝跟踪系统可用于自动焊接和机器人焊接的焊缝跟踪以及质量检测控制，可跟踪的最高速度为10m/min，见图1-5。加拿大Modular Vision System向市场上推出了一种三维激光视觉传感器，可在20m/min的焊接速度下对仅有0.05mm的根部开口或误差进行跟踪，见图1-6。

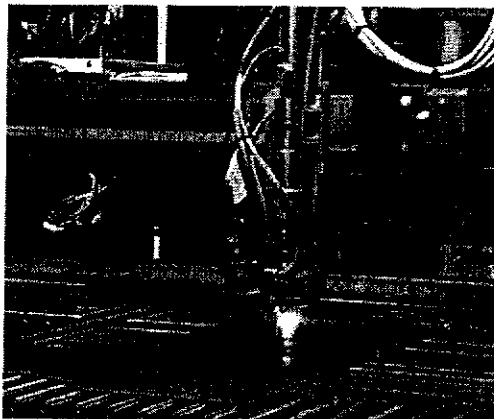


图 1-5 加拿大 Servo-robot 焊缝跟踪系统

Fig 1-5 Seam tracking system of Servo-robot

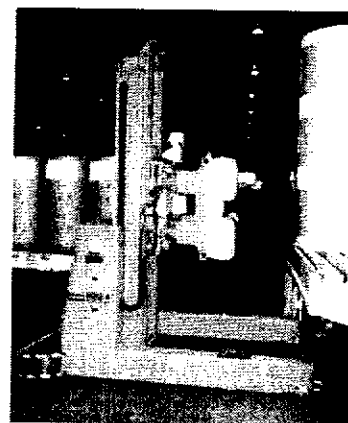


图 1-6 加拿大三维激光视觉传感器

Fig 1-6 Laser vision sensor of Canada

德国Precitec公司的激光焊缝跟踪系统LPF可以实现激光焊接的焊缝跟踪，跟踪精度可以达到0.05mm，见图1-7。

日本IHI公司的iL-Viewer焊缝跟踪系统通过分析熔池图像实现激光焊接过程

的跟踪控制^[52]，见图1-8。

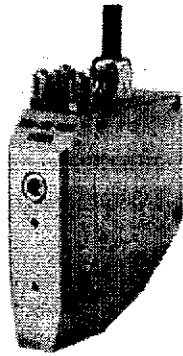


图 1-7 德国 Precitec 焊缝跟踪系统

Fig 1-7 Seam tracking system of Precitec

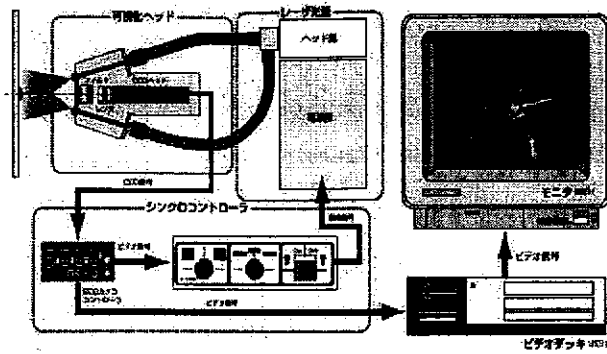


图 1-8 日本 IHI iLviewer 熔池监测系统

Fig 1-8 IHI iLViewer weld pool monitor

国内对焊缝视觉跟踪的研究主要是基于我国焊接行业的国情进行的基础性研究，虽然起步晚，但也取得了相当的成果。北京自动化所研发了一种基于结构光的视觉焊缝跟踪传感器，由激光发生器、摄像机、监视器和处理单元等组成，应用于弧焊机器人系统，可以进行焊缝识别并自动焊接^[53, 54]，如图 1-9 所示。南昌大学研发了基于焊缝背面温度场分布的焊缝跟踪智能控制系统，识别误差不超过 0.1mm，焊缝跟踪误差在 $\pm 0.5\text{mm}$ 之内^[55]。哈尔滨工业大学的激光扫描视觉焊缝跟踪传感器基于三角测量原理，采用精细聚焦的激光束作为主动光源对焊缝进行扫描测量提高了抗弧光干扰能力，横向测量精度可达 0.15mm，纵向测量精度可达 0.1mm，但系统成本较高^[56]。河北工业大学的基于机器人视觉大型焊缝识别与跟踪系统研究，该系统采用结构光传感器采集焊缝图像，跟踪精度为 $\pm 0.4\text{mm}$ ^[57]。智通机器人系统有限公司研发的实时焊缝跟踪技术有助于补偿由焊接件的尺寸偏差和焊接夹具的装夹误差带来的焊缝位置的不一致或变形，跟踪精确度为 0.15mm，如图 1-10 所示。

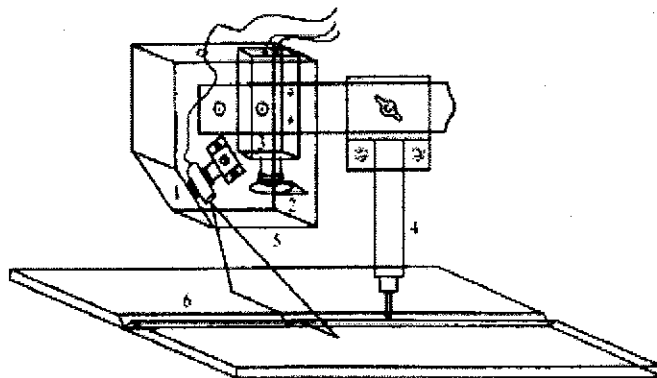


图 1-9 北京自动化所结构光视觉传感器

Fig 1-9 Structured light vision sensor of Institute of Automation



图 1-10 智通公司基于焊缝视觉跟踪的弧焊机器人

Fig 1-10 Arc welding robot based on visual seam tracking system of InterSmart

由于工业生产要求较高,国内的研究成果还较少应用于实际生产,并且大部分是针对弧焊等传统焊接过程中的焊缝跟踪展开的研究。

1.4 焊缝视觉跟踪技术研究的关键问题

1.4.1 焊缝跟踪图像处理技术

焊缝跟踪光纹图像实时处理技术是焊缝视觉跟踪系统的关键技术之一,是影响结构光焊缝视觉跟踪系统实时性的主要问题。一方面,激光焊接速度快,采用机器人进行激光焊接通常可以达到 6-8m/min,采用直角坐标机器人可以达到 10m/min,这就对跟踪系统实时性提出了较高的要求,而图像处理的实时性是制约跟踪系统实时性的关键;另一方面,激光焊接过程中的飞溅、烟尘、蒸汽、激光以及工件上的划痕、标记等这些因素都会对焊缝图像的质量有很大的影响,为了消除干扰需要采用图像处理方法,而图像处理方法若过于复杂会增加处理时间,将很难满足实时跟踪的要求,因此,如何优化图像处理方法,提高处理速度,保证跟踪系统的实时性是激光焊接焊缝视觉跟踪的一个难点。

目前,研究人员针对焊缝跟踪系统的光纹图像实时处理技术作了大量相关研究^[58, 59],焊缝跟踪光纹图像处理流程基本分为三个步骤:(1)光纹图像预处理;(2)光纹中心线提取;(3)焊缝剖面特征点识别。

采集的焊缝图像一般含有很多干扰噪声,因而在提取特征点之前需要对图像进行预处理,包括整体滤波去噪以及图像增强等。图像滤波去噪的方法有频域去噪和空域去噪,前者是基于图像的傅立叶变换,常采用频域高(低)通滤波法、同态滤波法等;后者是直接对图像像素进行处理,常采用直方图修正,邻域平均法、中值滤波法、均值滤波法等。在实时图像处理中,因后者的处理速度快多采

用后者。

华中科技大学朱六妹等人针对中值滤波耗时长的问题提出了对图像卷积滤波二值化后再进行中值滤波的方法,二值化后的图像像素灰度值为 0 或 255,可以不必对处理窗口进行排序取中间值,只要处理窗口中像素灰度值大于某一域值的像素个数大于处理窗口尺寸的一半,就认为该被处理像素点有信号,并把该像素灰度值设为最高值,免除中值滤波排序过程,节约处理时间,处理幅面为 200×200 的图像所用时间大约为 200ms,满足了弧焊过程中焊缝跟踪的实时性要求^[60]。

跟踪过程中可以选择光纹的边缘或是光纹的中心线来识别特征点,由于采用光纹中心线可以保证跟踪精度,因此多采用提取结构光条纹中心线来识别特征点,进行跟踪。

光纹中心线的提取可以通过基于焊缝边缘的方法来获得,首先由阈值分割、数学形态学或边缘检测算子等方法获得光纹的两条边缘,进而计算出光纹中心线。

阈值分割方法对图像采用二值化阈值分割。二值化方法的关键问题在于阈值的确定。西安交大杨煊等为了使阈值的选择具有适应性,对整幅图像的行或列进行扫描,并对每行或每列求出直方图,利用直方图选择阈值,再对该行或列进行二值化,这种方法被证明具有较好的抗噪声能力^[61]。徐德等人对弧焊过程中获取的跟踪激光条纹图像进行增强并二值化处理获取中心线,效果良好^[62]。

光纹的边缘也可以通过边缘检测的方法获取,研究人员已经设计出许多边缘检测算子,如 Sobel 算子,Robert 算子, Laplace 算子等,很长时间以来,各国学者在如何提高边缘的检测性能方面做了大量的工作。1980 年, Marr 和 Hildreth^[63]提出 LOG 边缘检测算子,将原始图像先用 Gauss 函数平滑,然后再将 Laplace 算子作用于平滑后的结果,用提取零交叉点的方法进行边缘检测;1986 年 Canny^[64]应用变分原理推导出一种用高斯模板一阶导数逼近的最优算子,可以有效地确定信号突变位置。由于这两种算子都基于 Gauss 函数空间, Gauss 函数的方差直接影响到边缘检测的效果。Hough 变换^[65]是对图像进行某种形式的坐标变换,将原始图像中给定形状的曲线或直线变换成空间中的一个点,即原始图像中直线上所有的点都集中到变换空间的某个点上形成峰点,从而识别出一段直线,其受噪声的影响较小。小波分析^[66-68]是近几年发展起来信号处理技术,具有良好的时频局部特性,利用小波变换的多尺度特性,提取不同精度、不同奇异度边缘可以获得良好的效果。邹奇仕等人对 CO_2 焊焊缝跟踪结构光条纹图像进行卷积滤波和中值滤波后,采用 Roberts 算子,可以较好地保留激光光带的边缘,精度满足其焊接要求^[69]。南昌大学刘南生等人提出了一种 V 型坡口光纹提取方法,选取 3 次样条小波函数对图像中的每列灰度信号进行多尺度小波变换得到边缘突变点信息,再利用尺度 1 与尺度 2 上的小波变换相乘,以突出边缘、削弱噪声,可靠地提取出 V 型坡口光

纹^[70]。

结构光光纹宽度方向上的灰度近似服从高斯分布, 根据这一特点, 研究人员提出了相应的光纹中心的亚像素提取方法, 如质心法, 曲线拟合法^[71, 72], 曲面拟合法, 极值法, Hessian 矩阵法^[73, 74], 基于 FIR 的方法, 方向模板法^[75], 遗传算法^[76]等。北京自动化所的李原等人采用基于图像序列方向像素灰度分布的曲线峰值提取光纹中心, 并利用激光条纹位置在时间和图像空间上的连续性和相关性, 进行特征点判断识别, 应用于沟槽类焊缝, 效果良好^[77]。

虽然现已存在的算法很多, 但是任何一种算法都不能精确提取所有情况下的激光光纹中心, 很多最优检测算法都只是在特定的模型下的最优, 到目前为止还是缺乏客观的激光光纹中心检测算法评价标准。

获取光纹中心之后, 还要进行进一步的特征分析, 即识别反映焊缝剖面信息的条纹特征点。对于结构光视觉, 一般采取对光纹图像进行斜率分析, 找到焊缝左右边缘并求其平均值的方法找到焊缝中心。华南理工黄石生等人针对坡口宽度为 15mm^[78]的 TIG 焊, 采用寻边算法, 通过梯度运算寻找边界点及坡口的准确位置。清华大学陈新征等在条纹中心线两端分别按照一定间隔设置若干个点, 首先计算出每两点之间线段的斜率, 然后可以求出每相邻两线段的斜率的差值, 通过实验设定合适的差值阈值, 即可找到斜率突变的点对应为棱边^[79]。以上讨论的方法均是针对存在间隙的焊缝, 而窄间隙、特征点不明显的焊缝剖面特征点识别仍是难题。

1.4.2 结构光传感器标定技术

结构光视觉传感器标定不仅包括摄像机的内外参数标定, 还包括传感器结构参数的标定, 即描述投射光源与摄像机间相对位置的参数的标定。

1.4.2.1 摄像机标定

在三维计算机视觉领域内的摄像机标定, 是指确定摄像机内部几何和光学特性(内部参数)和摄像机坐标相对于一个世界坐标系的三维位置和方向(外部参数)的方法。在计算机视觉中, 图像由一个二维的数据阵列表示, 其元素值表示空间某一点的亮度, 而亮度反映了空间物体某点反射光的强度, 该点的空间位置就由假设的摄像机模型和相应的参数确定。摄像机标定是从二维图像获取三维空间信息(欧几里德空间)的关键和必要步骤, 如基于图像的物体重建, 基于图像的测量等。

目前, 摄像机标定技术大体可以分为两类: 传统的摄像机标定方法、摄像机自标定方法。

传统标定方法的特点是要求有高精度的标定块, 标定精度高, 但算法复杂。

标定过程中采用一个结构已知、加工精度很高的标定块作为空间参照物,通过空间点和图像点之间的对应关系来建立摄像机模型参数的约束,然后通过优化算法来求取这些参数。根据求取标定参数方法的不同又将传统的标定方法分为三类:非线性优化法、解析法和两步法。大多数传统标定方法采用非线性优化法,可获得高精度的标定结果,但需要的计算量非常大。解析法通过解一组线性方程来得到标定结果,简化了计算过程,但标定精度不够。Tsai^[80]在他的论文中所使用的是典型的两步法,是假定只存在径向畸变的条件下的标定算法,此法将以上两种方法综合,采用解析法直接计算部分参数并作为非线性优化的初值,迭代计算得到最优参数值。也有人根据需求求解的参数类型,将传统的标定方法分为显参数和隐参数标定方法。显参数法指标定需要计算出摄像机的物理几何参数,如主点(图像中心)、焦距等,大多数文献中提出的标定方法属于这一类,而在有的场合,标定的参数并没有具体的物理意义。传统标定方法的典型代表有 DLT 方法(Direct Linear Transformation)^[81], Tsai 的方法,利用透视变换矩阵的摄像机标定方法^[82-84],迭代法,以及简易标定方法等。这些方法都涉及非线性方程求解,或需假设摄像机部分内参数可由其他方法测出,或者用线性模型首先计算出线性模型的参数,作为近似初值,再用迭代的方法计算出精确解。研究人员在寻找更合适的摄像机模型方面也作了深入的探讨^[85], Martins 等首先提出了双平面模型(two plane model)^[86], 马颂德等人^[87, 88]利用双平面模型标定摄像机参数,该方法把以上所介绍的摄像机线性参数与非线性参数组合成一些中间参数,用线性计算方法标定这些参数,可以简化计算过程,实验也表明,这种方法可较大地改善摄像机非线性参数的标定精度。

通常当应用场合所要求的精度很高且摄像机的参数不经常变化时,采用传统的摄像机标定方法,但该标定方法需要高精度的标定块,而实际应用中在很多情况下无法使用标定块,如空间机器人、危险、恶劣环境下工作的机器人等。

20 世纪 90 年代初, Hartley^[89]和 Faugeras^[90]首次提出摄像机自标定的思想,使得在场景未知和摄像机任意运动的一般情形下的标定成为可能^[91]。自标定方法(self-calibration)不需要标定物,是指仅依靠多幅图像对应点之间的关系直接进行标定的过程。从本质上来说,自标定法都是利用摄像机内参数自身存在的约束,与场景和摄像机运动无关。由于其仅需要建立图像对应点,所以标定方法灵活性强,应用范围广泛。自标定方法最大的不足是鲁棒性差^[92]。这主要是由于自标定方法不论以何种形式出现,均是基于绝对二次曲线(absolute conic)和绝对二次曲面(absolute quadric)的方法,需要求解多元非线性方程,除噪声影响之外,对初值的选择也十分敏感。自标定方法的主要应用场所是精度要求不高的场合,如通讯、虚拟现实等。在这些场合,首要需要考虑的问题是视觉效果而不是绝对精度。

由于线性方法计算简单,在数值上比非线性方法稳定,马颂德研究员首次利用主动视觉系统对摄像机运动的可控性,提出了自标定的线性方法^[93],属于基于主动视觉的摄像机标定。所谓的基于主动视觉的摄像机标定是指在已知摄像机的某些运动信息下标定摄像机的方法。这里,已知摄像机的某些运动信息包括定量信息和定性信息。定量信息如摄像机在平台坐标系下朝某一方向平移某一给定量,摄像机的二平移运动正交等。定性信息如摄像机仅作纯平移运动或纯旋转运动等。基于主动视觉摄像机标定方法的主要特点是由于在标定过程中知道了一些摄像机的运动信息,所以一般来说,摄像机的模型参数可以线性求解,因而算法的鲁棒性比较高,但却不适用于运动未知或运动无法控制的场合。

1.4.2.2 结构光传感器标定

近年来,关于结构光标定的文献有很多,大致分为传统标定方法和直接标定方法两类。

传统标定方法将系统需要标定的参数分为两部分,即摄像机内外参数和系统结构参数,通过两个步骤分别标定完成。首先标定摄像机内外参数,已有很多成熟的方法,然后根据应用的特征来估计系统的结构参数。目前,线结构光传感器的传统标定方法主要有靶标标定法、微分法、消隐点法、机械调整法、细丝散射法、交比不变法等。

靶标标定法是采用经特殊设计的靶标实现结构光传感器的标定,天津大学段发阶、刘凤梅等人^[94, 95]提出一种锯齿靶标法,该方法的实验装置包括锯齿靶标和一个一维工作台,首先标定摄像机的内参数,然后移动固定在一维工作台上的齿形标定靶,通过求解迭代方程来获取光平面与摄像机之间的相互位置关系。此种方法的不足之处是标定点数目少。北京航空航天大学的周富强提出了一种基于共面标定参照物的结构光传感器现场标定方法,该方法允许共面标定参照物在测量空间内自由移动,通过以摄像机三维坐标系为中介,将多个局部世界坐标系下的标定特征点统一到全局坐标系中,利用构建的标定特征点在现场对结构光传感器进行标定,因此可以保证传感器的标定状态与测量状态完全一致^[96]。

天津大学王春和等人将标定块置于二维工作台上,采用微分法,通过移动标准块位置求解微分方程来进行标定,与三坐标测量机比对,示值误差小于 0.15mm ^[97]。

天津大学肖海等人提出了消隐点法来进行结构光传感器的标定^[98]。在成像几何中,不与像平面平行的一个平面经过成像系统后,在像平面上要汇于一条直线,这条直线称为这个平面所形成的消隐线。另外,这个平面上的任意两条平行直线在像平面上的投影会相交于一点,这个点称之为消隐点。这个消隐点实际上为无穷远处的物点所成的像。选用方形量块作为标定靶标,标定出结构光传感器中激

光器同摄像机的夹角以及基线距离。

机械调整法^[99]是先用调整机构或经验,把光平面调到相对摄像机的一个特定位置,再利用理想透视模型求得光平面相对摄像机的位置。由于人为调整环节多,摄像机简化为理想模型,因此该方法精度不高,只适合一些小测量范围场合。

R. Dewar 和 K. W. James 分别使用了细丝散射法,其主要原理是让光平面投射到几根相互平行且完全不共面的细丝上,由于细丝散射,从而在细丝上形成亮点,几个亮点在像面上成像,将这些亮点作为标定点,采用外部三坐标测量设备可以获取亮点在空间中的三维坐标值,同时可以提取亮点在图像中的二维图像坐标,再用这两种坐标值来求解光平面与摄像机间的位置参数。这种方法要求投射器投射出的光束是可见光束,否则标定过程无法进行,并且由于拉丝有限,获取的标定点少,再者,亮点本身表现为一种光强分布,用仪器瞄准的亮点与利用软件算法从亮点在像平面成像形成的灰度分布中提取的点一般不是对应点,另外,由于细丝和实际测量中的待测物表面的散射特性相差较大,这必然导致利用细丝散射在像面上形成的灰度分布求得的特征点,与利用待测物表面散射在像面上形成的灰度分布求得的特征点不是来自同一个光平面,这两种不一致必然会给标定带来误差。

徐光祐^[100]和 D. Q. HUYNH^[101]先后分别提出了利用交比不变性原理进行标定。通过标定靶标上已知精确坐标的至少三个共线点,利用一次交比不变性来获得结构光光纹与该已知三点所在直线的交点的坐标,从而获得光平面上的标定点,为了克服一次交比不变法标定点数量较少的缺点,魏振忠提出了双重交比不变法^[102],可以有效地提高精度。

上面的传统标定方法也称为有模型标定方法^[103],为了提高标定的精度,相应的模型也会越复杂,计算量也很大,鉴于此,Emanuele Trucco^[103]等人提出了直接标定方法。该方法需要高精度的标定块,通过获取工作空间内已知三维空间坐标的特征点的图像坐标,根据图像坐标和三维空间坐标的对应关系,之后经插值算法,建立整个像面的索引表,该方法不需要标定模型,简单快速。王宗义等人^[104]通过将标定板置于工作区间的投射光平面内,并使标定板平面和光平面重合,检测图像上的特征点,获取特征点图像坐标和三维空间坐标的关系,然而操作过程中保证两个平面的完全重合需要一定的经验及方法。

直接标定方法不需要标定摄像机内外参数及结构参数,而是通过算法建立特征点的图像坐标同其空间三维坐标的对应关系,光面内任意点的空间三维坐标可以根据对应关系插值获得。点的图像坐标与其空间三维坐标的对应关系可以通过神经网络^[105-107]、遗传算法等建立。魏振忠利用RBF神经网络技术进行建模,通过神经网络的训练实现了系统的直接标定^[108]。A. Dipanda等人^[109]通过使用遗传算法

(Genetic Algorithm, GA)拟合出重构3-D坐标的各个双曲线系数,从而直接由图像2-D坐标得出实际点的3-D坐标。

1.4.3 焊缝跟踪系统控制方法

焊接过程中,跟踪传感器提供了焊缝位置偏差信息后,如何设计跟踪控制算法,实时控制执行机构使焊炬自动跟踪焊缝,是焊缝自动跟踪系统中亟待解决的问题。

在工程应用中最普遍的方法是PI(比例积分)控制法,然而仅采用PI调节会降低系统的相对稳定性,因而引进了PID控制方法。这些控制方法的实质是从被控对象检测出状态变量,以此检测值和期望值比较,得出偏差量,输送到特别设计的控制器中,按照已建立的数学模型进行运算,得出控制量,调节执行机构,控制焊炬同焊缝的位置偏差,使检测值和期望值更为接近,如此循环动作,使偏差量趋向于零,保证偏差量在允许的偏差范围之内。由于焊接过程是一个时变、多因素、非线性的复杂过程,存在着强光干扰、热变形和工艺规范等多种因素的影响^[110],所以单纯利用经典PID控制难于实现焊缝的自动跟踪。

进入90年代以来,随着电子技术、计算机技术、自动控制技术以及信息技术迅速地引入焊接领域,各种智能控制方法以及混合控制方法也逐步应用到焊接领域中来^[111, 112]。对于焊缝跟踪系统,国内外学者研究并应用了很多智能控制方法,主要包括模糊控制^[113-116]、人工神经网络^[117-120]、专家系统^[121, 122]以及混合控制方法^[57, 115, 123, 124]等。模糊控制是吸收了人的思维具有模糊性的特点,使用模糊数学中的隶属函数、模糊关系、模糊推理和决策等工具,得出控制动作。简单模糊控制器以检测到的焊炬偏离焊缝中心线的偏差和偏差变化作为模糊控制器的输入,根据控制规则,误差及误差变换率的模糊子集产生控制决策表,通过决策表的直接查询,可得到每一时刻应施于控制系统的控制动作,从而达到实时控制的目的。神经网络控制技术已被应用在弧焊机器人的焊缝跟踪控制技术中,通过神经网络在笛卡尔空间轨迹的补偿作用,确定出基于笛卡尔空间的参考轨迹控制。机器人焊缝跟踪系统采用神经网络控制器,具有良好的控制特性和较强的鲁棒性。专家系统控制也是智能控制方法的一种,这种控制方法采用被控对象领域的专业知识和经验,采用人工智能专家系统的知识表示及推理技术,得出控制动作,从而达到控制的目的。在焊缝跟踪系统中,专家系统控制方法还只是研究阶段,但在焊接中的其他领域已经有了逐步的应用。

日本S. Murakami等人^[125]研究了基于模糊控制的电弧传感焊缝跟踪系统,设计了模糊滤波器和模糊控制器,控制效果良好。高向东等人^[126]提出了一个自调整模糊控制器对焊枪运动进行控制,有效地提高了焊缝跟踪精度。胡绳荪^[115]采用Fuzzy—P控制方法,选取一个分段阈值,当偏差大于这个阈值时采用比例控制,小于或

等于这个阈值时则采用自调整模糊控制。该方法在控制过程中,采用了双因数自调整模糊控制算法,并在实验基础上确定了各参数的数值。试验也证明该方法具有快速、准确、稳定的特点,完全能够满足实际工程应用的需要。神经网络与模糊控制结合是最新颖、更有效的控制方法,它大大提高了控制的效果。Li Dia^[127]采用了模糊神经网络技术来实现GTAW焊接过程的控制,这种方法结合了神经网络和模糊逻辑控制的技术,消除了模糊专家法则的依靠限制和非自适应模糊规则缺陷,简化了模糊法则,提高了用于先进焊接过程成员函数的自适应性,结果表明这种方法应用在规则焊缝的电弧焊焊接过程控制中非常有效。华南理工大学黄石生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 Resonance Theory)神经网络的焊缝跟踪算法^[128],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,将实际焊接中获取的图像的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FUZZY-PID分阶段复合控制器,即当偏差大于某个给定阈值时采用模糊控制,增加系统的阻尼特性,可以在变量分级不高的情况下,精确的完成对偏差的调节;当偏差小于阈值时,切换到PID控制,以增大系统的响应速度,使系统得到及时调整^[129]。

1.5 论文的课题来源和主要内容

1.5.1 课题来源

本文的研究是结合中国科学院知识创新工程重要方向性课题“全自动激光拼焊成套装备关键技术与示范应用”,沈阳市科技攻关项目“激光视觉焊缝跟踪与质量检测技术研究”展开的,图 1-11 为全自动激光拼焊成套装备。

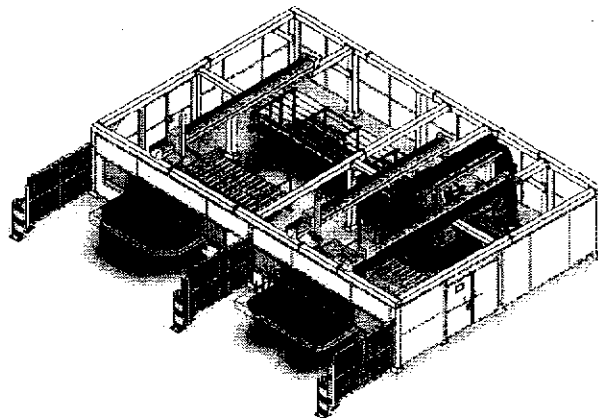


图 1-11 全自动激光拼焊成套装备

Fig 1-11 The automatic laser tailored blank welding equipment

1.5.2 本文的主要内容和安排

本文以激光拼焊为背景, 针对激光焊接焊缝跟踪中存在的科学问题和实际应用需求, 基于结构光视觉检测原理、实时图像处理等技术, 开展了应用于机器人激光拼焊系统的焊缝视觉跟踪关键技术研究以及系统集成技术研究, 为激光拼焊装备的发展提供了理论和技术上的支持。主要包括视觉跟踪传感器检测原理及结构分析, 激光拼焊焊缝跟踪图像处理方法, 结构光传感器标定技术, 焊缝跟踪控制方法及焊缝视觉跟踪补偿方法等。全文共分为六章, 各章节内容安排如下:

第1章 绪论

主要阐述了课题的学术背景, 问题的提出及课题研究的必要性和意义; 介绍了计算机视觉技术的发展及其在焊接中的应用; 详细介绍了焊缝视觉跟踪技术及其研究进展; 综述了焊缝视觉跟踪系统研究的关键技术: 对线结构光图像处理方法进行了总结归纳, 对传统摄像机标定及结构光传感器标定的各种方法进行了回顾和比较, 并对已有方法进行总结, 对焊缝跟踪控制方法进行了介绍; 最后说明了本论文的课题来源和主要研究内容。

第2章 视觉跟踪传感器检测原理及结构分析

介绍了线结构光视觉测量原理并建立了检测模型, 详细分析了视觉传感器精度影响因素, 在此基础上进行了结构光视觉传感器的原理设计, 给出了结构光视觉传感器的优化结构参数。

第3章 激光拼焊焊缝跟踪图像处理方法研究

分析了激光拼焊焊缝跟踪图像处理的特点, 包括焊接环境、焊缝类型以及焊接速度、焊接精度等因素的影响, 根据图像特征设计了相应的图像预处理算法、结构光中心线提取算法以及焊缝特征点识别算法。最后, 通过实验验证了该图像处理流程的有效性。

第4章 焊缝视觉跟踪标定技术研究

介绍了摄像机以及结构光视觉传感器的标定方法, 详细论述了结构光视觉传感器的传统标定方法以及直接标定方法, 并提出了一种新的线结构光视觉传感器直接标定方法, 该方法不必对摄像机的内外参数和系统结构参数进行标定, 通过摄取位于激光光面内标准标定块上特征点的图像, 建立特征点图像坐标同其空间三维坐标间的直接映射关系, 光面上其它点的三维空间坐标即可通过已知点插值获得, 最后给出了实验结果及精度分析。

第5章 焊缝视觉跟踪控制方法研究

探讨了焊缝跟踪系统超前偏差检测及跟踪过程节拍同步问题, 给出了跟踪过程中运动控制节拍和图像采集系统节拍同步的解决方案。针对激光拼焊过程中焊缝跟踪控制的特点, 建立基于图像的激光拼焊焊缝跟踪系统控制模型, 设计模糊

控制器,并结合激光拼焊焊缝跟踪系统生产实际要求,给出了焊缝跟踪系统的精度及实时性分析。

第6章 机器人激光拼焊视觉跟踪补偿方法研究

设计了应用于激光拼焊的焊缝视觉跟踪系统及基于焊缝视觉跟踪的激光拼焊系统实验平台;分析了激光拼焊过程中焊接精度的影响因素,结合系统工作的特点,进行了不同形状焊缝的视觉跟踪实验;根据同轴视觉传感,提出了一种新的基于同轴视觉传感的焊缝跟踪补偿方法,该方法直接获取激光焊点处的光斑图像,可以直接修正机器人焊点处轨迹偏差,在焊接过程中结合跟踪系统获取信息,最终实现激光拼焊过程中的误差跟踪补偿。

最后,全面总结了本论文的主要研究工作、研究成果,并对后续工作进行了展望。

第2章 视觉跟踪传感器检测原理及结构分析

线结构光视觉传感器是焊缝跟踪系统的核心,本章根据线结构光视觉检测基本原理建立了线结构光视觉传感器检测数学模型,分析了视觉传感器测量精度的影响因素,并给出了焊缝跟踪系统中线结构光视觉传感器的优化设计方法及结构参数。

2.1 线结构光视觉传感器检测原理

结构光视觉传感器具有测量精度高、获得信息量大、灵敏度高、实时性好、抗干扰能力强等特点^[21, 43, 130],被广泛应用于焊缝跟踪领域。

结构光视觉传感器作为焊缝跟踪系统中获得焊缝信息的重要组成部分,其测量精度与性能对焊缝跟踪系统的总体测量精度及可靠性有着直接影响^[131]。在结构光视觉传感器中,激光器与摄像机的几何关系,摄像机的内部参数,激光散斑噪声以及镜头畸变等带来的误差均会影响焊缝跟踪系统的测量精度。

结构光视觉传感器是基于结构光三角测量原理研制的,如图 2-1 所示,为结构光三角测量原理示意图。传感器主要包括结构光生成器和成像装置两部分。由一字线形激光器作为结构光生成器,由 CMOS 摄像机和镜片组组成成像装置。在镜头前加装的镜片组主要是为了最大程度减小焊接时强光的干扰,包括减光片和窄带滤光片,传感器结构示意图如图 2-2 所示。

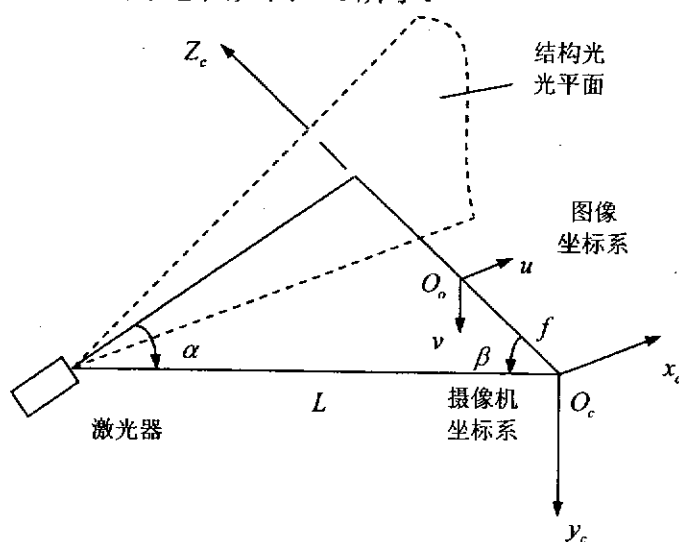


图 2-1 结构光三角测量原理示意图

Fig 2-1 The principle of optical triangle with structured light

工作时,一字线形激光器发出特定波长的线状结构光,投射到焊缝表面,该线状光经焊缝表面反射或散射后,经减光片、滤光片,滤除掉杂光,由处于另一位置的摄像机获得,即将反应焊缝表面形状的三维图像转换为线状光的二维畸变

图像。线状光的畸变程度取决于激光器和摄像机之间的相对位置及焊缝的三维形状，当激光器和摄像机的相对位置固定时，由畸变的线状光图像便可获得焊缝三维轮廓。

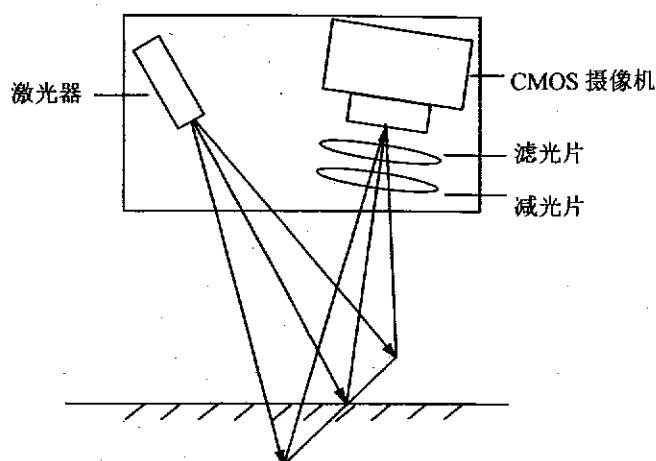


图 2-2 视觉传感器结构示意图

Fig 2-2 Structure of visual sensor

2.2 线结构光视觉检测模型的建立

结构光视觉传感器投影成像模型如图 2-3 所示。由投影成像模型建立结构光视觉传感器的数学模型，建立过程如下：首先，建立两个坐标系 $o_i - x_i y_i z_i$ 与 $o_g - x_g y_g z_g$ 。其中， $o_g - x_g y_g z_g$ 为物体坐标系，原点 o_g 是激光器发射点 o_L 在工件表面的投影， x_g 轴、 y_g 轴分别平行、垂直于焊缝方向， z_g 轴垂直于工件表面，竖直向上。 $o_i - x_i y_i z_i$ 为物体成像坐标系， o_i 为像平面中心， z_i 轴为摄像机的光轴，与竖直方向成 β 角。

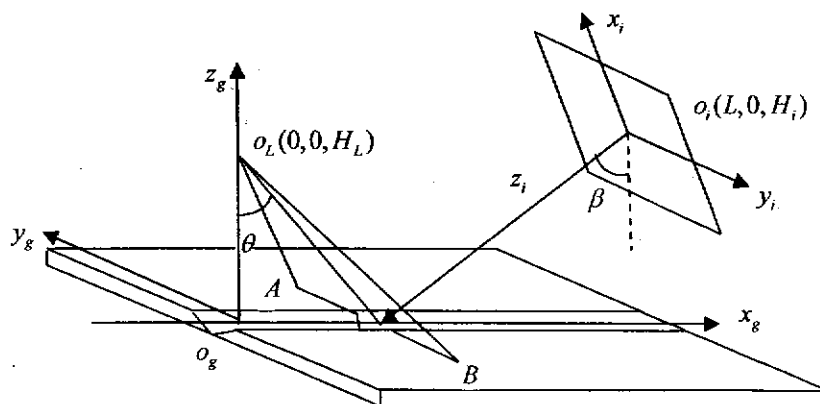


图 2-3 结构光视觉传感器投影成像模型

Fig 2-3 Perspective transformation model of laser stripe sensor

为了简化结构，不妨设 y_i 轴与 y_g 轴平行。激光器发出的光平面以与 z_g 轴方向成 θ 角投射到工件表面形成交线 AB ，并与 z_i 轴交于一点。然后，设 AB 线上的点，

即焊缝轮廓点的图像坐标为 (x_i, y_i, z_i) ，通过坐标变换和透视投影变换，由图像坐标推导得到其在物体坐标系下的三维坐标 (x_g, y_g, z_g) 。最后获得结构光视觉传感器的数学模型如式(2-1)所示。

$$\begin{cases} x_g = \frac{x_i [\cos \beta (H_L - H_i) - f + L \sin \beta]}{x_i (\sin \beta + \cos \beta \cot \theta) + f (\sin \beta \cot \theta - \cos \beta)} + \\ \quad \frac{f [\sin \beta (H_L - H_i) - L \cos \beta]}{x_i (\sin \beta + \cos \beta \cot \theta) + f (\sin \beta \cot \theta - \cos \beta)} \\ y_g = \frac{\tan \theta (f \cos \beta + H_i) - (f \sin \beta - L) - H_L \tan \theta}{x_i (\cos \beta + \sin \beta \tan \theta) + f (\sin \beta - \cos \beta \tan \theta)} \cdot y_i \\ z_g = \frac{x_i (H_L \sin \beta \tan \theta + H_i \cos \beta + f - L \sin \beta)}{x_i (\sin \beta \tan \theta + \cos \beta) + f (\sin \beta - \cos \beta \tan \theta)} + \\ \quad \frac{f (H_i \sin \beta - H_L \cos \beta \tan \theta + L \cos \beta)}{x_i (\sin \beta \tan \theta + \cos \beta) + f (\sin \beta - \cos \beta \tan \theta)} \end{cases} \quad (2-1)$$

式中， f 为摄像机焦距， H_i, H_L 分别为 o_i, o_L 点在物体坐标系下的纵坐标值。根据这一数学模型，可以获得工件上被测点与传感器结构参数之间的相互关系。

2.3 视觉传感器误差分析

影响结构光视觉传感器系统性能的误差因素有很多，包括激光散斑噪声误差，镜头畸变误差，激光条纹中心线提取、传感器标定、特征点判断识别等软件算法产生的误差以及传感器硬件系统结构参数和摄像机参数产生的误差。

2.3.1 激光散斑噪声误差

激光散斑噪声是当工件表面粗糙度与光波长相比足够粗糙时，工件表面反射的光场服从圆复高斯分布，光波干涉的结果使像点随机起伏产生的。

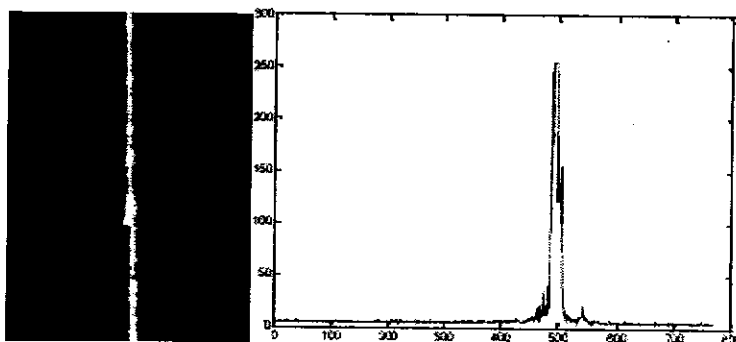


图 2-4 含有散斑的光纹图像及其截面光强分布

Fig 2-4 Image of laser stripe with laser speckle and its intensity distribution

在相干成像中，信号光的高度相干性和物面相对光波的粗糙性，使其在适中距离的任一观察点处得到的散射回波是由许多来自表面不同的微观区的相干组元

或子波组成的,而不同的子波的光程可能相差 $0 \sim n\lambda$ (λ 波长),因此具有不同相位的子波产生干涉,它们可能产生相长或相消,结果产生颗粒状的强度图像,我们称为散斑,它降低了图像的灰阶和空间分辨率,隐藏图像的精细结构,使图像的解释性变差,因而降低了图像的质量和传感器的探测能力。如图 2-4 所示为含有散斑的光纹图像及光纹某一截面上的光强分布,截面光强在理想情况下应服从高斯分布。为了减弱散斑的影响,降低散斑噪声引起的误差,人们已经研究了几种方法,包括热空气扰动法,孔径内扫描法^[132-134],光面内移动法^[135]等。

散斑噪声主要产生两方面的影响:首先,影响激光中心线及特征点的准确提取;其次,影响结构光传感器的标定精度。结构光传感器应用于焊缝跟踪中,其中的激光器波长为 660nm,工件表面粗糙度精度较高时一般为 0.008mm,一般不会有太多影响。但是当工件表面的光洁度特别高时,会带来一定的散斑影响。在标定过程中,为了降低散斑噪声的影响,可采用多帧平均技术,以精密平移台带动量块在视场内移动,测量标准量块上的光纹图像。宏观上看来,光纹图像成像在传感器光敏面的同一位置,理想像是一样的,但由于受物体微结构的影响,所形成的图像散斑形态有所差异,因此需通过获取多帧图像取平均来降低散斑噪声的影响。

2.3.2 镜头畸变误差

镜头畸变误差是由于摄像机的光学镜头存在一个畸变差,它使光线偏离原入射方向。畸变差异是一种非线性的多项式分布,是由目标像点与理论像点之间存在的多种类型的几何畸变叠加引起的,主要包括径向畸变、偏心畸变及薄棱镜畸变。径向畸变仅使像点产生径向位置偏差,而偏心畸变和薄棱镜畸变会使得像点既产生径向位置偏差,同时也会产生切向位置偏差。图 2-5 所示为理想像点和实际像点之间的位置关系。 dr 是径向畸变, dt 是切向畸变。

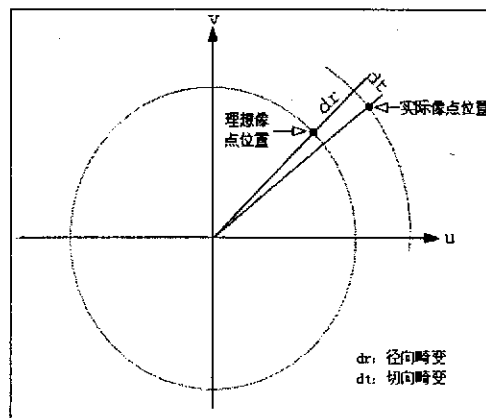


图 2-5 理想点与实际点间位置关系

Figure 2-5 Relative positions between ideal image point and real image point

1. 径向畸变 (Radial Distortion)

径向畸变主要是由镜头形状缺陷所造成的，它是关于摄像机镜头主光轴对称的。正向畸变又称为枕形畸变，负向畸变称为桶形畸变。径向畸变的数学模型为：

$$\Delta_r = k_1 r^3 + k_2 r^5 + k_3 r^7 + \dots \quad (2-2)$$

式中 $r = \sqrt{u_d^2 + v_d^2}$ ，为像点到图像中心的距离， $k_1, k_2, k_3 \dots$ 为径向畸变系数。若令 $u_d = r \sin \alpha$ ， $v_d = r \cos \alpha$ ，则上式可化为：

$$\begin{cases} \Delta_{ur} = u_d (k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6 + \dots) \\ \Delta_{vr} = v_d (k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6 + \dots) \end{cases} \quad (2-3)$$

2. 偏心畸变 (De-centering Distortion)

偏心畸变是由于光学系统的光学中心和几何中心不一致所造成的，即镜头各器件的光学中心不能严格共线。这类畸变既包含有径向畸变，又包含有摄像机镜头的主光轴不对称的切向畸变，其数学模型为：

$$\begin{cases} \Delta_{rd} = (j_1 r^2 + j_2 r^4 + \dots) \sin(\alpha - \alpha_0) \\ \Delta_{td} = 3(j_1 r^2 + j_2 r^4 + \dots) \sin(\alpha - \alpha_0) \end{cases} \quad (2-4)$$

式中 α_0 为最大切向畸变与 u 轴的夹角，因为：

$$\begin{bmatrix} \Delta_{ud} \\ \Delta_{vd} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sin \alpha & \cos \alpha \\ \cos \alpha & -\sin \alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta_{rd} \\ \Delta_{td} \end{bmatrix} \quad (2-5)$$

设 $p_1 = -j_1 \cos \alpha_0$ ， $p_2 = j_1 \sin \alpha_0$ ，则写为直角坐标的形式为：

$$\begin{cases} \Delta_{ud} = 2p_1 u_d v_d + p_2 (u_d^2 + 3v_d^2) + \dots \\ \Delta_{vd} = p_1 (3u_d^2 + v_d^2) + 2p_2 u_d v_d + \dots \end{cases} \quad (2-6)$$

式中 p_1, p_2 为切向畸变系数。

3. 薄棱镜畸变 (Thin Prism Distortion)

薄棱镜畸变是由于镜头设计缺陷与加工安装误差所造成的，如镜头与摄像机成像面有一个小的倾角等。这类畸变相当于在光学系统中附加了一个薄棱镜，它不仅仅引起径向位置的偏差，同时也引起切向的位置偏差。其数学模型为：

$$\begin{cases} \Delta_{rp} = (i_1 r^2 + i_2 r^4 + \dots) \sin(\alpha - \alpha_1) \\ \Delta_{tp} = (i_1 r^2 + i_2 r^4 + \dots) \cos(\alpha - \alpha_1) \end{cases} \quad (2-7)$$

式中， α_1 为最大切向畸变与 u 轴的正向夹角。设 $s_1 = -i_1 \cos \alpha_1$ ， $s_2 = i_1 \sin \alpha_1$ ，则上式可以写为直角坐标的形式：

$$\begin{cases} \Delta_{up} = s_1 (u_d^2 + v_d^2) + \dots \\ \Delta_{vp} = s_2 (u_d^2 + v_d^2) + \dots \end{cases} \quad (2-8)$$

式中 s_1, s_2 为薄棱镜畸变系数。图像点因为畸变都存在着偏差，在建模计算时需要进行相应的补差。设实际图像点的坐标为 (u_d, v_d) ，理想图像点的坐标为 (u_u, v_u) ，则有：

$$\begin{cases} u_u = u_d + \Delta_{ur} + \Delta_{ud} + \Delta_{up} \\ v_u = v_d + \Delta_{vr} + \Delta_{vd} + \Delta_{vp} \end{cases} \quad (2-9)$$

值得注意的是,目前光学系统的设计、加工以及安装都可以得到很高的精度,薄棱镜畸变很微小,可以忽略。复杂的变形模型不但不能提高测量精度,反而会使标定结果不稳定。现在一般只考虑径向畸变和切向畸变,而且一般只需要考虑前2项就可以了,甚至在精度要求不是太高的情况下,可以只考虑径向畸变^[136]。

在图像中心区域,CCD的畸变变小,畸变影响基本可以忽略。以图像中心点所对应的实际物点作为世界坐标系原点,通过求标定点对应实际物点在世界坐标系的值就可获得标定点的理想坐标值。选取几组标定点,求出其理想点坐标和实际点坐标,根据坐标求取畸变系数,再把畸变系数代入畸变公式,对像素坐标进行校正,得到理想坐标。另外,可以通过尽量避免使用图像周边像素来减小镜头畸变带来的误差。此外,镜头焦距对畸变影响也较大,焦距越短误差越大,在选择像机焦距参数时需要考虑这一约束条件。

畸变引起的主要是像的变形,而对像的清晰度影响并不大。因此,在线结构光系统中,摄像机的镜头在设计时必须要考虑消除像差的影响,通常较好的物镜的畸变小于千分之一,因而镜头都比较复杂。

2.3.3 软件算法误差

传感器标定误差、激光条纹中心线提取误差以及特征点判断误差等主要由标定算法、图像处理算法等产生的,可以通过提高算法的可靠性、准确度来改善。标定算法、图形处理算法的误差将在后面章节详细论述。

2.3.4 结构参数及摄像机参数产生的误差

根据前面的数学模型,焊缝轮廓点在结构光视觉传感器坐标系中的三维坐标不仅取决于其在像平面上的成像点的坐标值,还取决于传感器的结构参数 $H_s, H_L, L, \theta, \beta, f$ 。

由模型的几何关系知: $H_L \tan \theta + H_s \tan \beta = L$, 可以把坐标计算归结为如下函数关系式(2-10):

$$p(x, y, z) = F(H_L, H_s, \theta, \beta, f, x_i, y_i) \quad (2-10)$$

坐标测量综合误差包括传感器结构参数的标定误差以及被测物点对应摄像机上的像点坐标及其提取误差。根据误差分析理论^[137],坐标测量综合误差可以用 x, y, z 坐标轴方向测量误差表示。由于传感器在使用前都要进行精确标定,误差可以不计,本文只考虑像点提取误差在坐标轴方向产生的传感器测量误差 Δ 。假设像点提取算法确定,即提取误差为一定值: $\delta = \delta_x = \delta_y = 0.25 \cdot \text{pixel}$ 。其中, pixel 表示像点尺寸(mm)。传感器测量误差 Δ 如式(2-11)所示。

$$\Delta = \sqrt{\Delta x^2 + \Delta y^2 + \Delta z^2} = \sqrt{\left(\frac{\partial x}{\partial x_i}\right)^2 + \left(\frac{\partial x}{\partial y_i}\right)^2 + \left(\frac{\partial y}{\partial x_i}\right)^2 + \left(\frac{\partial y}{\partial y_i}\right)^2 + \left(\frac{\partial z}{\partial x_i}\right)^2 + \left(\frac{\partial z}{\partial y_i}\right)^2} \cdot \delta \quad (2-11)$$

传感器中激光器和摄像机存在三种位置方式^[138]：一是激光器垂直入射，摄像机倾斜接收；二是激光器倾斜入射，摄像机垂直接收；三是激光器倾斜入射，摄像机倾斜接收。由于第三种方式体积明显大于前两种方式，因此本文主要考虑前两种结构方式，对其分别进行误差分析。

方式一，激光器垂直入射，摄像机倾斜接收，即 $\theta = 0, \beta \neq 0, L = H_i \tan \beta$, β 即为摄像机与激光器的夹角。在这种情况下，结构光视觉传感器的数学模型可以简化为式(2-12)，其中三维空间坐标 z_g 仅与 x_i 有关， y_g 与 x_i 和 y_i 均有关。由式(2-12)对 x_i, y_i 求偏导，得式(2-13)~(2-16)，带入式(2-11)，计算获得综合误差 Δ 。

$$\begin{cases} x_g = 0 \\ y_g = \frac{-(f \sin \beta - H_i \tan \beta)}{x_i \cos \beta + f \sin \beta} \cdot y_i \\ z_g = \frac{x_i (H_i \cos \beta + f - H_i \tan \beta \sin \beta) + 2fH_i \sin \beta}{x_i \cos \beta + f \sin \beta} \end{cases} \quad (2-12)$$

$$\frac{\partial y_g}{\partial x_i} = -\frac{(H_i \tan \beta - f \sin \beta)}{(x_i \cos \beta + f \sin \beta)^2} \cdot y_i \quad (2-13)$$

$$\frac{\partial y_g}{\partial y_i} = \frac{H_i \tan \beta - f \sin \beta}{x_i \cos \beta + f \sin \beta} \quad (2-14)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial z_g}{\partial x_i} &= \frac{H_i \cos \beta + f - H_i \tan \beta \sin \beta}{x_i \cos \beta + f \sin \beta} \\ &= \frac{x_i (H_i \cos \beta + f - H_i \tan \beta \sin \beta) + 2fH_i \sin \beta}{(x_i \cos \beta + f \sin \beta)^2 \cdot \cos \beta} \end{aligned} \quad (2-15)$$

$$\frac{\partial z_g}{\partial y_i} = 0 \quad (2-16)$$

方式二，激光器倾斜入射，摄像机垂直接收，即 $\theta \neq 0, \beta = 0, L = H_i \tan \theta$, θ 即为摄像机与激光器的夹角。在这种情况下，结构光视觉传感器的数学模型可以简化为式(2-17)，其中三维空间坐标 x_g, z_g 仅与 x_i 有关， y_g 与 x_i 和 y_i 均有关。由式(2-17)对 x_i, y_i 求偏导，得式(2-18)~(2-23)，代入式(2-11)，计算获得综合误差 Δ 。

$$\begin{cases} x_g = \frac{x_i [(H_L - H_i) - f] - f \cdot H_L \tan \theta}{x_i \cot \theta - f} \\ y_g = \frac{f + H_i}{x_i \cot \theta - f} \cdot y_i \\ z_g = \frac{x_i (H_i + f)}{x_i - f \tan \theta} \end{cases} \quad (2-17)$$

$$\frac{\partial x_g}{\partial x_i} = \frac{H_L - H_i - f}{x_i \cot \theta - f} - \frac{x_i (H_L - H_i - f) - f \cdot H_L \cdot \tan \theta}{(x_i \cot \theta - f)^2 \cot \theta} \quad (2-18)$$

$$\frac{\partial x_g}{\partial y_i} = 0 \quad (2-19)$$

$$\frac{\partial y_g}{\partial x_i} = - \frac{(f + H_i) \cdot y_i}{(x_i \cot \theta - f)^2 \cot \theta} \quad (2-20)$$

$$\frac{\partial y_g}{\partial y_i} = \frac{f + H_i}{x_i \cot \theta - f} \quad (2-21)$$

$$\frac{\partial z_g}{\partial x_i} = \frac{f + H_i}{x_i - f \tan \theta} - \frac{x_i (f + H_i)}{(x_i - f \tan \theta)^2} \quad (2-22)$$

$$\frac{\partial z_g}{\partial y_i} = 0 \quad (2-23)$$

由上面的推导可以看出,传感器的测量误差同像点的坐标值 x_i, y_i , 像点提取精度 δ , 摄像机的焦距 f 以及传感器结构参数 H_i, H_L, θ, β 有关。传感器像点坐标值与误差关系如图(2-6)~(2-7)所示, 误差 Δ 随测点位置不同而不同, 且在像面上分布是不均匀的。分析得出, 两种方式像面 y 轴方向上误差最大点均发生在两个边缘点, 而 x 轴方向上误差最大点与 β, θ 的取值有关, 为两边缘点中的一点。

当选定了摄像机及激光器, 且像点坐标提取算法确定时, 即 f, H_i, δ 确定, $H_L = l_{laser} \cdot \cos \theta$, $H_i = l_{camera} \cdot \cos \beta$, 其中 l_{laser} 表示激光器发射激光的最优距离, l_{camera} 表示物体到相面的距离, 可以得出结构参数中 β, θ 为主要影响因素, 对误差的影响是非线性的。

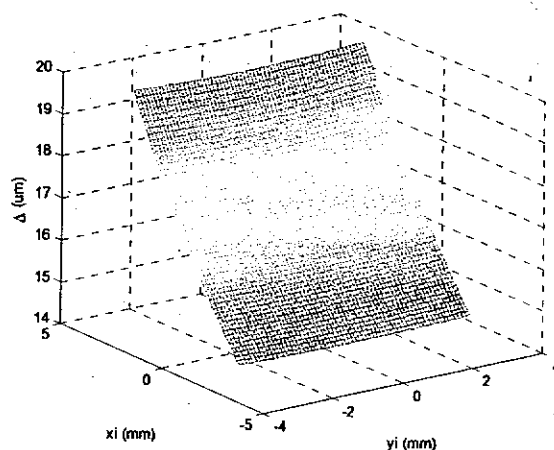


图 2-6 方式一像点坐标值与误差关系

Fig 2-6 Relationship between measuring error and image coordinates of the first method

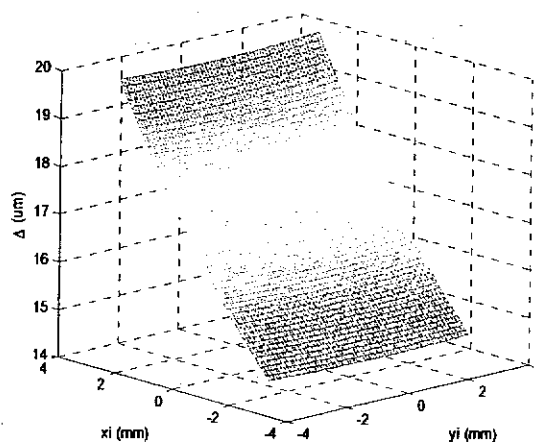


图 2-7 方式二像点坐标值与误差关系

Fig 2-7 Relationship between measuring error and image coordinates of the second method

2.4 视觉传感器结构设计

在优化设计结构光视觉传感器的结构参数时, 希望测量误差尽可能小。为提高准确度, 本文综合像面上像点误差 Δ_{ij} 的最大值 $\Delta_{\max}$ 、像点误差 Δ_{ij} 的均值 Δ_{mean} 以及误差 Δ_{ij} 的标准方差 σ_{Δ} 作为依据(如式(2-24)~(2-26)所示), 提出最优结构参数判定条件, 即在满足实际约束条件的前提下, 使得 $\Delta_{\max}$, Δ_{mean} , σ_{Δ} 均达到较小值的结构参数应是最佳的, 来实现传感器结构的优化设计。

$$\Delta_{\max} = \max(\Delta_{ij}) \quad (2-24)$$

$$\Delta_{\text{mean}} = \frac{\sum \Delta_{ij}}{n}, (n = i \cdot j) \quad (2-25)$$

$$\sigma_{\Delta} = \sqrt{\frac{\sum (\Delta_{ij})^2}{n}}, (n = i \cdot j) \quad (2-26)$$

其中, Δ_{ij} 表示像面上第 i 行, 第 j 列像点对应的误差值。

在传感器的优化设计过程中主要考虑测量精度因素的影响, 同时, 在保证测量精度的前提下, 从传感器的应用背景出发, 力求使其体积最小化。

通过上述综合分析, 可以对结构光视觉焊缝跟踪传感器结构进行优化设计。优化设计方法如下: 首先根据设计需求初步确定部分结构参数, 之后进行优化仿真, 最后依据最优结构参数判定条件确定结构参数。本文研究的结构光视觉传感器应用于激光焊接焊缝跟踪, 设计需求: 测量视场宽度范围为 10-15mm, 分辨率为 0.01mm; 选用的 CMOS 摄像机的像素个数为 1280×1024 , 单个像素尺寸为 $5.2 \mu\text{m} \times 5.2 \mu\text{m}$, 焦距 $f = 25\text{mm}$, $l_{\text{camera}} = 160\text{mm}$; 选用的激光器的 $l_{\text{laser}} = 110\text{mm}$; 像点提取误差为 1/4 像素。根据上述方法, 将相关参数代入优化方程, 进行仿真。仿真过程中, 角度值的步距为 1° , 由于机械结构限制, 激光器同摄像机的夹角为 $20^\circ \sim 55^\circ$ 。由图(2-8)~(2-10)的仿真结果可得: 第一种位置方式在 $\beta = 55^\circ$ 时获得优化解, 第二种位置方式在 $\theta = 48^\circ$ 时获得优化解。

第二种方式传感器测量误差明显小于第一种方式, 更易于取到理想值, 且结构尺寸较小。所以本文选用第二种位置方式进行结构设计, 并将这种位置方式应用于工程实验中。实验中获取焊缝跟踪结构光条纹图像信息, 左右拼焊板厚度分别为 1.6mm 和 0.8mm, 焊缝形式为对接焊缝, 图 2-11 为实际获取的焊缝跟踪结构光条纹中心线上像点的亮度分布。可见, 该位置方式的结构光传感器可以较好地获取光纹图像, 便于后续处理, 验证了本设计方法的正确性。焊缝跟踪过程中, 跟踪系统在获取反映焊缝三维轮廓的结构光条纹图像后, 对图像进行实时处理, 提取焊缝中心点, 之后依据焊缝中心点和焊炬的偏差调整焊炬, 实现焊缝的实时跟踪, 保证焊接质量。

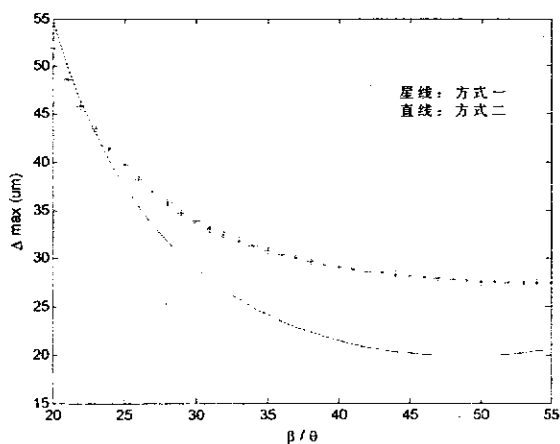


图 2-8 β/θ 与误差最大值关系图

Fig 2-8 Relationship between β/θ and $\Delta_{\max}$

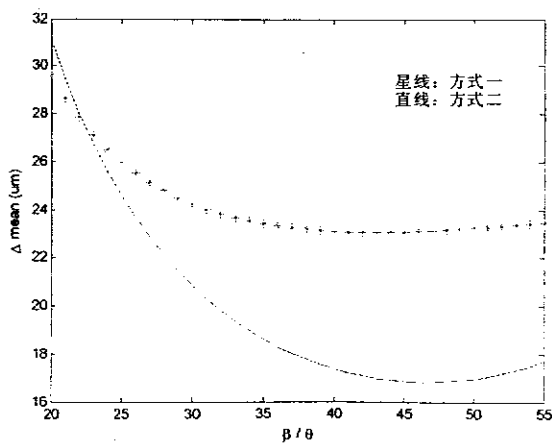


图 2-9 β/θ 与误差平均值关系图

Fig 2-9 Relationship between β/θ and Δ_{mean}

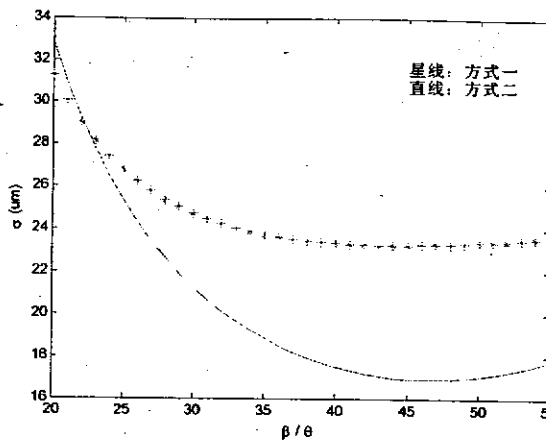
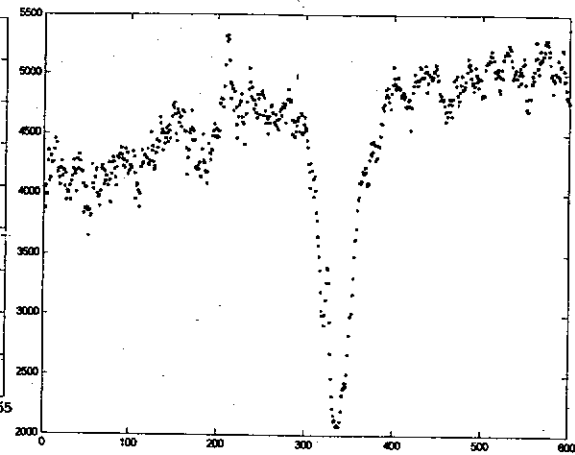
图 2-10 β/θ 与误差标准方差关系图Fig 2-10 Relationship between β/θ and σ 

图 2-11 结构光光纹中心线亮度分布图

Fig 2-11 Intensity distribution of laser stripe

2.5 本章小结

本章的目的是依据线结构光视觉跟踪传感器检测原理，建立线结构光视觉传感器测量模型，在理论上对系统模型进行分析，分析视觉传感器的误差影响因素，从而指导后续的工作。

首先，依据线结构光视觉检测原理，建立了结构光视觉传感器的数学模型，深入分析了应用于焊缝跟踪的结构光视觉传感器的误差影响因素，包括激光散斑噪声误差、镜头畸变误差、软件算法误差、由传感器结构参数及摄像机参数产生的误差，并分析相关结构参数对传感器性能的影响，为传感器的结构设计构建了理论框架，给出了一种结构光视觉传感器优化设计方法。其次，针对两种具体位置方式分别建立数学模型，给出两种方式结构参数的优化解。结果表明：第一种位置方式虽然摄像机采集到的图像反映了坡口截面的真实形状和尺寸，有利于后续的图像处理，但会显著增加传感器测量误差。同时实验结果表明，传感器的结构误差值不只同本身的结构参数有关，还与被测点的位置有关，因此可以通过调整被测焊缝在视场中的位置来提高测量精度。

第3章 激光拼焊焊缝跟踪图像处理方法研究

焊缝跟踪光纹图像实时处理技术是激光拼焊焊缝跟踪系统的关键技术之一,是能够以较高精度进行自动焊接的基础。采用结构光法获取焊缝跟踪图像,不仅能检测出焊接接头的中心位置,而且还能获得焊接接头的截面形状和尺寸等特征参数,并且适用于不同类型的焊接接头和各种焊接方法,因而是一种应用广泛的方法。在激光拼焊过程中,焊接接头的识别易受焊接激光、焊接飞溅、烟尘以及工件上的划痕等影响^[139],另外不同的焊接接头类型以及板材加工方式均会影响获取的跟踪图像的质量,对跟踪图像特征提取产生影响。因而如何消除这些噪声干扰获得高质量的图像是焊缝跟踪的关键。若为了消除干扰而采用过于复杂的图像处理算法,将会增加图像处理时间,尤其对于激光拼焊的高速度要求,将会很难满足其实时跟踪要求,因此,需要优化处理算法,提高处理速度,而如何简化图像处理算法,实现实时跟踪就成为激光拼焊焊缝跟踪的一个难点。本章对上述问题进行了深入的研究,给出了针对激光拼焊焊缝跟踪图像特点的图像处理方法,并编制了相应的处理程序。

3.1 激光拼焊焊缝跟踪图像处理特点

随着计算机视觉的广泛应用,图像处理技术迅速发展,相继出现了许多图像处理方法,这些方法针对不同的应用领域,都有其适用范围。为了更好地从激光拼焊跟踪图像结构光条纹中提取出反映焊缝截面形状和尺寸的特征参数,首先需要分析激光拼焊焊缝跟踪图像处理的特点,之后针对其特点提出相应的图像处理方法,从而有效地保证跟踪质量。

激光拼焊同其他焊接形式相比,具有高能密度、深熔、速度快、精度高等特点,其焊缝特点是热影响区范围小,焊缝较窄,外形美观^[9, 32, 33]。激光拼焊过程的激光强光干扰、多种焊缝类型、高速度处理要求、高精度焊接要求等均会对跟踪图像产生影响。

3.1.1 焊接环境影响

为了从跟踪图像中获取图像特征参数,重要的一点是能够得到清晰的跟踪图像。由于激光拼焊过程存在着烟尘、焊接激光、飞溅等环境干扰因素,采用视觉检测时会受到这些干扰因素的影响,因此有必要讨论激光拼焊环境对图像获取的影响。倘若不能得到原始的清晰的跟踪图像,那么其后的图像处理和特征提取都将变得十分困难,进而影响到控制量的获取和控制过程的精度。只有对这些特点有了充分的分析和了解之后才可以针对这些特点进行有效的图像处理。

激光拼焊热影响区小,同时本文研究的机器人激光拼焊系统采用了吸风排烟装置,飞溅和烟尘的影响较小,几乎可以忽略。激光焊炬的反射光污染成为跟踪

图像获取过程中需要考虑的主要问题之一。在不附加滤光系统进行焊缝跟踪时,由于强光污染,拍摄到的图像中是一片白色,无法分辨结构光条纹,如图 3-1 所示为激光拼焊过程图像。激光拼焊系统中采用 YAG 激光器进行激光焊接, YAG 激光器发出的激光波长为 1064nm,而传感装置中选用的激光器波长为 660nm,可以通过增加减光片、滤光片等光片组来滤除激光强光的干扰。



图 3-1 激光拼焊过程

Fig 3-1 Process of laser tailored blank welding

强光污染问题还可以通过确定合适的前视距离来改善。焊缝跟踪系统中的传感装置同激光焊炬为刚性连接,且与焊炬之间的距离固定,这一固定距离称为前视距离。可以根据实验确定有效的前视距离取值范围,选取合适的前视距离,减小激光焊炬反射光的污染。

3.1.2 焊缝类型影响

激光焊接过程中,焊缝类型包括对接焊缝、搭接焊缝、角接焊缝及 T 型接焊缝等,如图 3-2 所示。激光拼焊中,焊缝类型以对接焊缝为主,因此本文主要讨论对接焊缝的图像处理算法。对接焊缝根据板材厚度不同又可分为不等厚板材对接焊缝、等厚板材对接焊缝;根据焊缝间隙不同可分为宽间隙板材对接焊缝、窄间隙板材对接焊缝。

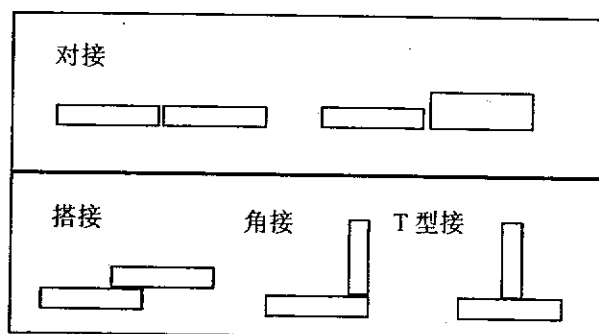


图 3-2 焊缝类型

Fig 3-2 Type of seam

视觉跟踪检测过程中获取的对接接头信息主要包括焊前焊缝间隙及板材错配