

第1章 引言

1.1 研究的目的意义

激光由于其单色性、方向性、相关性以及高亮度、超短脉冲等性质使它非常适合焊接加工。激光束经聚集后可获得很小的光斑,且能精密定位,因而可应用于大批量自动化生产,不仅生产效率大大提高且热影响区小,焊点无污染,大大提高了焊接的质量。当前,激光焊接技术已经大量应用到生产线上,如在汽车生产线上的车顶焊接,汽车底板及结构件(包括车门车身)的高速拼焊。除此之外,激光焊接也广泛用于航空,桥梁等领域,取得了巨大的经济和社会效益^[1]。

激光焊接中,影响焊接质量的因素很多。由于激光聚焦后光斑尺寸小,焊缝窄,因此要求焊件装配精度高,且光束在工件上的位置不能有显著偏移。但是,由于机械机构的长期使用和磨损,很容易使工件装配精度或光束定位精度达不到要求,从而使得焊接板材存在一定的缺陷。另一方面,激光焊接过程是一个极为复杂的物理化学过程,焊接质量除了容易受到上述的装配缺陷和光束定位不准影响外,还受到众多其它因素的影响,如材料的熔化和蒸发、小孔的形成以及激光诱导的等离子体的出现。在实际的应用过程中还由于环境因素的改变,特别是光学器件长时间受热后性能的变化以及材料成分和表面状态的不均匀性,导致激光焊接过程成为一个多参数的时变过程。由于上述种种原因,即使同样的工艺参数(常用的工艺参数有:激光功率、焊接速度、透镜焦距与离焦量、侧吹气流量等)条件,也可能会得到不同的焊接结果^[2],因此,焊接质量不可避免的会存在一定波动。所以,必须要对焊接质量进行检测,以保证焊接质量。

激光焊接设备是由激光、计算机、机器人、数控和精密机床等相结合的综合高新技术,其具有高速,高度自动化的特点。如果采用焊后离线检测或人工检测,焊接设备将无法实现自动化和连续作业,所以焊接质量检测必须在线实时进行,即在焊接过程中,同时进行质量检测,焊接结束后,可立刻判断出焊接质量是否合格。同时,焊接质量检测可以实时为焊接控制提供必要的参数,检测到的数据也能为焊后缺陷分析提供实验依据,从而可以对焊接工艺作进一步改进。在当前的激光焊接设备中,激光焊缝质量实时检测技术已经成为其中的关键技术,对保证激光焊接设备的焊接质量,实现焊接设备自动化方面有着不可或缺的作用。

本课题来源于中国科学院知识创新工程重要方向项目“全自动激光拼焊成套装备关键技术研究”与示范应用”和沈阳市科技攻关项目“激光视觉焊缝自动跟踪与质量检测系统”。目前,在沈阳自动化所现代装备研究设计中心的激光拼焊线中,焊缝质量在线检测已经是其中一个关键的部分,但是目前国内还未掌握其核心技术,所用的激光焊接和跟踪设备来自于加拿大 Servo-Robot 公司,价格昂贵,且

功能与性能不易扩展。通过该研究课题,希望掌握该技术,填补国内技术空白。而且对于促进机器人激光焊接技术在汽车,造船乃至航空航天和武器研制技术中的推广应用、加快采用新材料和制造技术的军备换代进程等都具有重要意义。

1.2 国内外研究现状

自 20 世纪 80 年代以来,国内外众多学者开展了大量关于激光焊接质量实时监测的研究及其实用化方面的工作,然而迄今为止,该领域的研究成果在可靠性、普适性和功能性等方面仍然不能较好满足实际生产的需要,这一领域仍然是各国学者研究的热门课题。

1.2.1 焊缝检测方法

激光焊接焊缝质量检测可以通过激光焊接中物理化学过程产生的等离子体光辐射、声信号、工件振动、熔池红外辐射、工件背面红外辐射等信号进行检测,也可以在焊后利用超声、X 射线以及辅助光源等信号进行检测。由于所检测信号的不同,导致了检测技术的不同。当前的检测技术主要有声波信号(可听声信号和超声波信号)检测、辐射信号检测(熔池的热辐射;等离子体检测);机器视觉信号检测等几个大方向^[3]。

视觉传感由于与工件无接触、采集信息量大,识别信息丰富,识别精度高,通用性强,不干扰正常的焊接过程等优点而成为焊缝检测方法中应用最广的方法之一。该方法主要是利用光谱中的可见光对焊缝区成像,成像后图像中的焊缝信息直接反映焊缝的状态,因此通过图像特征量的提取可以直接对焊接进行在线检测,焊缝特征直观且易于处理,而不用转换成其它参数进行研究。该传感技术可以得到焊缝的二维甚至三维信息。

在视觉传感检测方法中,根据检测系统中成像光源是辅助光源还是焊接区域自身产生的光源,视觉传感检测可分为主动式和被动式两类。被动式视觉传感是利用焊接过程中产生的光强或环境光作为成像光源,在大部分被动视觉方法中焊接过程中产生的可见光本身就有足够光强,可以作为成像光源,所以没有因热变形等因素所引起的超前检测误差,并且能够获取接头和熔池的大量信息,这些对于焊接质量自适应控制非常有利。但被动式方法存在强光干扰的问题,因此检测可靠性很难保证^[4]。而主动式视觉检测方法采用小型激光器作为光源,又加入了与辅助光源波长相匹配的窄带光学滤波片,可以有效避免焊接过程中的光污染,提高图像的信噪比,获得质量较高的图像。目前应用比较多的是通过投射一条或者多条光纹到焊件上,根据结构光的变形获取有关的几何形状。这种成像原理也叫做三角测量原理^[26]。

基于三角测量原理的激光视觉传感器系统由于其具有的优异性能而获得高度重视和发展,其优点主要是:获取信息量大,可以获得接头截面精确的几何形状

和空间位置姿态；检测空间范围大误差容限大，焊接之前可以在较大范围寻找接头；智能性好；通用性好。但是在结构光照射到光滑的金属表面时，会产生强烈的镜面反射，往往会导致视觉的后续处理失败。因此需要进一步探索研究三角测量法结构光视觉测距原理，提高其测量精度，完成不同材质的视觉测量，实现实用化。

结构光基本原理如下图 1-1。当前，采用结构光三维测量原理的焊缝检测设备有加拿大 Servo-robot 公司的焊缝在线检测系统与瑞士 Soudronic 公司使用的焊缝在线检测系统 Souvis5000。如图 1-2 为 Servo-robot 公司的焊缝质量检测系统，该检测系统采用单条结构进行焊缝视觉检测，可以有效对焊缝错配、咬边、凸凹度、过厚、焊接坡角、焊缝宽度等参数进行检测。图 1-3 为 Soudronic 公司使用的在

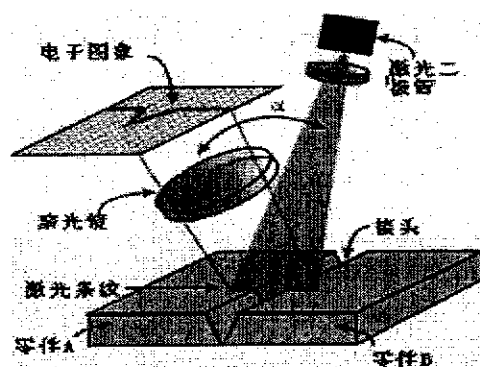


图 1-1 结构光法原理

Fig 1-1 Principle of structured light

线检测系统 Souvis5000。如图 1-3 所示。在该视觉检测系统中，采用双结构光作为系统主要检测光源，并采用了频闪辅助光源对焊接区域进行照明。从而能够进行焊缝形貌的分析以及对焊接过程中的飞溅和焊缝表面的气孔进行检测^[5]。该套设备除可以识别焊缝错配、咬边、凸凹度、过厚、焊接坡角、焊缝宽度等参数外，还可以有效识别小孔。

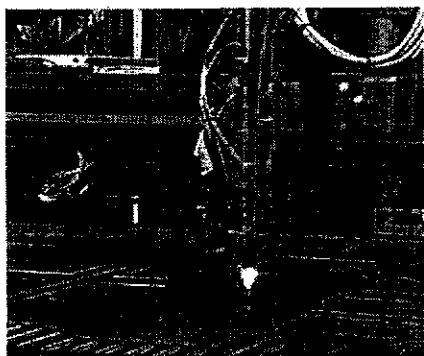


图 1-2 Servo-robot 检测系统

Fig.1-2 seam Inspection system Of Servo-robot

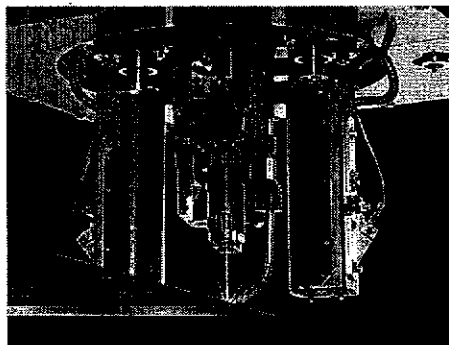


图 1-3 Souvis 5000 系统

Fig.1-3 The Souvis 5000 system

1.2.2 焊缝检测图像处理技术

采用结构光视觉原理进行焊缝检测的系统中,焊缝结构光图像的处理是系统的核心内容。结构光图像处理步骤基本上分为图像预处理,提取光纹中心线,从光纹中心线中提取焊缝参数。其中,光纹中心线的提取是结构光图像处理中最为关键的步骤,该步骤决定了焊缝检测系统的检测精度。影响光纹提取的因素有:激光光面的厚度、光强的大小、被测物体表面的几何特征、被测物的运动、相机的制造工艺以及其内部产生的热噪声和电噪声等。这些因素获取的图像有一定的随机特征和随机干扰,因而导致要精确提取结构光纹异常困难。国内外学者对此进行了大量研究,目前常用方法有极值法,几何中心法,高斯曲线拟合法, Hessian 矩阵法等^[6]。

极值法首先是在图像中光纹垂直方向上搜索出结构光纹区域灰度的局部极大值,并将该极大值所在的点定义为条纹中心线中的点。该方法的处理速度快,实时性好,但是容易受到噪声的影响,当图像中信噪比高,且图像中光纹灰度未饱和的情况下,该方法具有比较好的效果^[6,7]。

几何中心法是将光纹看成是局部以光纹中心线为轴的对称结构,因此该方法将垂直于光纹方向的截面的几何中心点作为光纹中心线。该方法算法简单,速度快,但是在出现条纹缺失以及光纹边缘毛刺干扰的情况下,光纹中心的提取将会出现误差。由于光纹的截面光强分布已知,且一般情况下光纹宽度很小,光纹边缘干扰随机对称分布。因此通常采用阈值法来确定光条纹的中心位置。阈值法提取效果很大程度上取决于图像质量。

激光器发出的光线光强在垂直于光面的方向上呈高斯分布,虽然由于被测物体表面各区域反射强度不同导致激光光线经反射并成像后,不再严格服从高斯分布,但图像中结构光光纹灰度分布基本上近似于高斯分布。根据这一特性,利用高斯曲线对该截面的光纹灰度值进行拟合,则拟合后曲线的最大值所在的点即为截面的光条中心点,这种方法即为高斯拟合法。该方法要求结构光纹图像灰度值不存在饱和,否则,拟合精度将很难满足要求^[7-10]。

垂直于光条方向的光纹截面中心点具有的特征是:该点在截面灰度分布曲线中的一阶导数为 0 且二阶导数绝对值为极大值。Hessian 矩阵法^[11-13]利用该特点来提取结构光纹中心。该方法将光纹中灰度分布曲线中每一个点的切线方向 Q 作为该点光条截面点灰度分布曲线的走向,若该点在切线方向上的一阶方向导数为 0 且二阶方向导数绝对值最大,则将该点作为为该截面的光条中心点。因此, Hessian 法的关键是切线方向 Q 的求解。通过求取 Hessian 矩阵中绝对值最大的特征值所对应的特征向量来代替 Q 的求解,可以使得问题大为简化,且便于工程实现。该方法对存在强反射、噪声干扰大的光条纹中心的提取具有很好的抗干扰能力,但运算量过大,影响检测实时性。

1.2.3 结构光传感器标定技术

随着结构光视觉传感技术的广泛应用,出现了大量的结构光传感标定方法,这些方法大致可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摄像机内外参数和系统结构参数,标定过程主要有两个步骤,首先标定摄像机内外参数,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细丝散射法、交比不变法等。

R.Dewar^[14]和 K.W.James^[15]分别提出了“拉丝法”,该方法通过让结构光投射到几根相互平行且完全不共面的细丝上,并使相机以一定角度接收。细丝上被结构光照射到的部分形成亮点,并在像面上成像。将亮点作为标定点,这些标定点的三维物理坐标可以采用高精度三坐标测量设备获取,而二维图像坐标可以通过处理含有亮点的图像提取。最后用三维物理坐标与二维图像坐标共同来求解光平面与摄像机间的位置参数。不同位置细丝反射的结构光在图像中成像后特征不一致,而且细丝和实际待测物体表面的散射特性相差较大,故该方法获取的标定点少,标定点精度较低^[16]。

徐光祐教授^[17]和 Huynh 教授^[18]分别提出了利用交比不变性原理来进行结构光传感标定的方法。该方法利用三个已知精确物理坐标的共线点,根据交比不变原理可以计算出图像中与已知三点共线的点的物理坐标。该方法具有较高精度,适合现场标定,但需要至少两个相互垂直的平面构成的高精度三维标定参照物,同时获取标定点数量不可能太多。张广军等人改进了 Huynh 的方法,提出了一种基于双重交比不变性的标定点获取方法^[19],该方法可以有效解决交比不变性实验中特征点少的问题,但实际操作中,仍然需要大量的经验和方法。

Emanuele Trucco^[20]等人提出了直接标定方法。首先获取工作空间内已知三维空间坐标的特征点的图像坐标,之后根据特征点图像坐标和三维空间坐标的对应关系,将其余点的三维空间坐标插值算出,由此建立整个像面像素的索引表。该方法不需要标定模型,计算量小,简单快速。王宗义等^[21]将标定板平面和结构光光平面在工作区间重合,并在此条件下采集标定板图像,进一步根据标定板和图像处理获取特征点图像坐标和三维空间坐标之间的关系。该方法精度较高,但是要保证结构光光平面与标定板平面完全重合比较困难。

1.3 研究方法与研究内容

本文参考相关的激光焊接质量检测技术的文献和专利,并进行焊缝检测视觉技术相关的实验验证与分析,逐步对激光焊接质量检测有了深入认识与掌握,设计了针对激光拼焊的在线质量检测系统,并研究了检测方法和算法。

本文主要研究了结构光视觉方法在焊缝质量检测系统中的应用。重点研究了

焊缝图像的处理算法、检测系统的高精度标定方法以及检测系统的软件实现。在图像处理中,主要利用结构光来提取焊缝缺陷,处理步骤为首先提取结构光纹中心线,进一步提取结构光中心线特征点,最后根据特征点计算焊缝缺陷参数。在检测系统标定方法中主要研究了直接标定方法,该方法首先建立光平面与像平面之间特征点的对应关系,则像平面中的任意像点对应的光平面物理坐标可以通过已知特征点插值得出,通过分析验证,提出一种在检测系统中切实可行且精度满足要求的直接标定方法。最后,搭建了焊缝质量检测试验平台,并对焊缝检测的图像处理算法的精度和速度,以及标定的计算速度进行了验证。

1.4 论文组织结构

第1章 引言 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;详细介绍了焊缝检测技术的发展现状与趋势,最后说明了系统采用的研究方法和本文大致的研究内容,以及论文的组织与结构。

第2章 焊缝质量检测系统图像处理算法研究 在本章中,首先介绍了系统的整体结构和检测原理,其次重点介绍了焊缝图像的处理算法,最后分析了图像处理算法的速度与精度。

第3章 检测系统标定方法研究 本章主要研究并设计了检测系统的标定方法。本系统标定采用了直接标定方法。主要介绍了直接标定原理、具体实现步骤以及实验验证。结果表明,该直接标定方法满足检测系统要求。

第4章 焊缝质量检测实验平台设计与实现 在本章中,介绍了系统的硬件与软件的设计与实现。包括硬件参数的详细说明,软件功能框图,开发工具,以及软件设计中的一些关键问题。

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 焊缝质量检测图像处理算法研究

2.1 引言

图像处理是检测系统的核心部分,本章重点研究并设计了针对激光拼焊焊缝质量检测的图像处理算法。对于激光拼焊焊缝图像处理算法,要求能够实时、准确提取焊缝参数,如果设计的算法过于复杂耗时,那么即使能够提取出焊缝参数,在工程上也很难得到应用。而焊缝表面特征复杂多变,焊缝图像特征变化较大,因此设计的图像处理算法需要具有普适性,能够满足焊缝图像特征不稳定的特性,即对于不同厚度,不同工艺下的板材,都应该有正确的检测结果。焊缝质量检测图像处理检测的指标包括焊缝宽度、焊缝凹凸度、错配、焊缝坡度、咬边等。

检测系统中采用了焊后焊缝表面主动视觉检测方法,基于结构光视觉检测原理来检测焊缝缺陷参数。结构光视觉检测技术以其高精度、光条图像信息易于提取、实时性强及主动受控等特点,近年来在工业三维测量领域得到了广泛的应用。结构光检测基本原理如图2-1,实际采集的焊缝图像如图2-2。

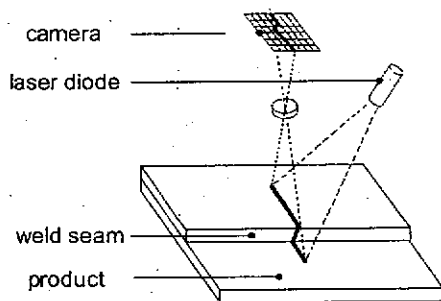


图 2-1 结构光基本原理

Fig.2-1 The principles of structured light

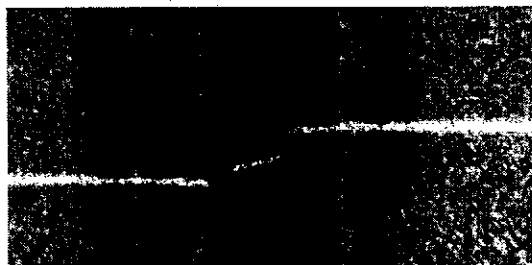


图 2-2 带结构光的焊缝图像

Fig.2-2 image of Structured light on seam

激光投射器将一字线形结构光投射于焊接板材表面,相机接收由板材反射的结构光。图像中光纹的形态取决于光学投射器与摄像机之间的相对位置和物体表面形廓。直观上,沿光条显示出的位移(或偏移)与物体的高度成比例,图像中光纹的转折表示了板材平面高度的几何变化。当光学投射器与摄像机之间的相对位置一定时,由图像中的二维光纹图像坐标便可重现物体表面的三维轮廓^[22]。根据结构光提取焊缝参数的基本方法是:首先提取结构光纹的中心线,根据结构光中心线的几何特征,提取焊缝参数。

为了更好的介绍图像处理算法的研究,本文接下来将首先介绍系统的基本结构以及系统的检测要求。

2.2 系统的基本结构与检测要求

2.2.1 检测系统基本结构

本系统方案是根据检测系统的功能要求,在参考现有成熟且广泛应用的焊缝检测系统基础上进行设计的。方案中采用了焊后焊缝表面主动视觉检测方法,通过结构光视觉来检测焊缝缺陷参数。下面具体介绍系统的功能需求与基本结构。

系统由光源,图像采集设备(相机,采集卡),数字 I/O 卡和工控机组成,如图 2-3 中蓝色框图中的部件。光源、相机与焊枪为刚性连接。检测系统与 PLC 通过数字 I/O 卡进行通信。

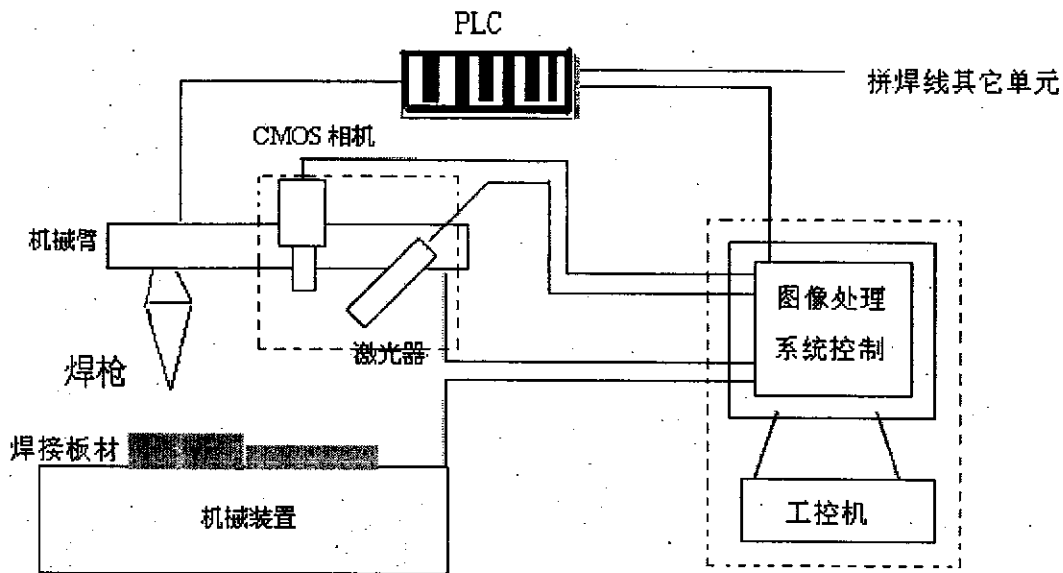


图 2-3 系统基本结构

Fig.2-3 the basic structure of system

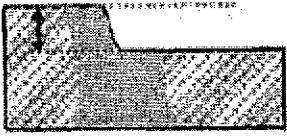
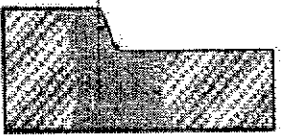
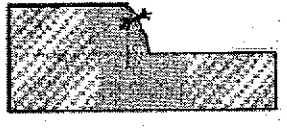
系统工作机制：检测系统启动后，监听 PLC 命令，如果系统检测到 PLC 的开始检测指令，则相机开始连续采集图像，同时机械臂开始带动相机、激光投射器以及焊枪一起运动，此时焊缝并未进入相机视场。相机首先将采集到的每一帧图像实时存储在图像采集卡缓存，工控机实时从图像采集卡缓存中读取图像，并立即进行图像处理。焊缝的起始点与终止点需要检测系统自动识别。在检测系统刚启动时，检测软件的图像处理算法为起始点识别算法。若检测到焊缝起始点，则检测系统进入了焊缝缺陷参数提取步骤。在该步骤中，由于焊缝的终止位置需要自动识别，所以首先进行终止点识别算法，若图像不是终止点，则进行焊缝缺陷提取的图像处理，并将处理结果动态显示。如果检测到终止点，则检测系统自动停止图像采集与处理，判断焊缝是否合格，并将判断结果发送给 PLC。PLC 采取相应的动作，将板材丢弃或者放入成品区。同时，检测系统显示检测结果并进行文件和数据库操作。

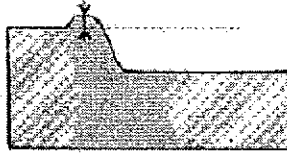
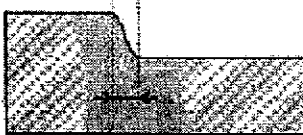
2.2.2 检测指标要求

依据 ISO13919-1 B 级标准, 系统需要检测出的焊缝表面参数指标主要有焊缝错配、咬边、凸凹度、过厚、焊接坡角、焊缝宽度等。各种焊缝参数的定义及其具体指标如表 2-1。其中, t 为板材厚度, 激光拼焊中 t 的最小值为 0.5mm; 示意图中焊缝图例为焊缝的横截面。

表 2-1 焊缝缺陷参数

Table 2-1 Parameters of weld defects

序号	缺陷类型	示意图	指标要求
1	Mismatch 错配	1-Mismatch (错边) 单位: mm  表示两板之间的距离(Z轴)	$<0.1t$
2	Undercut 咬边	2-Undercut (咬边) 单位: mm  较低的板和位于该板之下的轮廓之间的最大距离	$<0.05t$
3	Weld Slope 焊缝斜坡	5-Weld slope (焊缝斜坡) 单位: 度  表示焊缝的两末端和上板的垂直线之间的角度	45 ± 5
4	Convexity 凸凹度	6-Convexity (凸度) 单位: mm  从通过两板末端的直线到焊缝表面最远点的垂直距离(负号=凹度, 正号=凸度)	if 最小板厚 $t < 1.0\text{mm}$ $<0.15t$ if 最小板厚 $t \geq 1.0\text{mm}$ $<0.2t$

5	Overthickness 过厚	 3-Overthickness (过厚) 单位: mm 上板和位于该板之上的轮廓之间的最大距离	min (0.2mm+0.15t, 5mm)
6	Bead Width 焊缝宽度	 4-Bead width (焊缝宽度) 单位: mm 表示两板之间焊缝的宽度	

2.3 图像处理算法的设计

算法的介绍以不等厚板焊缝为例, 不等厚焊缝的典型图像如图 2-4, 具体的图像处理步骤如下, 图中除结构光之外的灰度信息可以通过滤光片有效滤除。

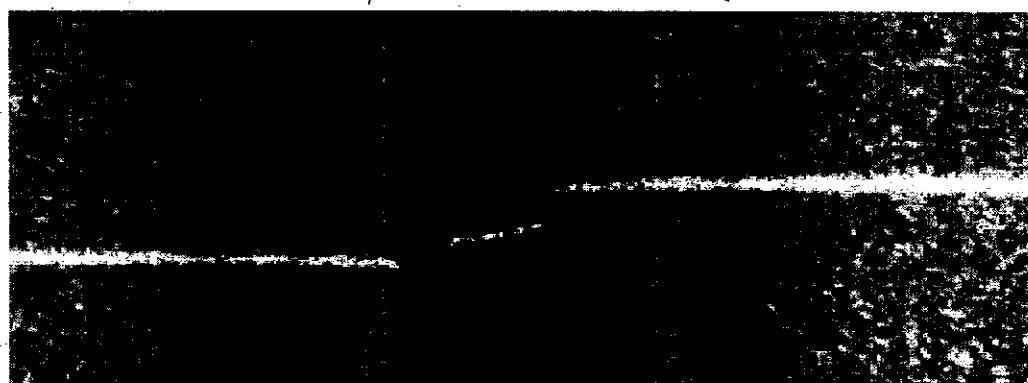


图 2-4 结构光图像

Fig.2-4 images of Structured light

2.3.1 提取结构光纹中心线

2.3.1.1 提取结构光纹感兴趣区域, 记为 ROI

提取感兴趣区域, 可以减小图像幅面, 集中于图像中的关键特征, 减小灰度图对提取结构光的干扰, 同时也减少了需要处理的数据量, 提高了图像处理速度。提取方法为对图像的行投影, 根据投影值确定感兴趣区域。设图像 Image 高度长度分别为 m , n ; 可以将图像看为 $m \times n$ 的矩阵, 矩阵中每个元素为一个像素的灰度值, 则图像处理步骤如下:

Step1 建立数组 $SumRow[m]$, 并对数组清零;

Step2 对图像的每一行做累加, 将累加结果存入 *SumRow* 如式 (2-1)

$$\text{SumRow}[i] = \sum_{j=0}^{j=m-1} \text{Image}[i][j], \quad 0 \leq i \leq n-1 \quad (2-1)$$

则 *SumRow* 曲线如图 2-5

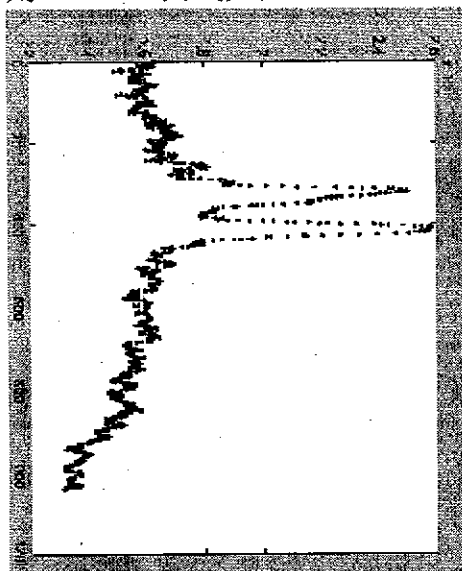


图 2-5 图像行投影曲线

Fig.2-5 Horizontal projection curve of original image

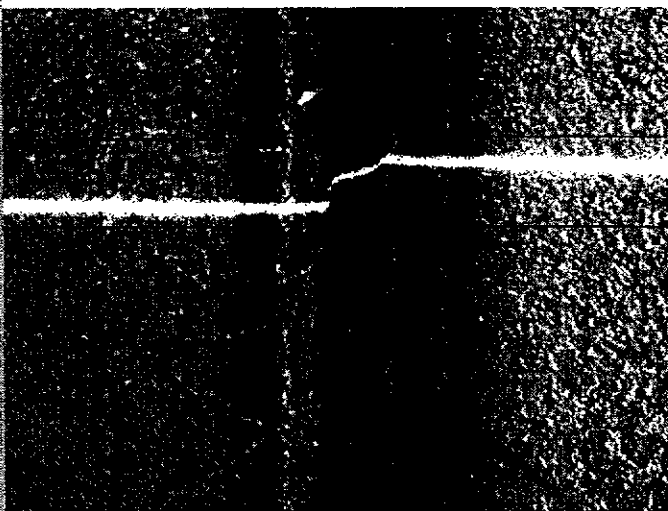


图 2-6 原始图像

Fig.2-6 original image

Step3 设 *SumRow* 数组的累加和平均值 *mean* 为

$$\text{mean} = \frac{\sum_{i=0}^{i=m-1} \text{sumrow}[i]}{m} \quad (2-2)$$

Step4 在数组 *SumRow* 中搜索所有大于 *mean* 的元素, 并记录这些元素在数组中的索引。

Step5 在 Step4 所记录的索引中提取最大的值, 令其为 *MaxBorder*, 提取最小的值, 令其为 *MinBorder*。

Step 6

$$\begin{cases} \text{MinBorder} = \text{MinBorder} - 20 \\ \text{MaxBorder} = \text{MaxBorder} + 20 \end{cases} \quad (2-3)$$

由于结构光纹一般宽度仅为 20 个像素以下, 考虑到光纹可能轻微的倾斜, 要将 *MaxBorder*, *MinBorder* 分别加减 20, 这样才能使所确定的感兴趣区域可以将整个结构光都包含进去。

Step 7 将原图像中行坐标位于 *MaxBorder* 与 *MinBorder* 之间的图像作为感兴

趣区域, 记为 ROI, 此时感兴趣区域已经找到。如图 2-6 中蓝色框内的部分。

2.3.1.2 将图像按不同的灰度范围分割

板材焊缝表面反射特征不一致, 如图 2-7。从左至右, 除结构光纹之外, 图像

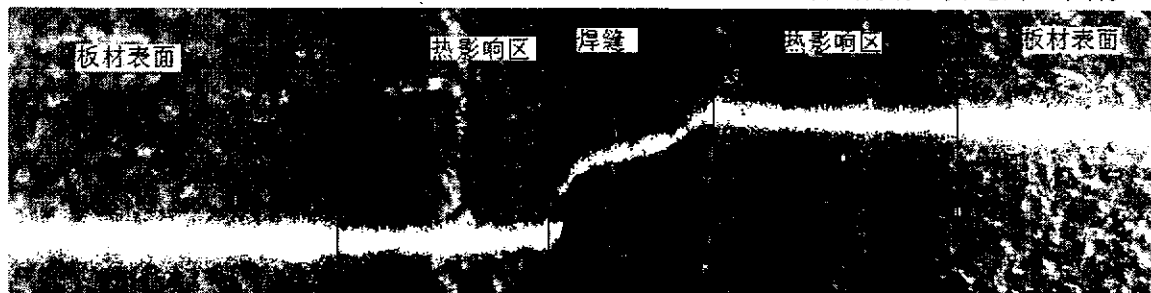


图 2-7 图像中不同部分的灰度特征

Fig.2-7 gray characteristics of different parts of the image

灰度信息按列分区段不同。板材表面整体灰度值比较高, 热影响区灰度值相比板材表面低, 而焊缝区域灰度值最低。这种不一致使得在图像中难以用一个阈值有效提取结构光纹。当阈值比较高时, 板材表面区域可以有效提取光纹, 但焊缝表面由于光纹灰度低, 条纹可能会断裂。而阈值较低时, 焊缝表面可以有效提取结构光, 但由于板材区域灰度图灰度值高, 在该区域低阈值会产生大量杂斑, 且结构光纹变粗。因此, 需要根据焊缝表面的反射特征, 将焊缝分为几个不同区段, 对每个区段分别进行阈值操作。基本方法为: 对图像进行列投影, 根据投影值的分布对图像分割。具体步骤如下:

Step1 对 ROI 按列投影

设 ROI 像素矩阵行列为 p, q , 建立数组 $SumCol[q]$, 并对数组清零; 做如下运算, 如式 (2-3), $SumCol$ 数组曲线如图 2-8。

$$sumcol[j] = \sum_{i=0}^{i=n-1} Roi[i][j] \quad 0 \leq j \leq q-1 \quad (2-4)$$

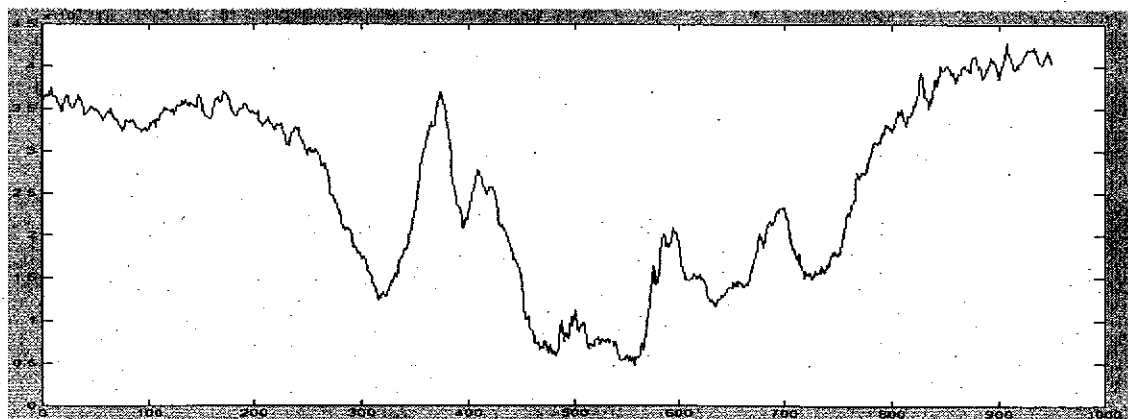


图 2-8 ROI 列投影曲线

Fig.2-8 Vertical projection curve of ROI

Step2 搜索 $SumCol$ 曲线中的一些特殊的极值点, 这些极值点中, 相邻的极小值点与极大值点相差大于某个阈值 K 。

图像中, 不同区域, 灰度按列逐渐变化, 因此, 在列投影中, 极大值表示某一区域的峰值灰度, 极小值表示另一区域中灰度最低的部分, 而两个区域的分界点即为极大值与极小值的中间点。当相邻极大值与极小值之差大于阈值 K 时, 则认为该极大值极小值所在的区域应该分割。因此, 首先在 $SumCol$ 曲线中搜索相差大于阈值 K 且相邻的极大值点与极小值点。

搜索过程如下:

S1 $P_s = SumCol[q]$;

S2 在 $SumCol$ 中, 以 P_s 为起点, 从左至右, 搜索一个点 P_t , 使得 P_t 左右两个邻近点都小于它 (极大值点) 或者都大于它 (极小值点), 且 $|P_t - P_s| < K$, 这可以去掉一些相差小的极值点, 如图中类似于小圆点标注的一些极值点等。

S3 $P_{temp} = P_s$, $P_s = P_t$, 重复 S2。

如果搜索到新的 P_t , 且 $P_s < P_{temp}$, $P_s < P_t$, 或者 $P_s > P_{temp}$, $P_s > P_t$, 则认为已找到一个极值点 P_f , 且 $P_f = P_s$ 。 $P_{temp} = P_f$, $P_s = P_t$, 重复 S2, 直到 $SumCol[q]$ 。

否则 $P_s = P_t$, 重复 S2, 直到 $SumCol[q]$ 。

搜索的极值点如图 2-9 中用小方块标注的极值点, 分割位置为图 2-9 中十字交叉型标注的点的横坐标。

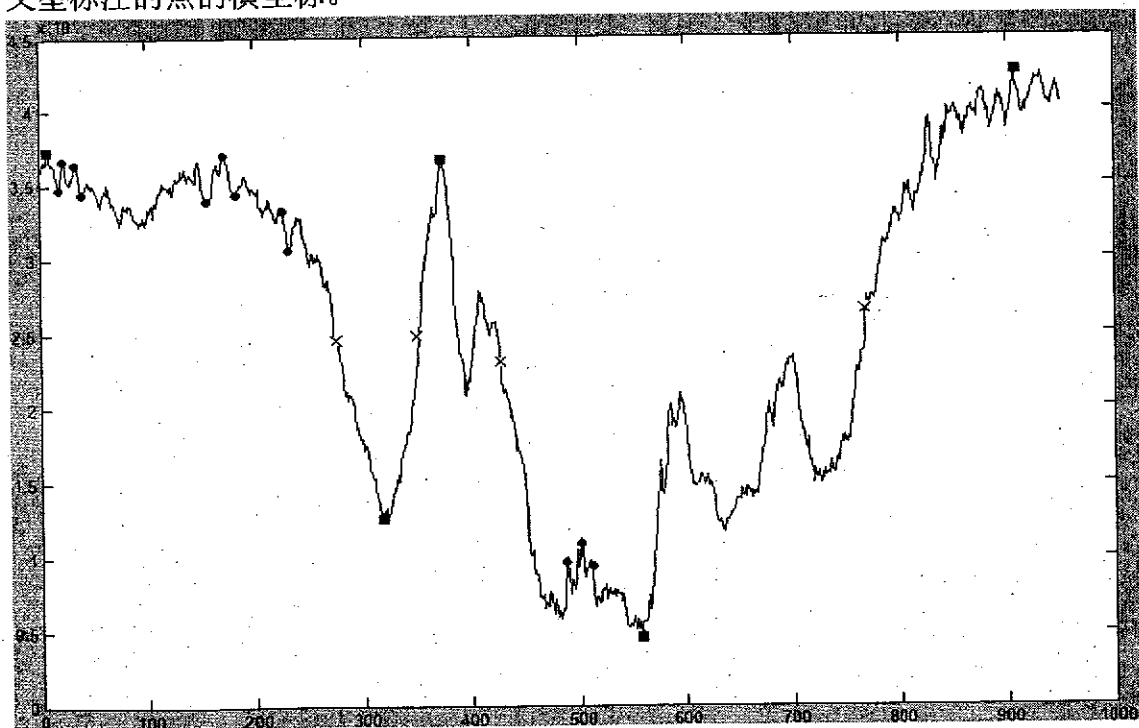


图 2-9 图像分割点的确定

Fig.2-9 the determination of segmentation points of image

分割结果如下图 2-10。



图 2-10 图像分割结果

Fig.2-10 results of segmentation to image

2.3.1.3 对以上分开的各段，首先通过滤波消除干扰杂斑，进一步用大津阈值方法对各段进行阈值操作

Step1 滤波

滤波方法采用中值滤波^[23]，模板为 3×3 。该滤波模板可以消除细小的杂斑干扰，以及光纹边缘毛刺。虽然会对结构光产生一定的模糊，但是这种影响在边缘仅有一个像素，因此，对光纹边缘提取的精度影响不大。

Step2 大津阈值方法

大津阈值法^[24]是广泛使用的阈值分割法之一，也称为最大类间方差法或最小类内方差法，是由日本学者大津展之(OTSU)1979 年最先提出的。该方法基于图像的灰度直方图，以目标和背景类间方差最大或类内方差最小为阈值选取准则。其基本计算方法为：设一幅图像是由一物体和背景构成，物体与背景有不同的灰度值，基于直方图统计图像的灰度值为 $1 \sim L$ 级，在 $1 \sim L$ 间选择阈值 K ，将图像分为目标(暗) $C_0=1 \sim K$ 与背景(亮) $C_1=K+1 \sim L$ 两类，如果两类的类间方差最大，则所求出的 K 为最佳阈值 K 。

滤波以及阈值结果如图 2-11



图 2-11 滤波和阈值后的结果图像

Fig.2-11 the filtered and threshold-segmented result image

2.3.1.4 提取结构光纹

阈值操作后的各部分图像中，除了结构光条纹以外，还有大量的干扰杂点，如图 2-11 中一些细小的斑点。因此，需要一种有效的方法来消除杂斑干扰，并提取结构光光纹边缘。由于阈值后的图像结构光光纹面积最大，所以可通过面积比较来提取结构光纹，剔除干扰杂斑。首先搜索和记录图像中大于阈值的区域的轮廓与面积，待搜索完成后，面积最大的区域即为结构光光纹，搜索过程中记录的

轮廓即为结构光边缘。具体搜索算法如下:

算法的描述以图 2-12 为例, $M_1, M_2, \dots, M_n$ 为阈值后的图像中大于阈值的不连续区域, 称这些区域为 M 区域, 设 M_3 为要提取的对象, 其他的 M 区域为干扰杂斑。

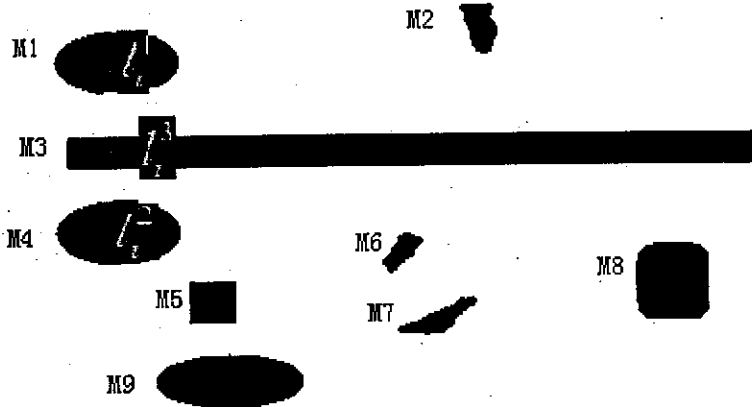


图 2-12 搜索算法示意图

Fig.2-12 sketch map of Search algorithm

S1 取图像中第一列, 如果在该列中有像素灰度值大于阈值的连续段 n 个, 则提取这些段, 记为 $l_1^1, l_2^1, \dots, l_n^1$, 记录这些连续段的上下边界为 (x_1, yu_1^1, yd_1^1) , (x_1, yu_1^2, yd_1^2) , $\dots$, (x_1, yu_1^n, yd_1^n) 。并建立 n 个轮廓结构体, 每个结构体对应于一个 M 区域, 结构体形式为 $\{pixelsum, (x_1, yu_1, yd_1), (x_2, yu_2, yd_2), \dots, (x_n, yu_n, yd_n)\}$, 其中, $pixelsum$ 为搜索过程中, 一个 M 区域已被搜索到的像素总数, $pixelsum$ 可以认为是该轮廓的面积。每一列中, 某个 M 区域在该列中的行坐标及其上下边界。

S2 取图像中下一列, 同 S1, 提取该列中大于阈值的各个段 $l_1^2, l_2^2, \dots, l_n^2$, 并记录这些连续段的上下边界。如果该列中大于阈值的连续段 l_i^2 与上列中大于阈值的连续段 l_{i-1}^1 有相交的部分, 则认为 l_i^2 与 l_{i-1}^1 属于同一个 M 区域, 将 l_i^2 的边界信息加入包含 l_{i-1}^1 的轮廓结构中, 修改 $pixelsum$, 将 l_i^2 中的像素个数加入 $pixelsum$ 。若该列中存在与前一列都不相交的段 l_i^2 , 则认为找到一个新的 M 区域, 建立轮廓结构体, 将 l_i^2 信息加入该结构体中。

S3 重复 S2, 直到最后一列。搜索完成后, 每个轮廓结构体包含一个不连续区域 M 的面积与轮廓, 在这些结构体中搜索面积最大的轮廓, 并提取边界。

该方法的前提是要求被搜索区域(结构光纹)在面积或长度上要大于干扰杂斑。在此前提下, 该方法有极高的可靠性与准确性。在图 2-12 中, 其中的 m_4 可以很快提取出来。提取结果如图 2-13。

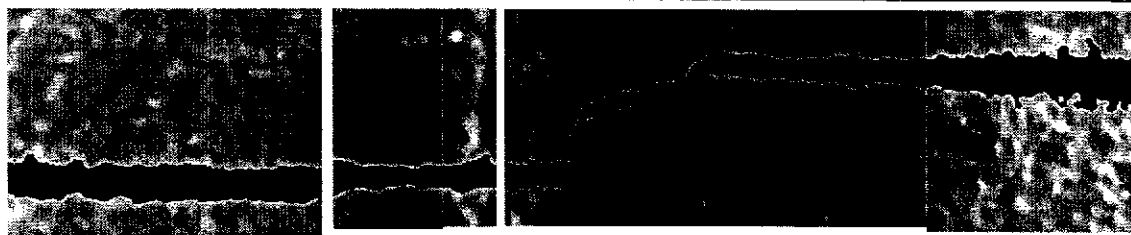


图 2-13 结构光纹提取结果

Fig.2-13 the result of extraction of structured light patterns

2.3.1.5 提取每段图像的中心线

上一步处理中已经提取了结构光纹的上下边界，形式如下

$$\{(x_1, yu_1, yd_1), (x_2, yu_2, yd_2), \dots, (x_n, yu_n, yd_n)\}$$

其中， x_i 为光纹的横坐标， yu_i 为在 x_i 所在列中光纹的上边缘， yd_i 为在 x_i 所在列中光纹的下边缘。

设中心线中某一点的坐标为 (x_c, y_c) ，则中心线提取按下式(2-5)进行

$$\begin{cases} x_c = x_i \\ y_c = \frac{yu_i + yd_i}{2} \end{cases} \quad (2-5)$$

通过上下边缘取平均，可以有效抑制边缘随机毛刺的对中心线提取的干扰，题图效果如图 2-14 所示。

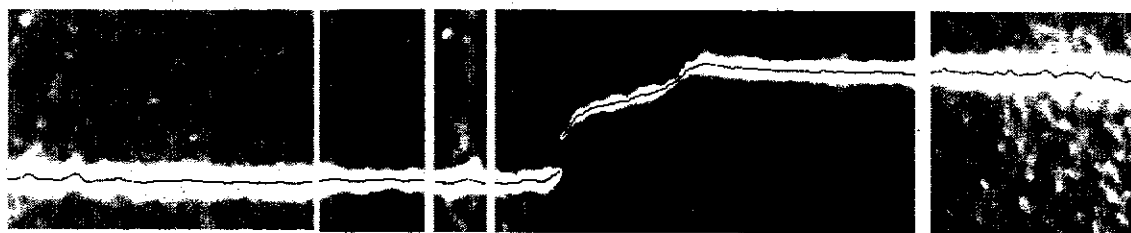


图 2-14 中心线提取结果

Fig.2-14 the extraction results of centerline

2.3.1.6 连接各段图像的中心线，结果如图 2-15



图 2-15 最终的中心线提取结果

Fig.2-15 the final extraction results of the centerline

2.3.2 结构光中心线特征点的识别

结构光光纹中心线特征点为在中心线上处于焊缝边缘的点, 如下图 2-16 中的 A, B 点。设 A, B 点将中心线分为三段, 分别为 S1, S2, S3, 如图 2-16。中心线中 S1, S3 段整体上大致成直线形状, 直线斜率是在 $(0 \sim x^\circ)$, 其中, x 为直线

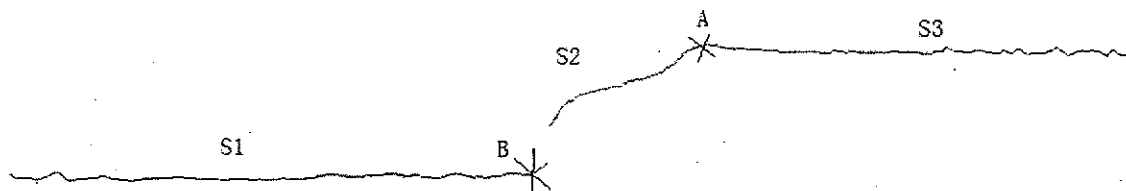


图 2-16 中心线中特征点位置

Fig.2-16 the position of feature points in centerline

最大斜率, 该值取决于焊缝工艺。有时会因为焊接工艺的一些因素, 使得板材表面呈弯曲形态, 从而使中线中 S1, S2 段整体上成向上或向下弯曲的形状。如下图 2-17 中的结构光纹右侧部分成向上弯曲状。

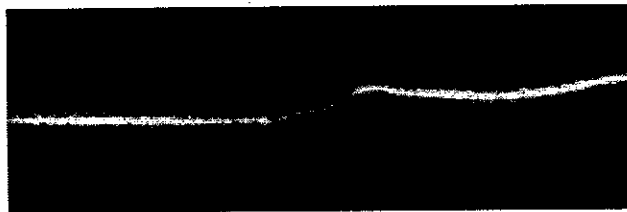


图 2-17 结构光纹弯曲的图像

Fig.2-17 bending structured light images

另外, 由于板材表面的粗糙度以及光纹边缘毛刺的影响, 使得光纹中心线在小范围内有呈锯齿状。如图 2-16 中所示 S1 与 S3 中局部的一些锯齿形线段。由于焊缝表面形态没有固定的特征, 因此, 光纹中心线 S2 段没有固定的几何形状。

以上为结构光中心线的几何特征, 下面将具体介绍中心线特征点的提取算法。

2.3.2.1 搜索两个点 PL, PR, 使这两个点必然处于结构光光纹中心线中 S2 段中。

Step1 建一个圆, 圆形的直径为焊缝的最大宽度的 $1/2$ 。

圆直径取 $\frac{\text{焊缝最大宽度}}{2}$, 这可以有较抑制光纹中微小锯齿的对搜索的干扰。

宽度越大, 抑制能力越强, 但运算量也越大。虽然准确的焊缝宽度未知, 但是一批板材中, 焊缝宽度的大致范围是可以经验获取的, 所以, 可以在检测前预先确定该值。

Step2 将圆模板沿光纹中心线从左至右扫描。

扫描方式为: 每次扫描时, 将光纹中心线的点作为圆形模板的圆心, 则光纹中心线将圆形模板分为上下两部分, 如图中 2-18 中的 U 和 D 两部分, 这里, 我

们计算 D 的面积。D 面积的计算可以用一种简便的方法进行：若圆形模板以圆心为坐标原点，则圆周上各个点的相对坐标可预先获取，而中心线中各点的坐标已知，那么一次 D 的面积的计算只需要 $((2 \times (\text{焊缝最大宽度}) + 1) \times \text{中心线像素个数})$ 个加减法运算。面积的计算可以通过像素个数来代替。如果光纹中心线发生断裂，则需要用直线段将断裂的位置连接即可。

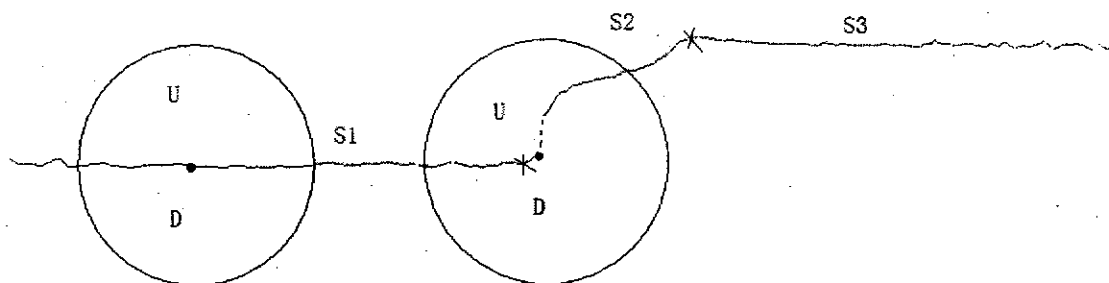


图 2-18 扫描方法

Fig.2-18 the scanning method

Step3 全部扫描完成后，提取最大 D 面积的和最小 D 面积对应的中心线中的两个点。设位于左边的点为 PL，位于右边的点为 PR。则 PL，PR 必然在光纹中心线的 S2 段中，如图 2-20。原因是：

如果在理想的折线中，D 面积的最大值，最小值必然在角点。如图 2-19，C2 圆中 D 的面积最大，C3 中 D 的面积最小，C1 中 D 的面积居中。P2，P3 为角点，而 P1 为直线上的点^[25]。但是，由于结构光纹中心线不是理想的折线，处于焊缝部分的 S2 段几何形状复杂多变，因此，在结构光纹中，D 面积最大的点不一定

是角点。但是，在以 $\frac{\text{焊缝最大宽度}}{2}$ 为直径的情况下，D 面积最大和最小对应的点必然在 S2 段中。

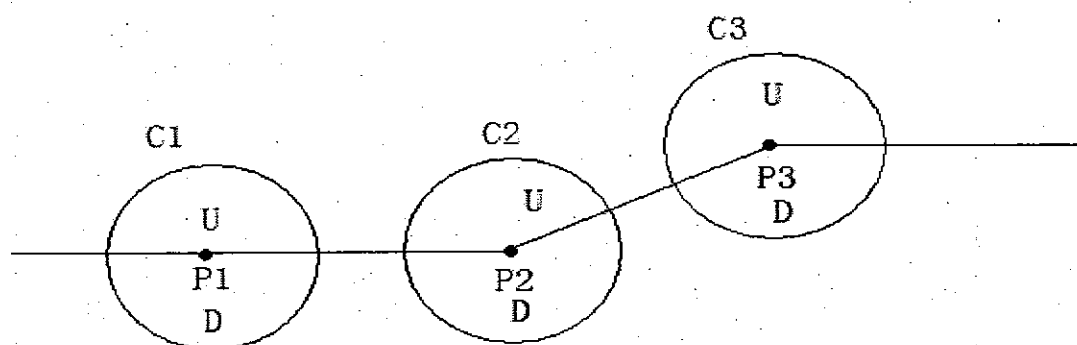


图 2-19 角点的确定

Fig.2-19 determination of corner point

2.3.2.2 搜索两个点 LS, RS, 使着这两个点分别处于中心线 S1, S3 中, 且尽可能距焊缝最近

从 PL 开始向左搜索, 如果圆形模板中 D 面积逐渐增加或者减少到 ($1/2 \times \text{圆面积} - E$, E 为一个比较小的阈值), 则停止搜索, 此时, 将该停止点作为 LS 点。

同理, 向右搜索, 如果 D 面积会逐渐增加 ($1/2 \times \text{圆面积} - E$), 停止搜索, 此时, 将该停止点作为 RS 点。设 S1 中 LS 左边的部分为 Z1 段, S3 中 RS 右边的部分为 Z2 段, 如下图 2-20。

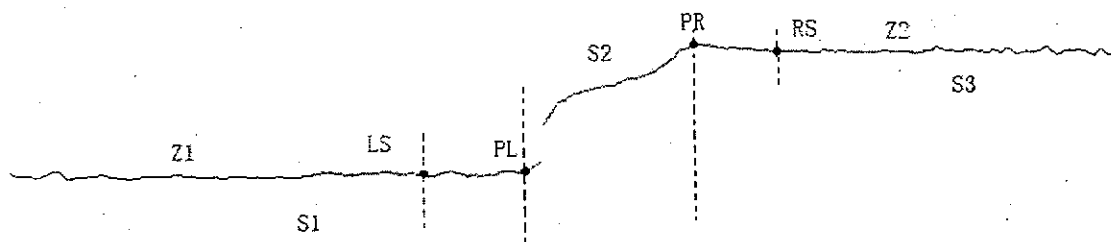


图 2-20 搜索结果

Fig.2-20 search result

2.3.2.3 对中心线中的 Z1, Z2 这两段分别用线段精确拟合

这里采用递归方法来分割并拟合直线。

Step1 对 S1 中 Z1, 用最小二乘法拟合, 并计算平均拟合误差。

Step2 设 $ST = Z1$, 将 ST 等分为 2, 得到 STL, STR 两线段, 并计算 STL, STR 平均拟合误差。

Step3 比较 ST 与 STL、STR 的平均拟合误差, 如果相差小于阈值, 则认为此时直线拟合良好。Z1 拟合完成。如果相差大于阈值, 则令 $ST = STL$, 重复 Step2。并令 $ST = STR$, 重复 Step2。直到等分后的每段线段像素个数小于有效拟合线段的数值。

Step4 将斜率相同且相邻的线段连接, 最后, Z1 被相邻但斜率不同的多个线段拟合。

Step3 用同样的方法, 对 Z2 用多个线段准确拟合。

如图 2-21, 曲线被分割为 4 段, 每段分别用直线段拟合, 图中用虚线隔开。

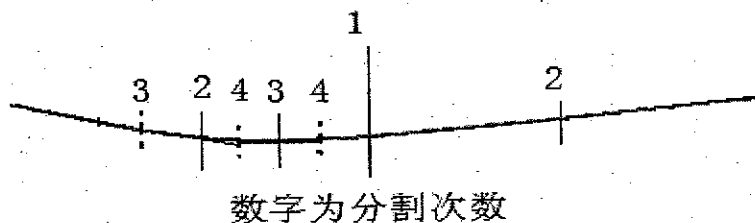


图 2-21 拟合示意图

Fig.2-21 sketch map Fitting

2.3.2.4 提取准确特征点

设中心线 S1 段中, 距 S2 最近的线段为 L1, 在 S1 段中点 PL 至点 LS 之间, 计算点到 L1 所在的直线的距离, 如果距离小于 L1 的拟合平均误差, 则认为该点与直线共线。

根据 PL 至 LS 之间点到 L1 的距离, 可以获知 PL 至 LS 之间中心线的几何形状, 该段几何形状可能会存在 3 种情况, 如图 2-22, 一种是正常的焊缝边缘, 一种是过厚, 一种是咬边。在这三种情况中, 特征点的位置为图 2-22 中的圆点位置。同理, 可以确定另一个特征点。

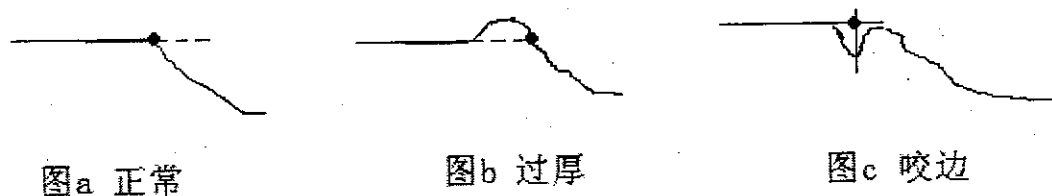


图 2-22 结构光中心线特征点附近的 3 种几何形状

Fig.2-22 the three kinds of shape in neighborhood of feature point in the centerline

2.3.3 焊缝缺陷参数的计算

设 S1 处于薄板一侧, S2 处于厚板一侧。缺陷参数以本章第 2 节的检测要求为准。

1) 咬边

焊缝咬边一般发生在焊缝与板材的交接处, 典型特征为, 中间低, 两边高, 且范围很小, 如下图 2-23 所示。

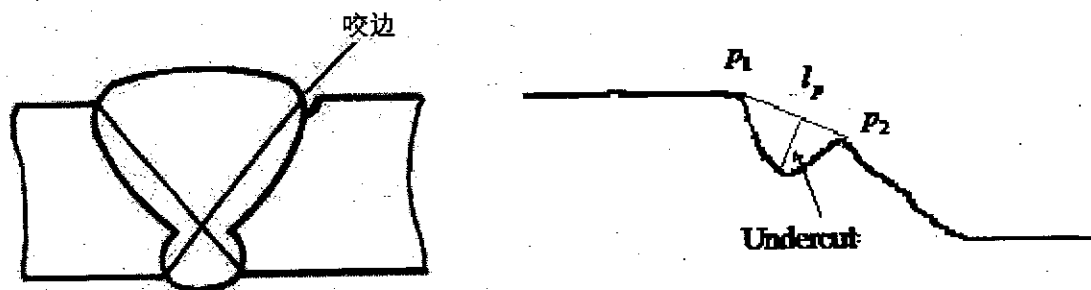


图 a 实际焊缝咬边

图 b 结构光中的咬边

图 2-23 咬边

Fig.2-23 undercut

若咬边缺陷两边纵坐标最大值处点的坐标分别为 $p_1(x_1, y_1)$, $p_2(x_2, y_2)$, 由这两点确定的直线为 $l_p(k_p, b_p)$, 设在光纹中咬边区域的各个点到直线 l_p 为 distance。

则咬边 Undercut=Max(distance)

2) 错配

取 S1 与 S3 中斜率相等或相近的两个线段, 计算两线段所在直线间的距离

设两线段为 $l_1\{(x_{s1}, y_{s1}), (x_{e1}, y_{e1}), k_1, b_1\}$, k_1, b_1 为 l_1 拟合后的斜率与截距
 $l_2\{(x_{s2}, y_{s2}), (x_{e2}, y_{e2}), k_2, b_2\}$, k_2, b_2 为 l_2 拟合后的斜率与截距。

则

$$Mismatch = \frac{|k_2 * x_{e1} - y + b_2|}{\sqrt{k_2^2 + 1}} \quad \text{其中 } y = k_1 * x_{e1} + b_1 \quad (2-6)$$

3) 凸凹度

特征点为 A, B。设两直线确定的直线为 $l_i(k_i, y_i)$ 。则中心线中处于两特征点之间的点 (x_c, y_c) 到直线 l_i 距离为 Condis tan ce。

则凸度

$$Convex = \text{Max}(\text{Condis tan ce})$$

凹度为

$$\text{concavity} = \text{Min}(\text{Condis tan ce})$$

4) 焊缝宽度

设 A 点, B 点在线段 l_2 所在直线的投影点为 $p_a(x_a, y_a), p_b(x_b, y_b)$ 。

焊缝宽度

$$\text{Bead Width} = \sqrt{(x_b - x_a)^2 + (y_b - y_a)^2} \quad (2-7)$$

5) 焊缝斜坡

设厚板一侧最近邻焊缝的中心线线段所在的直线参数为 $l_4(k_4, b_4)$, 而由特征点确定的直线参数为 $l_i(k_i, y_i)$

则焊缝斜坡

$$\text{WeldSlop} = \arctan(k_i) - \arctan(k_4) \quad (2-8)$$

6) 过厚

设邻近焊缝一侧的线段为 $l_i(k_i, y_i)$, 则从特征点开始, 向焊缝方向逐个计算焊缝中心线的点到直线 l_i 的距离 distance。

过厚 Overthickness=Max(distance)

以上为结构光纹提取焊缝曲线参数的具体步骤。光纹中心线的准确提取对整个检测算法有非常大的影响。图像中背景光对光纹中心线提取有比较大的干扰。通过镜头前加滤光片, 可以去除背景光干扰, 但是仍然难以用一致的阈值提取结构光纹。原因是阈值过大, 板材表面结构光纹提取效果好, 但热影响区焊缝中结构光纹会发生断裂和不连续。而阈值过小, 焊缝和热影响区可以比较好的提取, 但板材表面去光纹宽度过大, 边缘毛刺过多, 影响图像处理精度。因此需要对图

像分段进行阈值处理。除了设计结构光光纹的提取算法外,在图像的采集中应尽量使结构光纹尽可能细,且边缘毛刺尽可能小,这将非常有利于下一步的特征点提取操作。

特征点的检测是整个算法中最关键的部分。特征点的提取,决定了后续焊缝缺陷参数计算的准确性。由于光纹中心线的倾斜,弯曲,局部锯齿状的凸凹,以及处于焊缝区域部分的中心线不稳定和复杂的特征,使得要可靠且准确的提取特征点非常困难。但是,平滑的结构光光纹非常有利于特征点的提取,因此中心线的提取的好坏对特征点的识别有非常大的影响。

焊缝缺陷指标的计算中,咬边的检测最为复杂。因为实际焊缝中咬边尺寸比较小,所以在结构光光纹中形变小,如果结构光光纹过粗,则极易将咬边缺陷的形态淹没。而结构光光纹边缘的毛刺过大,则容易在结构光光纹中心线上产生小的转折,从而误认为是咬边。因此,对咬边的可靠检测,不仅需要算法上的改进,而且需要尽量提高图像中结构光光纹的质量,即使得结构光光纹很细,且边缘没有毛刺。

2.4 小结

本章基于结构光视觉检测原理建立了焊缝质量检测系统,依据 ISO13919-1 B 级标准,深入分析了激光拼焊焊缝质量检测指标要求,并针对检测指标,研究了焊缝图像处理算法。焊缝图像处理算法是整个检测系统的核心内容,其处理的速度与精度直接影响到系统的实时性与准确性。本文设计了焊缝图像处理算法流程,并针对激光拼焊焊缝图像特征不稳定的特点,提出了特征点识别算法,首先缩小特征点所在的范围,进一步在小范围内搜索准确的特征点,确保了焊缝特征点的准确识别。本文中介绍的图像处理算法可以有效检测出前述的 6 种焊缝缺陷。

第3章 传感器标定方法研究

3.1 引言

焊缝质量检测系统采用了视觉原理,因此,为了从二维图像获取三维空间信息,需要场景中工件上的某点实际物理坐标与该点在图像平面上对应的图像坐标之间的对应关系,建立这种对应关系的过程即为标定。

标定计算的复杂度与摄像机成像(景物—图像)几何模型的复杂性有关。小孔摄像机成像模型满足严格的透视变换关系,其基本变换计算式是线性关系,可以直接采用解线性方程组的方法求解。但是由于实际的摄像机成像原理并不是理想化的小孔成像,此外,摄像机还存在有制造和装配误差,因此,实际成像与理想的小孔成像之间存在差异,这些差异称为畸变。为了精确地建立含畸变的图像坐标与实物三维坐标之间的关系,需要通过标定来修正这种畸变^[27]。

结构光传感器标定方法有基于模型的标定与直接标定两种方法。基于模型的结构光标定方法在大视场、短焦距或广角镜头的应用中有明显优势,但在小视场、精度要求很高的场合标定难度加大。而采用直接标定方法,可以通过数值方法达到非常高的精度,该方法不需要标定模型,不必标定摄像机的内外参数及结构光系统参数,不存在测量结果对中间标定参数敏感性的问题。

本章首先介绍了结构光视觉传感器的标定原理及方法,针对激光拼焊焊缝质量检测应用需求,研究了焊缝质量检测视觉传感器直接标定方法,并改进了一种针对于光平面上特征点的网格划分方法,通过合理划分特征点网格,对特征点插值计算,获取待标定点的准确物理坐标,有效地提高了该直接标定方法的精度,并给出了标定实验结果及精度分析。

3.2 直接标定方法

3.2.1 直接标定原理

直接标定方法的标定原理如图 3-1 所示,首先通过实验获取一组特征点,该组特征点的图像坐标 (u, v) 以及对应的三维空间坐标 (x_w, y_w, z_w) 可以通过图像处理和实验操作获取。图像坐标与空间三维坐标是一一对应关系 $(u, v) \rightarrow (x_w, y_w, z_w)$ 。在标定特征点获取之后,图像中其它任意点的三维物理坐标 (x_w, y_w, z_w) 可以通过该组已知图像坐标与三维物理坐标的标定特征点插值算出。特征点的获取可以离线进行,而标定中点的插值计算需要实时进行,因此,插值算法应尽可能简单。特征点的数量越多,标定精度也就越高,且在特征点的数量达到一定密度的情况下,用简单的线性插值函数即可满足系统精度要求。

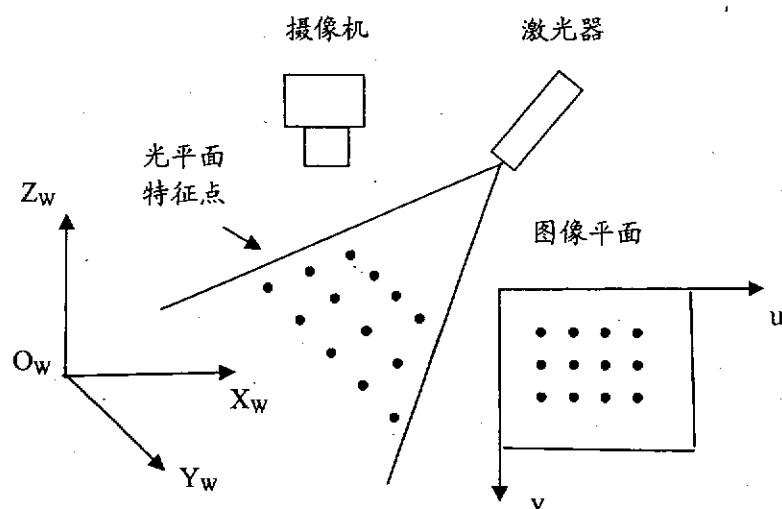


图 3-1 直接标定方法原理图

Fig 3-1 Principle of direct calibration

3.2.2 标定特征点的确定

如何确定和提取标定点是直接标定方法中最关键的步骤。系统中的光平面与像平面如图 3-2。首先将检测系统视场中的结构光光平面按一定密度等间隔划分

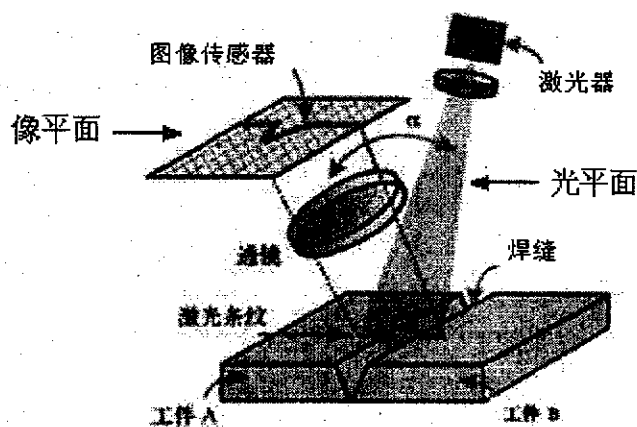


图 3-2 检测系统光平面与像平面

Fig.3-2 light-plane and image-plane of inspection system

为矩形网格，则每个网格顶点即为我们所提取的标定特征点，这些标定特征点在光平面中的坐标即为其物理坐标。相应的，在像平面中也有与光平面相应的网格，但由于镜头的畸变，这些网格成不规则的四边形，如图 3-3，像平面中网格的顶点即为标定特征点在图像中的坐标。通过采集图像过程中的三维平移台以及图像处理，可以获取像平面中这些不规则网格顶点的对应的光平面物理坐标

(x_w, y_w, z_w) 以及图像坐标 (u, v) ，由于光平面倾斜角度已知， x_w, z_w 成一定的函数关系；因此，光平面物理坐标可表示为 (y_w, z_w) 。则标定特征点的图像坐标与物理坐标之间存在一种一一对应关系，即 $(u, v) \leftrightarrow (y_w, z_w)$ ，那么 y_w, z_w 可以表示为 u, v 的函数关系，即如式 3-1。

$$\begin{cases} y_w = f(u, v) \\ z_w = g(u, v) \end{cases} \quad (3-1)$$

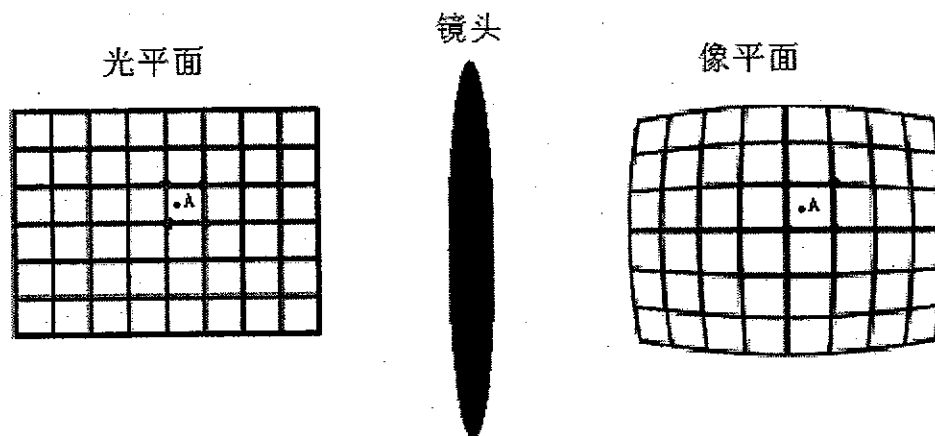


图 3-3 等间距网格划分的光平面与对应的像平面

Fig.3-3 the corresponding image plane of the light plane divided by equidistance grid

式 3-2 中的函数为复杂的非线性函数。但当网格划分的足够小时，上述函数在一个小网格内可以近似为一个线性函数，则对于像平面中的任意一个待标定点点 $A(u_a, v_a)$ ，可以首先求出在包围待标定点点的小四边形区域内的近似线性函数，之后，可插值算出其物理坐标 $A(y_a, z_a)$ 。具体的插值函数力求简单快速，因为标定计算是实时进行的。

插值计算精度与像平面网格的密度有关，而像平面中网格划分的密度取决于光平面划分的密度，所以，光平面分割密度越高，像平面网格密度与大，插值精度越高。分割密度越大，将会增加特征点采样的工作量，且会增加特征点搜索的数量，从而也增加整个视觉检测时间。但分割密度过小，插值精度又很难保证，因此，应该确定一个合理的分割密度。

确定分割密度的方法如下：

假设在某种分割密度 M 下，已经在像平面中获取了一组特征点，设该组特征点的图像坐标为 (u, v) ，物理坐标为 (x_1, y_2, z_3) 。那么，在这组特征点中选取其中一个点 S ，如图 3-4 中 S 点，设其实际物理坐标为 (x_w, y_w, z_w) ，利用以该点为中心的小四边形的四个顶点（如图 3-4 中四个绿色点）插值计算其实际物理坐标为 (x_1, y_2, z_3) ，若插值误差满足如下关系：

$(x_r - x_l) < \delta, (y_r - y_l) < \delta, (z_r - z_l) < \delta$ (δ 为标定所要求精度), 则图 3-4 中 P_1 点被包围它的最小网格的四个顶点插值计算后, 插值误差也小于 δ ; 同理 P_2, P_3, P_4 各点插值误差也小于 δ 。

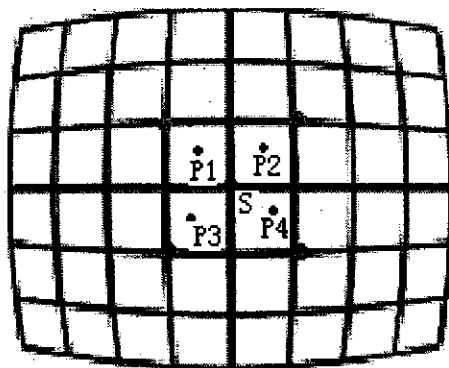


图 3-4 确定分割密度的方法

Fig.3-4 the method to determine density of segmentation

畸变是镜头放大率随到光轴中心的距离变化造成的。由于镜头表面是光滑连续的曲线, 所以, 镜头的这种畸变量是从光轴中心到四周连续单调的变化, 畸变曲线只有一个极值, 且不会出现突变。以图 3-5 中 S 点为例, 当 S 点的插值精度满足精度要求时, 以 S 为顶点的 4 个小四边形内的线性插值误差都将满足精度要求, 如图 3-5 中的 T1, T2 点或图 3-4 中的 T1, T2, T3, T4。

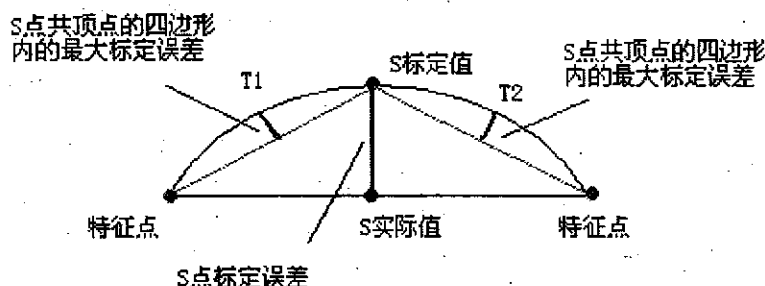


图 3-5 确定分割密度的方法

Fig.3-5 the method to determine density of segmentation

镜头的畸变程度在整个像面里是不一样的, 因为镜头中心畸变小, 边缘畸变大, 所以在确定分割密度时, 要在图像边缘的八个方位进行测试, 最后密度最大的划分间隔为整个光平面网格的划分密度。

最后, 因为镜头的畸变在整个像面里不一样, 所以光平面网格的划分可以不均匀, 即有的地方稀疏, 有的地方密一些。虽然这样可以减少采样点, 但是这会增加其它实现上的困难。而均匀划分, 这样虽然会增加实验图像采集的工作量, 但因为数据均匀, 非常利于特征点的采集与软件的实现, 如标定表的生成, 以及四边形顶点的查找与插值等。

3.2.3 标定特征点提取

标定点的提取分为两个步骤, 首先进行图像的采集, 图像中包含了特征点的信息。在图像的采集过程中, 利用三维高精度平移台可以获取该幅图像中特征点的物理坐标。其次通过对采集到的图像进行处理, 获取图像中特征点的图像坐标。

3.2.3.1 特征点提取实验

Step1 设计标定块, 由 10 个厚度为 1mm 的标准量块及三自由度精密平移台组成标定试验台, 如图 3-6 所示。将标准量块交叉叠放, 使其中 5 个量块间隔均为 1mm, 如图 3-7。在标定块上建立坐标系 $o_w-x_wy_wz_w$, 分别与精密平移台的三个坐标轴平行, 如图 3-8;

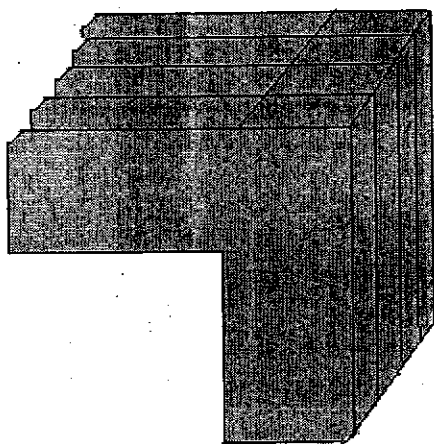


图 3-6 标定量块的叠放结构
Fig 3-6 architecture of gauge block

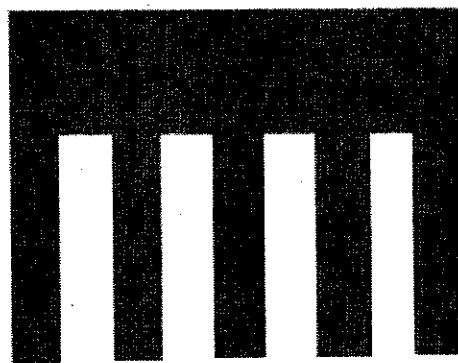


图 3-7 标定量块的上表面视图
Fig 3-7 upside profile of gauge block

Step2 将标定块置于工作区间的激光光平面内, 确保多个量块上表面所形成的平面与相机传感器平面平行, 激光条纹以一定角度投射于量块棱边, 采集量块上的结构光纹图像。

Step3 保持 y_w , z_w 不变, 沿 x_w 轴方向微调三维平移台, 获取 n 幅图像, 如图 3-9 所示, 沿 x_w 连续采集 n 幅图像主要是为了消除光纹与量块以及一些随机因素引起的干扰。具体方法是将每一幅图像的特征点提取, 并对 n 幅图像所求取的特征点取平均。

Step4 沿 y_w 轴方向微调三维平移台, 并重复步骤 3, 获取同一光面深度不同位置的多组特征点, 移动次数以前述的采集密度为准, 设为 M ;

Step5 沿 z_w 轴方向微调三维平移台, 重复步骤 3、4, 获取不同光面深度的多组特征点, 移动次数以前述的采集密度为准, 设为 N ;

6) 处理图像, 获取多组特征点的图像坐标, 并记录下特征点相应的三维空间坐标值, 建立对应关系。并且, 按照三维平移台移动的次序, 将特征点按顺序存

入二维数组中 L, 该二维数组为 $M \times N$, 数组中每个元素为一个结构体, 结构体形式如式 3-2:

$$\text{struct} \begin{cases} u \\ v \\ y \\ z \end{cases} \quad \text{其中 } (u, v) \text{ 为图像坐标, } (y, z) \text{ 为物理坐标} \quad (3-2)$$

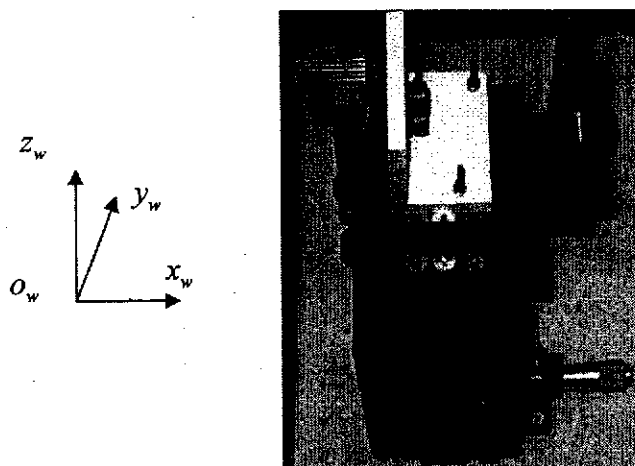


图 3-8 标定块实物图

Fig 3-8 Calibration block

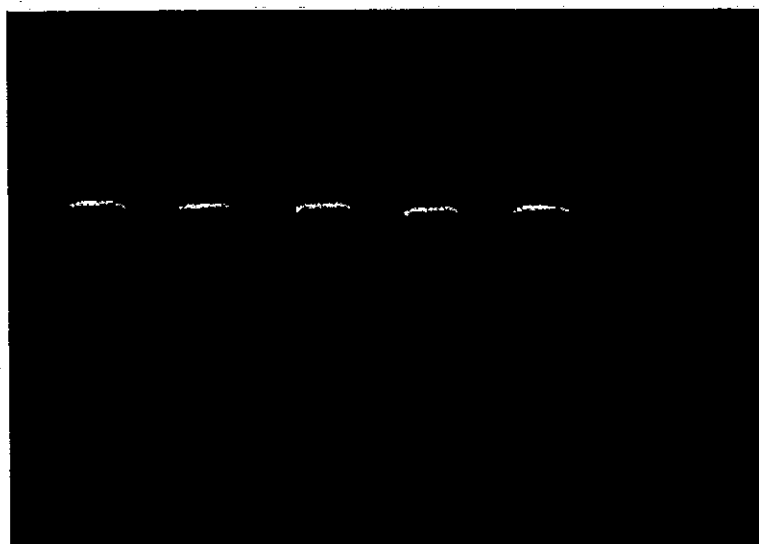


图 3-9 获取多帧标定图像

Fig 3-9 Capturing calibration images

图像坐标通过图像处理得到, 实际物理坐标通过移动平移台的坐标计算而得到。在 L 数组中, 每行之间特征点信息按 Z 轴移动的顺序存放, 而每一行中为三维平移台 Z 为某一值时, 沿 y 方向移动顺序按序存放。最后 L 数组所具有的特征

是：每一行中，从左到右，图像横坐标值 u 由小变大。每一列中，图像纵坐标值 v 由小变大。数组中每个结构体中的元素的图像坐标之间的相对顺序与像平面上点的相对位置是一致的。

3.2.3.2 标定图像的处理方法

标定图像中特征点的准确提取直接影响标定的精度，标定实验中采集的典型图像如图 3-9 所示，图像中特征点如图 3-10 中的圆点所示。标定图像处理算法对



图 3-10 特征点位置

Fig 3-10 the location of feature points

于精度有很高的要求，因此，除了在实验中采集高质量的图外，还要仔细设计图像处理算法。标定特征点的图像处理算法中的关键步骤是图像中各段光纹中心线的准确提取，这里主要采用亚像素边缘提取方法提取结构光边缘，之后根据边缘提取中心线，亚像素提取算法精度高，虽然处理速度比较慢，但该部分图像处理算法离线进行。由于量块上各段结构光纹共线，所以，在提取出各段光纹中心线后，将多段中心线一起拟合直线，并再次准确计算特征点。

算法流程如图 3-11 所示。

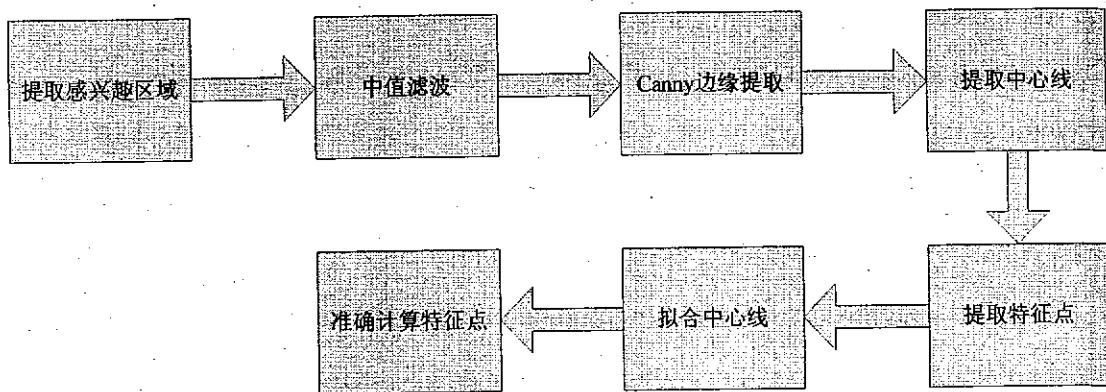
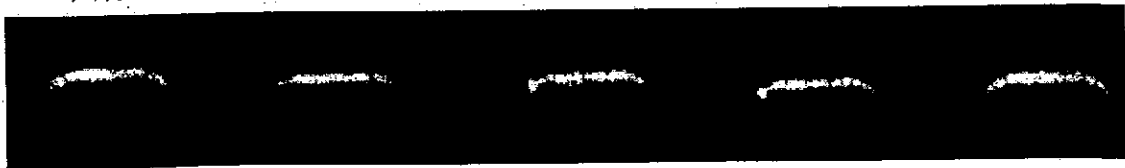


图 3-11 特征点提取算法流程

Fig 3-11 Feature points extracted flow chart

图像处理过程如图 3-12 所示。



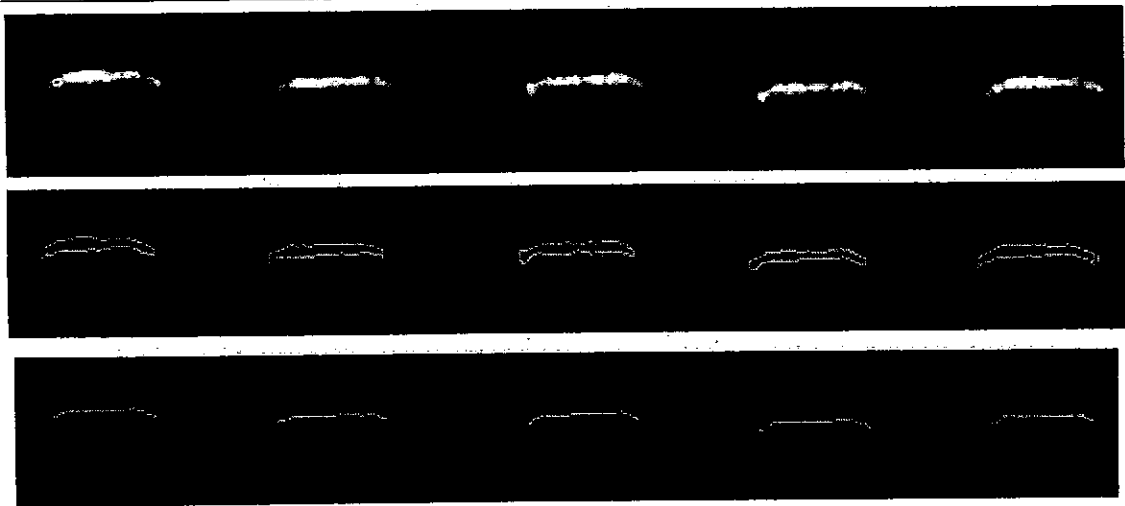


图 3-12 标定图像处理

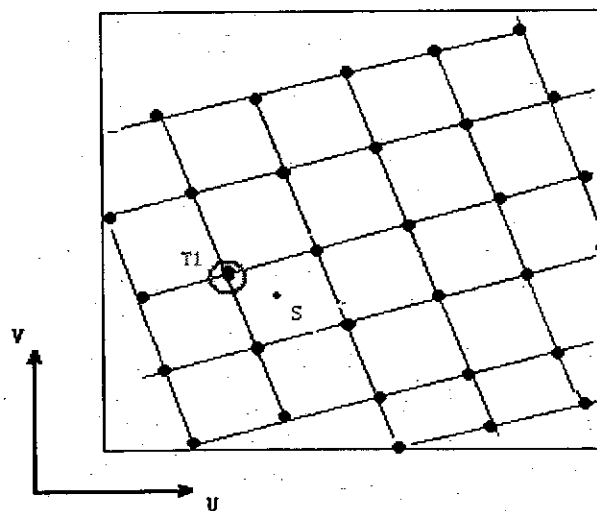
Fig 3-12 Processing of calibration images

3.2.4 查找与插值

要计算出待标定点的物理坐标, 需要找出包围该点的最小四边形的四个顶点, 利用这四个顶点插值算出待标定点的实际坐标。该算法的前提要求 3.3.2 节中取得的标定特征点的图像坐标范围要比相机工作幅面大很多, 这样才不会出现相机工作幅面中的某个点的处于标定表之外的情况, 且大大减少查找与插值的复杂性(比如边界判断等)。图像坐标轴为 U 轴方向向右, V 轴方向向上。另外, 由于镜头畸变, 像面中特征点的排列不一定是规则的, 可能如图 3-13 中有一定的不规则倾斜。

3.2.4.1 查找

假设被插值点为 $S(x_s, y_s)$, 如图 3-13 中 S 点, 为了查找包围该点的小四边形

图 3-13 $T1$ 点相对与 S 点的位置Fig. 3-13 $T1$'s position relative to S

的四个顶点,首先在标定特征点提取实验中建立的二维数组 L 中查找一个点 $T_1(x_{t1}, y_{t1})$,该点在像平面中距 S 点最近,且位于 S 点左上方的点,该顶点为包围 S 的最小四边形左上角顶点,如图 3-13 中 T_1 点。

搜索方法如下:

Step1 先搜索数组 L 中第一行,找到一个点 G_1 ,使得 G_1 在 U 方向上距 M

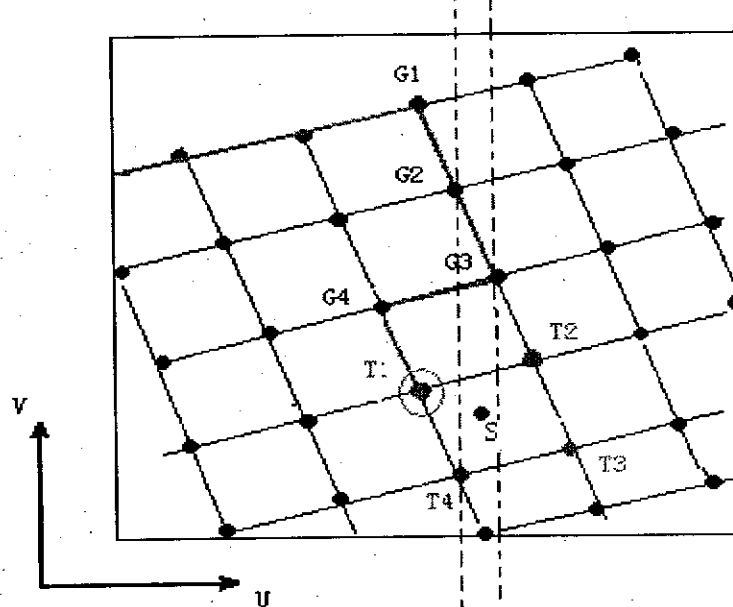


图 3-14 搜索包围待标定点的最小网格 4 个顶点的算法

Fig.3-14 the algorithm to search the four vertex points for all the points to calibrate to encircled by the smallest grid

点最近,且在 M 点左边,如图 3-14 中 G_1 点。

Step2 从 G_1 点开始,沿 G_1 点在数组 L 中所在的列向下一行寻找,并在该行中寻找在 U 方向距 M 点最近且位于左边的点 $G_i(x_{gi}, y_{gi})$,如图 3-10,并且记录此点。

Step3 重复 step2,直到当找到一点 $G_n(x_{gn}, y_{gn})$ 当 G_n 满足 $(x_{gn} < x_s, y_{gn} > y_s)$ 条件时停止,此时说明点 T_1 在 G_n 点所在行的上一行。因而,取出上一行的被记录的点 G_{n-1} ,即为要找的 T_1 点。

Step4 查找其它三个点,在数组中 L 中,设 T_1 点下标为 (i, j) ,则 T_2, T_3, T_4 在数组中的下标分别为 $(i+1, j), (i+1, j+1), (i, j+1)$ 。

由此,待插值点 S 的所需要的四个顶点均已找到,如图 3-11 中 T_1, T_2, T_3, T_4 。

查找效率:在二维数组中,只有第一行是在整个行内搜索,其它各行只是在 U 方向很小范围内搜索,所以基本上是按照很小的折线查找,如图 3-11 中绿色折线所表示的查找路径,查找次数基本上与标定表的行列数成线性关系。

因为标定表数组中,每行,每列坐标值并不严格相等,所以,上述的查找方

法会出现以下情况, 虽然找到 T_1, T_2, T_3, T_4 , 但被插值点 S 却不在 T_1, T_2, T_3, T_4 组成的四边形中, 如图 3-15。但是 S 不在网格 1 中, 却在网格 2 中。所以, 在

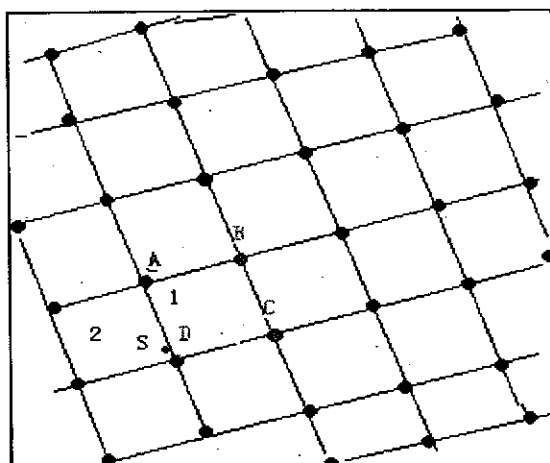


图 3-15 搜索算法可能出现的意外情况

Fig.3-15 unexpected situation that may happen in search algorithm

找到四个顶点时, 应该判断 S 是否在该网格内, 如果不是, 则根据 S 的特征, 确定其在相邻的四个网格中 (上, 下, 左, 右) 的那个网格内。

3.2.4.2 插值计算

设找到的四个点为 T_1, T_2, T_3, T_4 , 设平面方程为 $Y = A*u + B*v + C$ 。根据最小二乘法拟合平面, 有如下(3-3)式

$$f(A, B, C) = (A*u_1 + B*v_1 + C - Y_1)^2 + (A*u_2 + B*v_2 + C - Y_2)^2 + (A*u_3 + B*v_3 + C - Y_3)^2 + (A*u_4 + B*v_4 + C - Y_4)^2 \quad (3-3)$$

$$\text{令 } \frac{\partial f}{\partial A} = 0, \frac{\partial f}{\partial B} = 0, \frac{\partial f}{\partial C} = 0 \quad (3-4)$$

则可得未知数为 A, B, C 的三元一次方程, 解此方程的 A, B, C , 从而可以求取 Y 坐标。同理 Z 坐标也可以得到。

3.3 实验和结果分析

根据前面算法的分析, 在网格划分密度确定的情况下, 标定算法的整体精度已经确定, 即每个点的标定误差都小于 δ 。这可以通过下述方法进行验证。

如图, 设这些特征点已提取完成。则在标定特征点提取实验设备状态未改变的情况下, 利用三维平移台和量块, 随机采一组测试点, 使这组点大致均匀分布在像面上, 根据三维平移台读出物理坐标, 根据图像处理算出图像坐标。则该组测试点的物理坐标与图像坐标都已知, 设这种物理坐标为准确值。利用前述的直接标定算法和已提取的标定特征点, 对测试点的物理坐标插值计算, 则同样得到一组测试点的物理坐标, 设该组物理坐标为计算值。通过比较这组测试点的两组

物理坐标, 即可验证标定算法的精度和正确性。

以下为一组测试数据, 如图 3-16, 3-17。共 100 个测试点, $\delta < 0.05\text{mm}$ 。实验设备为分辨率为 1024×1024 的瑞士 Photonfocus MV-D1024E-80 型相机, 焦距为 25mm 的 InfiniGage 镜头、Stocker Yale 的 Snf 701L 激光器、三自由度精密平移台、1mm 厚的高精度标准量块等。其中三自由度精密平移台可在 X、Y、Z 三个方向移动, 分辨率为 0.002mm, 且在 X、Y、Z 方向上行程都为 13mm。

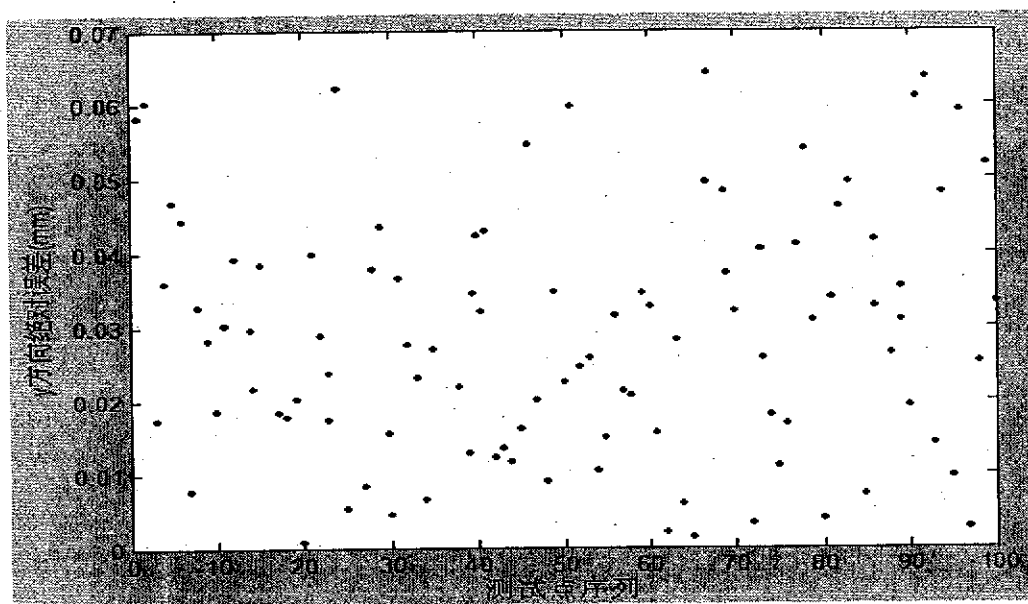


图 3-16 y 方向绝对误差

Fig 3-16 Absolute error in direction y



图 3-17 z 方向绝对误差

Fig 3-17 Absolute error in direction z

表 3-1 误差统计

Table 3-1 error statistics

序号	误差最大值	误差最小值	平均误差	误差方差
Z 方向	0.532	0.005	0.0237	2.432×10^{-4}
Y 方向	0.663	0.007	0.0279	2.385×10^{-4}

实验结果表明, 该标定方法的精度基本可以满足激光拼焊的精度要求。测量结果的一些比较大的误差可能来自于标定量块的倒角所致, 也可能来源于标定相机传感器平面与量块所在平面不平行, 以及图像处理等引入的误差。

3.4 本章小结

本章系统介绍了结构光视觉传感器的标定原理及方法, 针对激光拼焊焊缝质量检测应用需求, 研究了焊缝质量检测视觉传感器直接标定方法, 并提出了一种针对于光平面上特征点的网格划分方法, 通过合理划分特征点网格, 获取待标定点的准确物理坐标, 有效地提高了该直接标定方法的精度。实验结果表明, 标定精度可以满足激光拼焊质量检测系统的精度要求, 且便于工程实现。

第4章 焊缝质量检测实验平台设计与实现

4.1 系统硬件组成

检测系统硬件组成如图 4-1 所示, 包括视觉传感单元和图像处理单元两部分, 视觉传感单元由线形激光器、相机组成, 图像处理单元包括图像采集卡, 工控机, 数据采集卡。其中, 选取数据采集卡主要是为了提供检测系统需要的定时器, 模拟输出通道, 数字 I/O 等资源。

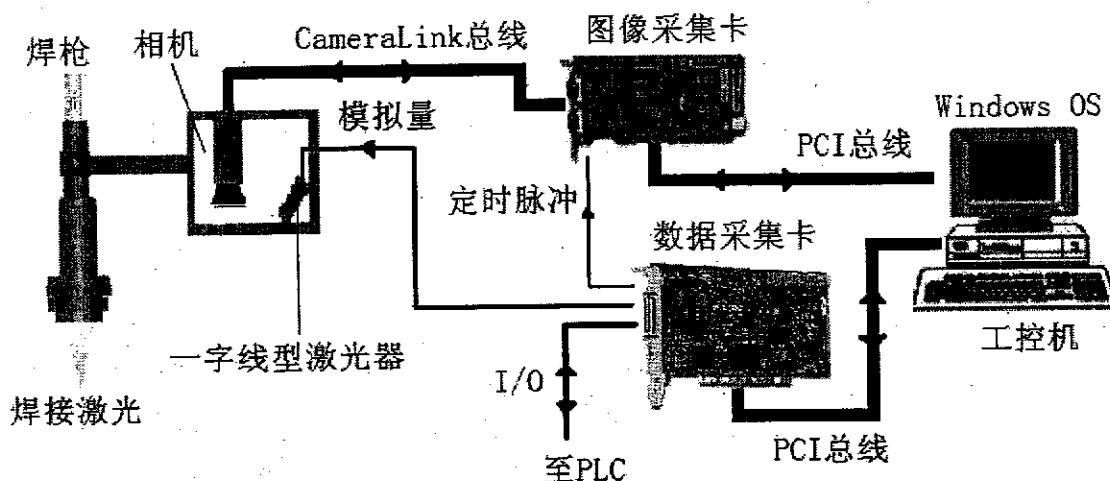


图 4-1 检测系统硬件组成

Fig. 4-1 the hardware of Weld quality inspection system

系统具体硬件说明如下

- 1) 激光投射器: 采用 Stocker Yale 的 Snf 701L 激光器。波长为 660nm, 功率可调, 最大 100mw, 扇角 10°。
- 2) 相机: 采用了瑞士 Photonfocus 公司 MV-D1024E-80, 像元尺寸为 10.6μm×10.6μm, 分辨率为 1024×1024, 全局快门, 可避免因高速运动产生的运动模糊, 具有线性响应和 Linlog 对数响应的特性, 且使用 LinLog 技术, 有高达 120dB 的动态响应范围, 在全分辨率的条件下可以达到 75 帧/每秒, 可设置多个感兴趣的区域 (MROI), 数据接口为 CameraLink, 12 位的采样分辨率, 更好的信噪比 (SNR), 内置 LUT 查找表功能, 提供 Windows 操作系统和 QNX 实时操作系统下的软件开发包, 外形尺寸为 55×55×46 (长度×宽度×高度), 小巧轻便, 易于安装。镜头接口为 C/CS。触发模式有自运行 (无触发)、接口触发、I/O 触发三种。
- 3) 图像采集卡: 采用 SiliconSoftware 公司的 MicroEnable IV 采集卡, 该采集卡是一种基于 PCI-E 接口的可编程高性能数据采集卡, 带宽为 203Mbytes/秒, 支持高达 85MHz 的像素时钟, 可通过扩展板 Trigger/GPIO, CLIO 和 PxPlant 扩展

功能。可连接 CameraLink 接口的 Base 相机。板上内存 128MB, 具有更短的响应时间, 和更高的带宽。

4) 数据采集卡: 采用美国 National Instruments 公司的 NI PCI-6221 数据采集卡, 该卡有 2 路 16 位模拟输出; 24 路数字 I/O; 2 个 32 位定时计数器。Windows 驱动支持。

6) 工控机配置: 机双核 CPU, 主频 2.2G, 内存 4G, PCIE 接口\PCI 接口, AIMB-763 主板。

4.2 系统软件设计

4.2.1 Windows 实现检测系统关键问题

4.2.1.1 Windows 的优势

在 windows 下, 有大量丰富的开发软件和界面工具, 且开发工具文档成熟, 很容易找到针对项目的应用。另外 Windows 几乎支持所有的硬件, 如图像采集卡, 数字 I/O 卡, 且这些硬件的驱动库都很完善。这些优势使得 windows 能够大大加快项目的进度, 能够快速开发原型系统, 验证系统功能。因此, 如果 Windows 能够在一定程度上满足系统实时要求, 则对系统的设计有很大帮助。

4.2.1.2 Windows 实现检测系统的关键

在系统的实时要求里, 最重要的是对于图像的及时处理。这里要求为相机采的每一幅图都要被处理。

首先分析图像的采集过程。相机采用外触发方式, 外部定时器以一定频率的脉冲触发相机, 则相机以该频率连续采集图像, 图像首先存储于采集卡的缓存, 并等待操作系统读取。Windows 以一定的频率发出读取命令, 并从采集卡缓存读取图像, 在这个过程中, 因为 Windows 不是实时系统, 虽然有实时优先级的进程, 但仍然不能保证某个任务在某一特定的时间限制内可以开始执行。因此, Windows 读取图像的频率并不稳定, 虽然平均读取频率高于相机采集频率, 但如果 Windows 忙于其它更高级任务, 图像读取线程被挂起导致图像读取时间太迟, 而此时采集卡缓存已满, 那么相机新生产的图像将只能丢弃或者覆盖采集卡缓存中已有的图像, 这将会影响检测结果。

为了提高 Windows 读取和处理图像的速度, 需选择高频率的处理器, 或者多核处理器, 以及大的内存, 这可以大大提高处理器的响应速度。另一方面, 减少 Windows 许多检测系统不要的功能, 禁止不必要的进程, 使 Windows 系统的负载在一个固定的范围内。另外, 在检测系统的软件设计中, 合理设置图像读取线程的优先级。

通过增加采集卡缓存, 可以允许图像读取线程被阻塞更长的时间。图像采集卡除了板上 RAM 可用外, 还可以将工控机内存作为缓存。因此, 采集卡可以有

大于 1G 的缓存。通过增大工控机内存，可以减小系统内存换页次数，这可减小图像读取线程被阻塞的概率。在这种配置下，发生图像读取线程被挂起的概率将非常小。即使检测过程中发生了图像读取线程被长时间挂起的情况，但被堵塞的图像可以在采集卡中缓存，待随后图像读取停止后，再集中处理。

4.2.2 焊缝表面三维重建实现

三维重建是指利用二维投影恢复物体三维信息（形状等）的数学过程和计算机技术。三维重建技术有接触与非接触两种，以非接触方式应用最为广泛，有时差测距，三角测距，结构光法，调变光立体视觉法，立体光学法等。当前，利用结构光三维测量技术进行三维重建，已经有了广泛应用，且有了成熟的产品^[27-29]。

利用三维测量技术进行三维重建的原理为：线形激光器投射激光线到被测物表面，摄像机采集激光条纹，随着待测物（距离激光器）距离的不同，激光条在摄影机画面中的形状亦有所不同。通过分析图像中激光条纹的形状，即可得到被测物表面的相对高度。将激光线连续扫描被测物，则被测物整个表面信息的相对高度即可获知，从而可以利用已获取的表面信息进行三维重建^[30,31]。图 4-2 与图 4-3 为三维重建原理。



图 4-2 模型
Fig 4-2 the model

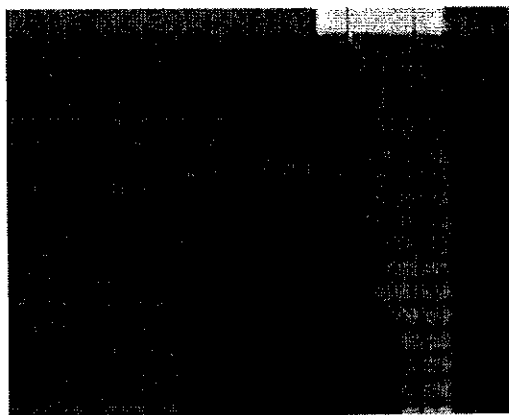


图 4-3 三维重建原理
Fig 4-3 the principle of three-dimensional reconstruction

本系统中利用结构光纹进行焊缝表面形态的识别，如下图 4-4，其机制与上述

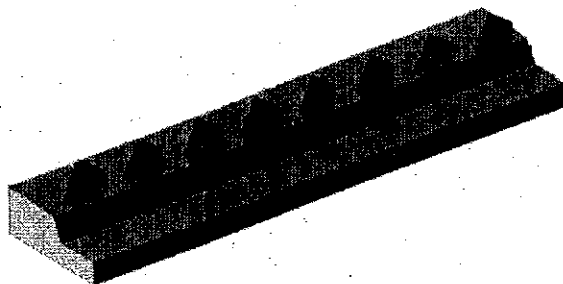


图 4-4 结构光扫描焊缝
Fig 4-4 Structured light scanning seam

结构光三维重建原理基本相同。因此,检测系统在某种程度上,也可以看出三维重建设备。设检测图像中结构光纹中心线的像素个数为 M ,整个检测过程共生产图像 N 幅,则检测过程中,总的结构光像素可组成一个二维 $M \times N$ 的二维矩阵 Q ,矩阵中每个元素为一条结构光纹中的一个像素点。而每个像素点与实际中焊缝表面的一个实际点 (x, y, z) 相对应,其中 y, z 可以通过标定插值算出,而 x 可以通过检测频率,检测速度,以及图像序列算出。若将焊缝表面作为一个曲面,则可以用一个二元参数曲面方程表示。其中,两个自变量取值为 Q 矩阵的下标范围。曲面方程如下

$$\begin{cases} x = x(u, v) \\ y = y(u, v) \\ z = z(u, v) \end{cases} \quad \text{其中 } 0 < u < M, 0 < v < N \quad (4-1)$$

一旦求出曲面方程,即可通过成熟的三维软件重建焊缝曲面。

对于小孔,因为从灰度图中只能获取其边缘轮廓位置,而无法获取深度信息,因此,在三维重建中只标识其位置,小孔的位置可以根据图像中结构光纹的相对距离算出。

系统三维重建的实施可以有 OpenGL 直接编程,也可以通过 Matlab 三维仿真工具简便实现,但是直接使用 OpenGL 编程比较复杂,因而开发速度比较慢,而 Matlab 三维仿真工具虽然方便,但其运行速度慢,且其集成在检测软件中后,导致检测软件体积庞大。而 Measurement studio 中的 3 维控件,其具有 OpenGL 的快速特点以及 Matlab 的易用性,且该控件具有产品级的可靠性与易用性。因此三维重建可以用 Measurement studio 控件实施。只需要建立焊缝表面的曲面矩阵,即可通过调用 Measurement studio 三维控件的方法简单实现。

4.2.3 检测系统软件设计

检测系统软件开发工具有 Visual C++, 机器视觉软件 Halcon, 界面工具 Measurement studio, 以及图像采集卡与数据采集卡的驱动和文档。数据库采用了 Access 2003。

其中,利用 Visual C++ 中的 MFC 来开发检测系统的整体软件框架。Halcon 有良好的人机交互界面,开发视觉算法非常便捷且高效。该软件负责开发检测系统视觉算法,算法开发完成后,可以直接转换为高质量 C++ 代码,只需要将代码有机的嵌入到 Visual C++ 工程即可完成检测系统视觉软件的设计。而 Measurement studio 控件是专业的界面设计工具,除了可以快速设计漂亮专业的按钮,专业的检测界面之外,还可以快速开发复杂二维波形图,以及 3D 绘图。本系统中该软件负责系统专业检测按钮的设计,检测结果的直观波形显示,以及三维重建等。

检测系统软件功能框图如图 4-5。

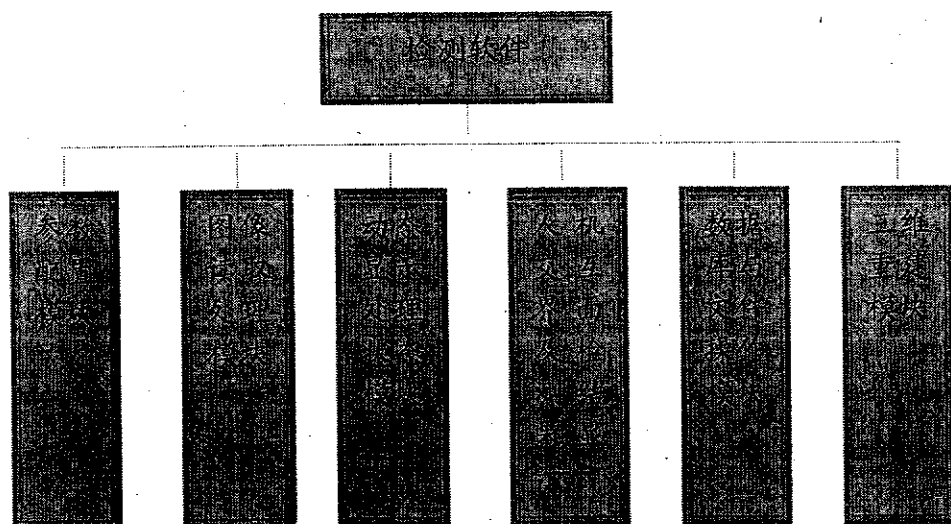


图 4-5 软件模块

Fig.4-5 Software modules

在 Windows 下开发检测系统，为了实现检测系统所需要的实时性，需要着重对检测系统软件中的进程与线程进行设置。检测软件中采用了多线程技术，软件由一个进程和进程中的三个线程组成，线程 1 负责图像读取和处理模块，线程 2 负责参数配置，数据库操作，人机交互界面以及检测结果显示和三维重建等功能模块，线程 3 负责动态显示模块。进程优先级为高优先级，线程 1 相对优先级最高，线程 3 相对优先级最低，线程 2 仅比线程 3 优先级高，但比线程 1 优先级低。其中，禁止动态提高线程 2 和线程 3 线程优先级的功能，以防止线程 1 被挂起，不能够及时读取和处理图像。

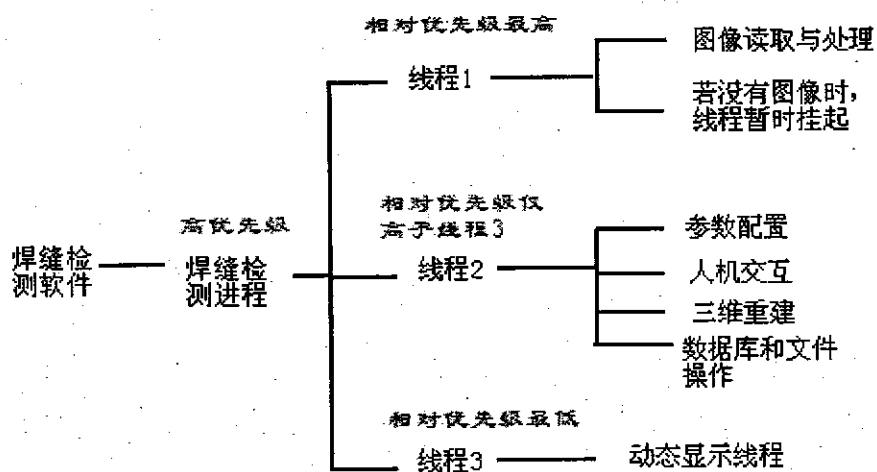


图 4-6 检测系统软件线程设置

Fig.4-6 the settings of thread of the inspection system software

4.3 图像处理算法与标定算法在检测实验平台中的验证

检测系统中, 图像处理以及标定计算不仅要精度满足要求, 而且需要实时进行。因此, 在系统平台搭建完成之后, 本文首先对系统的图像处理精度进行验证。其次对图像处理速度以及标定计算速度进行了验证。

4.3.1 图像处理算法精度的验证

首先获取焊缝剖面, 并采用高倍显微镜对焊缝剖面进行测量, 获取焊缝参数, 将测出的焊缝缺陷参数值为精确值, 检测系统检测结果将与该精确值比较, 从而验证检测结果是否正确, 图像处理算法的精度是否满足系统要求。焊缝剖面的放大图像如图 4-7 所示, 图中, 左右板材厚度分别为 1.6mm, 2.5mm, 放大倍率为 25 倍。

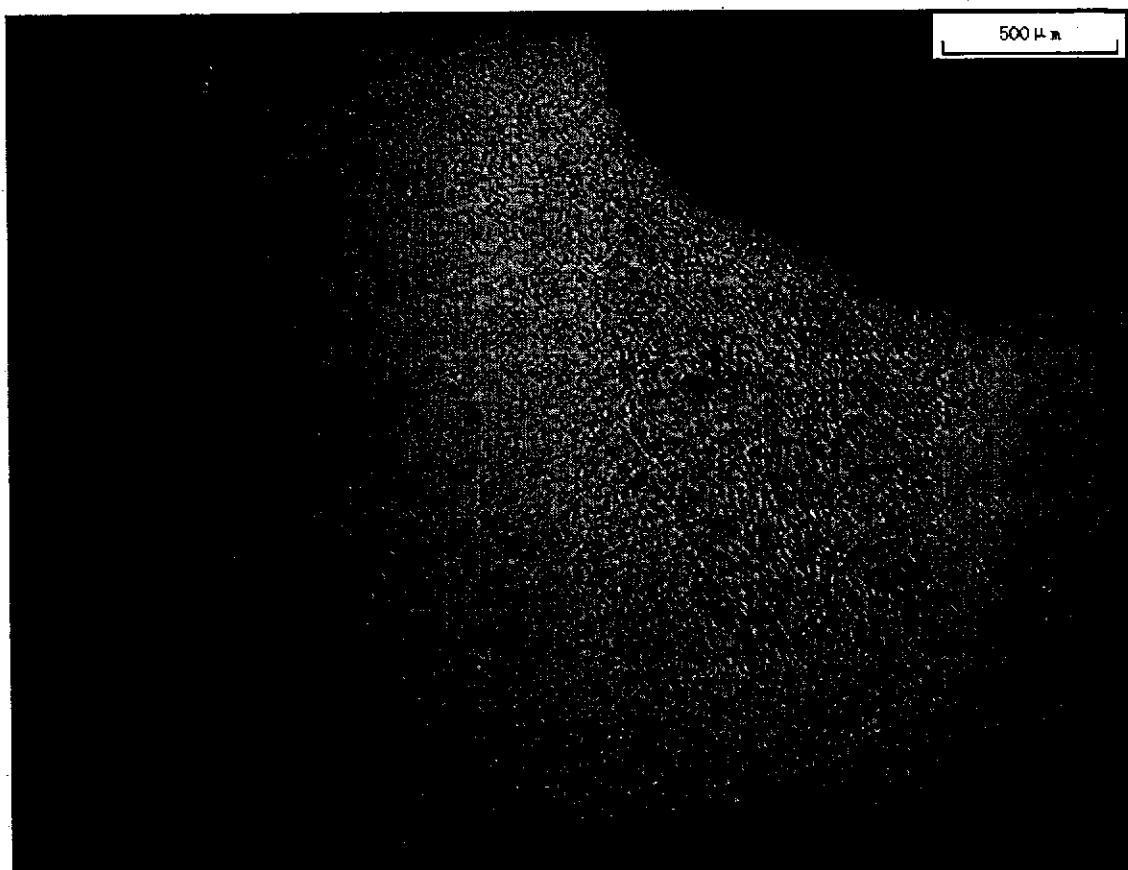


图 4-7 焊缝显微剖面

Fig.4-7 seam microdissection

该截面对应的结构光纹大致如图 4-8, 采用的图像处理算法为本文第 2 章中介绍的结构光焊缝图像处理算法。其测量的焊缝参数为检测值, 这两组数据的对比表 4-1 所示。实验表明, 系统检测误差基本满足检测系统要求。

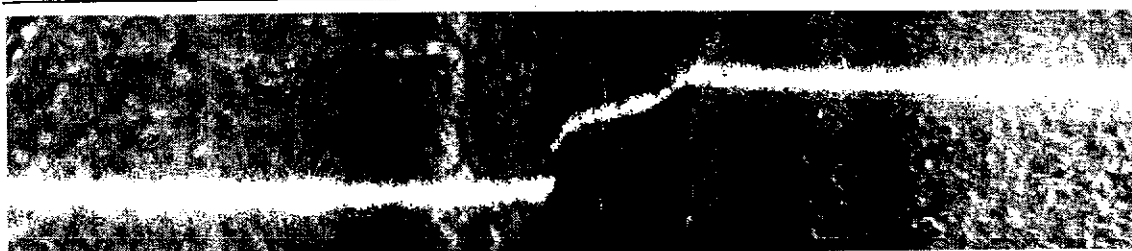


图 4-8 焊缝结构光图像

Fig.4-8 structure light image of seam

表 4-1 检测误差

Table4-1 measurement error

焊缝参数	精确值 (mm)	检测值 (mm)	误差
错配	0.848	0.771	0.067
凸凹度	-0.324	-0.575	0.251
焊缝斜坡	0.714	0.562	0.152
咬边	0	0	0
焊缝宽度	0.960	0.982	0.022
过厚	0	0.01	0.01

4.3.2 图像处理的速度以及标定算法中查找插值速度的验证

算法的处理速度分步骤给出。图像幅面 1024×1024 ，感兴趣区域幅面为 200×1024 。算法各步骤处理时间如下表 4-2。

表 4-2 图像处理算法的时间

Table4-2 time of image processing algorithm

处理步骤	提取感兴趣区域	图像分割	中值滤波	阈值	提取光纹	提取中心线	提取特征点	标定搜索插值	计算焊缝参数	总处理时间
时间 (ms)	5.5	0.7	1.3	0.3	0.5	0.1	2.2	0.5	0.4	11.5

幅面越大，图像处理时间越长，因此，在满足精度的前提下，应该尽量减少图像幅面。在图像幅面大小固定的情况下，计算时间由于图像特征的不同而有波动。但总的波动范围不超过 2ms。在检测系统实际工作中，图像幅面远小于 1024×1024 ，因此，图像处理的速度可以满足检测系统要求的 100 帧/s 的要求。

4.4 本章小结

本章针对激光拼焊质量检测需求，进行了焊缝质量检测系统的软、硬件设计及实现。重点讨论了软件实现中的一些关键问题，如 Windows 实现检测系统实时

性的方法，线程的优先级等。最后，对本文中所提出的图像处理算法的速度和精度以及标定算法的速度进行了验证，试验结果表面图像处理算法与标定的精度和速度满足系统要求。

结 论

激光拼焊作为一种先进的焊接技术因其潜在的优势在工业生产中有着良好的应用前景,而焊缝质量实时检测在激光拼焊过程中的应用仍存在很多亟待解决的技术难题,因此,研制焊缝视觉检测系统,实现焊接过程中的在线质量实时检测,具有实际应用价值和重要研究意义。本文以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”为依托,针对激光拼焊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,开展了应用于激光拼焊系统的焊缝质量实时检测关键技术研究,具体研究内容及取得的研究成果如下:

1. 基于结构光视觉检测原理建立了焊缝质量检测系统,依据 ISO13919-1 B 级标准,深入分析了激光拼焊焊缝质量检测指标要求,并针对检测指标,设计了焊缝图像处理算法流程。针对激光拼焊焊缝图像特征不稳定的特点,提出了特征点识别算法,首先缩小特征点所在的范围,进一步在小范围内搜索准确的特征点,确保了焊缝特征点的准确识别。

2. 针对激光拼焊焊缝质量检测应用需求,研究了焊缝质量检测视觉传感器直接标定方法,并提出了一种针对于光平面上特征点的网格划分方法,通过合理划分特征点网格,获取待标定点的准确物理坐标,有效地提高了该直接标定方法的精度。实验结果表明,标定精度可以满足激光拼焊质量检测系统的精度要求,且便于工程实现。

3. 针对激光拼焊质量检测需求,进行了焊缝质量检测系统的软、硬件设计及实现,完成了系统的硬件以及软件的设计与实现。

由于激光拼焊过程的动态性和复杂性,本文设计研究的焊缝检测系统仍处于实验室阶段,应用到工业生产实际中还有待于深入研究。