

以及跟踪过程中的特征点信息,如图 3-3 所示,之后通过获取的特征点计算跟踪点。

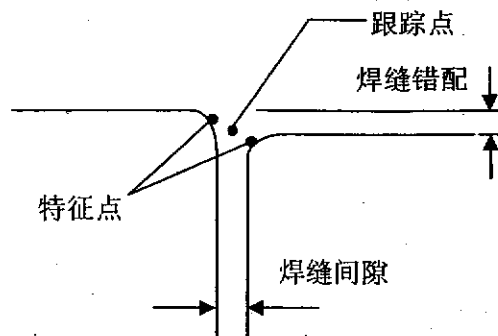


图 3-3 对接接头参数及特征点

Fig 3-3 Parameters and feature points of butt joint

3.1.3 拼焊高精度要求

激光拼焊具有较高的定位精度要求,焊接过程中要求焊接定位精度为 $50\sim 100\ \mu\text{m}$,相应地对跟踪系统的精度就有更高的要求。从图像处理这一方面考虑,获取图像的质量以及图像处理算法的精度均会对跟踪精度产生影响。

获取图像的质量除了受上述环境、传感装置的精度等因素的影响外,同时还取决于传感装置中所用的结构光条纹的质量,由于激光拼焊焊缝尺寸较小,反映焊缝形状的结构光条纹的线宽及功率也需要满足调制要求。另外,板材精度也会影响图像质量,若板材边缘精度低,产生的噪声将会淹没真实特征。而板材的精度主要由板材加工方式决定,包括精剪、粗剪、模具落料、激光切割等。

图像处理算法的精度也会影响跟踪精度,跟踪点的准确识别直接影响着跟踪精度。

3.1.4 拼焊高速度要求

激光拼焊的速度高,直角坐标机器人进行激光拼焊,速度可以达到 $10\text{m}/\text{min}$,关节机器人进行激光拼焊的速度可以达到 $6\sim 8\text{m}/\text{min}$,因此,对跟踪系统的实时性要求较高。焊缝跟踪过程中采集获取的图像信息数据量大,每幅图像都要进行重复的复杂运算,会占用很大的系统资源,耗费时间,由此可知图像处理的实时性是确保跟踪实时性的一个关键。图像处理的实时性一方面由图像处理硬件结构保证,通过采用专用的图像处理硬件处理图像以减小图像处理时间,本系统选用 FPGA(Field program gate array)芯片和 DSP 芯片来构成实时图像处理系统,如图 3-4 所示;另一方面结合快速图像处理算法,实时识别提取焊缝特征点。

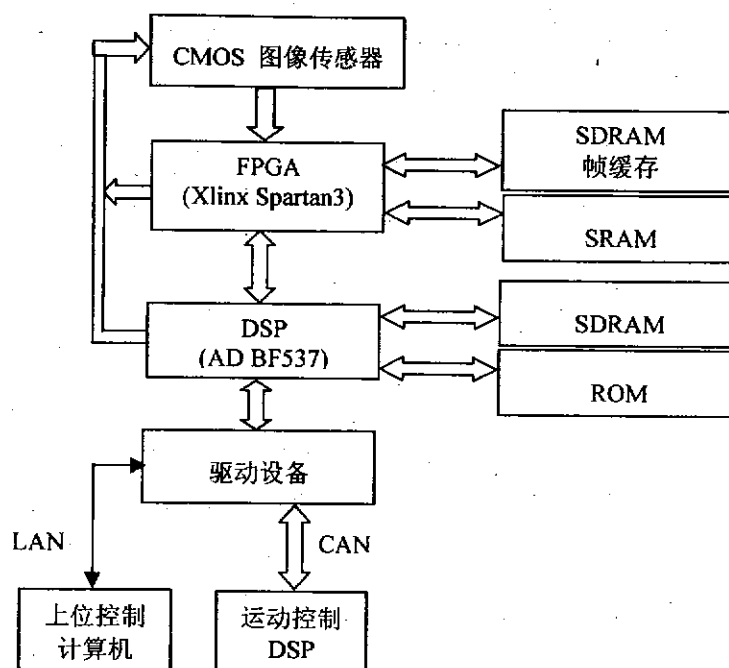


图 3-4 实时图像处理系统

Fig 3-4 Real time image processing system

图像处理过程中的预处理及结构光光纹中心线获取由 FPGA 芯片完成，跟踪特征点的识别由 DSP 专用图像处理芯片完成。

3.2 结构光光纹图像处理

焊缝跟踪系统结构光光纹图像处理的目的是为了实时地获取结构光条纹的中心线，通过中心线识别出反映焊缝剖面信息的特征点，进而获得焊缝的中心位置，之后计算出焊炬同焊缝中心位置的偏差，最终调整伺服执行机构使得焊炬处于准确位置。图像处理流程如图 3-5 所示。

3.2.1 数字图像表示

从理论上讲，图像是一种二维连续函数，图像的亮度是其位置的连续函数，然而对图像进行数字处理时，通过取样和量化对图像在空间和亮度上进行了离散化。一幅图像可以用一个二维数组 $f(x,y)$ 表示，在灰度图像中， f 表示灰度值，它常对应客观景物被观察到的亮度。

$$f(x,y) = \begin{bmatrix} f(0,0) & f(0,1) & \cdots & f(0,N-1) \\ f(1,0) & f(1,1) & \cdots & f(1,N-1) \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ f(M-1,0) & f(M-1,1) & \cdots & f(M-1,N-1) \end{bmatrix} \quad (3-1)$$

本论文中采用和处理的图像为灰度图像，一般用阵列法来表示。连续图像 $f(x,y)$ 按等间隔采样，排成 $M \times N$ 阵列，如式(3-1)。图像阵列中每一个元素都是

离散值,称为像素(Pixel)。通常图像中灰度用整数来表示,取值 0~255,0 值对应黑色,255 对应白色,中间值对应中间的灰度等级。

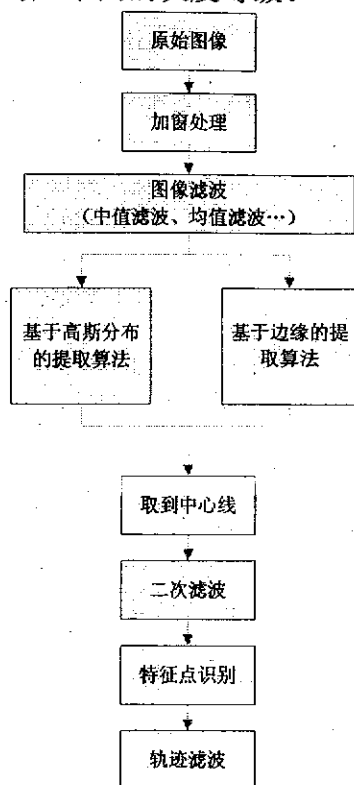


图 3-5 实时图像处理流程

Fig 3-5 Real time image processing flow

3.2.2 图像预处理

获取的焊缝跟踪图像由于焊接过程中的飞溅、烟尘、反光、激光强光、传感器本身的影响,包含了很多噪声和干扰,所以在对图像的特征进行提取之前,首先要滤除这些不必要的干扰,然后才能具体分析整个图像的信息。如图 3-6 所示,分别为等厚、不等厚板材的结构光条纹原始图像,结构光条纹垂直于焊缝方向。

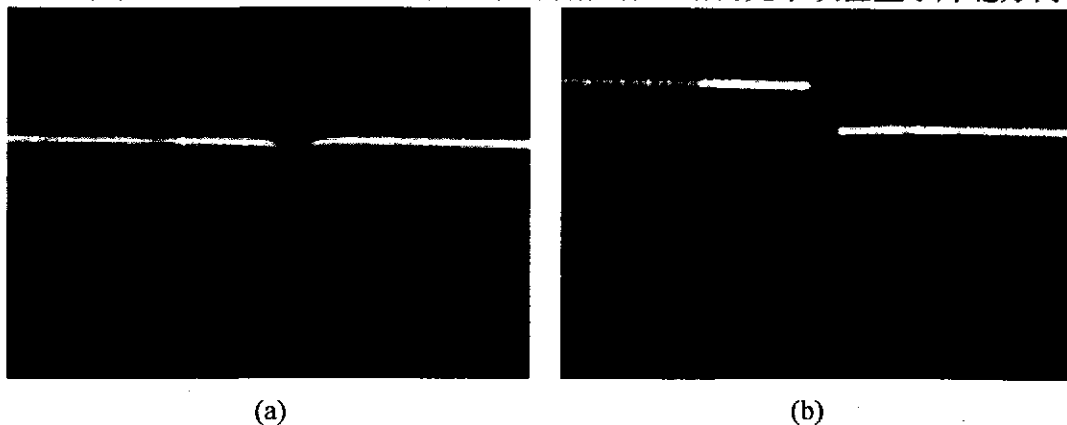


图 3-6 跟踪焊缝原始图像

Fig 3-6 Raw image of weld seam

3.2.2.1 加窗算法

跟踪过程获取的焊缝图像的图像特征所在区域相对稳定,因此可以将图像的有效区域提取出来,即通过加窗处理算法通过设定感兴趣区域来减小需处理的图像的幅面,有效地节省图像处理时间。跟踪过程中,可以根据获得的第一幅图像确定图像感兴趣区域。

在平行焊缝方向上,通过图像的灰度投影计算投影方向上灰度累加值,计算公式如式(3-2):

$$SW_i = \sum_{j=1}^H f(i, j) \quad i=1, \dots, W \quad (3-2)$$

依据相邻两灰度累加值的差值来确定区域的边缘,边缘两侧相邻的灰度累加值差别最大,通过式(3-3)确定。

$$\begin{aligned} iMax &= i : \text{Min}(SW_{i+1} - SW_i) + T \\ iMin &= i : \text{Max}(SW_{i+1} - SW_i) - T \end{aligned} \quad (3-3)$$

其中, T 为设定的反映窗口大小的阈值。

在垂直焊缝方向上,对于无突变的直线焊缝可以预先设定窗口边缘,对于曲折线焊缝可根据要求设定动态窗口。

加窗后的图像如图 3-7 所示。

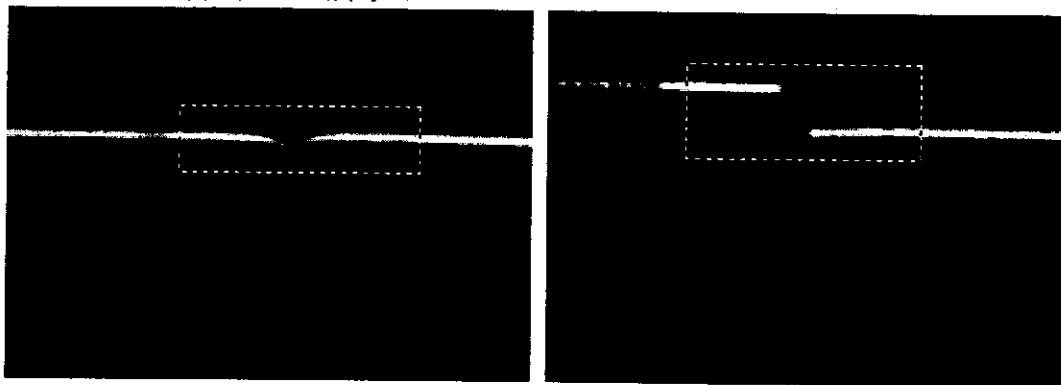


图 3-7 加窗后图像

Fig 3-7 Region of interest in raw image

3.2.2.2 图像滤波

由于获取的结构光条纹图像含有许多噪声,受到噪声污染的图像不利于特征信号的提取,为提高提取信息精确度所以有必要对图像进行滤波处理。

平滑可用低通滤波实现。平滑滤波器是用滤波掩模确定的邻域内像素的平均灰度值去代替图像每个像素点的值,这种处理减少了图像灰度的“尖锐”变化。常见的平滑处理就是减噪,即通过线性滤波器和非线性滤波器的模糊处理可以减小噪声。

均值算法又叫邻域平均法,是一种最简单的线性滤波器。这种方法的基本思想是用几个像素灰度的平均值来代替每个像素的灰度值。噪声在图像上常常表现为一些孤立像素点。这可以理解为像素的灰度是空间不相关的,即噪声点像素灰度与它们的近邻像素灰度有显著不同。借助噪声点的这一空间特性,产生邻域平均法。设 $f(x,y)$ 为给定的有噪声的图像,经过邻域平均处理后为 $g(x,y)$,在数学上表达式如式(3-4)所示:

$$g(x,y) = \frac{1}{M} \sum_{(m,n) \in s} f(m,n) \quad (3-4)$$

式中 s 是所取邻域中各近邻像素的坐标; M 是邻域中包含的近邻像素的个数。对于邻域可以有不同选取方式,如四邻点邻域八邻点邻域, 3×3 邻域, 5×5 邻域等。邻域平均法有明显的除噪声平滑图像的效果,但它同时存在着边缘模糊效应。随着邻域的加大,图像的模糊程度也愈加严重。为克服这一缺点,可以采用阈值法减少由于邻域平均所产生的模糊效应。

统计滤波器是一种非线性的空间滤波器,它的响应基于图像滤波器包围的图像区域中像素的排序,然后由统计排序结果决定的值代替中心像素的值。中值滤波器是统计滤波其中最常见滤波器,是一种非线性平滑滤波器。它是将像素(在中值计算中包括原像素值)邻域内灰度的中值代替该像素的值。

该方法在去除噪声的同时又能保留图像边缘的细节,这是因为它不依赖于邻域内那些与典型值差别很大的值。中值滤波在一定条件下,可以克服线性滤波器(如均值滤波等)所带来的图像细节模糊,而且对滤除单极或双极脉冲干扰即图像扫描噪声最为有效。在实际计算过程中并不需要图像的统计特性,也给计算带来不少方便,但是对一些细节多,特别是线、顶尖等细节多的图像不宜采用中值滤波。中值滤波抑制随机点状噪声的效果良好,但随着窗口的扩大,有效信号的损失也将明显增加,因此窗口大小的选择,以能兼顾两者为佳。

为了改善中值滤波器的滤波效果,同时针对图像及噪声的不同特点,在中值滤波的基础上又有了最大值和最小值滤波器、中点滤波器、混合中值滤波器、自适应中值滤波器等。

在本文中,图像滤波处理采用了 3×3 窗口的中值滤波,一方面达到了去噪滤波的要求,另一方面很大程度上保留了图像中边缘的清晰性。

工作步骤如下:

- (1) 设定处理窗口大小,取一个窗口的图像数据;
- (2) 读取窗口中对应像素的灰度值,利用排序算法对窗口中的像素灰度值排序;
- (3) 取中值,以排好序的序列的中值作为处理后该点的灰度值;
- (4) 将窗口在图中漫游,遍历整个图像。

滤波图像如图 3-8 所示。

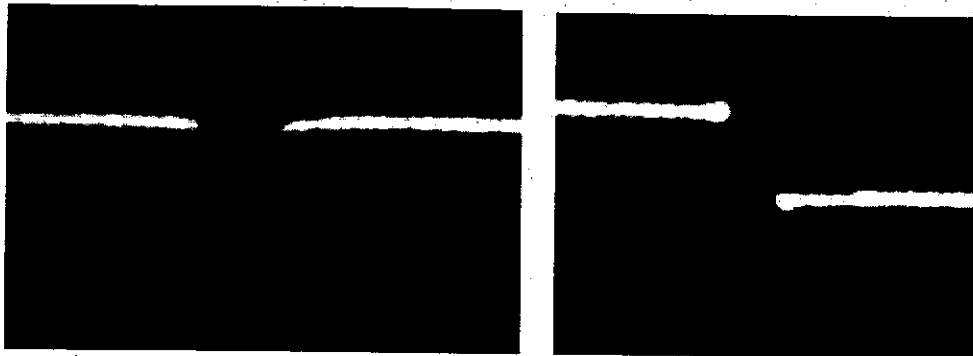


图 3-8 滤波图像

Fig 3-8 Filtered image

3.2.3 光纹中心线的提取

结构光条纹中心线的提取是焊缝跟踪系统图像处理的关键技术之一，同时也是影响结构光视觉焊缝跟踪系统精度的主要因素之一。

根据获得的焊缝图像可知，光纹和图像背景界限分明，结构光光纹中心线可以基于焊缝边缘提取，通过二值化分割或边缘检测算法等获得光纹的两条边缘，进而计算出光纹每个截面的几何中心点作为截面的光纹中心点。

另外，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，研究人员也提出了相应的基于高斯分布的光纹中心线的亚像素提取方法。

3.2.3.1 基于边缘的提取算法

检测焊缝跟踪结构光条纹边缘时，由于条纹是规则直线，在没有其它干扰因素下，可以很容易的检测出其边缘。但是在焊接过程中，实时检测结构光条纹边缘将变得较困难，因为环境噪声以及板材的粗糙度、强反射性等都会对边缘检测造成很大的干扰，甚至会导致检测失败。这就要求有好的边缘检测算法来对带有噪声的焊缝图像进行进一步去噪，以得到其边缘，为后续图像处理打好基础。

(1) 二值化分割

二值化过程实际上是图像分割的一个特例。对图像的二值化分割就是根据图像中灰度像素的变化将图像分割成两个具有不同灰度的区域，每个区域的灰度值相近。

二值化分割之前，需要确定图像的分割阈值。阈值是在分割时作为区分物体与背景像素的门限，大于或等于阈值的像素属于物体，而其它属于背景。这种方法对于在物体与背景之间存在明显差别的景物分割十分有效。确定阈值的方法主要包括以下几种：

1) 双峰法

双峰法的原理极其简单：它认为图像由前景和背景组成，在灰度直方图上，

前后二景都形成高峰，在双峰之间的最低谷处就是图像的阈值所在。

2) 迭代法

迭代法是基于逼近的思想，其步骤如下：

首先，求出图像的最大灰度值和最小灰度值，分别记为 $z_{\max}$ 和 $z_{\min}$ ，令初始阈值为：

$$T_0 = (z_{\max} + z_{\min}) / 2 \quad (3-5)$$

其次，根据阈值 T_k 将图象分割为前景和背景，分别求出两者的平均灰度值 z_0 和 z_B ，求出新阈值：

$$T_{k+1} = z_0 + z_B / 2 \quad (3-6)$$

最后，若 $T_k = T_{k+1}$ ，则所得即为阈值；否则转第二步，迭代计算。

迭代所得的阈值分割的图像效果良好。基于迭代的阈值能区分出图像的前景和背景的主要区域所在，但在图像的细微处还没有很好的区分度。

3) 大津法 (OTSU 法)

大津法^[72]由大津于 1979 年提出。设一幅图像的灰度值为 $1, \dots, m$ 级，灰度值为 I 的像素数为 n_i ，此时得到：

总像素数为：

$$N = \sum_{i=1}^m n_i \quad (3-7)$$

各值的概率：

$$p_i = \frac{n_i}{N} \quad (3-8)$$

然后用灰度值阈值 t 将图像分割为两部分，每部分的概率分别为 ω_0 和 ω_1 ，如式所示：

$$\omega_0 = \sum_{i=1}^t p_i = \omega_t \quad (3-9)$$

$$\omega_1 = \sum_{i=t+1}^m p_i = 1 - \omega_t \quad (3-10)$$

每部分的均值为：

$$\mu_0 = \sum_{i=1}^t \frac{ip_i}{\omega_0} = \frac{\mu_t}{\omega_t} \quad (3-11)$$

$$\mu_1 = \sum_{i=t+1}^m \frac{ip_i}{\omega_1} = \frac{\mu - \mu_t}{1 - \omega_t} \quad (3-12)$$

其中， $\mu = \sum_{i=1}^m ip_i$ 是整体图像的灰度平均值；

两部分的方差为：

$$\sigma^2(k) = \omega_0(\mu_0 - \mu)^2 + \omega_1(\mu_1 - \mu)^2 \quad (3-13)$$

从最小灰度值到最大灰度值遍历 t , 当 t 使得方差值最大时, 即为分割的最佳阈值。采用大津法对跟踪图像进行阈值分割, 如图 3-9 所示。对于获取的二值化图像, 可以直接求取边缘。

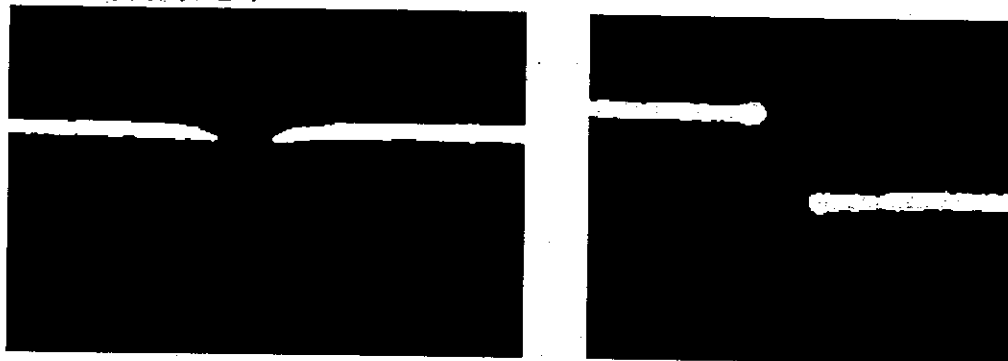


图 3-9 大津法分割后图像

Fig 3-9 Image segmentation by OTSU

(2) 二值数学形态学提取边缘

数学形态学是以形态为基础对图像进行分析的数学工具, 其基本思想是用具有一定形态的结构元素去度量和提取图像中的对应形状, 以达到分析和识别图像的目的。数学形态学可以用于抑制噪声、特征提取、边缘检测、图像分割、形状识别等一系列图像处理过程^[140-142]。数学形态学的应用可以简化图像数据, 保持它们基本的形状特征, 并除去不相干的结构; 而且数学形态学具有天然的并行实现结构, 能较好地满足实时控制要求^[143]。

设二值图像集合为 A , 结构元素集合为 B , A 和 B 都是由二维整数空间 (Z^2) 的元素组成的集合, 图像 A 被结构元素 B 膨胀, 用 $A \oplus B$ 表示, 图像 A 被结构元素 B 腐蚀, 用 $A \ominus B$ 表示, 分别定义为:

$$A \oplus B = \{z | (\hat{B})_z \cap A \neq \emptyset\} \quad (3-14)$$

$$A \ominus B = \{z | (B)_z \cap A^c \neq \emptyset\} \quad (3-15)$$

式中: $\hat{B} = \{w | w = -b, b \in B\}$, $(B)_z = \{c | c = b + z, b \in B\}$, $A^c = \{w | w \notin A\}$, 其中, $z = (z_1, z_2)$ 为二维整数空间 (Z^2) 的点。

开运算定义为:

$$A \circ B = (A \ominus B) \oplus B \quad (3-16)$$

闭运算定义为:

$$A \bullet B = (A \oplus B) \ominus B \quad (3-17)$$

近年来, 数学形态学已经广泛地应用于图像的边缘检测领域, 并提出了一些基于数学形态学的边缘检测算子。基本的形态学梯度算子定义为以下形式:

膨胀型: $A \oplus B - A$;

腐蚀型: $A - A \ominus B$;

膨胀腐蚀型: $A \oplus B - A \ominus B$ 。

由定义可知,膨胀型算子是将原图像膨胀后减去原图像从而得到图像边缘;腐蚀型算子是原图像减去原图像腐蚀收缩后的图像得到边缘。而膨胀腐蚀型算子计算的是一定区域内最大灰度值和最小灰度值之差,其可视效果和精确性都不是很尽如人意。

(3) 边缘检测

边缘检测是图像处理以及计算机视觉领域的一个重要研究内容。图像的边缘是图像的最基本特征。通常经典的边缘提取方法是考察图像的每个像素在某个邻域内灰度的变化,利用边缘邻近一阶或二阶方向导数变化规律检测边缘,这种方法称为边缘检测局部算子法。图像边缘信息在图像分析和人的视觉中都是十分重要的,是图像识别中提取图像特征的一个重要属性。由于边缘的成因复杂,实际景物图像中的边缘往往是各种类型的边缘以及它们模糊化后结果的组合,另外边缘检测需要在噪声和边缘间做取舍,二者是高频信号,很难用频带区分。边缘检测算法有很多,其算子大多是检查每个像素的邻域灰度变化率,也包括方向的确定。常用的边缘检测算子包括 Kirsch 算子、Canny 算子、Laplacian 算子、LOG 算子等。

针对焊缝跟踪图像存在大量的噪声信号,焊件的表面状况和光照环境也对图像处理结果有较大的影响,故应在图像处理中选取适当的边缘检测算子准确地提取焊缝边缘特征,减少噪声引起的虚假边缘干扰。Roberts 算子、Sobel 算子、Prewitt 算子等梯度算子,计算简单,但精度不高^[144]。LOG 算子通过检测二阶导数过零点来判断边缘点,在边缘定位精度和消除噪声级间存在着矛盾,并且 LOG 算子没有解决如何组织不同尺度滤波器输出的边缘图为单一的、正确的边缘图。结合焊缝提取的实际情况,本文采用 Canny 算子对结构光条纹进行边缘提取。

Canny 算子遵循三个准则^[64]:信噪比最大,即好的检测性能,不漏检真实边缘,也不把非边缘点作为边缘点检出,使输出的信噪比最大;高定位精度,即检测出来边缘上的点应该和实际边缘的点最相近;单边缘响应,即保证单边缘只有一个像素响应。根据以上三个准则,Canny 算子检测方法可以概括如下:

- 1) 对图像使用带有指定标准偏差 σ 的高斯滤波器来平滑,从而可以减少噪声;
- 2) 计算每点的局部梯度 $g(x, y) = [G_x^2 + G_y^2]^{1/2}$ 和边缘方向 $\alpha(x, y) = \arctan(G_y/G_x)$;
- 3) 对梯度图像非最大值抑制处理,确定的边缘点会导致梯度幅度图像中出现脊,算法追踪所有脊的顶部,并将所有不在脊的顶部的像素设为零;
- 4) 对梯度图像进行双阈值操作和边缘连接,设定阈值 T_1 和 T_2 , 其中 $T_1 < T_2$, 对于大于 T_2 的像素点称为强边缘像素,小于 T_1 的称为非边缘像素,介于两个阈值之间的为弱边缘像素,对于弱边缘像素通过 8 连接集成到强像素,执行边缘链接。

前面介绍的边缘检测算子基本上都是像素级的。当结构光条纹提取精度要求高时,像素级提取精度已无法满足要求,尤其是在焊缝跟踪结构光传感器的标定过程中,标定图像的结构光条纹中心线需要提取到亚像素级,目前比较简便的亚像素级边缘检测算法主要有两类:一类是在像素级边缘的一定区域进行内插,如曲线拟合或曲面拟合;另一类算法是通过计算像素级边缘区域的一阶距或重心来实现亚像素级边缘定位。

Lyvers 等人^[145]提出了利用几何矩提取图像的亚像素边缘,该方法利用 6 个图像几何矩,计算出 4 个阶跃边缘参数,图像矩是关于多项式 $\{x^p y^q\}$ 的函数,但多项式 $\{x^p y^q\}$ 不具备正交性,所以在图像处理时会出现冗余信息^[146]。Ghosal 和 Mehrotra^[147]首次提出了利用 Zernike 正交矩来检测亚像素边缘,在他们的算法中建立了理想的阶跃灰度模型,通过图像的三个不同阶次 Zernike 矩计算模型的 4 个参数,以这 4 个参数为判断边缘的依据来确定图像中物体的边缘。

3.2.3.2 基于高斯分布的提取算法

结构光光纹宽度方向上的理想分布曲线近似服从高斯分布,其代数表达式为:

$$I(x) = A \cdot \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \cdot \exp\left[-\frac{(x-u)^2}{2\sigma^2}\right] \quad (3-18)$$

式中,参数 A 为幅值,表示曲线的高度, σ 为标准差,代表曲线的跨度, u 为均值,即为要求的光纹中心。基于高斯分布的提取算法主要有极值法、质心法、曲线拟合法、Hessian 矩阵法、方向模板法等。

(1) 极值法

极值法是把光纹宽度截面内灰度最大值所对应的像素点作为光纹中心点。该方法速度快但精度较低,且没有考虑噪声的影响。

(2) 质心法

质心法是把光纹宽度截面内的像素点的灰度分布质心作为光纹中心点。设光纹某一宽度截面上点的坐标为 (X_i, Y_i) , 相应的灰度值为 $I(X_i, Y_i) (i=1, \dots, N)$, N 为截面内点的个数,则该截面的光条中心点 (X_c, Y_c) 计算如下:

$$X_c = \frac{\sum_{i=1}^N I(X_i, Y_i) \cdot X_i}{\sum_{i=1}^N I(X_i, Y_i)}, Y_c = \frac{\sum_{i=1}^N I(X_i, Y_i) \cdot Y_i}{\sum_{i=1}^N I(X_i, Y_i)} \quad (3-19)$$

(3) 曲线拟合法

曲线拟合法是基于光纹截面点的灰度分布近似高斯分布这一特点,利用高斯曲线或者二次曲线对其进行曲线拟合,则拟合曲线的局部极大值点为截面的光条中心点。曲线拟合主要讨论最常用的抛物线拟合法以及高斯函数拟合法。

1) 抛物线拟合

抛物线的函数形式:

$$f(x) = ax^2 + bx + c \quad (3-20)$$

当 $x = -\frac{b}{2a}$ 时, 为截面上曲线极值点, 即光纹中心位置。

将光纹截面的各个像素的坐标值和灰度值代入(3-20)

$$\begin{bmatrix} f_0(x) \\ f_1(x) \\ f_2(x) \\ \dots \\ f_{n-1}(x) \\ f_n(x) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_0^2 & x_0 & 1 \\ x_1^2 & x_1 & 1 \\ x_2^2 & x_2 & 1 \\ \dots & \dots & \dots \\ x_{n-1}^2 & x_{n-1} & 1 \\ x_n^2 & x_n & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} a \\ b \\ c \end{bmatrix} \quad (3-21)$$

即可根据式(3-21)计算求得抛物线的参数值, 进而计算光纹中心位置。

2) 高斯函数拟合

高斯曲线拟合方法是采用高斯函数去逼近结构光光纹的灰度分布, 从而计算出光纹中心。高斯函数如下:

$$f(x) = A \cdot \exp\left[-\frac{(x-x_c)^2}{\rho^2}\right] \quad (3-22)$$

其中, A 是结构光条纹灰度幅值, ρ 是光纹的宽度, x_c 是高斯分布的中心坐标。该方法在没有强反射干扰时, 可以获得比较理想的结果, 但在噪声大, 光纹反射强烈的情况下, 难以获得满意的结果。另外由于运算量大也会影响速度。

(3) Hessian 矩阵法^[148]

该方法认为光纹截面的中心点是截面点灰度分布曲线的一阶导数为 0 或二阶导数绝对值极大的点。该方法把光纹上每一个点处的切线方向 $n(t)$ 作为该点处光纹截面点灰度分布曲线的走向, 若该点处在 $n(t)$ 方向上的一阶导数为 0 和二阶方向导数绝对值为极大, 则该点即为该截面的光纹中心点。因此, $n(t)$ 的求解便成为关键。该方法把 $n(t)$ 的求解转化为求一使 Hessian 矩阵的绝对值为最大的特征值所对应的特征向量, 从而使问题大为简化, 但该方法运算量大, 效率较低, 不能很好地满足实时性要求。

(4) 方向模板法

由于物体表面反射不一致, 实际上, 在结构光图像中, 光条纹强度并不是呈严格的正态分布, 而只是类正态分布, 并且结构光系统中存在着噪声的影响, 摄像机采集的图像还含有其它散乱点的信息, 前面所介绍的传统方法未考虑这些情况。胡斌等人提出了一种方向模板法^[149], 结构光条纹的形状随物体表面变化而不同, 在小尺度情况下, 可认为结构光条纹形状有四种模式: 水平、垂直、左斜 45°、

右斜45°, 对应这四种模式, 分别设计四种方向的模板, 模板大小固定, 但其方向可变。这种方法的抗白噪声能力比较强, 并且能较好地解决极值法和质心法检测结构光条纹中心出现的噪声问题, 同时, 能够检测出较精细的结构光条纹中心。

3.2.4 光纹特征点识别

焊缝图像处理的主要任务是识别结构光条纹的特征点, 图像特征点的准确识别是焊缝跟踪图像处理的难点之一。如图3-3中焊缝特征点的位置可以根据焊缝类型确定, 求取特征点后, 通过特征点计算得到焊缝跟踪点。对接焊缝中, 主要为等厚、不等厚板材有间隙焊缝以及等厚板材窄间隙焊缝。在设计特征识别算法时, 要考虑算法具有一定的通用性, 还要兼顾算法的复杂度, 若复杂度太高, 无法满足激光拼焊的实时性要求。

(1) 等厚、不等厚板材有间隙焊缝特征点选取

通常, 图像经过预处理并提取出光纹中心线后, 可以根据中心线的转折点作为焊缝的特征点, 这种方法通过求取条纹曲线二阶差分的极大值点, 提取条纹特征点。由于这些特征点本质是基于条纹局部特征的, 在存在噪声干扰的情况下, 易受到干扰, 可靠性存在问题。当板材要对接焊接在一起时, 观察对接接头图像, 可以看到在激光条纹中间会发生中断, 本文选取这个特征作为判据来判断特征点的位置。

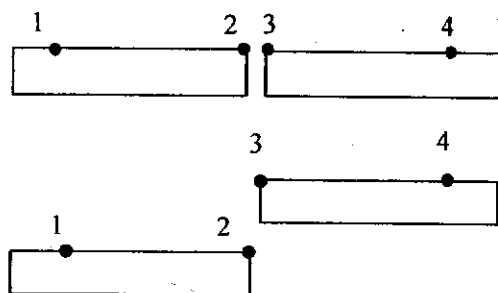


图 3-10 焊缝结构光条纹特征点示意图

Fig 3-10 Feature points of laser stripe in seam tracking

特征点判断过程如下:

首先, 根据光纹图像拟合出焊缝主直线, 为两条中断的直线;

其次, 确定主直线上的边缘点 1, 2, 3, 4, 如图 3-10 所示, 其中, 2, 3 为光纹的中断边缘点, 即焊缝特征点。

最后, 分别从 1, 4 点左右同时搜索两条直线, 建立搜索条件:

$$\begin{cases} f(i-1, j) > T \\ f(i, j) > T \\ f(i+1, j) < T \end{cases} \quad (3-23)$$

其中, $f(i, j)$ 表示 (i, j) 点的灰度值, $T = \frac{\sum_{(i,j) \in S} f(i, j)}{i \cdot j}$ 为设定的搜索阈值, 当满足上面的判据即可以提取出 2、3 点。

这种情况不反映焊缝的高度。该搜索法算法简单, 提取出来的特征点比较准确, 响应较快, 适合实时操作。

(2) 等厚板材窄间隙焊缝图像特征点选取

对于等厚板材, 尤其是焊缝平直规整且间隙窄的焊缝, 其图像特征不明显, 无法依据边缘点进行焊缝特征点的识别。本文依据灰度投影变化作为特征判断特征点位置, 如图 3-11 所示。

首先, 行方向进行灰度累加投影, 得到灰度曲线并滤波;

其次, 用数据窗对灰度曲线遍历, 计算窗内各点方差。方差反映了灰度投影曲线在该区域的波动程度。

最后, 相应确定区域内, 灰度曲线上的极小值即为对应焊缝特征点的横坐标。

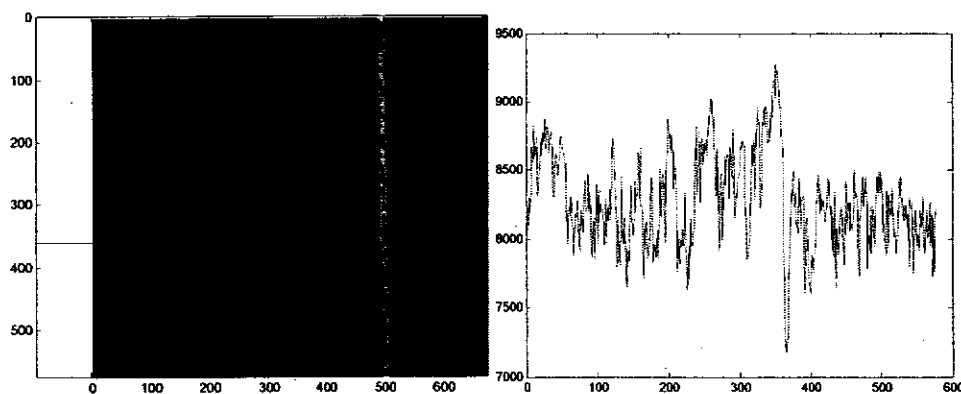


图 3-11 等厚板材窄间隙焊缝图像特征点识别

Fig 3-11 Feature points identified of mono-blanks with narrow seam

3.2.5 轨迹滤波

光纹中心线上各个点的坐标可视为序列信号, 同一条光纹图像上的各点可以拟合出板材形状, 具有相关性; 不同光纹图像上同一位置的点具有连续性, 即时间上的连续性。本文主要讨论直线焊缝及曲线焊缝的轨迹跟踪, 首先设定阈值滤除突变点, 对于突变点处可以由式(3-24)~(3-25)计算其对应的理想跟踪点, 通过求取突变点相邻 $2m$ 条结构光条纹上的跟踪点的均值作为该突变点处的跟踪点位置, 确保跟踪的稳定性及可靠性。

$$y^f = \text{average}(y^{n-m}, \dots, y^{n-1}, y^n, y^{n+1}, \dots, y^{n+m}) \quad (3-24)$$

$$z^f = \text{average}(z^{n-m}, \dots, z^{n-1}, z^n, z^{n+1}, \dots, z^{n+m}) \quad (3-25)$$

其中, y^n 为第 n 条结构光条纹上跟踪点 y 方向坐标值, z^n 表示第 n 条结构光条纹上跟踪点 z 方向坐标值, y^f , z^f 分别表示轨迹滤波之后突变点处的理想跟踪

点坐标值。

3.3 实验及结果分析

实验获取等厚、不等厚板材跟踪图像结构光条纹, 分别采用基于边缘和基于高斯分布的提取算法提取焊缝跟踪结构光条纹中心线, 并依据光纹特征点识别算法识别光纹特征点, 最终计算跟踪点。

二值化阈值分割后提取的边缘线及中心线如图 3-12 所示:

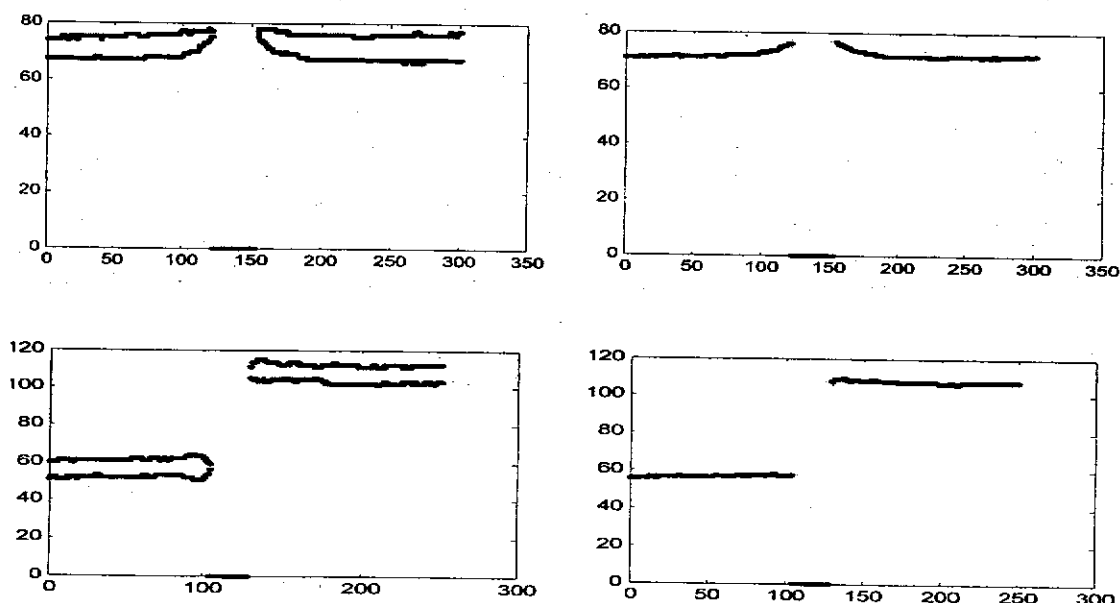


图 3-12 二值化阈值分割后的光纹边缘和中心线提取

Fig 3-12 Edge and centerline of laser stripe extracted after binarization segmentation

采用数学形态学方法, 对经过大津法二值化阈值分割的结构光条纹图像提取边缘, 选择 $[1 \ 1 \ 1]$ 作为结构元素, 算法先对二值化图像进行闭运算, 之后采用腐蚀算子去除边缘毛刺, 如图 3-13 为基于二值数学形态学的条纹中心线提取流程, 图 3-14 所示为提取出的光纹边缘线。

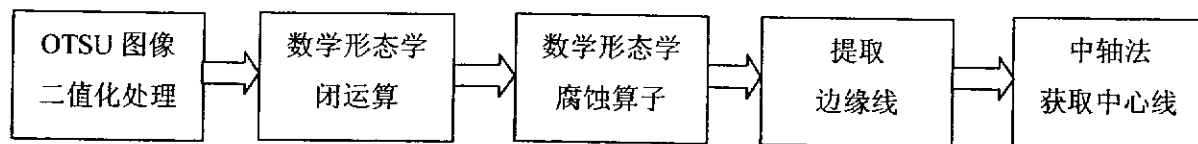


图 3-13 二值数学形态学光纹边缘提取流程

Fig 3-14 Flow chart of laser stripe edge detected by Mathematical Morphology method

边缘检测算子 Canny 算子提取结构光条纹边缘如图 3-15 所示。

基于高斯分布的结构光中心线提取, 其中, 图 3-16 通过高斯函数拟合提取出的结构光纹中心线, 设定不同阈值 t 分别获取光纹中心线。图 3-17 为通过抛物线

拟合提取出的结构光纹中心线。

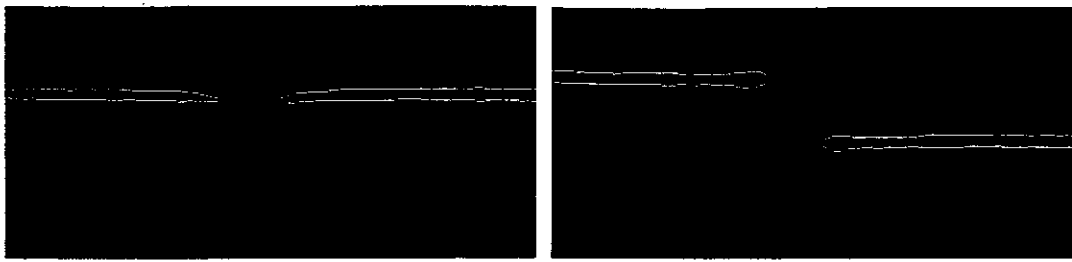


图 3-14 二值数学形态学提取的光纹边缘

Fig 3-14 Edge of laser stripe detected by Mathematical Morphology method

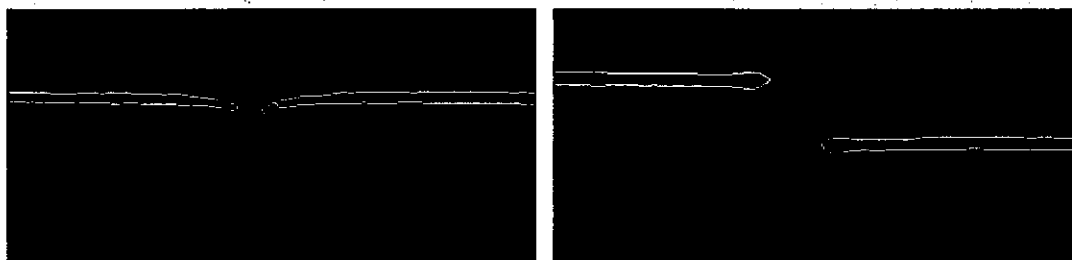


图 3-15 Canny 算子检测的光纹边缘

Fig 3-15 Edge of laser stripe detected by Canny

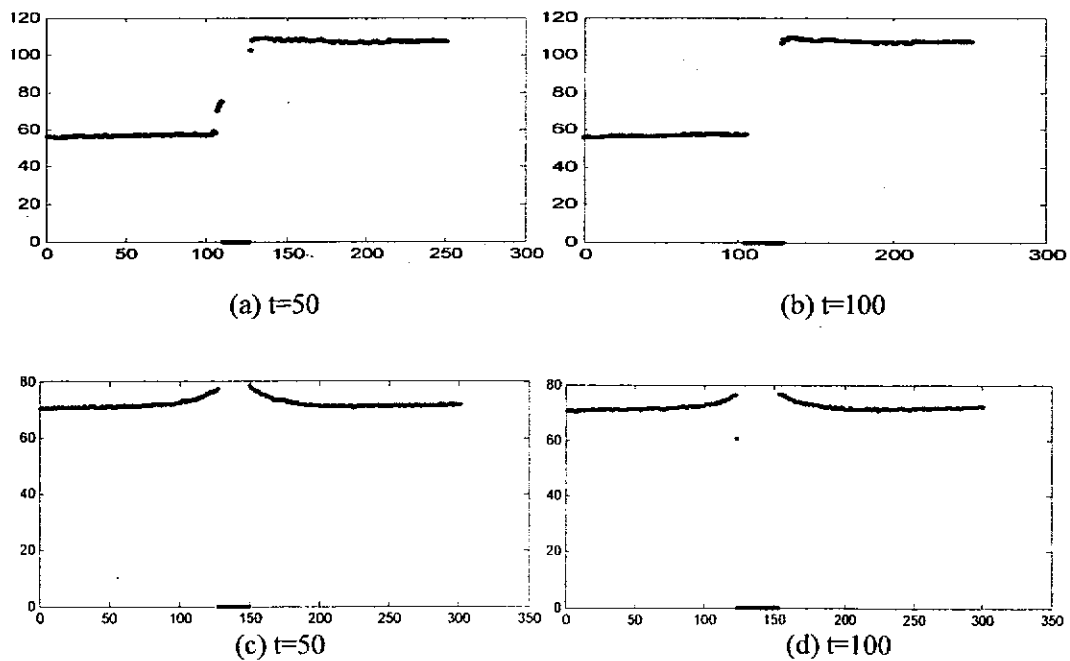


图 3-16 高斯函数拟合获取中心线

Fig 3-16 Centerline of laser stripe extracted by Gaussian function fitting method

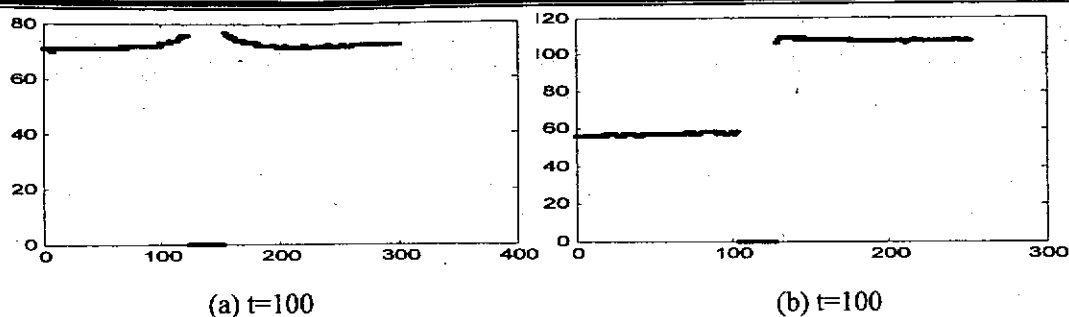


图 3-17 抛物线函数拟合获取中心线

Fig 3-17 Centerline of laser stripe extracted by Parabola function fitting method

对上述中心线依据前面给出的特征点识别方法求取左右特征点，并依据左右特征点计算获得跟踪点位置坐标，如表 3-1、3-2 所示，分别为等厚、不等厚板识别的特征点坐标及计算获得的跟踪点坐标。

根据实验数据比较可以得出：影响提取精度的主要因素有光平面自身“厚度”变化、光强的变化、被测物体表面的性质、图像采集系统内部产生的热噪声和电噪声等。光平面自身的变化是有规律的、可重复的，可以采用合适的方法来消除这种影响。但图像采集系统产生的噪声是随机的、不可重复的；工件表面的情况也千差万别，不同颜色、粗糙度、材质所体现出的漫反射性能不相同，由这两种情况造成的光纹中心提取误差属于随机误差。

通过不同图像处理方法获得结构光条纹中心线及特征点，其中，高斯拟合可以提取获得亚像素级跟踪点坐标，但易受阈值影响，对噪声点敏感，需要合理的阈值设定；抛物线拟合也易受阈值影响，且二者耗时较长；Canny 算子在焊缝间隙反光处容易影响提取效果；二值化阈值分割易产生光纹中心线断点，影响后续的特征点识别。

表 3-1 等厚板材特征点

Table 3-1 Feature points of mono-blanks

方法	左特征点	右特征点	跟踪点
二值化分割	(321,175)	(353,175.5)	(337,175.25)
数学形态学	(320,175)	(354,175)	(337,175)
Canny 算子	(331,178)	(346,179)	(338.5,178.5)
高斯拟合($t=50$)	(326.0000, 176.5000)	(349.0000, 177.3706)	(337.5000, 176.9353)
抛物线拟合($t=100$)	(322,175)	(353,176)	(337.5,175.5)

表 3-2 不等厚板材特征点

Table 3-2 Feature points of bi-blanks

方法	左特征点	右特征点	跟踪点
二值化分割	(303,106.5)	(329,157)	(316,131.75)
数学形态学	(303,106)	(329,157.5)	(316,131.75)
Canny 算子	(302,104)	(330,158)	(316,131)
高斯拟合($t=100$)	(303.0000, 106.5667)	(328.0000, 155.3074)	(315.5000, 130.93705)
抛物线拟合($t=100$)	(302,104)	(330,158)	(316,131)

综上所述,采用基于二值化数学形态学的方法提取结构光纹中心线效果良好,同时,实验结果表明,对于幅面为 200×300 的图像,图像采集处理时间小于 10ms,满足激光拼焊实时性要求。

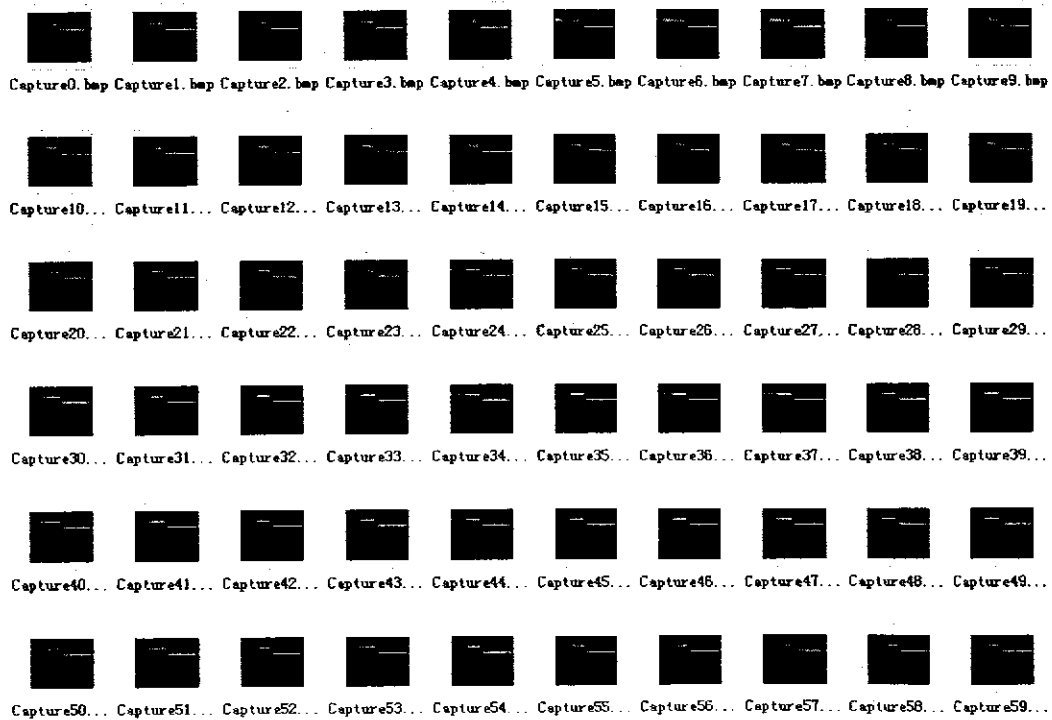


图 3-18 跟踪图像序列

Fig 3-18 Image sequence of seam tracking

获取焊缝跟踪点后,对跟踪点进行轨迹滤波实验,实验采用 1.6-2.5mm 不等厚

镀锌钢板在 6m/min 的焊接速度下获取跟踪图像序列, 如图 3-18 所示。采用二值数学形态学方法提取结构光光纹中心线, 之后依据不等厚板特征点识别算法, 识别每幅图像的特征点并计算焊缝跟踪点, 以垂直于焊缝方向上的跟踪点的轨迹为例, 该轨迹表示激光焊炬在工件表面垂直于焊缝方向上的偏差量。图 3-19 为工件表面垂直于焊缝方向上焊缝跟踪点轨迹图, 横坐标代表跟踪的焊缝长度, 纵坐标代表跟踪点在垂直于焊缝方向上的坐标值, 以像素坐标表示。由图可知, 存在轨迹突变点, 采用上文的轨迹滤波方法对跟踪点进行轨迹滤波, 图 3-20 为一次滤波后的跟踪点轨迹, 实验中采用的相机的分辨率为 0.0125mm/pixel, 可知, 一次滤波后的轨迹总体偏差在 10 个像素以内, 即 0.125mm 以内, 为了确保跟踪轨迹平滑稳定以及跟踪控制的有效性, 对一次滤波后的轨迹采用上述平均轨迹滤波方法进行二次轨迹滤波, 如图 3-21 所示, 由图可知, 可以实现稳定跟踪, 从而保证了焊接质量。

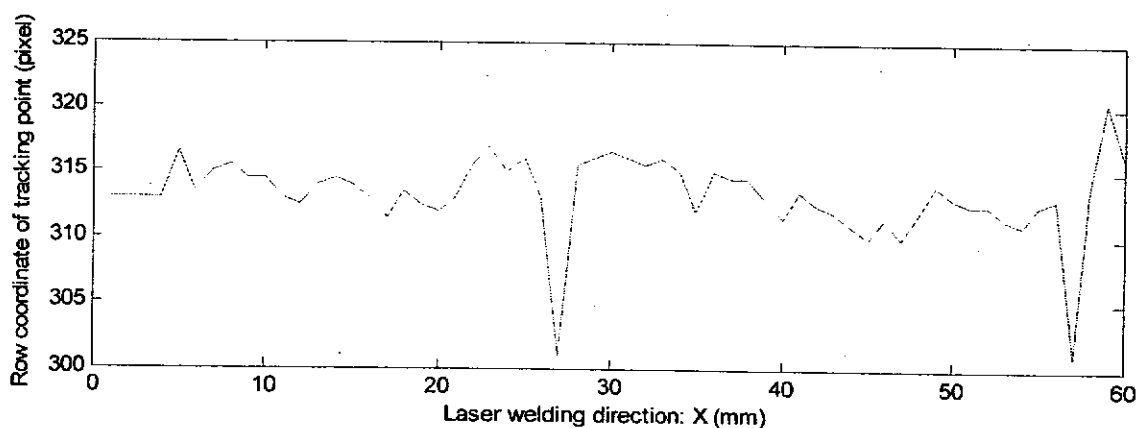


图 3-19 跟踪点轨迹图

Fig 3-19 Trajectory figure of seam tracking point

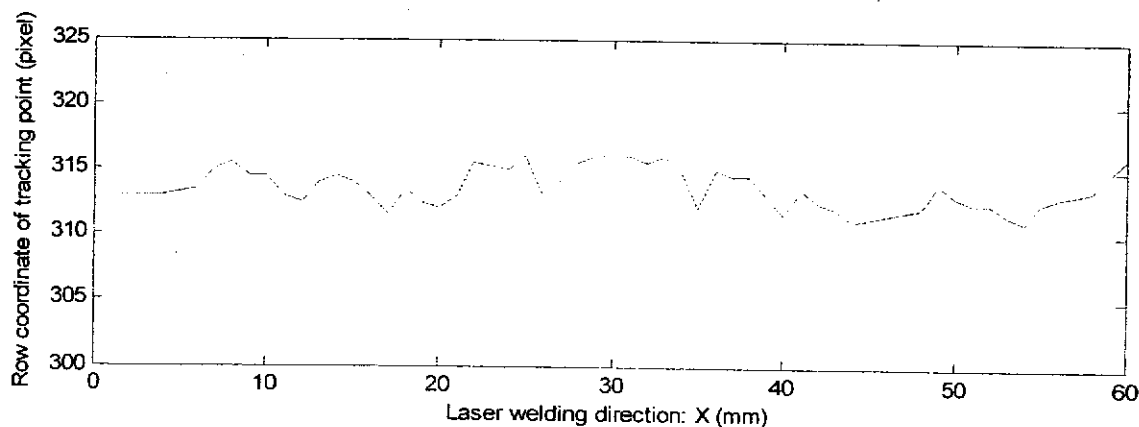


图 3-20 跟踪点滤波轨迹

Fig 3-20 Filtering of trajectory of seam tracking point

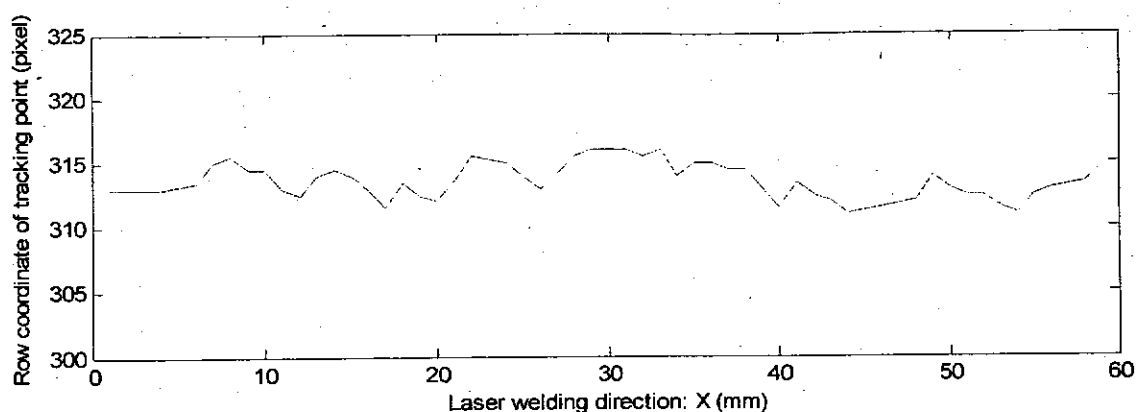


图 3-21 跟踪点二次滤波轨迹

Fig 3-21 Secondary filtering of trajectory of seam tracking point

3.4 本章小结

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。本章首先分析了激光拼焊焊缝跟踪图像处理的特点,之后针对其特点给出了相应的解决方案及图像处理方法,从而有效地保证了跟踪质量。

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。激光拼焊过程中,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。针对这些特点,图像处理硬件选用专门的图像处理芯片 FPGA 芯片和 DSP 芯片来构成实时图像处理系统。针对结构光条纹图像特点,对激光拼焊过程中获取的等厚、不等厚板材跟踪图像结构光条纹,分别采用基于边缘和基于高斯分布的提取算法进行光纹中心线提取,获取结构光条纹中心线后,依据焊缝间隙特点,采用相应的特征点识别算法,进行特征点识别。实验结果表明,基于二值数学形态学方法进行跟踪图像处理,效果良好,对于幅面为 200×300 的图像,图像处理时间小于 10ms,满足激光拼焊实时性要求,最后采用轨迹滤波算法对跟踪点进行轨迹滤波,保证了跟踪的稳定性及可靠性。

第4章 焊缝视觉跟踪标定技术研究

采用结构光视觉传感方法进行焊缝跟踪,首先,需要对其结构光视觉传感器进行标定,而结构光视觉传感器的标定包括摄像机内、外部参数的标定以及传感器结构参数的标定,即结构光光源与摄像机间相对位置关系的标定。当建立了摄像机及传感器的数学模型后,三维空间中的物体在摄像机像平面上的成像位置由模型参数确定,摄像机的标定就是求取模型参数的过程,也就是估计摄像机内部几何和光学特性以及摄像机坐标系相对于一个世界坐标系的三维空间位置和方向的方法。结构光传感器系统的标定是结构光测量方法进行跟踪测量必须进行的步骤,标定的精度直接关系到跟踪测量结果。

本章的结构如下:首先介绍摄像机标定,包括标定中常用的坐标系,摄像机模型等,主要介绍了传统的标定方法如 Tsai 方法^[80]、Matlab 工具包算法^[150]等,然后介绍了结构光视觉传感器的标定方法,包括传统标定方法和直接标定方法,并提出了一种新的直接标定方法,并给出了标定实验结果及精度分析。

4.1 摄像机标定

摄像机标定是从二维图像获取三维空间信息的关键和必要步骤,确定场景中工件上的某点在摄像机坐标系中三维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,即在建立摄像机成像几何模型后,精确估计出摄像机模型中的各种参数。

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,如投影矩阵法。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,需要在变换关系中引入畸变修正项。

4.1.1 常用坐标系

为了描述光学成像过程,在计算机视觉系统中涉及到以下几种坐标系:

图像像素坐标系:

摄像机采集的图像是经过模数转换离散采样后得到的离散数值的数字图像。如图 4-1 所示,在图像上定义直角坐标系 O_0-uv ,称为图像坐标系, O_0 为图像坐标系的原点,位于图像的左上角位置,每一像素坐标表示场景中三维点在图像平面上的投影,用 (u,v) 表示。

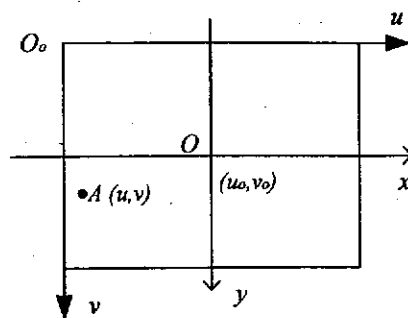


图 4-1 图像坐标系

Fig 4-1 Image frame

图像物理坐标系:

图像坐标系只表示像素位于数字图像中的列数和行数，并没有用物理单位表示出该像素在图像中的物理位置，建立用物理单位（例如毫米）表示的图像坐标系 $O-xy$ ，称为图像物理坐标系，则 (x, y) 表示以物理单位度量的图像物理坐标系的坐标。该坐标系的 x 轴与 y 轴分别与 u, v 轴平行，原点 O 定义在摄像机光轴与图像平面的交点即光心处，该交点理想情况下一般位于图像中心处，但由于摄像机制造的原因，例如 CCD 镜头的配合，以及镜头自身镜片的安装等，光心一般都会偏离图像的中心。

若光心的图像坐标为 (u_0, v_0) ，每一个像素在 x 轴和 y 轴方向上的物理尺寸为 dx 和 dy ，在不考虑畸变的情况下，图像中任意一个像素在实际图像坐标系和计算机图像坐标系之间的变换关系为：

$$\begin{aligned} u &= \frac{x}{dx} + u_0 \\ v &= \frac{y}{dy} + v_0 \end{aligned} \quad (4-1)$$

用矩阵形式表示为：

$$\begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1/dx & 0 & u_0 \\ 0 & 1/dy & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix} \quad (4-2)$$

由于 $\begin{vmatrix} 1/dx & 0 & u_0 \\ 0 & 1/dy & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{vmatrix} = \frac{1}{(dx)(dy)} \neq 0$ ，所以 $\begin{bmatrix} 1/dx & 0 & u_0 \\ 0 & 1/dy & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$ 总是可逆的，故存

在：

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} dx & 0 & -u_0 dx \\ 0 & dy & -v_0 dy \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} \quad (4-3)$$

摄像机坐标系:

即以观察者为中心的坐标系, 将场景点表示成以观察者为中心的数据形式, 用 (X_c, Y_c, Z_c) 表示; 如图4-2所示, 其中坐标原点 O_c 称为摄像机光心, X_c 轴和 Y_c 轴与图像物理坐标系的 x 轴和 y 轴平行, Z_c 轴与成像平面垂直, 称为摄像机的光轴, O_cO 为摄像机焦距。

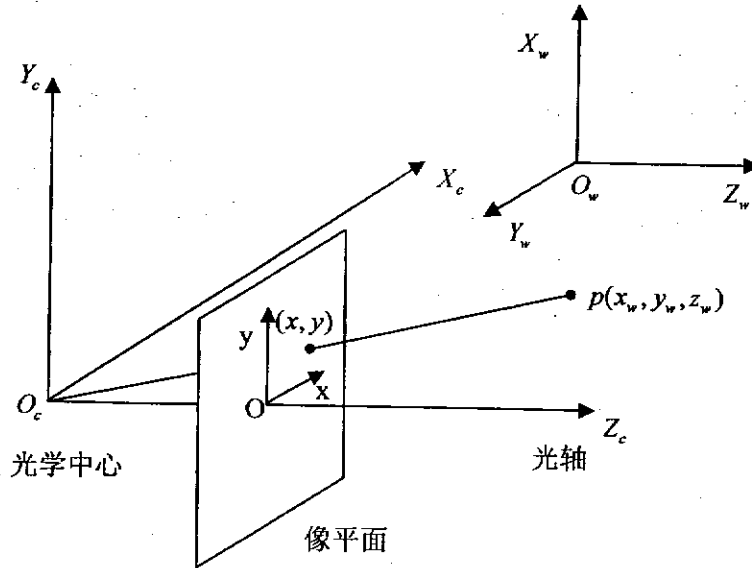


图4-2 摄像机坐标系与世界坐标系

Fig 4-2 Camera coordinate and world coordinate

世界坐标系:

也称为绝对坐标系, 用于表示场景点的绝对坐标, 用 (X_w, Y_w, Z_w) 表示。为了在三维环境中描述摄像机和物体的位姿关系, 选择一个基准坐标系为世界坐标系, 该坐标系由 X_w 轴、 Y_w 轴和 Z_w 轴组成。摄像机坐标系和世界坐标系之间的关系可以用旋转矩阵 R 与平移向量 T 来描述。因此, 如果已知空间某点 P 在世界坐标系和摄像机坐标系下的齐次坐标分别为 $(X_w, Y_w, Z_w, 1)^T$ 和 $(X_c, Y_c, Z_c, 1)^T$, 则:

$$\begin{bmatrix} X_c \\ Y_c \\ Z_c \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R & T \\ 0^T & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{bmatrix} = M_1 \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{bmatrix} \quad (4-4)$$

其中, R 为正交单位旋转矩阵, T 为三维平移矢量, $0^T = (0, 0, 0)^T$, M_1 为 4×4 矩阵。

4.1.2 摄像机模型

摄像机能够将三维空间的物体映射成为平面的二维图像, 图像上每一点的位置则由空间物体与摄像机的相对位置和姿态、摄像机的内部特性所决定, 这些都与摄像机成像几何模型有关。摄像机模型是光学成像几何关系的简化, 最简单的模型为线性模型, 即针孔模型 (Pin-hole Camera)。通常针孔模型摄像机参数分别用内外参数矩阵描述, 对于镜头畸变较大的像机, 还需要引入畸变参数, 即建立摄像机的非线性模型。

4.1.2.1 线性摄像机模型 (针孔模型)

对于空间中任意一点 M, 在像平面上的物理坐标可以写成:

$$x = f \frac{X_c}{Z_c}, y = f \frac{Y_c}{Z_c} \quad (4-5)$$

由(4-3)、(4-4)和(4-5)得:

$$\begin{aligned} Z_c \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} f/dx & s & u_0 \\ 0 & f/dy & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} [R \quad T] \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k_u & s & u_0 \\ 0 & k_v & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} [R \quad T] \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{bmatrix} \\ &= K [R \quad T] \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{bmatrix} = P \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (4-6)$$

其中, P 为 3×4 矩阵, 称为投影矩阵; s 称为扭转因子, $k_u = f/dx, k_v = f/dy$; K 完全由 k_u, k_v, s, u_0, v_0 决定, K 只与摄像机内部结构有关, 称为摄像机内参数矩阵; $[R \quad T]$ 完全由摄像机相对世界坐标系的方位决定, 称为摄像机外部参数。

4.1.2.2 非线性摄像机模型

线性模型不能准确地描述成像几何关系, 尤其在使用广角镜头时, 在远离图像中心处会有较大的畸变。描述非线性畸变可用下列公式:

$$\begin{aligned} \bar{x} &= x + \delta_x(x, y) \\ \bar{y} &= y + \delta_y(x, y) \end{aligned} \quad (4-7)$$

其中, $(\bar{x}, \bar{y})$ 为由小孔线性模型计算出来的图像点坐标的理想值; (x, y) 是实际的图像点的坐标, δ_x 与 δ_y 是非线性畸变值, 它与图像点在图像中的位置有关, 可用以下公式表达:

$$\begin{aligned} \delta_x(x, y) &= k_1 x(x^2 + y^2) + (p_1(3x^2 + y^2) + 2p_2xy) + s_1(x^2 + y^2) \\ \delta_y(x, y) &= k_2 y(x^2 + y^2) + (p_2(3x^2 + y^2) + 2p_1xy) + s_2(x^2 + y^2) \end{aligned} \quad (4-8)$$

其中, δ_x 与 δ_y 的第一项称为径向畸变, 第二项称为离心畸变(decentering), 第

三项称为薄棱镜畸变(thin prism)。式中的 $k_1, k_2, p_1, p_2, s_1, s_2$ 称为非线性畸变参数。

摄像机标定结果是存在误差的,对于光学镜头畸变误差,在一般场合是可以忽略不计的,但在高精度测量、位姿计算或使用广角镜头的场合中,镜头的畸变是不能忽略的,因为标定的误差在视觉计算过程中会被传递放大,严重影响计算的精度。目前图像系统非线性畸变校正的发展已较成熟,按结果可分两类:(1)求解畸变参数的同时得出摄像机全部成像参数,称非线性摄像机标定,有需要标靶的传统标定方法和摄像机自标定方法两种。Tsai提出的两步法是传统方法的典型,稳定可靠,常作为摄像机标定的实际标准;摄像机自标定技术求解不太稳定。(2)仅求解畸变参数,称非线性畸变校正,有借助于试验仪器(如平行光管)的试验法和应用数字图像处理的图像法;另外还有应用透视投影直线仍保持直线的性质进行非线性畸变校正的,如基于交比不变性。

4.1.3 摄像机标定方法

目前常用的考虑畸变的摄像机标定方法为 Tsai 两步法和 Matlab 工具箱法。

4.1.3.1 Tsai 两步法

摄像机的镜头畸变主要有径向畸变和切向畸变两种,但在工业视觉中,一般只需要考虑径向畸变。Tsai 给出了一种在假定只存在径向畸变条件下的标定算法,该算法分为两步进行,第一步基于图像点坐标只有径向畸变误差,而无周向畸变偏移的特性,通过建立和求解超定线性方程组,先计算出外部参数;第二步不考虑畸变因素,利用一个三变量的优化搜索算法求解非线性方程组,来确定其它参数,所以又称“两步法”。

如图 4-3 所示,设 (X_w, Y_w, Z_w) 是三维世界坐标系中物体点 P 的三维空间坐标, (X_c, Y_c, Z_c) 是同一点 P 在摄像机坐标系中的三维坐标。将摄像机坐标系定义为中心在 O_c 点(摄像机的光心),且 Z_c 轴与光轴重合的坐标系; OXY 是图像坐标系,其中中心在 O 点(光轴与图像平面的交点),X, Y 轴分别平行于摄像机坐标系的 X_c, Y_c 轴。 (X_u, Y_u) 是在理想小孔摄像机模型下的 P 点的图像坐标, (X_d, Y_d) 是由透镜畸变引起的偏离 (X_u, Y_u) 的实际图像坐标, (X_f, Y_f) 是计算机图像坐标系中 P 点的图像坐标,单位是像素(pixel);有效焦距 f 是光心到图像平面的距离。

在图像坐标系中,畸变模型即实际图像坐标 (X_d, Y_d) 与理想图像坐标 (X_u, Y_u) 之间的关系:真实图像坐标 (X_d, Y_d) 到计算机图像坐标 (X_f, Y_f) 的变换关系由 (4-4)、(4-5) 式得:

Fig 4-3 Distortion model of Tsai Method

$$Y_f = v_0 + d_v^{-1} Y_d$$

$$d_x' = d_x \frac{N_{cx}}{N_{fx}} \quad (4-10)$$

N_{fx} 为计算机在 X 方向上采集的像素数目;

$$X = X_f - u_0$$

$$Y = Y_f - v_0$$

$$s_x^{-1} d_x' X(1 + R_d^2) = f \frac{X_c}{Z_c} \quad (4-11)$$

$$d_y Y(1 + R_d^2) = f \frac{Y_c}{Z_c}$$

其中, s_x 为不确定性比例因子, 由摄像机横向扫描与采样定时误差引起。

$$R_d = \sqrt{(s_x^{-1} d_x' X)^2 + (d_y' Y)^2} \quad (4-12)$$

把式 (4-4) 代入式 (4-11) 可以得到下式:

$$\begin{aligned} s_x^{-1} d_x' X(1+kR_d^2) &= f \frac{r_1 x_w + r_2 y_w + r_3 z_w + T_x}{r_7 x_w + r_8 y_w + r_9 z_w + T_z} \\ d_y Y(1+kR_d^2) &= f \frac{r_4 x_w + r_5 y_w + r_6 z_w + T_y}{r_7 x_w + r_8 y_w + r_9 z_w + T_z} \end{aligned} \quad (4-13)$$

已知 $Y_d = d_y Y$ ，设 $X_d' = d_x' X$ ，对于每个标定点点 i ，设 (X_{wi}, Y_{wi}, Z_{wi}) 是其世界坐标， (X_{di}, Y_{di}) 是通过上式计算的图像坐标，那么经过整理后，可得到以下矩阵形式的方程：

$$\begin{bmatrix} Y_{di} X_{wi} & Y_{di} Y_{wi} & Y_{di} Z_{wi} & Y_{di} & -X_{di} X_{wi} & -X_{di} Y_{wi} & -X_{di} Z_{wi} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_y^{-1} s_x r_1 \\ T_y^{-1} s_x r_2 \\ T_y^{-1} s_x r_3 \\ T_y^{-1} s_x T_x \\ T_y^{-1} r_4 \\ T_y^{-1} r_5 \\ T_y^{-1} r_6 \end{bmatrix} = X_{di} \quad (4-14)$$

Tsai 两步法求摄像机标定内外参数的过程如下：

- 第一步，解上面的线性方程，求出方程组的七个未知量以后，利用 R 矩阵的单位正交性质，用优化方法进行处理并解出 R, T_x , T_y 。
- 第二步，在不考虑畸变的情况下，对于每个标定点点 i ，建立如下所示的线性方程式，求出的未知量 f 和 T_z 作为初始值，并设 k 的初始值为 0；然后再代入非线性方程组式，求出 T_z ，有效焦距 f ，畸变系数 k 的精确解。

$$d_y Y_i(1+kR_{di}^2) = f \frac{r_4 x_{wi} + r_5 y_{wi} + r_6 z_{wi} + T_y}{r_7 x_{wi} + r_8 y_{wi} + r_9 z_{wi} + T_z} \quad (4-15)$$

$$\begin{bmatrix} Y_{ci} & -d_y Y_i \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f \\ T_z \end{bmatrix} = d_y Y_i (r_7 X_{wi} + r_8 Y_{wi} + r_9 Z_{wi}) \quad (4-16)$$

4.1.3.2 Matlab 工具包

Matlab 标定工具软件包^[150]是一个自由下载的用于摄像机标定的共享软件，它利用的标定物是黑白相间的棋盘格平面，该平面在摄像机前任意摆放，采集到 20-30 幅图像，利用该图像序列来标定摄像机的内外参数。由于该方法不需要特定的三维标定物，并且对标定平面的移动没有严格限制，算法中五个畸变参数已经足够描述摄像机的畸变模型，所以是一种简单、实用的标定方法。

设像机内参数矩阵具有 (4-6) 式形式，畸变参数用来描述像机的径向和切向畸变： $k_c = (k_c(1), k_c(2), k_c(3), k_c(4), k_c(5))^T$ 。令 M 为像机三维坐标空间中的坐标矢量 $M = [X_c; Y_c; Z_c]^T$ ，那么该点在像平面上的成像坐标只与内参数有关，令 x_n 为小孔模型下图像中成像的物理坐标：

$$x_n = \begin{bmatrix} Xc/Zc \\ Yc/Zc \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix}$$

令 $r^2 = x^2 + y^2$, 经过镜头畸变, 新的成像的物理坐标 x_d 为:

$$x_d = \begin{bmatrix} x_d(1) \\ x_d(2) \end{bmatrix} = (1 + k_c(1)r^2 + k_c(2)r^4 + k_c(5)r^6)x_n + d_x \quad (4-17)$$

其中 d_x 是切向畸变矢量:

$$d_x = \begin{bmatrix} 2k_c(3)xy + k_c(4)(r^2 + 2x^2) \\ k_c(3)(r^2 + 2y^2) + 2k_c(4)xy \end{bmatrix} \quad (4-18)$$

5 个参数的矢量 k_c 包含了径向和切向的畸变参数, 这些参数已经足够描述像机的畸变模型。在该畸变模型下, M 点的最终成像像素坐标为 $x\text{-pixel}=[x_p, y_p]$, 其中:

$$\begin{aligned} x_p &= k_u(x_d(1) + sx_d(2)) + u_0 \\ y_p &= k_v x_d(2) + v_0 \end{aligned} \quad (4-19)$$

则 $x\text{-pixel}$ 可以写成:

$$\begin{bmatrix} x_p \\ y_p \\ 1 \end{bmatrix} = K \begin{bmatrix} x_d(1) \\ x_d(2) \\ 1 \end{bmatrix}$$

外参数定义为: 旋转矩阵和平移矢量, 设 R 是世界坐标系和像机坐标系间的旋转矩阵, 将旋转矩阵分解成为绕 Y, X, Z 轴的旋转角 α, β, γ :

$$\begin{aligned} \gamma &= \arctan(r_{21}/r_{22}) \\ \beta &= \arctan(r_{13}/r_{33}) \\ \alpha &= -1 * \arctan(r_{23}/(\cos \gamma * r_{22} + \sin \gamma * r_{21})) \end{aligned} \quad (4-20)$$

这样像机的所有特性就由这 16 个参数来完全描述。

Matlab 工具包的标定过程分两部: 首先假定镜头的畸变系数为 0, 对所有内外参数进行初值估计, 所用的方法是平面单应矩阵方法, 得到一个解析解; 然后进行非线性优化, 如果有 n 幅图像, 空间平面上有 m 个点, 那么需要优化的参数有 $10+6n$ 个 (5 个内参数矩阵元素、5 个畸变系数、 $6n$ 个外参数), 通常选用的优化函数是重投影误差:

$$f = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \|p_{ij} - \hat{p}_{ij}(K, k_c(1), k_c(2), \dots, k_c(5), R_i, t_i)\|^2 \quad (4-21)$$

其中 p_{ij} 和 $\hat{p}_{ij}$ 分别代表在第 i 幅图像中的第 j 点实际测量得到的图像坐标和在计算出的标定参数下估计的图像坐标, (4-21) 式最小化是一个非线性优化的过程, 它的物理意义是: 估计出一组标定参数的初值后, 不断改变这组估计参数的大小, 使得图像坐标的实际量测值与估计值之间的几何距离最小, 在优化方法上通常有 LM 方法、牛顿迭代法等等, 在本工具包中采用的是梯度下降法。

4.2 结构光视觉传感器标定

为了从结构光视觉传感器所摄取的图像中获得空间物体的几何信息,必须建立图像中像点位置和空间物体表面特征点之间的相互关系。这种相互对应关系主要包括摄像机的内外参数及结构光光源与固定装置之间的位置关系参数。

结构光视觉传感器的标定方法目前主要包括两类:传统标定方法和直接标定方法。

4.2.1 传统标定方法

传统标定方法的标定过程分为两个步骤:首先标定摄像机内外参数,然后标定出光源与摄像机的位置关系。线结构光传感器的传统标定方法主要有交比不变法、机械调整法、微分标定法、消隐点法、细丝散射法和靶标标定法等。

传统标定方法中,由于机械调整法、细丝散射法等方法的标定过程及标定装置比较复杂,本文主要介绍一种应用平面靶标实现线结构光传感器的标定方法^[15]并给出标定过程。

4.2.1.1 标定原理

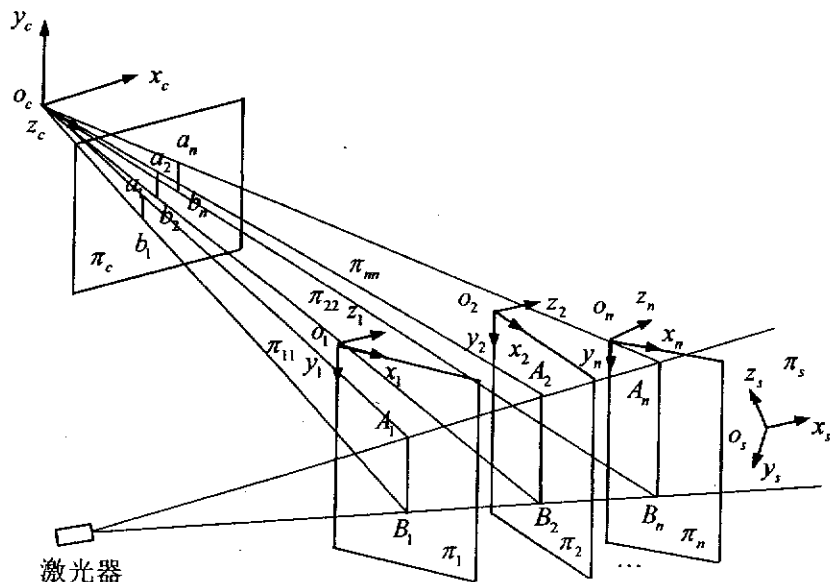


图 4-4 标定原理图

Fig 4-4 The principle of calibration

图 4-4 为标定原理图,建立坐标系如图所示, $o_c-x_c y_c z_c$ 为摄像机坐标系, o_c 为摄像机的投影中心, $o_1-x_1 y_1 z_1$ 为建立在平面靶标上的坐标系, $o_2-x_2 y_2 z_2 \cdots o_n-x_n y_n z_n$ 为任意移动后的平面靶标坐标系, $o_s-x_s y_s z_s$ 为测量坐标系, π_c 为图像平面, π_s 为光平面, π_1 为靶标平面, $\pi_2 \cdots \pi_n$ 为移动后的靶标平面,激光器投影在靶标平面 $\pi_1, \pi_2, \cdots \pi_n$ 上为 $A_1B_1, A_2B_2, \cdots A_nB_n$,即为光平面与靶标平面的交线;又, $A_1B_1, A_2B_2, \cdots A_nB_n$ 在摄像机平面上投影为 $a_1b_1, a_2b_2, \cdots a_nb_n$,在已得到靶标

平面坐标的前提下,通过图像处理得到投影 $a_1b_1, a_2b_2, \dots, a_nb_n$ 在像面的坐标,由摄像机投影中心 o_c 与 $a_1b_1, a_2b_2, \dots, a_nb_n$ 可以确定平面 $\pi_{11}, \pi_{22}, \dots, \pi_{nn}$,由针孔透视变换模型可知, A_1B_1 也在平面 π_{11} 上,同理, $A_2B_2, \dots, A_nB_n$ 也分别在平面 $\pi_{22}, \dots, \pi_{nn}$ 上,因此, $A_1B_1, A_2B_2, \dots, A_nB_n$ 也是靶标平面同平面 $\pi_{11}, \pi_{22}, \dots, \pi_{nn}$ 的交线,可以通过靶标平面同平面 $\pi_{11}, \pi_{22}, \dots, \pi_{nn}$ 确定 $A_1B_1, A_2B_2, \dots, A_nB_n$ 的表达式,因 $A_1B_1, A_2B_2, \dots, A_nB_n$ 又在光平面上,可以得到光平面坐标系与摄像机坐标系的位置关系。

确定靶标坐标系到摄像机坐标系的变换:选择靶标平面上棋盘格的角点作为特征点,在靶标平面坐标系下,特征点的 z 坐标为0,则靶标平面特征点坐标与其图像坐标之间的关系为式(4-22):

$$\tilde{m}_n = \begin{bmatrix} x_n \\ y_n \\ 1 \end{bmatrix} = A \cdot [R_i \quad T_i] \begin{bmatrix} x_i \\ y_i \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_u & sf_u & u_0 \\ 0 & f_v & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot [R_i \quad T_i] \begin{bmatrix} x_i \\ y_i \\ 1 \end{bmatrix} \quad (4-22)$$

式中, $\tilde{m}_n = [x_n \quad y_n \quad 1]^T$ 为归一化图像坐标;

$A = \begin{bmatrix} f_u & sf_u & u_0 \\ 0 & f_v & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$ 为像机内部参数矩阵;

$[x_i \quad y_i \quad 1]^T$ 为特征点的靶面坐标;

$[R_i \quad T_i]$ 为第 i 个靶面到摄像机坐标之间的旋转矩阵和平移向量。

A 已知,则可以通过特征点计算出 $[R_i \quad T_i]$ 。之后,靶标平面结构光条纹上的点,可以全部映射到摄像机坐标系下,从而得到结构光面上的点在摄像机坐标系的三维空间坐标,进而可以得到光平面在摄像机坐标系的平面方程如式(4-23):

$$Ax + By + Cz + D = 0 \quad (4-23)$$

其中, A, B, C, D 为平面方程系数。

4.2.1.2 标定过程

这种基于平面标定参照物的线结构光传感器标定方法的标定过程包括如下几个步骤:

- 1) 准备一标准棋盘格平面靶标,如图4-5所示;
- 2) 将靶标在测量空间内任意摆放几个位置,采用前面介绍的 Matlab 工具箱法求解摄像机内部参数,标定过程如图4-6,4-7所示;
- 3) 选择棋盘格的角点作为特征点,平面靶标置于 π_1 位置;
- 4) 根据平面靶标上特征点的图像坐标和已知的空间关系,得到平面靶标在摄像机坐标系下的平面方程;

5) 将激光光纹投射在平面靶标上, 由摄像机获取光纹信息, 根据摄像机投影中心及光纹在像面上的信息确定平面 π_{i1} , 再由 π_i 和 π_{i1} 计算交线, 得到光平面内 $A_i B_i$ 的直线方程, 即可求得光纹中心线上的点在摄像机坐标系下的坐标;

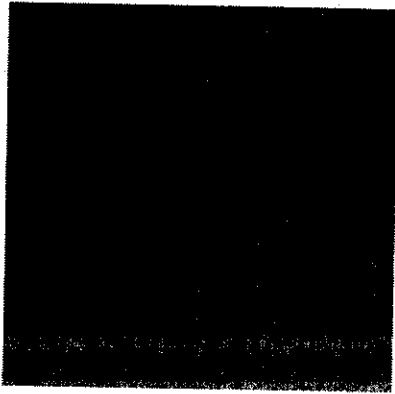
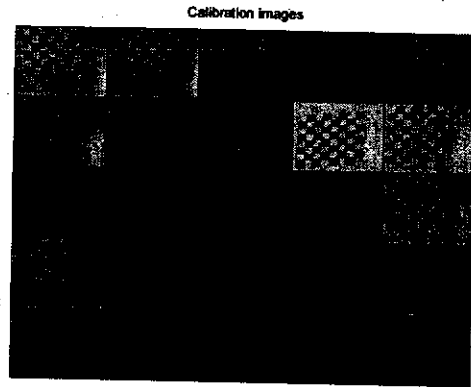


图 4-5 平面标定靶标图

Fig 4-5 Planar pattern for calibration



4-6 标定图像

Fig 4-6 Calibration images

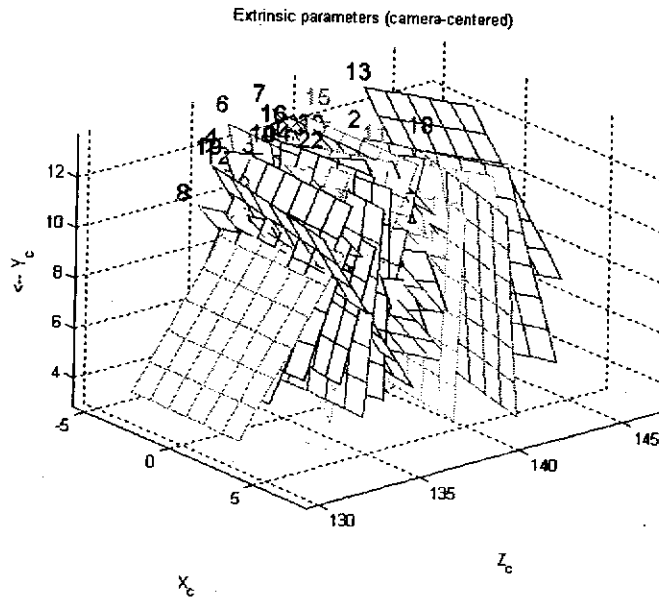


图 4-7 标定板在摄像机坐标系分布

Fig 4-7 Distribution of calibration boards in camera coordinate

6) 将平面靶标任意移动至 $\pi_2 \cdots \pi_n$ 位置, 见图 4-8, 重复步骤 4、步骤 5, 分别求出 $A_2 B_2, \cdots A_n B_n$ 的直线方程, 同时获得多条光纹中心线上的点在摄像机坐标系下的坐标;

7) 上述获得的光纹中心线上的点均在光平面上, 可以拟合获得光平面在摄像机坐标系下的方程, 即光平面坐标系相对摄像机坐标系的关系表达式。

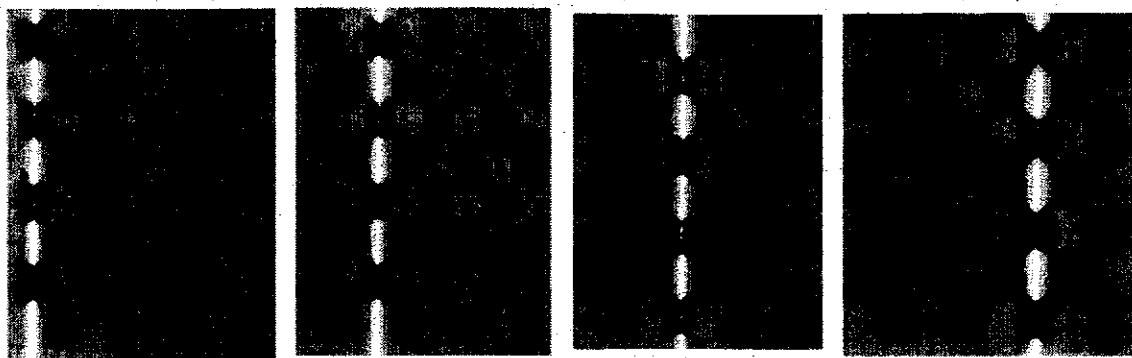


图 4-8 光纹图像

Fig 4-8 Images of laser stripe in planar pattern

4.2.2 直接标定方法

采集获得的激光条纹特征点的图像坐标与空间三维坐标存在一一对应的关系，直接标定法就是建立特征点图像坐标与空间三维坐标间的对应关系。通过测量标定块上特征点的图像坐标，记录各点的图像坐标与空间三维坐标，建立对应关系，之后光面内任一点的空间三维坐标即可根据对应关系插值求取。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。

4.3 一种新的结构光传感器直接标定方法

前面提及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，在小视场情况下难度加大，此时标定模板的制作精度制约着校正精度，而涉及到小视场的非线性校正的文献极为有限。本文针对小视场高精度应用领域，提出了一种新的直接标定方法，通过设计标定模块，搭建实验平台，建立了特征点图像坐标同其空间三维坐标的直接映射关系，该方法简单直接，易于实现。

4.3.1 标定原理

新的直接标定方法的标定原理如图 4-9 所示，通过获取激光光平面上特征点的图像坐标 (u, v) ，根据该特征点的已知三维空间坐标 (x_w, y_w, z_w) ，直接建立点的图像坐标同空间三维坐标的对应关系 $(u, v) \rightarrow (x_w, y_w, z_w)$ ，其中，图像坐标 u 对应空间坐标 y_w ，图像坐标 v 对应空间坐标 z_w ，如式(4-24)所示。跟踪测量时其余任意点的空间三维坐标可以通过非线性插值得到。

$$\begin{cases} u \rightarrow y_w \\ v \rightarrow z_w \end{cases} \quad (4-24)$$