

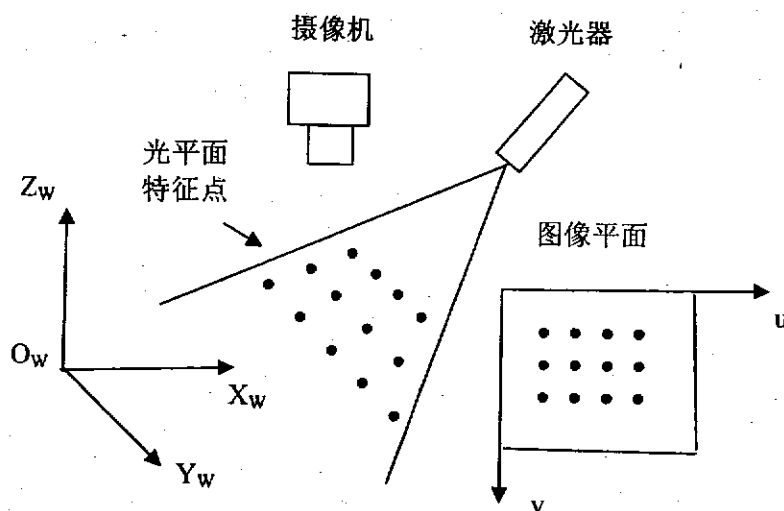


图 4-9 直接标定方法原理图

Fig 4-9 Principle of direct calibration

4.3.2 标定过程

这种基于对应关系的线结构光传感器直接标定方法，其标定过程包括如下几个步骤：

- 1) 设计标定块，由标准量块及三自由度精密平移台组成标定块，并建立如图 4-10 所示的标定实验平台，在标定块上建立世界坐标系 $O_w - x_w y_w z_w$ ，分别与精密平移台的三个坐标轴平行；
- 2) 将标定块置于工作区间的投射激光光平面内，确保投射光光面垂直于量块所在的平面，即与 z_w 轴平行，激光条纹垂直于量块棱边，拍摄图像并检测图像中的特征点；
- 3) 在光平面同一深度同一位置，沿 x_w 轴方向微调三维平移台，获取 n 幅图像，如图 4-11 所示，处理获取特征点的图像坐标，求取 n 幅图像的特征点图像坐标均值，以减少激光散斑影响；
- 4) 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；
- 5) 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；
- 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，如图 4-12 所示；
- 7) 为特征点编号，记录每一个特征点的索引号、图像坐标与空间三维坐标，建立查找表。

结构光传感器的精确标定是高精度跟踪的基础。在标定过程中，为了减低散斑噪声的影响，采用多帧平均技术，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 CCD 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，可以通过获取多帧图像取平均来降低散斑噪声的影响。

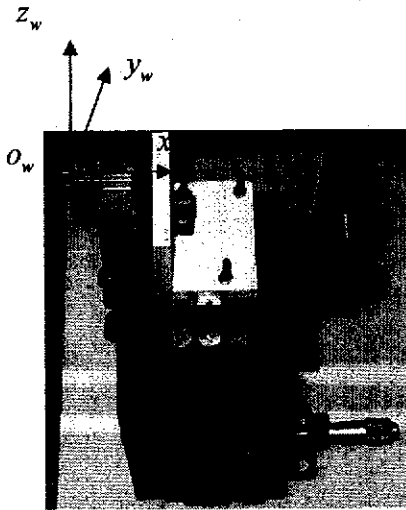


图 4-10 标定块实物图

Fig 4-10 Calibration block

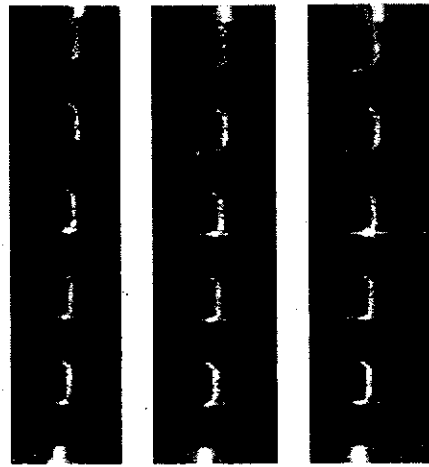


图 4-11 获取多帧标定图像

Fig 4-11 Capturing calibration images

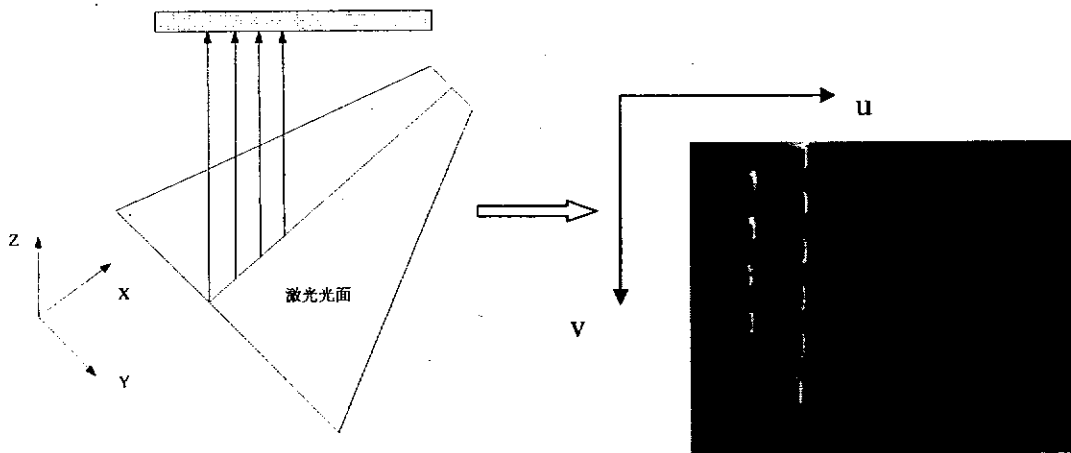


图 4-12 对应关系示意图

Fig. 4-12 Correlation between image coordinate and world coordinate

4.3.3 标定图像特征点提取

标定图像特征点的准确提取直接影响标定的精度，因此，需要根据标定图像特征选择图像特征提取算法，标定过程中获取的结构光条纹图像为离线处理，实时性要求不高，但有更高的精度要求，以确保满足系统的精度要求。

本文通过亚像素边缘提取算法获取结构光条纹边缘线，之后由中轴法获取中心线，算法流程如图 4-13 所示，图像处理结果如图 4-14 所示。

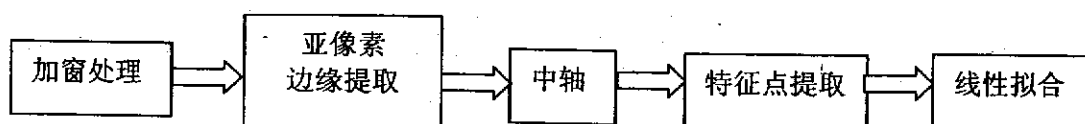


图 4-13 特征点提取算法流程

Fig 4-13 Feature points extracted flow chart

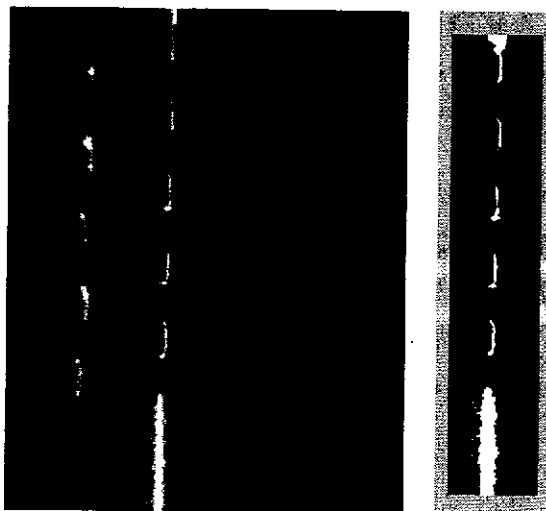


图 4-14 标定图像处理

Fig 4-14 Processing of calibration images

选取其中一组特征点坐标如表 4-1 所示:

表 4-1 特征点图像坐标

Table 4-1 Image coordinates of feature points

特征点 图像坐标	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
u	1026. 6410	1027. 1817	1027. 6505	1028. 1936	1028. 6776	1029. 2184	1029. 6930	1030. 2154	1030. 6895	1031. 2168
v	70.6	153.0	224.6	308.0	381.8	464.6	537.0	616.8	689.4	770.0

4.3.4 实验和结果分析

在真实图像的标定实验中,我们使用的设备有分辨率为 1280×1024 的MVC1000m摄像机、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、标准量块等。摄像机视场为 $16 \times 12.8 \text{ mm}^2$ 。

根据前面提出的新的直接标定方法,选用厚度为1mm的2级标准量块及三自由度精密平移台搭建标定模块,其中三自由度精密平移台具有在X、Y、Z三个方向移动的能力,其分辨率为0.002mm,在X、Y、Z方向上行程都为13mm。

实验分为两部分, 首先是传感器标定实验, 通过获取的特征点的图像坐标以及已知空间三维坐标建立查找表, 其次, 进行校验实验, 选取校验点, 经图像处理获得校验点的图像坐标, 之后依据透视投影变换原理及交比不变性, 通过对标定实验获得的查找表进行非线性插值, 获得校验点的空间三维坐标, 同校验点的真实空间三维坐标进行对比, 以验证该标定方法的精度。建立好查找表后, 选取 250 个校验点, 插值后计算得: y_w 方向绝对误差均值为 0.03283mm, 误差均方根为 0.02379mm, 如图 4-15 所示; z_w 方向绝对误差均值为 0.02084mm, 误差均方根为 0.01480mm, 如图 4-16 所示。表 4-2 为其中任意 5 个校验点的绝对误差。

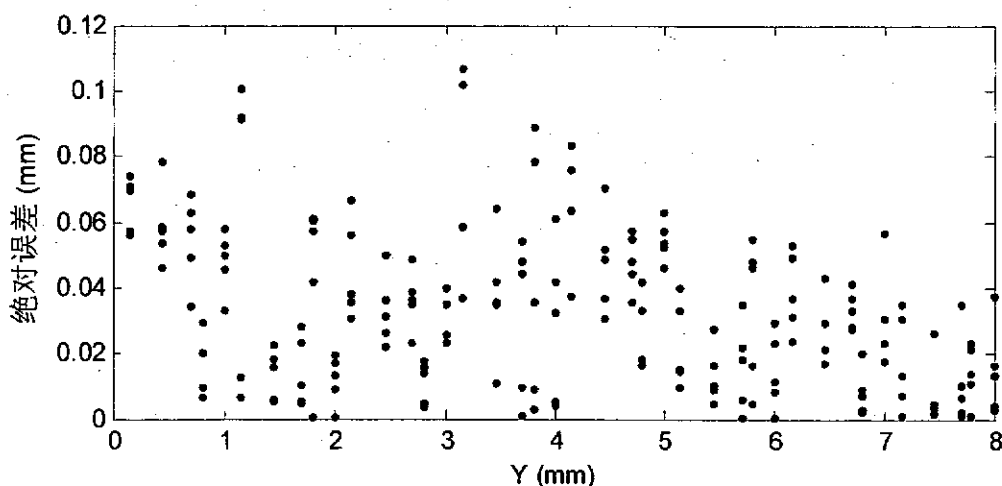
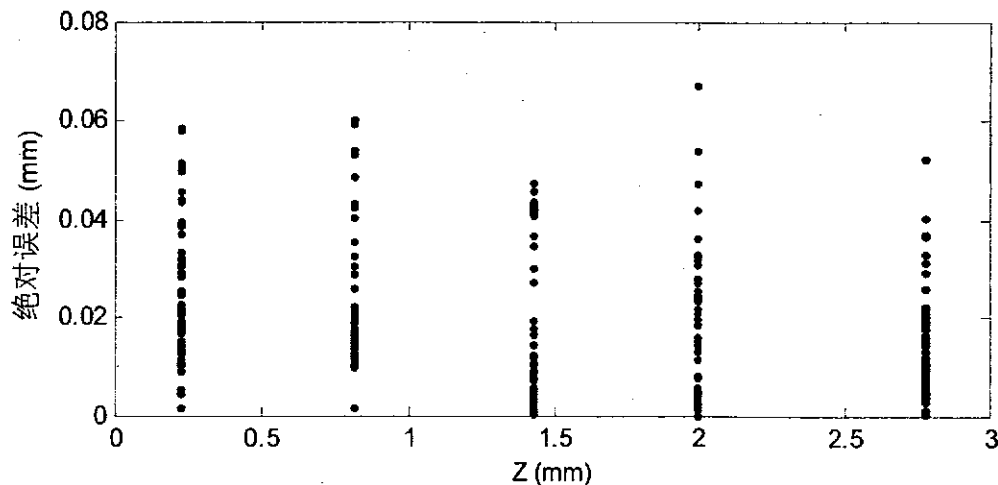
图 4-15 y_w 方向绝对误差Fig 4-15 Absolute error in direction y_w 图 4-16 z_w 方向绝对误差Fig 4-16 Absolute error in direction z_w

表 4-2 校验点绝对误差

Table 4-2 Absolute error of checking points

序号	y 真实值 (mm)	y 插值 (mm)	y 绝对误差 (mm)	z 真实值 (mm)	z 插值 (mm)	z 绝对误差 (mm)
1	1.80	1.8414	0.0414	2.78	2.8169	0.0369
2	2.45	2.4764	0.0263	2.78	2.7702	0.0098
3	5.70	5.7095	0.0095	2.78	2.7792	0.0008
4	7.70	7.6996	0.0004	2.78	2.7731	0.0069
5	8.45	8.4795	0.0295	2.00	2.0236	0.0236

实验结果表明,该标定方法的精度可以满足激光拼焊的精度要求。测量结果的误差可能来源于标定过程中投射光光面与量块所在平面不垂直,可以通过机械装置的安装精度保证,同时通过实验方法调节。另外,影响测量结果的因素还包括标定量块的倒角反光等引起的特征点提取误差,插值算法误差以及随机噪声等。

4.4 本章小结

本章系统论述了摄像机以及结构光视觉传感器的标定方法,并提出了一种新的线结构光视觉传感器标定方法。焊缝跟踪系统中,结构光视觉传感器的标定精度直接决定了系统的实际使用精度。当前结构光传感器的标定方法很多,但大多数在大视场、短焦距或广角镜头的应用中有明显优势,而在小视场情况下标定难度加大。本文针对焊缝跟踪过程中小视场高精度的应用要求,提出了一种新的直接标定方法,并实验验证了该标定方法的有效性。新方法建立了特征点图像坐标同空间三维坐标的直接映射关系,使得空间任一点的三维坐标均可通过已知点插值获得,而不必对摄像机的内外参数和系统结构进行标定。该方法操作便捷,可靠稳定,标定精度高,符合激光拼焊的精度要求,可以方便地应用于实际工业生产,满足现场应用需求。

第5章 焊缝视觉跟踪控制方法研究

本文在前面的章节中介绍了结构光视觉传感器的设计、焊缝跟踪图像处理以及结构光视觉跟踪传感器的标定方法,最终可以高精度地提取出焊缝特征点,而如何利用焊缝特征点信息实现焊缝跟踪控制是本章所要解决的问题。

焊缝跟踪的任务就是保证焊炬高精度地实时跟踪焊缝。在控制过程中,将提取的图像特征点信息与所要求的期望值相比较,得到焊缝中心位置与激光焊炬之间的偏差与偏差变化率,偏差与偏差变化率经控制器协调控制输出,最后通过执行机构动作来调节焊炬与焊缝之间的相对位置关系,从而实现焊缝跟踪。

基于视觉传感的焊缝跟踪系统面临的一个重要问题就是如何提高跟踪控制过程的精度及实时性。目前一方面主要通过提高视觉传感器的精确度和实时性,实现视觉信息的准确提取;另一方面,在焊缝跟踪控制过程中采用智能控制方法。

本章首先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;之后,针对激光拼焊过程中焊缝跟踪控制的特点,建立焊缝跟踪系统控制模型,设计了模糊控制器,通过参数自调整增强模糊控制器的自适应能力,提高控制系统的动态性能和鲁棒性,以实现跟踪过程中的偏差跟踪控制;最后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。

5.1 焊缝跟踪偏差检测

5.1.1 偏差检测

焊缝视觉跟踪系统中的传感装置与激光焊炬为刚性连接,且距离固定,称之为前视距离。因此,由传感装置获取的跟踪图像计算而得到的偏差为超前偏差,即为获取图像这一时刻的激光焊炬与焊缝中心的相对偏差,但此时激光焊炬并不是处在对应该偏差的焊接位置。激光焊炬要到达传感装置获取图像的位置,即偏差实际调节位置,还需要行走时间 t ,如式(5-1)所示:

$$t = \frac{L}{v} \quad (5-1)$$

式中, L 为前视距离, v 为焊接速度。

激光焊炬对焊缝的偏差调节滞后于图像处理过程,而实际上跟踪过程中需要调节的是焊炬从一个位置前进到下一个位置在水平和竖直方向上的偏差量,并不是直接由图像处理系统计算出的偏差量,所以需要计算焊炬的实际偏差调整量。以计算激光焊炬在工件表面垂直于焊缝方向上的实际偏差调整量为例,如图5-1所示^[152],为水平方向上偏差调整过程。设在前视距离内,传感装置获取并处理了 M 幅图像,位置 S_n 处图像处理计算的偏差值,即传感装置与焊缝中心位置的距离值用 D_n 表示,从位置 n 到位置 $n+1$ 激光焊炬水平方向实际偏差调整量用 Δa_{n+1} 表

示, 且定义焊缝位于激光焊炬右侧时的 D_n 和 Δa_n 为正。

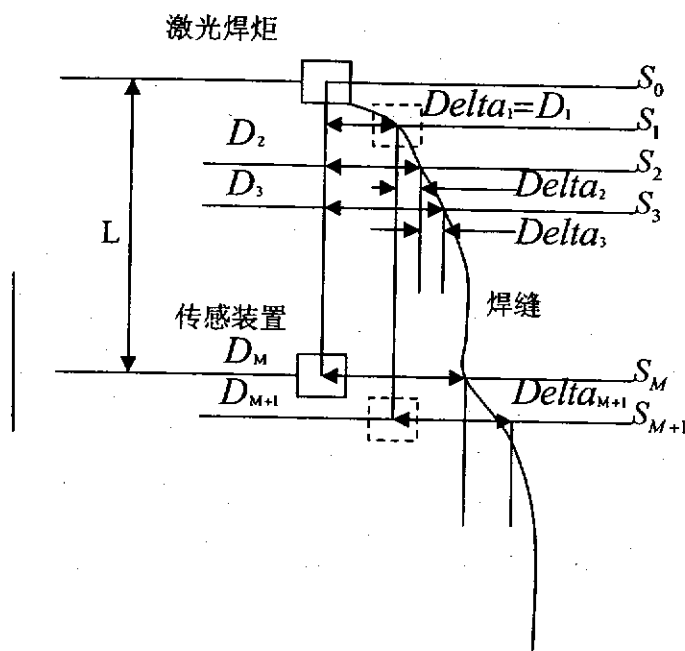


图 5-1 激光焊炬与焊缝相对位置^[152]

Fig 5-1 Relative position of the welding torch and seam

传感装置初始位置设为 S_0 , 在位置 S_1 处传感装置获取第一幅跟踪图像, 经图像处理, 得到此时传感装置与焊缝的偏差 D_1 , 在焊枪未前进到传感装置初始位置前, 不需要进行任何水平方向偏差调整, 当到达传感装置初始位置 S_0 时, 激光焊炬正对焊缝, 由初始位置前进, 开始进行偏差调整, 激光焊炬由位置 S_0 前进到位置 S_1 所需的实际偏差调整量 Δa_1 等于传感装置在 S_1 位置获得的偏差值 D_1 ; 而从位置 S_1 前进到位置 S_2 , 水平方向激光焊炬实际偏差调整量不再是之前得到的图像处理结果 D_2 , 实际偏差调整量计算公式如式(5-2)所示:

$$\Delta a_2 = D_2 - \Delta a_1 \quad (5-2)$$

激光焊炬从位置 S_2 到位置 S_3 的实际偏差调整量为:

$$\Delta a_3 = D_2 - \Delta a_1 - \Delta a_2 \quad (5-3)$$

依此类推, 从位置 n 到位置 $n+1$ 的实际偏差调整量为:

$$\Delta a_{n+1} = D_{n+1} - \sum_{k=1}^n \Delta a_k \quad (n+1 \leq M, n, k \in Z) \quad (5-4)$$

上面的公式适用于激光焊炬前进位置小于等于 M 的情况。当激光焊炬从位置 S_M 前进到位置 S_{M+1} 时, 情况发生变化, 传感装置在位置 S_{M+1} 处获得的焊缝图像偏差量对应于激光焊炬在水平方向平移 Δa_1 距离后, 即此时图像的水平基准为位置 S_1 , 而不是此前的位置 S_0 , 所以激光焊炬从位置 S_M 前进到位置 S_{M+1} 的实际偏差调整量为:

$$\Delta_{M+1} = D_{M+1} - \sum_{k=2}^M \Delta_k \quad (5-5)$$

同理,可以得到激光焊炬到达位置 M 后的实际偏差调整量计算公式:

$$\Delta_{M+n+1} = D_{M+n+1} - \sum_{k=n+2}^{M+n} \Delta_k \quad (n, k \in Z) \quad (5-6)$$

上面两个公式(5-4), (5-6)适用于激光焊炬与焊缝存在的各种位置关系。

根据焊缝的实际情况,本系统选取 $\pm 3\text{mm}$ 作为焊缝偏差的研究范围,可以覆盖大多数的偏差情况。对于大于 $\pm 3\text{mm}$ 的少数大幅度偏差,按照偏差为 $+3\text{mm}$ 或 -3mm 的极限位置来进行处理,这样虽然在一定程度上影响控制的精确性,但可以防止过度的超调,简化算法,因此是可行的。

针对伺服电机的控制量,控制距离的输出范围应该为 $\pm 3\text{mm}$ 。控制对象松下伺服电机每旋转 360 度设置的脉冲数为 5000,丝杠传动机构每旋转 360 度移动的距离为 10mm, $\pm 3\text{mm}$ 也就是丝杠机构旋转 216 度的距离,这样一个控制周期最多需要 3000 脉冲。

5.1.2 节拍同步

激光拼焊速度快,精度高,为了满足跟踪精度要求,需要跟踪系统具有较高的图像采集处理频率,同时,需要确保跟踪系统的控制位置对应着相应的图像采集位置。前者由图像处理硬件及软件算法决定,后者可以通过节拍同步方法实现。

如图 5-2 所示,传感装置在 T_0 时刻采集 S_0 位置的跟踪图像,由于传感装置和激光焊炬之间存在一前视距离 L ,那么假设焊接的速度为 v ,则在通过 L/v 时间后,激光焊炬才行走到 S_0 位置。图像采集和处理的时间不为固定值,运动控制卡需要以与图像采集处理相同的频率来进行控制,因此,图像采集和运动控制之间应该有如下时序关系:传感装置在 T_0 时刻采集 S_0 位置,在 T_1 时刻采集 S_1 位置,在 T_n 时刻采集 S_n 位置;由于传感装置和激光焊炬之间有固定的前视距离,因此,相对于上面传感装置的采集时序,激光焊炬在 $L/v+T_0$ 时刻运动到 S_0 位置,在 $L/v+T_1$ 时刻运动到 S_1 位置,在 $L/v+T_n$ 时刻运动到 S_n 位置,其余以此类推。

针对节拍同步问题,可以分为三个阶段来实现:起始阶段,中间运行阶段,收尾阶段。

起始阶段, T_0 时刻传感装置开始采集位置 S_0 处图像,由图像采集处理单元给运动控制单元发送一定时起始信号,运动控制单元此时启动一个定时器,一个计时器,计时器用于记录相邻两幅图像采集处理的时间间隔,定时器为执行定时。图像采集处理单元采集图像并处理后,得到偏差信息,并将偏差信息发送给运动控制单元,存入缓存,之后由运动控制单元给图像采集处理单元发送确认信号,传感装置在确认运动控制单元收到偏差信息数据后,开始采集下一幅图像,并再次发送一计时起始信号给运动控制单元,运动控制单元在收到起始信号后,计算

上次计时器开始计时到现在所用时间, 然后重新开始计时, 如此循环, 直到传感装置走完整个前视距离。在整个前视距离中, 激光焊炬并未发生实际的运动控制, 仅仅是在运动控制单元中存储了在前视距离中获取的偏差信息数据和这些偏差信息的时间间隔。

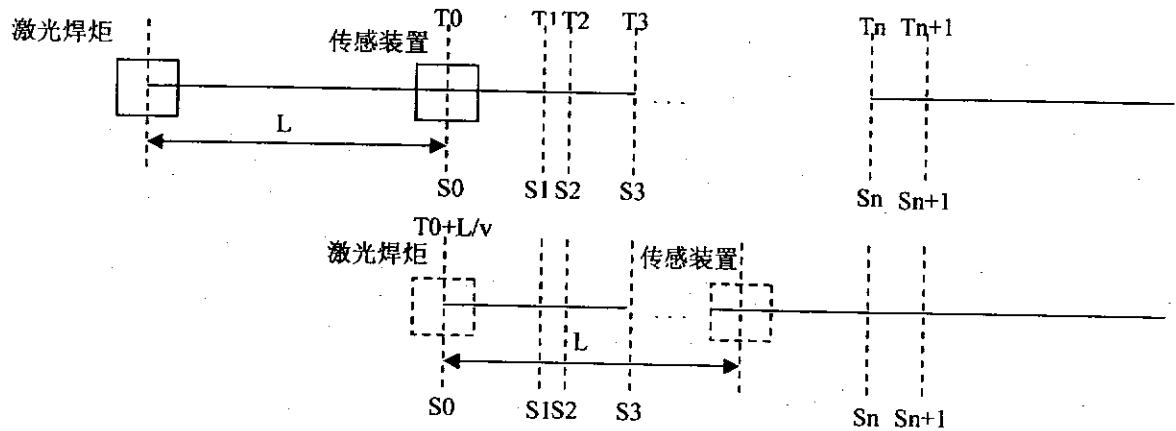


图 5-2 节拍同步示意图

Fig 5-2 Synchronization of image capturing and seam tracking control

中间运行阶段: 图像采集处理单元继续给运动控制单元发送计时开始信息, 采集, 处理, 发送偏差信息数据, 确认信号。运动控制单元除了进行计时, 存储偏差信息数据和时间间隔外, 还要进行激光焊炬的位置控制。运动控制单元的执行定时器定时到 L/v 时刻时, 运动控制单元开始取出偏差信息, 执行定时器清零, 并把此偏差信息和下一偏差信息的时间间隔存入定时器, 开始重新定时。同时, 运动控制单元控制伺服电机驱动运动执行机构对焊炬进行偏差控制, 在执行定时器定时时间截止时, 取出下一个偏差信息, 重复上述步骤。

收尾阶段: 当已走完焊缝全程时, 传感装置停止采集, 图像采集处理单元发送一结束信号给运动控制单元, 后者在取完所有的偏差信息之后, 如果取出的数据是结束信号, 则结束控制过程。

5.2 焊缝跟踪控制方法

5.2.1 焊缝跟踪控制模型

焊缝跟踪过程中, 经图像处理获得焊缝中心点位置, 之后通过坐标转换计算焊炬同焊缝中心点位置的偏差, 即焊炬的调整量, 由此得到基于图像处理的焊缝跟踪系统的控制模型如图 5-3 所示。

在本系统中, 以焊炬相对于焊缝在水平和竖直方向上的位置偏差作为被控制量, 在控制过程中, 能够根据采用偏差的大小来实时调节执行机构的运动。因为激光焊接过程是一个时变、非线性复杂系统, 故综合考虑后选用模糊控制方法实

现激光拼焊过程的焊缝跟踪控制^[153]。

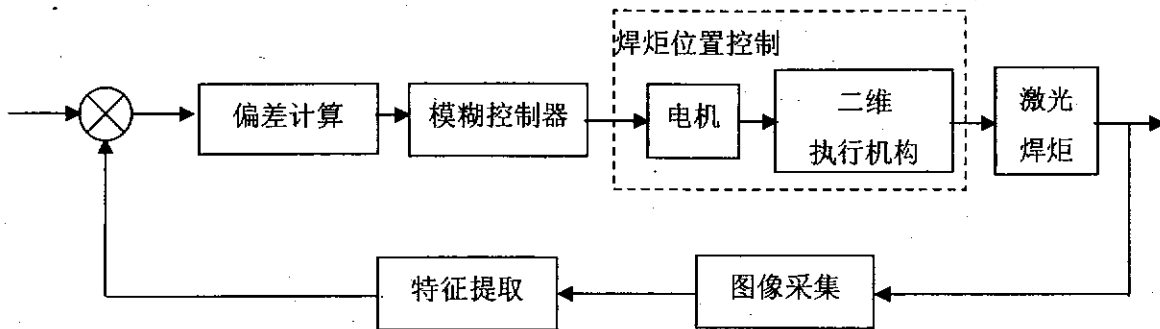


图 5-3 焊缝跟踪控制系统模型

Fig 5-3 The model of seam tracking control system

5.2.2 基本模糊控制器设计

本系统采用双输入单输出结构，对应的输入变量为偏差 E 及偏差 E 的变化率 EC ，输出变量为控制量 U 。在本系统中，偏差 E 为激光焊炬相对于焊缝中心的位置偏差， EC 为 E 的导数， U 为伺服电机的控制量。 E 的模糊集为 $\{NB, NM, NS, O, PS, PM, PB\}$ ，论域为 $\{-3, -2, -1, 0, 1, 2, 3\}$ ； EC 的模糊集为 $\{NB, NM, NS, O, PS, PM, PB\}$ ，论域为 $\{-3, -2, -1, 0, 1, 2, 3\}$ ； U 的模糊集为 $\{NB, NM, NS, O, PS, PM, PB\}$ ，论域为 $\{-3, -2, -1, 0, 1, 2, 3\}$ 。

根据人工操作的经验判断，可以建立相应的模糊控制规则。根据偏差 E 和偏差变化率 EC 的不同，可建立如下规则：

当偏差 E 为负大，若偏差变化率 EC 也为负或者零时，说明输出很大，为了尽快使控制偏差减小，控制量 U 取负大。若 EC 为正小，此时偏差很大，但在缓慢减小，为了加快偏差减小，且抑制超调，控制量应取负小。若 EC 为正中或正大时，偏差在快速减小，此时控制量为零，以抑制超调。

当偏差 E 为负中且偏差变化率 EC 为负大或者负中时，此时偏差较大且偏差有快速变大趋势，控制量取负大来抑制这种趋势，但当偏差变化率 EC 为负小或者为零时，控制量取负中使偏差快速减小，且能抑制超调。当偏差变化率 EC 为正小时，此时偏差缓慢减小，控制量 U 取负小以加快偏差减小并抑制超调。当偏差变化 EC 为正中和正大，偏差在快速减小此时主要作用是抑制超调，不做控制，控制量 U 取零。

当偏差为负小且偏差变化 EC 为负大或者负中，为了抑制这种偏差快速增大的趋势，控制量应负大，当偏差变化 EC 为负小，控制量取负中，当偏差为零，控制量应取负小。偏差变化 EC 为正小时，此时偏差可以很快减小至零，此时不做控制。若偏差变化率 EC 为正中或正大时，此时主要是抑制超调，控制量应取正中。

当偏差 E 为零且 EC 为零时, 不做控制。其它情况下根据偏差变化率 EC 的情况, 选取的控制量应该与 EC 的变化方相同且稍大的控制量以加快响应时间。比如, 若 EC 为负小, 控制量取负中, 若 EC 为正中, 控制量取正大。

对于偏差为正的情况, 与偏差为负的情况正好相反。

表 5-1 模糊控制规则表

Table 5-1 The rule table of the fuzzy control

$E \backslash EC$	NB	NM	NS	O	PS	PM	PB
NB	NB	NB	NB	NB	NM	O	O
NM	NB	NB	NB	NB	NM	O	O
NS	NB	NM	NM	NM	O	PS	PS
O	NB	NM	NS	O	PS	PM	PB
PS	NS	NS	O	PM	PM	PM	PB
PM	O	O	PM	PB	PB	PB	PB
PB	O	O	PM	PB	PB	PB	PB

为了能够进行模糊控制, 需要将输入变量从基本论域转换到相应的模糊集论域。转换方法是将输入变量乘以相应的量化因子, 输出变量乘以相应的比例因子。一个好的模糊控制器除了要有好的控制规则外, 合理的选择模糊控制器的输入变量的量化因子和输出控制量的比例因子也非常重要。设偏差 E 的量化因子为 K_e , 偏差变化率 EC 的量化因子为 K_c , U 的量化因子 K_u 。选取原则是增加 K_e 相当于加大误差的权重, 加快系统响应速度, 但过大会产生超调, 过小则响应太慢; K_c 影响误差速率的权重, 增大它可以有效的抑制超调量, 但会降低系统响应速度, 减小则会产生超调和振荡; K_u 调整控制器的输出, 在上升阶段, K_u 越大响应越快, 但在稳定阶段, K_u 应该较小, 以抑制超调。

根据误差 E 的实际变化范围 $[-e, e]$, 以及相应的论域 $[-n, n]$, 可得

$$y = \frac{e}{n} \quad (5-7)$$

将相应的偏差变化范围带入上述公式, 可得 K_e 和 K_c

同样, 根据输出变量得实际变化范围 $[-u, u]$ 和论域 $[-m, m]$ 可得输出变量得比例因子

$$K_u = \frac{u}{m} \quad (5-8)$$

由于受实际系统的各种参数的影响, 根据上述公式得到的量化因子和比例因子可能不是最优, 需要在这些值附近不断进行调整, 直到获得满意的控制效果。

在模糊控制系统中,对输入精确量进行模糊化的关键是确定其模糊集的隶属函数。常用的隶属度函数通常采用三角形,梯形,高斯形。对本系统来说,模糊变量的隶属度如图 5-4~5-6 所示:

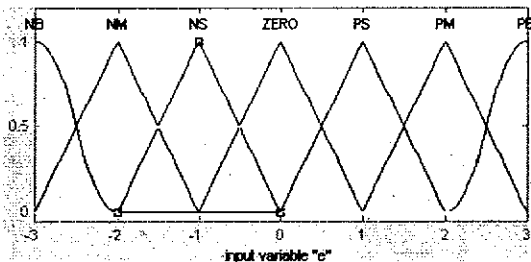


图 5-4 模糊变量 E 的隶属度

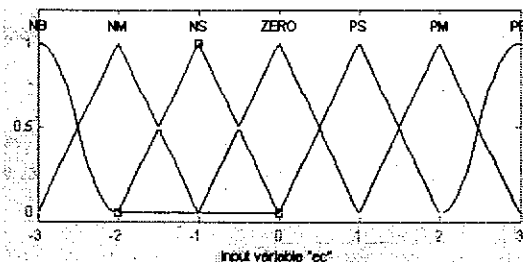


图 5-5 模糊变量 EC 的隶属度

Fig 5-4 Membership grade of fuzzy variable E Fig 5-5 Membership grade of fuzzy variable EC

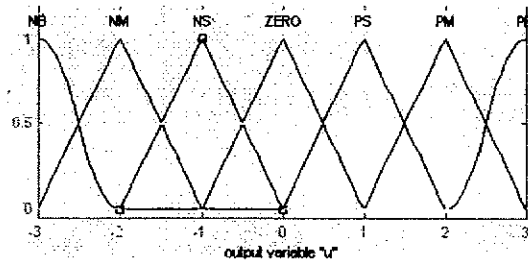


图 5-6 控制量 U 的隶属度

Fig 5-6 Membership grade of controlled variable U

通过 Matlab 提供的模糊工具箱 (FIS) 可以方便地进行模糊控制器的仿真。仿真框图见图 5-7:

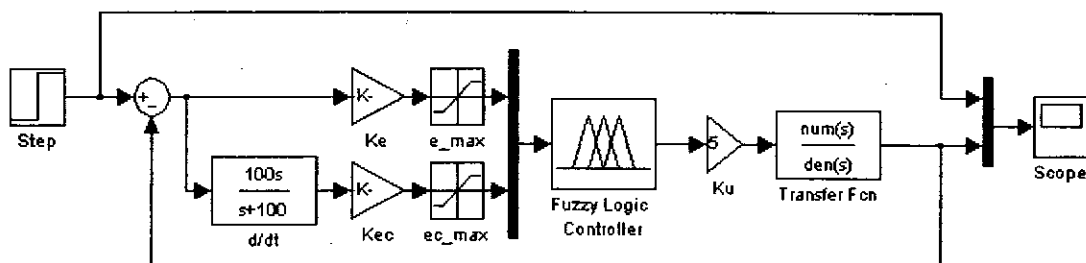


图 5-7 模糊控制器仿真框图

Fig 5-7 Simulation block diagram of fuzzy controller

仿真效果如图 5-8 所示:

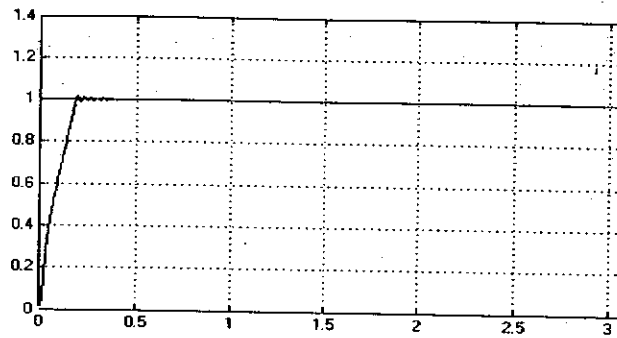


图 5-8 仿真效果图

Fig 5-8 Result of simulation

5.2.3 参数自调整方法

在一般模糊控制器中, 量化因子和比例因子固定, 会给系统的控制性能带来一些不利的影响^[154]。当误差较大时, 不能快速地消除误差, 动态响应速度受到限制; 当误差较小时, 存在调节死区; 当被控对象参数发生变化或受到随机干扰影响时, 控制器不能很好地适应, 会影响模糊控制的效果。为增强模糊控制器的自适应能力, 提高控制系统的动静态性能和鲁棒性, 需要对量化因子和比例因子等参数进行在线修正调整^[155]。参数自调整模糊控制系统结构如图 5-9 所示。

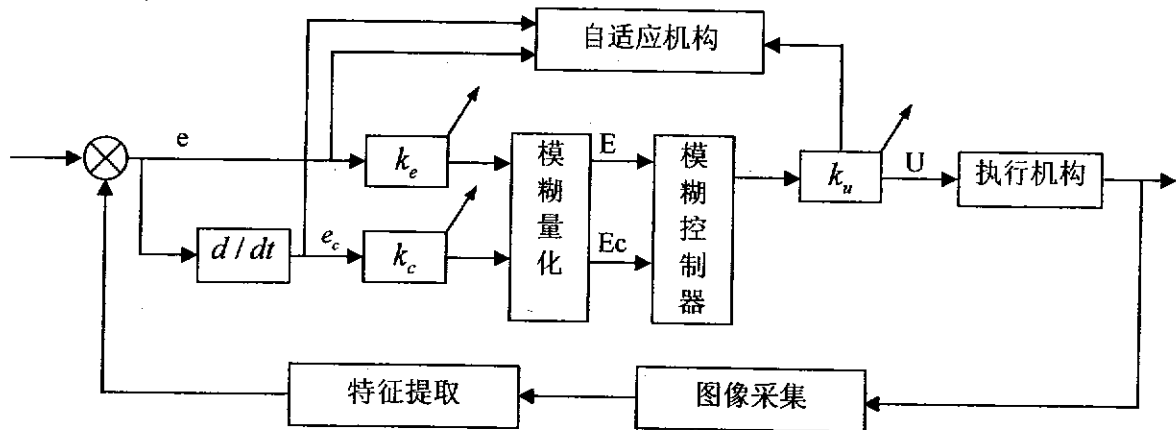


图 5-9 参数自调整模糊控制器

Fig 5-9 Fuzzy controller with self-adjusting parameters

量化因子和比例因子均是考虑两个论域变换而引出的, 对输入变量而言的量化因子具有量化效果, 而对输出而言的比例因子起到比例调节作用。量化因子和比例因子的大小及不同量化因子之间大小的相对关系, 对模糊控制器的控制性能影响很大, 仅用一组恒定不变的值难以保证被控过程处于最佳控制状态, 往往会降低模糊控制系统的鲁棒性。

对于量化因子、比例因子等参数的自调整可以分为如下几个阶段进行^[156], 如

图 5-10 所示, 为典型的二阶系统阶跃响应曲线。

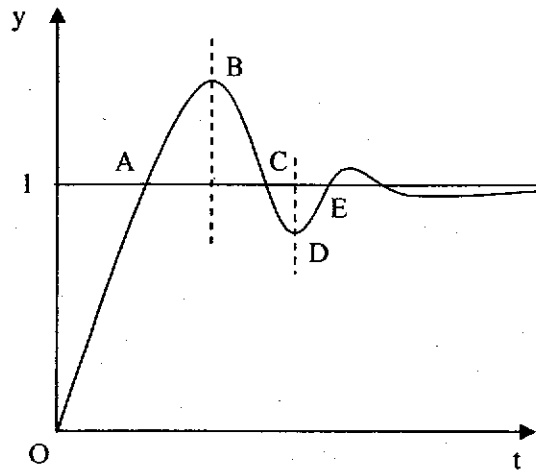


图 5-10 二阶系统单位阶跃响应曲线

Fig 5-10 Unit-step response of second-order system

OA 段: $e > 0$ 且 $e_c < 0$, 初始阶段应考虑使系统尽快消除偏差趋向稳态, 增加由误差产生的控制作用, 即增大误差量化因子 K_e , 同时增加控制器的输出, 即增大比例因子 K_u , 以加强控制作用, 使系统具有较快的上升特性, 而在接近 A 点时, 为使得系统尽快接近稳态, 抑制系统超调, 应减小误差产生的控制和减小控制器的输出, 即减小误差量化因子 K_e 和比例因子 K_u , 而增大误差变化率的量化因子 K_c 。

AB 段: $e < 0$ 且 $e_c < 0$, 系统输出已有超调且误差正在增大, 所以必须增加误差产生的控制作用和增加控制输出, 减小误差变化率产生的控制作用, 即增大 K_e , K_u , 减小 K_c 。

BC 段: $e < 0$ 且 $e_c > 0$, 系统误差逐渐减小, 系统输出趋向稳态, 在系统尽快达到稳态的同时, 避免出现回调, 应减小控制作用和误差产生的作用, 而增加误差变化率的控制作用, 即减小误差量化因子 K_e 及比例因子 K_u , 增大误差变化率的量化因子 K_c 。

CD 段: $e > 0$ 且 $e_c > 0$, 系统出现下超调, 若回调不太大, 应该使系统尽快接近稳态。应加强误差产生的控制作用和控制器的输出, 降低回调, 使系统尽快回到稳态值附近。所以此阶段应增加误差量化因子 K_e 及比例因子 K_u , 减小误差变化率量化因子 K_c 。

由以上分析可知, 可以通过对模糊控制器的量化因子及比例因子等参数进行自动调整, 使模糊控制器的控制规则可以根据误差和误差变化率的变化得到实时在线的调整, 来提高焊缝跟踪控制系统的性能。

5.2.4 运动控制单元软件设计

由于运动控制单元要实现的功能较多,为了使程序易于编写、查错,以及便于后期的维护、更新和扩充,采用模块化设计方法来构建运动控制单元下位机软件系统框架。整个下位机软件可以划分为初始化模块、串行通信模块、CAN通信模块、超前偏差控制模块。整个下位机软件的系统结构的总体设计和工作流程如图5-11所示。

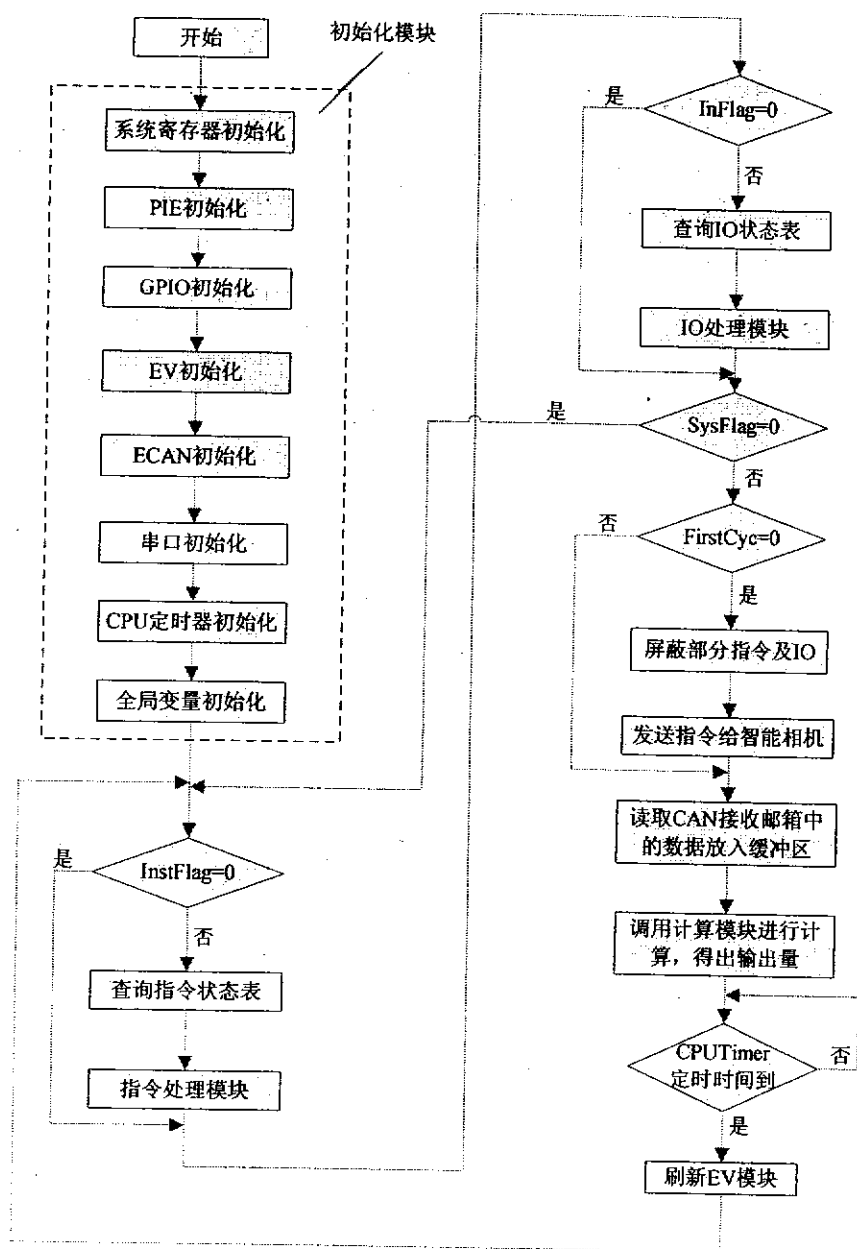


图 5-11 下位机软件流程图

Fig 5-11 Flow chart of lower computer software

图中可以看出,下位机软件系统的各个模块以子程序或中断服务子程序的形式,在主程序的流程控制下,进行协调工作。各个模块的具体功能如下:

(1) 初始化模块 主要负责在主程序的工作循环开始前, 通过调用子程序的形式, 对全局变量和所用到的内部资源的相关寄存器进行初始化设置, 使系统按要求的初始状态开始工作。

(2) 串行通信模块 它由两个子模块组成: 接收子程序模块以中断服务子程序的形式接收上位机发送的各种命令以及控制参数; 发送子程序模块向上位机发送错误指令, 以函数的形式, 通过主程序的调用进行工作。

(3) CAN 通信模块 CAN 通信模块主要完成的功能是以中断的方式接收图像处理单元处理后的定位数据, 接收到的数据是跟踪控制器进行跟踪控制的依据。

(4) 超前偏差控制模块 超前偏差控制模块的主要功能是应用从 CAN 通信模块接收到的定位数据, 运用超前偏差跟踪公式进行计算, 并转换为控制伺服电机所需要的脉冲个数, 从而通过伺服驱动器控制伺服电机完成跟踪。

(5) 指令处理模块 指令处理模块主要完成的任务是首先接收上位机传送来的命令及参数信息, 然后根据接收到的数据进行响应处理。若接收到的是一条命令, 则执行命令; 若接收到的是一个参数数值, 则刷新相应的参数。

(6) IO 处理模块 IO 处理模块用来实现控制器与 PLC 等外部逻辑设备的信息交互。控制器根据不同的 IO 指令执行相应的操作。

在本设计中, 整个下位机系统软件采用 C 语言编写, 编辑、编译和仿真环境是 TI 公司的 C2000 软件及配套的仿真器。

5.3 焊缝跟踪系统实时性及精度分析

系统的实时性是指系统必须在有限的时间内对外部输入信号完成指定的处理, 即信号处理的速度必须大于或等于信号更新的速度, 而且从信号输入到信号经过处理后信号输出的延迟足够小。为了达到实时性的要求, 需要对系统进行合理的配置。实时性是焊缝跟踪系统的一个重要指标, 满足跟踪系统的实时性是高质量焊接的有效保证。

本节对激光拼焊焊缝跟踪系统生产实际要求作了阐述, 并详细给出了影响实时性及精度的各因素。

5.3.1 激光拼焊焊缝跟踪系统要求

激光拼焊焊缝跟踪系统达到的技术性能, 主要应该满足在实际焊接环境下焊接质量的需要, 达到下述的技术要求:

- (1) 适于激光拼焊的各种工件厚度及坡口型式;
- (2) 可跟踪焊缝间隙为 0-2mm, 水平方向执行机构调节量为 $\pm 15\text{mm}$, 竖直方向执行机构调节量为 $\pm 15\text{mm}$, 执行机构具有自动回零功能;
- (3) 系统的实时性好, 可以满足激光拼焊的速度要求, 激光拼焊速度可以达到

10m/min;

(4) 系统的精度高, 可以满足激光拼焊高精度要求, 激光拼焊定位精度为 $50\mu\text{m}$ - $100\mu\text{m}$;

(5) 系统的耐用性及抗干扰性好, 可以在现场焊接环境下应用;

(6) 系统操作简单, 维修方便, 实用可靠, 性价比高。

5.3.2 系统实时性分析

系统实时性的影响因素包括图像采集时间、图像传输时间、图像处理时间、跟踪运动伺服控制周期等因素。

图像采集时间: 图像的实时采集, 直接决定着整个系统能否达到实时处理, 也是系统实现实时性的前提。相对于系统对时间参数的要求来看, 该部分在内部硬件结构搭配确定后, 可以通过采集图像幅面及曝光时间来决定采集时间, 本系统图像采集频率可以达到 150-200Hz。

图像传输时间: 摄像机同上位机的数据传输采用以太网, 同运动控制 DSP 的数据传输采用 CAN 总线, 速率分别为 10/100M 和 1M 的传输速度, 可以满足数据传输要求, 传输时间相对于图像采集时间等可以忽略不计。

图像处理时间: 焊缝跟踪过程中采集获取的图像信息数据量大, 而且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, 耗费时间会非常大, 如果仅仅从每个运行周期角度来看, 这一部分将是系统实时性能否达到的一个关键, 也就是说影响焊缝跟踪系统实时性的瓶颈是图像数据处理部分。为了有效地提高图像处理时间, 需要系统从硬、软件两方面来采取措施, 通过采用专用的图像处理硬件并结合实时图像处理算法来提高图像处理时间, 实验验证, 本系统的图像采集处理时间总和小于 10ms, 可以满足激光焊接的速度要求。

跟踪伺服控制周期: 要提高整个系统的运行速度, 就需要根据具体的速度及相应的跟踪精度要求来规定每个控制过程周期的运行时间, 同时还要考虑跟踪计算机控制周期和传感器采集和传输周期的节拍同步。

5.3.3 系统精度分析

系统精度主要包括传感器精度、图像传输精度、跟踪控制系统精度及机械系统精度几部分组成, 前面已经详细论述了传感器精度影响因素, 这里主要对后面几种精度进行分析。

图像传输精度: 摄像机通过以太网将数据信息传输给监控单元, 传输的数据为图像信息, 数据量较大, 包括焊缝形状的像素点图像、特征点、计算出的焊缝间隙/高度等参数, 因此, 数据传输将会有一定的延时。考虑到传输的图像仅仅是用于监控单元的跟踪过程显示, 因此延时带来的误差不会对跟踪系统伺服运动控制造成影响。

摄像机通过 CAN 总线将焊炬偏差信息传输给运动控制单元, 如果这些跟踪点的位置与运动控制单元的时间节拍不同步或者丢步, 那么形成的跟踪轨迹曲线将因此而产生跟踪曲线误差。因此如何使跟踪系统设计的运动控制节拍和图像采集系统节拍同步是系统设计的关键问题。

跟踪控制系统精度: 包括轨迹处理算法精度、跟踪轨迹规划算法精度、控制器硬件精度。轨迹处理算法精度即跟踪点的滤波算法精度, 会将干扰点滤掉, 提高系统的精度, 基本不会带来误差。跟踪轨迹速度规划算法精度, 在确定了最终的跟踪轨迹曲线之后, 需要对跟踪位移在单周期范围内进行加速减速的速度规划, 或者经过二次取点进行多个周期的合并运动控制。二次采样的频率决定规划的精度, 跟踪的精度取决于二次取点的算法, 采用平均法时, 跟踪位置为两点 (或者多点) 位置的均值。控制器硬件精度中, 由硬件产生定时时钟, 误差可以忽略。同时为减小位置控制过程中的误差需要采取必要的减小干扰的措施, 如光电隔离、远离强电信号等。

机械系统精度: 包括驱动系统伺服电机精度、传动系统精度、热变形误差等, 包含电机、带传动、丝杠、温度等多种影响因素。

5.4 本章小结

本章首先探讨了焊缝跟踪系统超前偏差检测问题, 其次分析了跟踪过程中运动控制节拍和图像采集处理节拍的同步问题, 通过设定定时器、计时器实现节拍同步; 之后, 针对激光拼焊过程中焊缝跟踪控制的特点, 建立了基于图像处理的焊缝跟踪系统控制模型, 设计了模糊控制器, 以实现跟踪过程中的偏差跟踪控制; 最后介绍了焊缝跟踪实验系统的软硬件组成, 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实时性及精度分析。

第6章 机器人激光拼焊视觉跟踪补偿方法研究

激光拼焊作为一门先进的焊接技术被广泛应用于航空、航天、兵器、舰船、石化、汽车等行业。同传统弧焊焊接方式比较,它具有以下特点:首先,速度快,目前使用 4kW 的激光器焊接 1 mm 厚的板材焊接速度高达 20 m/min,而电弧焊接速度一般不超过 0.3-3m/min;其次,焊接精度高,焊接定位精度为 50-100 μ m,远高于电弧焊的焊接精度;另外,激光拼焊的非接触、变形极小的特点优于电弧焊接,非常适合大量且连续的在线加工。为了满足激光拼焊的焊接精度要求,当采用直角坐标机器人进行长直焊缝、多组焊缝激光焊接以及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。焊缝跟踪补偿方法的研究是焊缝视觉跟踪系统有效地应用到机器人激光拼焊中一个亟待解决的技术难题,是确保高质量高精度激光拼焊的关键。

本章首先分析了机器人激光拼焊过程中焊接精度的影响因素,之后实验分析了多关节式机器人的运动轨迹精度,并结合系统工作的特点,对不同形状的焊缝分别探讨了跟踪补偿方法,进行了跟踪补偿实验。在实验过程中,根据同轴视觉传感,本文提出了一种新的基于同轴视觉传感的焊缝跟踪补偿方法,该方法通过获取激光焊点处的引导光斑图像,可以直接修正机器人轨迹偏差,在焊接过程中结合跟踪系统获取信息,可以实现激光拼焊过程中的误差跟踪补偿,满足了系统应用的便捷性。仿真实验验证了该方法的有效性。

6.1 基于焊缝跟踪的激光焊接实验平台构建

6.1.1 焊缝视觉跟踪系统设计

焊缝视觉跟踪系统主要包括智能传感单元、运动控制单元、监控单元及水冷单元等组成部分,如图 6-1 所示。智能传感单元由线性结构光传感器及智能图像处理单元组成,其中,线性结构光传感器包括半导体激光器、摄像机、光片组,可以实现激光条纹的获取;智能图像处理单元由 FPGA(Field program Gate Array)和图像处理 DSP 组成,主要完成对激光条纹图像的预处理,条纹中心线的提取及特征点的识别。图像处理获得的特征点信息在传递给运动控制单元的运动控制 DSP 后,转换为控制信息,控制二维跟踪执行机构,实现焊缝跟踪控制。运动控制 DSP 通过 I/O 口与上位控制 PLC 实现通信,通过串口与监控单元进行通信,跟踪画面在监控单元实时显示。水冷系统负责进行线性结构光传感器的冷却,以确保传感器在高温焊接过程中安全工作。

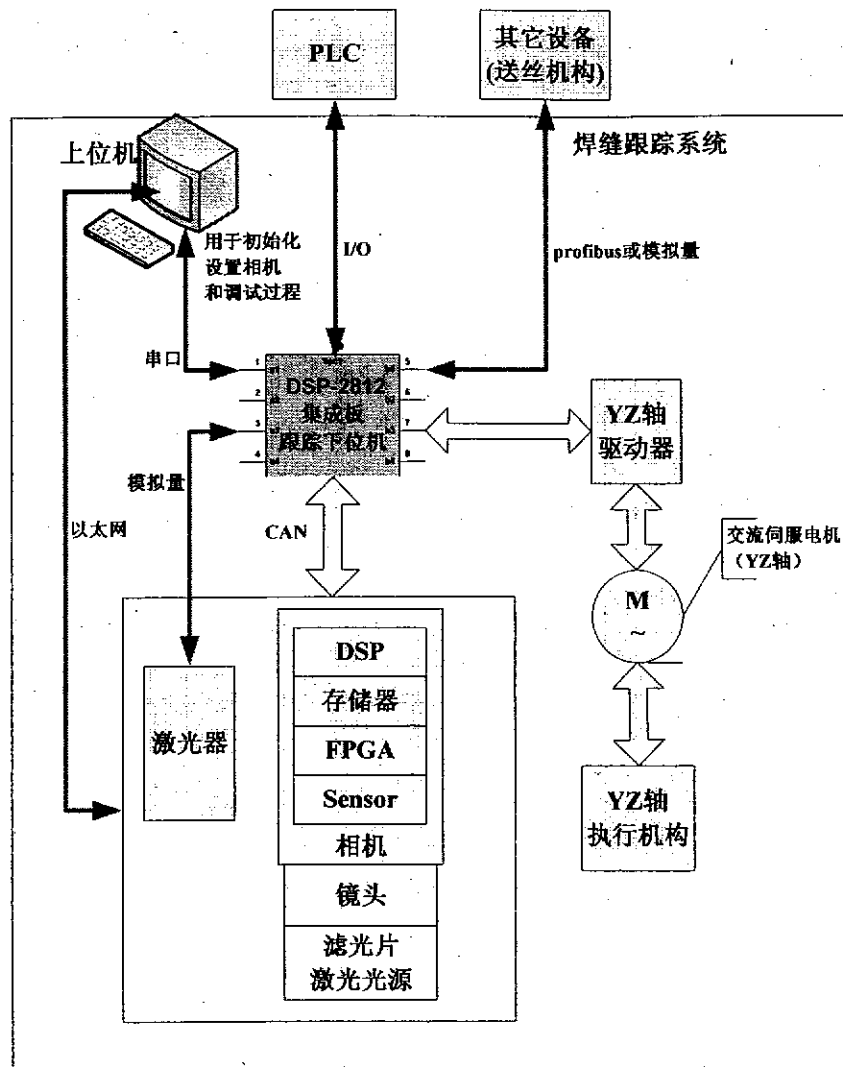


图 6-1 焊缝跟踪系统

Fig 6-1 Seam tracking system

6.1.2 基于焊缝跟踪的激光拼焊实验平台设计与实现

通过对应用于激光拼焊的焊缝跟踪系统进行需求分析，本节设计了具有焊缝识别与焊缝跟踪功能的激光拼焊实验平台。其硬件由上位机 PLC 控制器、机器人控制器、机器人本体、焊缝跟踪系统、激光器、激光焊接头、冷水机、送丝机、夹具及辅助设备、远程控制计算机等组成，如图 6-2 所示。其中机器人可以采用多关节机器人或者直角坐标机器人。

按照功能的不同，可以将系统硬件归结为视觉系统、机器人系统、焊接系统、辅助系统。机器人系统由机器人控制器及机器人本体组成，多关节式机器人选用 ABB-R4400 工业机器人；直角坐标机器人选用日本 HIRATA GR1800A 机器人。视觉系统如前文所述。焊接系统包括激光器、激光焊接头、冷水机、送丝机。辅助系统由夹具及辅助设备、远程控制计算机等组成，图 6-3 为基于多关节式机器人的激

光拼焊实验系统。

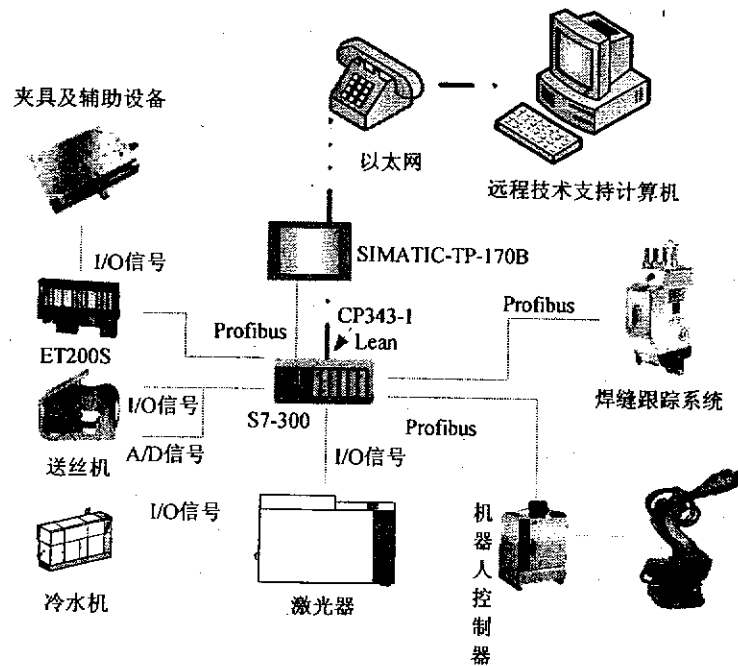


图 6-2 基于焊缝视觉跟踪的激光焊接实验平台

Fig 6-2 Laser tailored blank welding system based on visual seam tracking

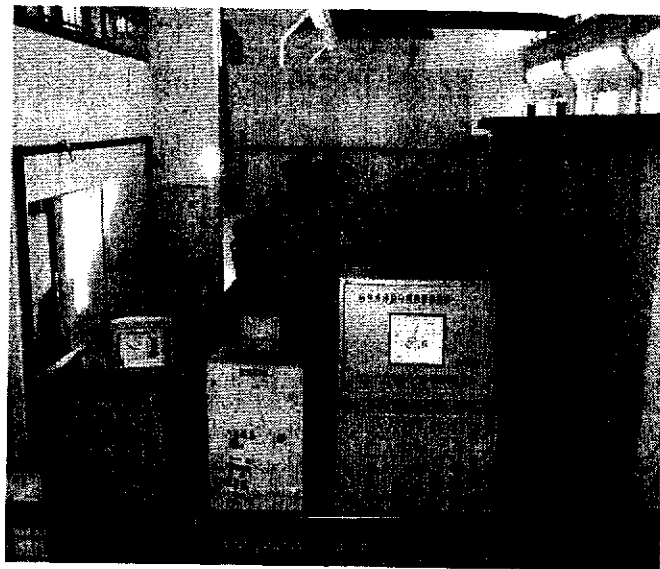


图 6-3 基于工业机器人的激光焊接实验系统

Fig 6-3 Laser welding system based on industrial robot

按照控制结构分为三层，包括人机交互层、上位控制层及下位控制层，如图 6-4 所示。

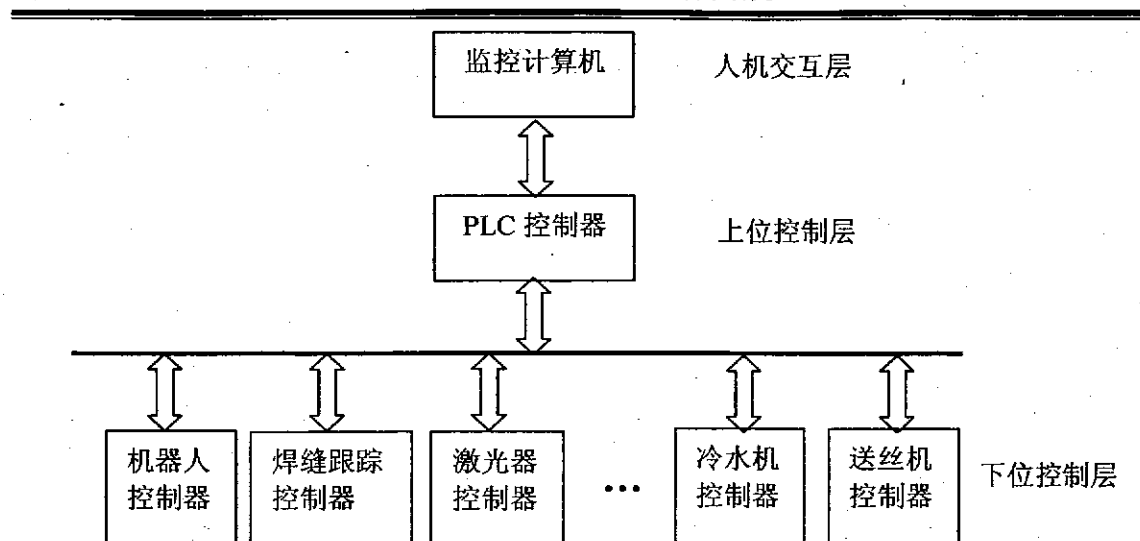


图 6-4 控制系统结构

Fig 6-4 Structure of control system

6.2 激光拼焊焊缝视觉跟踪补偿

激光拼焊过程中影响精度的因素主要包括焊接机器人精度、夹具精度、焊接过程热变形、板材精度、焊缝形状等。这些因素导致焊接过程中机器人焊炬实际焊接位置与焊缝中心位置之间产生焊接偏差，为了保证焊接质量，需要通过焊缝跟踪来补偿偏差值。

直角坐标机器人的控制单元多采用数控单元，位置精度高。在短直焊缝焊接过程中，直角坐标机器人可以满足焊接要求；在长直焊缝焊接、曲线焊接以及多组焊焊接过程中，由于夹具精度、板材精度、焊缝形状等因素的影响，会产生焊接偏差，需要进行跟踪补偿。

在多关节式机器人激光拼焊中，除考虑夹具精度、板材精度、焊缝形状等因素影响之外，还需要考虑焊接机器人的精度影响，因此在示教之后需要进行误差跟踪补偿。本节主要讨论如何应用多关节式机器人进行激光拼焊，之后针对不同形状的焊缝分别给出了跟踪补偿方法。

6.2.1 工业机器人运动轨迹精度分析

工业机器人的重要性能评估指标为机器人绝对位姿精度(又称静态精度)和绝对轨迹精度(又称动态精度)。在机器人焊接过程中，为了满足焊接精度要求，要求焊枪实时精确地沿焊缝运动，因此，运动过程中速度的稳定性和轨迹精度尤为重要。另外，由于焊枪的姿态对焊缝质量也有一定影响，因此希望在焊枪沿焊缝运动的同时，焊枪姿态的可调范围也要尽量大。

本文中的激光焊接实验采用的多关节式机器人为 ABB 公司的 IRB4400 机器人，速度稳定性可以保证，这里主要考虑机器人的轨迹精度以及轨迹重复精度是

否满足激光焊接精度的问题。首先,建立机器人焊炬坐标系,即 TCP(Tool Center Position)坐标系,如图 6-5 所示。

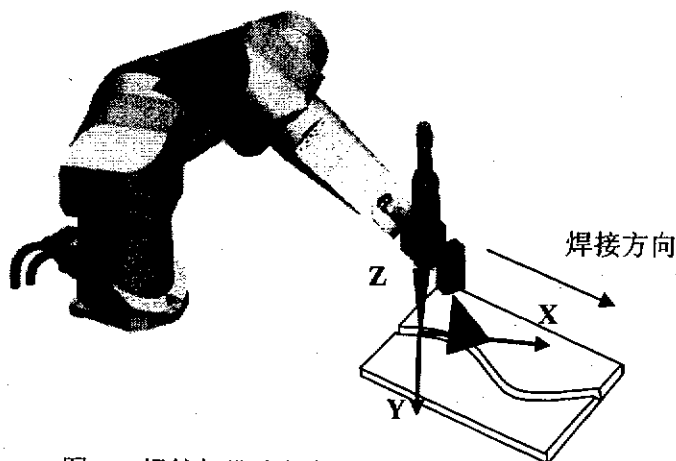
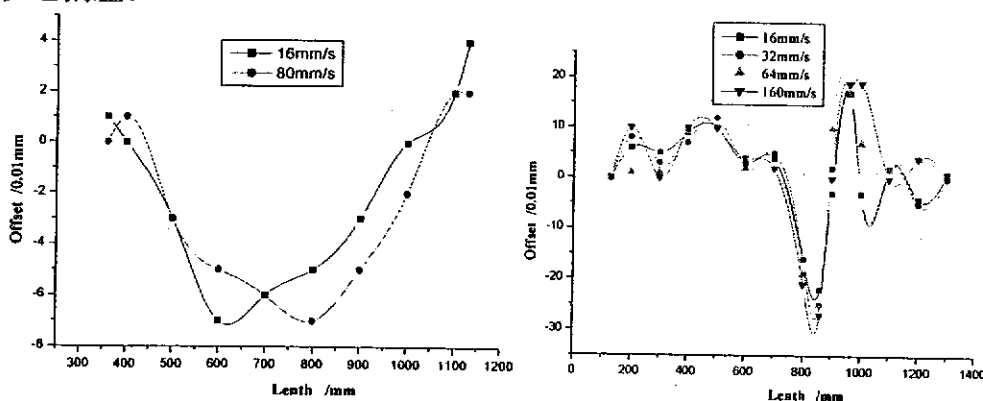


图 6-5 焊接机器人焊炬坐标系

Fig 6-5 Tool coordinate of welding robot

坐标系建立过程如下:坐标系的原点取在 YAG 激光焊炬的焦点位置,对于直线焊缝, X 方向沿焊缝方向,即焊接方向, Y 方向为焊缝所在工件平面上垂直于焊缝的方向, Z 方向垂直于工件平面竖直向上;对于曲线焊缝, X 方向为沿焊接方向 TCP 所在焊接位置的切线方向, Y 的方向为工件平面上垂直于该切线的方向, Z 方向垂直于工件平面竖直向上。

之后,实验获取不同速度下机器人 TCP 运动轨迹偏差,如图 6-6 所示,为机器人负载 20Kg 时, TCP 以不同速度沿 X 方向运动时,在 Z 方向和在 Y 方向上的运动轨迹偏差。



(a) TCP 沿 X 向运动时在 Z 向的轨迹偏移 (b) TCP 沿 X 向运动时在 Y 向的轨迹偏移

图 6-6 不同速度下, TCP 沿 X 向运动时在 Z/Y 方向的轨迹偏移

Fig 6-6 Route deviation of TCP when it moves along X direction in different velocity

由实验数据可以得出,当机器人沿 X 方向运动时,在 Z 方向上的运动轨迹偏差较 Y 方向上的运动轨迹偏差小;机器人在运动路径中部的偏差和波动较大;重

复运动时, 机器人运动路径具有较好的重复性; 在低速运动条件下, 速度对运动轨迹的影响很小。本文以 Y 方向上的运动轨迹偏差为例, 讨论当机器人沿 X 方向运动时, 在 Y 方向上的轨迹偏差补偿。

在焊接区域, 机器人末端安装焊枪及视觉跟踪装置, 此时负载为 40Kg, 实验获取在焊接路径上, 当 TCP 以不同速度沿 X 方向运动时, 在 Y 方向上的运动轨迹偏差, 如图 6-7 所示。

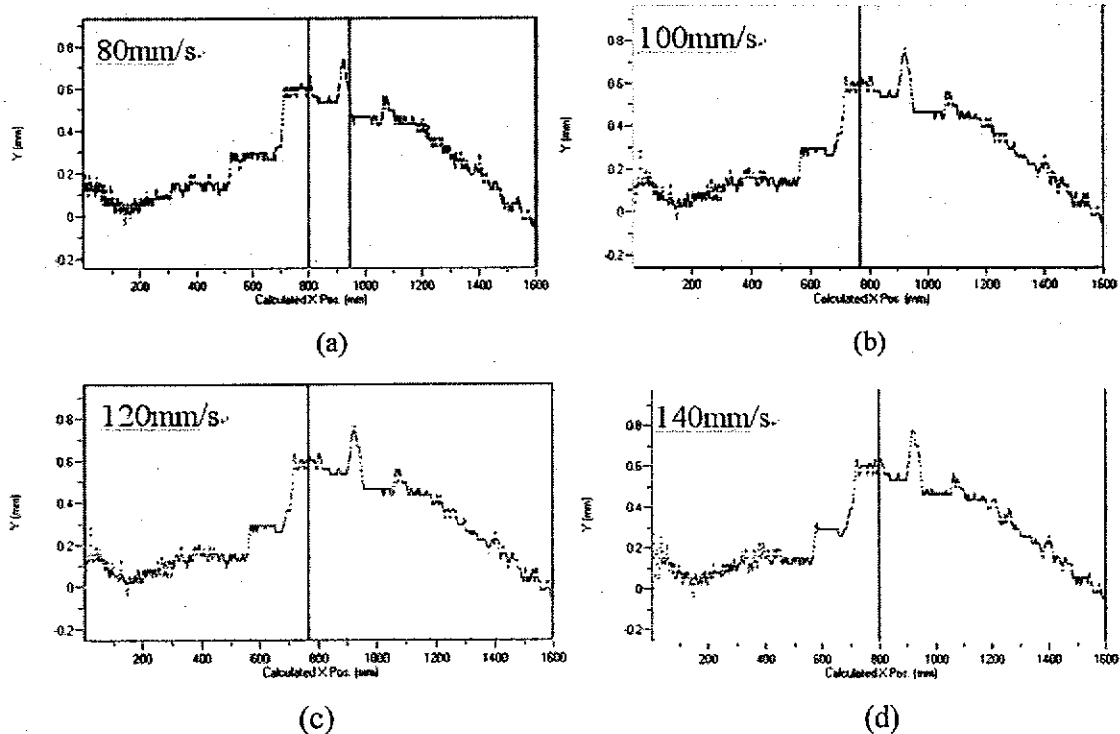


图 6-7 不同速度下, TCP 沿 X 向运动时在 Y 向的轨迹偏移

Fig 6-7 Route deviation of TCP in Y direction when it moves along X direction in different velocity

由实验数据可以得出, 机器人轨迹偏差主要为阶跃式和抖动式, 阶跃式如图 6-7(a)所示, 抖动式如图 6-7(b~d); 重复运动时, 机器人运动路径具有较好的重复性。

6.2.2 焊缝视觉跟踪误差补偿

6.2.2.1 直线焊缝误差跟踪补偿

分析直线焊缝误差补偿, 首先需要建立直线焊缝误差模型。由于焊接过程中误差数值的不可预知性, 选取其中一段直线焊缝建立误差补偿示意模型, 如图 6-8 所示, 建立过程如下: 图中直线 AB 表示理想直线焊缝, 虚线表示实际焊缝, 由于板材精度、定位夹紧精度的影响, 实际焊缝会和理想焊缝存在一个偏差。机器人示教点在实际焊缝上选取, 由于机器人在各示教点之间的运动轨迹是通过示教点

插值形成的以及机器人的轨迹精度影响, 机器人运动轨迹同实际焊缝存在偏差。图中双点划线表示机器人实际运动轨迹, 机器人运动轨迹同实际焊缝的偏差为 Δ_{L1} 。图中点划线表示焊接过程中的焊缝, 焊接过程中的热变形以及由此引起的定位夹紧装置误差会使焊接过程中的焊缝偏离实际焊缝 Δ_{L3} , 而机器人运动轨迹同焊接过程中的焊缝存在偏差 Δ_{L2} 。

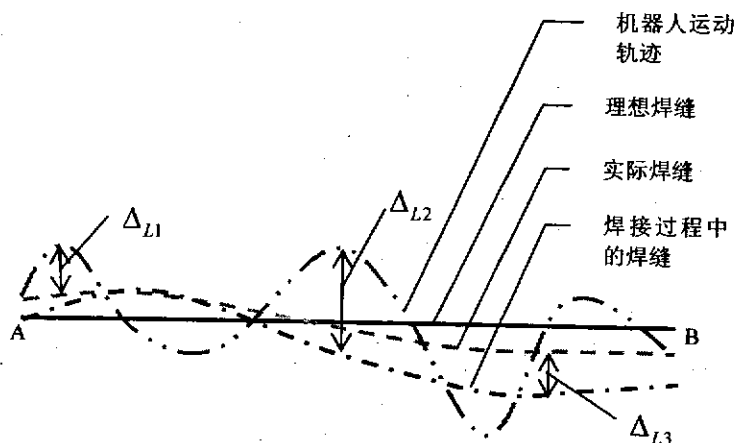


图 6-8 直线焊缝误差补偿示意图

Fig 6-8 Error compensation of straight bead

对直线焊缝跟踪补偿过程中, 首先对机器人示教, YAG 激光焊炬的焦点设为机器人的 TCP 点位置, 示教点的选取如图 6-9 所示; 之后开启视觉跟踪系统, 机器人沿示教轨迹运动, 记录下机器人运动轨迹同实际焊缝的偏差 Δ_{L1} 。由于直线焊缝焊接过程中, 机器人轨迹重复精度高, 虽然存在前视距离, 但在前视距离获得的跟踪偏差 Δ_{L1} 可以直接用于对焊炬焊接点即 TCP 位置的轨迹偏差补偿, 所以可以直接通过偏差 Δ_{L1} 补偿机器人抖动产生的轨迹偏差。焊接过程中, 在补偿偏差的同时启动焊缝视觉跟踪传感器, 由焊缝跟踪装置补偿偏差 Δ_{L3} , 最终实现机器人运动轨迹同焊接过程中的焊缝的偏差补偿, 即 $\Delta_{L2} = \Delta_{L1} + \Delta_{L3}$ 。

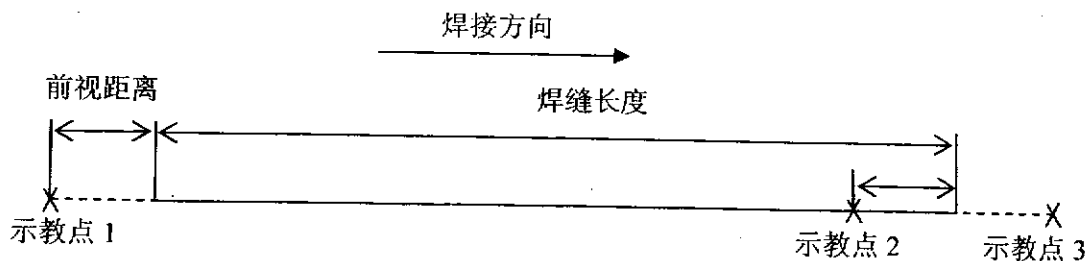


图 6-9 直线焊缝示教点

Fig 6-9 Teach points of straight bead

直线焊缝视觉跟踪补偿实验中, 直线焊缝长度为 1600mm, 焊接速度为 7.2m/min, 焊接功率为 4Kw, 板材厚度分别为 0.7mm 和 1.5mm。焊接结果如图 6-10

所示, 质量良好。



图 6-10 直线焊缝焊接结果

Fig 6-10 Weld result of straight bead

6.2.2.2 曲线焊缝误差跟踪补偿

曲线焊缝跟踪原理与直线焊缝跟踪原理类似, 建立曲线焊缝跟踪示意图, 如图 6-11 所示。图中曲线由两段直线和一段圆弧构成, 1~6 为激光焊接前机器人焊接轨迹上的 6 个示教点。

对于曲线焊缝, 由于焊接过程中焊接机器人的末端姿态改变, 视觉传感器同焊炬之间的前视距离, 致使视觉传感器获得的机器人轨迹偏差不等于焊炬焊接点的轨迹偏差, 而焊接过程中的误差补偿实际是在补偿焊炬焊接点的轨迹偏差, 即补偿 TCP 的轨迹偏差。

因此, 对于曲线焊缝误差跟踪补偿方法步骤如下:

(1) 按曲线上设置好的示教点对机器人进行示教, 机器人的 TCP 点位置为 YAG 激光焊炬的焦点, 示教过程中, 确保焊炬垂直于工件表面, 同时保证焊缝一直处于视觉传感器的视场内, 并同结构光条纹垂直;

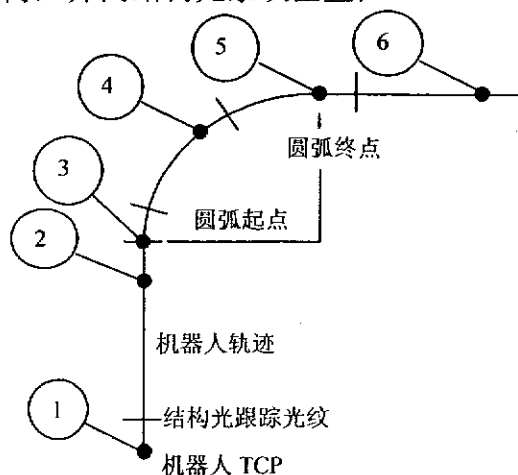


图 6-11 曲线焊缝示教点

Fig 6-11 Teach points of weld seam shaped curve

(2) 开启视觉跟踪系统, 机器人沿示教轨迹运动, 记录下前视位置下机器人运动轨迹同实际焊缝的偏差 $\Delta_{C1-ahead}$, 补偿示教轨迹, 生成补偿轨迹 1;

(3) 将视觉传感器的结构光移至 TCP 位置, 机器人按照补偿轨迹 1 运动, 由视觉传感器记录下 TCP 位置的机器人运动轨迹同实际焊缝的偏差 Δ_{C1-TCP} , 用以补偿步骤(2)中获得的补偿轨迹 1, 生成补偿轨迹 2;

(4) 在焊接过程中, 将视觉传感器的结构光移至前视距离位置, 使焊接机器人按照步骤(3)中的补偿轨迹 2 运动, 同时启用视觉焊缝跟踪系统, 由焊缝跟踪系统实时获得焊接过程中的焊缝偏离实际焊缝的偏差 Δ_{C3} , 设机器人运动轨迹同焊接过程中的焊缝存在偏差 Δ_{C2} , 最终实现机器人运动轨迹同焊接过程中的焊缝的偏差补偿, 即 $\Delta_{C2} = \Delta_{C1-ahead} + \Delta_{C1-TCP} + \Delta_{C3}$ 。

曲线焊缝视觉跟踪补偿实验中, 曲线形状如图 6-12 所示, 由两段直线和一段 1/4 圆弧组成, 圆弧半径为 167.5mm, 焊接速度为 4.8m/min, 焊接功率为 3.8Kw, 板材厚度分别为 1.6mm 和 2.5mm。焊接结果如图 6-13 所示, 焊接质量良好。

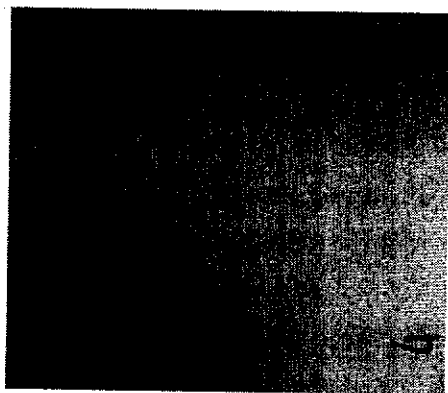


图 6-12 曲线焊缝

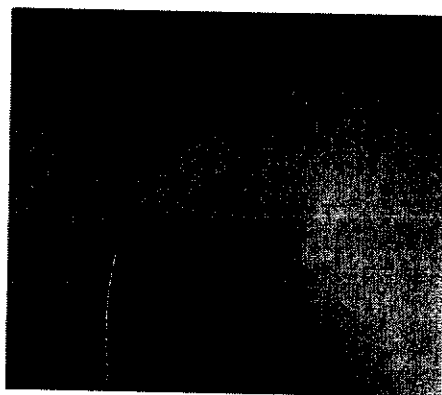


图 6-13 曲线焊缝焊接结果

Fig 6-12 Weld seam shaped curve

Fig 6-13 Weld result of Weld seam shaped curve

6.3 同轴视觉跟踪补偿方法及仿真实验

传统的同轴视觉图像传感是一种基于焊接过程辐射光信息的监测方法, 它是从熔池的正上方采集熔池的图像信息, 通过对所采集图像的处理、分析来对焊接熔池的状态进行判断, 从而实现对激光焊接过程的最直观、直接地监测。同轴视觉传感装置结构如图 6-14 所示。

在跟踪补偿实验中, 视觉传感装置获取的为前视距离处的偏差值, 而在焊缝跟踪补偿过程中, 尤其是曲线焊缝, 需要通过获取机器人 TCP 点处的偏差值来补偿机器人运动轨迹偏差, 因此, 就需要调节视觉传感装置, 将传感装置的结构光条纹移至 TCP 点处, 来获取 TCP 点处的机器人轨迹偏差。该操作比较复杂, 而同轴视觉传感获取的正是机器人 TCP 点处信息。不同于传统的同轴视觉传感, 用来获取焊接过程中的熔池信息, 本文通过同轴视觉传感直接获取示教后的机器人

TCP 点处激光引导光斑图像, 光斑的中心点即为激光焊炬的中心点, 通过计算焊炬中心点与焊缝的偏差值, 可以直接获得机器人的运动轨迹偏差, 之后在焊接过程中可以采用这一偏差直接对机器人运动轨迹进行补偿。

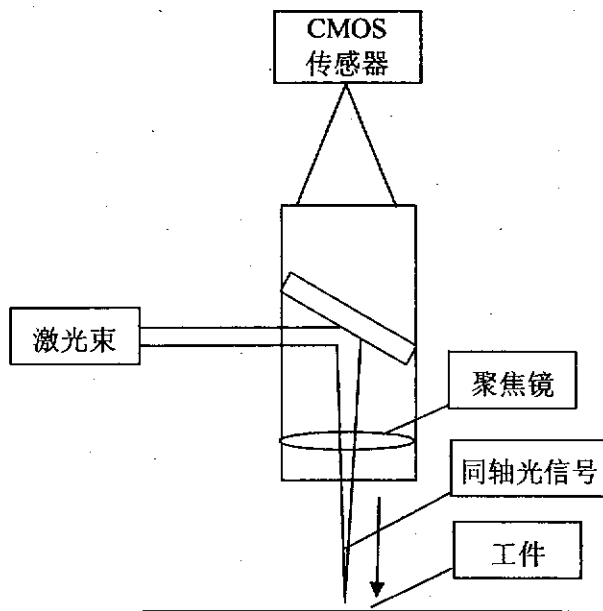


图 6-14 同轴视觉传感光路示意图

Fig 6-14 Schematic diagram of coaxial monitoring system

同轴视觉传感获取的激光引导光斑原始图像如图 6-15 所示, 经图像处理, 计算灰度投影 (光斑中心及焊缝分别为灰度最大最小值), 求得激光光斑中心同焊缝的偏差, 即为焊接机器人运动轨迹偏差 Δ , 如图 6-16 所示。

采用同轴视觉传感, 机器人激光拼焊焊缝误差跟踪补偿方法步骤如下:

- (1) 对工业机器人示教, YAG 激光焊炬的焦点设为机器人的 TCP 点位置;
- (2) 开启视觉跟踪系统及同轴视觉监测系统, 机器人沿示教轨迹运动, 同轴视觉系统获取激光引导光斑图像, 经图像处理, 求得激光引导光斑中心同焊缝的位置偏差 Δ , 即机器人 TCP 运动轨迹同实际焊缝的偏差;

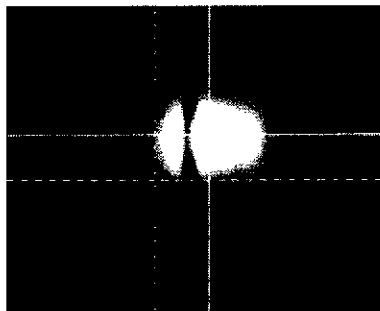


图 6-15 激光引导光斑原始图像

Fig 6-15 Raw image of laser spot

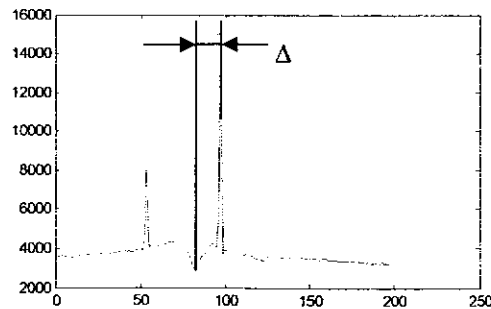


图 6-16 轨迹偏差 Δ

Fig 6-16 Route deviation Δ

- (3) 在焊接过程中, 根据求得的偏差直接补偿机器人抖动产生的轨迹偏差, 同

时可以通过同轴视觉监测跟踪补偿的结果,启动视觉焊缝跟踪传感器,由焊缝跟踪装置补偿焊接偏差,可以实现机器人运动轨迹同焊接过程中的实际焊缝的偏差补偿。

本文对该方法进行了仿真实验。首先对机器人进行示教,由于实验中对非等厚板材进行激光焊接,因此,示教时激光焊炬偏置于厚板方向,同焊缝中点设定一固定位置偏差 offset,之后机器人按照示教轨迹运动,通过同轴视觉传感记录下运动过程中的激光引导光斑图像,经过图像处理,得到激光引导光斑中心同焊缝的位置偏差 Δ ,即机器人 TCP 运动轨迹同实际焊缝的偏差,如图 6-17 所示。机器人再一次沿示教轨迹运动,采用获取的偏差值 Δ 补偿机器人运动轨迹偏差,获取补偿后的激光光斑图像,经图像处理获取此时机器人 TCP 运动轨迹同实际焊缝的偏差,如图 6-18 所示,可见依据同轴视觉传感获取的激光光斑图像,计算得到的偏差值可以较好地补偿机器人运动轨迹偏差。最后,引入焊接过程偏差,开启焊缝跟踪传感装置,由焊缝跟踪传感装置及同轴视觉传感共同进行焊接过程中的各种偏差补偿,如图 6-19 所示,可以较好地补偿焊接过程中的偏差。仿真实验验证依据同轴视觉传感可以有效地补偿机器人 TCP 运动轨迹偏差,结合视觉跟踪传感装置可以有效地对焊接过程中的各偏差进行补偿,效果良好。

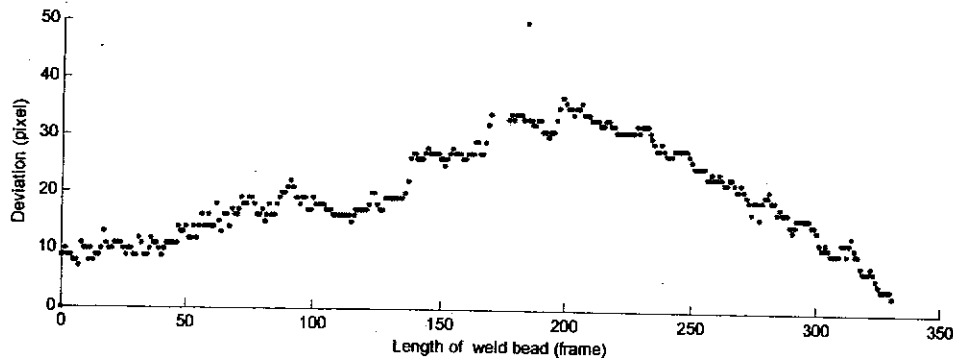


图 6-17 机器人运动轨迹偏差

Fig 6-17 Route deviation of robot

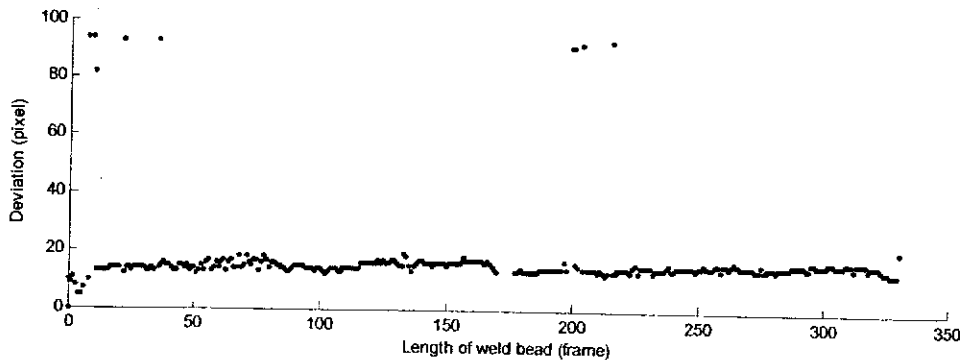


图 6-18 补偿后的激光光斑与焊缝中点的偏差

Fig 6-18 Deviation between laser spot and weld bead after deviation compensation

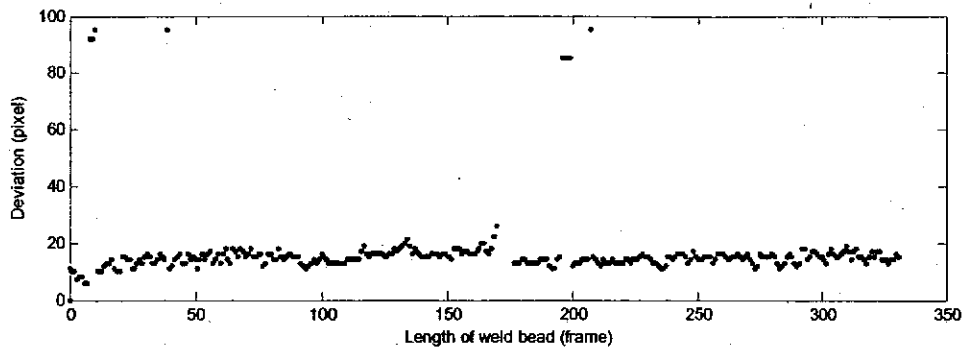


图 6-19 跟踪补偿后的激光光斑与焊缝中点的偏差

Fig 6-19 Deviation between laser spot and weld bead after deviation compensation and seam tracking

6.4 本章小结

本章分析了机器人激光焊接过程中焊接精度的影响因素，实验分析了多关节式机器人的轨迹精度，并结合系统工作的特点，对不同形状的焊缝分别探讨了跟踪补偿方法，进行了跟踪补偿实验，实验结果表明焊接质量良好。在实验过程中，根据同轴视觉传感原理，提出了一种新的基于同轴视觉传感的焊缝跟踪补偿方法，该方法通过获取激光焊点处的引导光斑图像，可以直接修正机器人轨迹偏差，在焊接过程中结合跟踪系统获取信息，可以实现激光焊接过程中的误差跟踪补偿，满足了系统应用的便捷性。仿真实验验证了该方法的有效性。

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,而焊缝视觉跟踪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,研制焊缝视觉跟踪系统,并将其应用于机器人激光焊接,实现焊接过程中的自动跟踪补偿,具有实际应用价值和重要研究意义。本文主要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,具体研究内容及取得的研究成果如下:

1. 依据线结构光视觉检测原理,建立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,之后给出了一种结构光视觉传感器优化设计方法,并针对两种具体结构方式分别建立数学模型,给出两种结构方式的优化解。

2. 针对激光拼焊过程中图像处理的特点,研究了基于二值数学形态学的焊缝跟踪结构光条纹中心线提取算法流程及激光拼焊焊缝特征点识别算法。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,图像采集处理时间小于 10ms,满足激光拼焊实时性要求。

3. 针对激光拼焊焊缝跟踪过程中小视场高精度的要求以及工业现场实际应用的便捷性要求,提出了一种新的线结构光视觉传感器直接标定方法。该方法可以满足激光拼焊焊缝跟踪过程中小视场高精度的应用要求,通过建立特征点图像坐标同空间三维坐标的直接映射关系,使得空间任一点的三维坐标均可由已知点插值得到,而不必对摄像机的内外参数和系统结构参数进行标定,可靠性高。实验表明该方法具有较高的标定精度,可以满足激光拼焊的精度要求;同时,该方法操作便捷,可以方便地应用于实际工业生产中,满足工业现场的实际应用需求。

4. 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,通过设定定时器、计时器实现节拍同步。针对激光焊接过程中焊缝跟踪控制的特点,建立基于图像的激光焊接焊缝跟踪系统控制模型,设计模糊控制器,来实现跟踪过程中的偏差跟踪控制,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。

5. 分析了机器人激光拼焊过程中焊接精度的影响因素,通过实验分析了机器