

基于视觉激光切割厚板切割状态监控方法

高士友¹ 马 雷² 张润生²

(¹燕山大学机械工程学院, 河北 秦皇岛 066004)
(²燕山大学车辆与能源学院, 河北 秦皇岛 066004)

摘要 利用光纤镜头和彩色工业摄像机实时采集激光切割厚板中切割点的图像,从彩色图像中分别选取蓝色、绿色和红色通道图像,分析各通道图像的特点和切割点的几何形状特征。首先以激光焦点在图像中的位置为中心建立坐标系,以 x 轴方向为起始,45°为间隔向 8 个方向搜索激光切割区域的边缘点,根据边缘点到坐标原点的距离信息确定激光切割方向和切割顶点;建立边缘识别用抛物线模型,根据边缘处存在灰度特征、梯度特征和方向特征设计识别目标函数,识别切割顶点两侧边缘,进而识别整个切割点处的几何形状。实验表明识别方法具有良好的适应性、准确性和实时性。

关键词 激光技术;激光切割;厚板;边缘识别;目标函数

中图分类号 O439 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201239.0203007

Method of Monitoring Cutting Point State in Laser Cutting Plank Process Based on Vision

Gao Shiyou¹ Ma Lei² Zhang Runsheng²

(¹College of Mechanical Engineering, Yanshan University, Qinhuangdao, Hebei 066004, China)
(²College of Vehicles and Energy, Yanshan University, Qinhuangdao, Hebei 066004, China)

Abstract Fiber of optical lens and color industrial video camera are used to capture image of cutting point in laser cutting process. Blue channel, green channel and red channel images are adopted to analyze cutting point geometry shape from color image. The position of laser beam focal point is used as origin of coordinates and the coordinate system is set up. The x axis is original direction and interval is 45 degree, the edge points of laser cutting region are searched from eight directions. According to distances from origin of coordinates to edge points, the laser cutting direction and cutting peak are fixed. Parabola model is set up, and the objective function is designed according to gray feature, gradient feature and direction feature, and the objective function is used to identify edge at bilateral cutting peak, and then cutting point geometry shape is identified. Test shows that the method has preferable adaptability, accuracy and real-time quality.

Key words laser technique; laser cutting; plank; edge identification; objective function

OCIS codes 100.5010; 100.2000; 350.3390; 100.2960; 110.2970

1 引 言

激光切割是激光技术的重要工业应用之一。激光切割厚板的物理过程十分复杂,工艺条件的微小变化(如:表面质量、化学成分、温度变化)将引起严重的切割质量问题。因此,在激光切割厚板时实时识别切割状态和自适应控制工艺参数对改进切割质

量和避免切割缺陷非常重要^[1~3]。

Sichani 等^[3]开发了激光切割的实时监控和自适应控制系统,确定了监测参数与不同质量特征之间的关系,用 25 mm 厚的 HARDOX-400 钢板和 15 mm 厚的 ST52-3 板的线性切割展示了实时监控和自适应控制系统的功能。Leidinger 等^[4]使用硅

收稿日期: 2011-09-28; 收到修改稿日期: 2011-11-13

基金项目: 国家重大科技专项(2009ZX04003-032)和国家自然科学基金(50871022)资助课题。

作者简介: 高士友(1958—),博士,教授,主要从事激光加工工程和塑性成形理论与工艺等方面的研究。

E-mail: gao58@sina.com

光电二极管监测激光切割过程,得出光电二极管信号的变化和平均值分别与挂渣和切口粗糙度有很好的相关性。Huang 等^[5]采用光电二极管和 CCD 相机开发了激光切割的智能自适应控制系统,光电二极管监测切口处的光辐射,CCD 相机监测切口底部的锥形火花,建立了锥形火花形状变化与切割质量的关系。Kaebnick 等^[6]开发了激光切割的自适应控制系统,使用了包括光电二极管和硒化锌(ZnSe)二色性透镜的监测系统。Schulz 等^[7]开发了通用的工艺控制系统,即可以装配不同传感器(CCD 相机、光电二极管)的模块化系统,以监测不同的激光制造工艺,并且集成一个高速 CCD 相机到该系统来监测激光切割工艺,得到了切缝和缺陷图像。Sheng 等^[8]提出识别激光切割过程的声音,开发了激光切割时光束穿透监控系统。Danisman 等^[9,10]使用朗缪尔探针检测激光切割中的电子温度和等离子流,发现在高电子温度和低电子密度时切割质量得到改善,等离子体形貌反映了切割质量。李淑玉等^[11]采用 YAG 激光器切割自动流量平衡阀过流曲线,以切缝宽度、切口表面粗糙度和熔渣量作为衡量指标,研究了输出电流、扫描速度、焦点位置、辅助气体种类和压力对过流曲线和切割质量的影响。基于光电二极管的监控系统具有短的反应时间和快的信号处理能力;基于 CCD 相机的监控系统能够提供丰富的信息,获得更加优化的工艺控制能力。

本文利用光纤镜头和彩色工业摄像机实时采集激光切割厚板中切割点的图像,从彩色图像中分别选取蓝色、绿色和红色通道图像,分析各通道图像的特点和几何形状特征,为激光切割厚板的自适应控制系统提供具有良好的适应性、准确性和实时性的识别方法。

2 激光切割状态图像分析

试验用功率为 4 kW 的 CO₂ 激光器,利用氧气辅助切割,气体压力为 2.5 kg/cm²,切割速度为 70 mm/min,焦距为 180 mm,焦点半径为 0.5 mm,焦点距离切割的板面 1 mm。监控系统包括光纤镜头、彩色工业摄像机(CCD)和工控机。实验采用厚度为 15 mm 碳钢板材。镜头视场为 10 mm×10 mm,采集图像为 RGB 彩色图像,大小为 640 pixel×512 pixel。为了充分利用图像中彩色信息分析激光切割状态,从彩色图像中分别选取蓝色通道、绿色通道和红色通道生成各自通道图像,图像为 8 位灰度图像,其灰度值在 0~255 之间,其结果如图 1 所示(彩图请见网

络电子版)。图 1 中箭头形状部分为激光切割点,下面白色部分为已完成切割部分的状态。蓝色、绿色和红色通道图像中激光切割区域大小、几何形状与彩色图像存在一定的差异,这些差异反应了激光切割的不同特征。

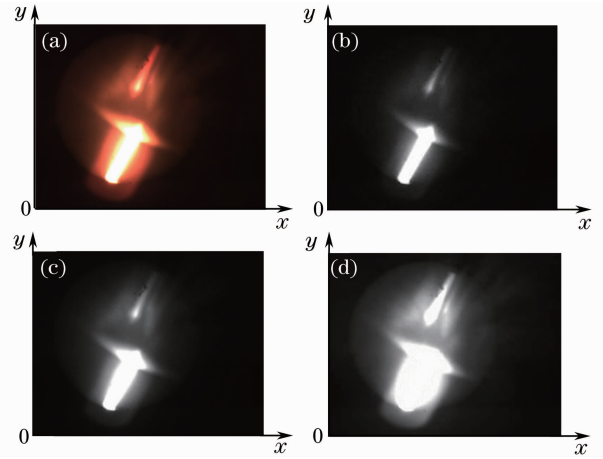


图 1 激光切割状态图像。(a)彩色正像;(b)蓝色通道;(c)绿色通道;(d)红色通道
Fig. 1 Image of laser cutting state. (a) Chromogram; (b) blue channel image; (c) green channel image; (d) red channel image

切口具有 3 种热力学状态^[12]:切缝、切缝边缘、热影响区,分区情况如图 2 所示。切缝处金属产生气化现象,切缝边缘金属为液态,热影响区金属为高温固态。图 1 中蓝色通道图像的区域最小,与切缝相对应,其边缘处纹理反应切缝的表面质量和边缘处是否挂渣;绿色通道图像的区域比蓝色通道的稍大一些,与切缝边缘相对应;红色通道图像的区域最大,其反应了热影响区的状态。彩色图像中由白色变至红色反应了激光切割切口的状态。通过实时识别图像的几何特征,可以判定当前切割状态,从而判定切割质量。图 2 中, $z=0$ 为切割板材的上表面, $z=1$ 为下表面; $x=0$ 为激光束轴线, $x=X_A$ 为下表

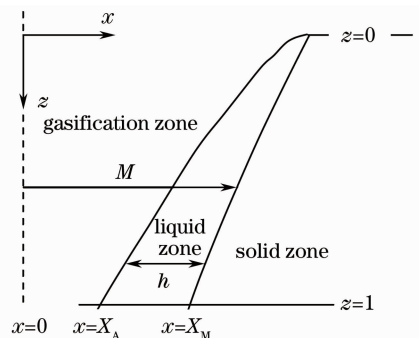


图 2 激光切割状态示意图

Fig. 2 Schematic diagram of laser cutting state

面气化区边界, $x = X_M$ 为液体区边界, M 为切缝最大宽度, h 为液体区宽度。

3 激光切割方向与切割点顶点识别方法

由于激光切割设备采用可编程序控制器(PLC)控制, 机床在工作时无法向监控系统提供设备进给方向, 因此监控系统首先应判定激光切割方向。下面以蓝色通道图像为例说明切割方向识别方法, 其他通道图像与其相同。由于光纤镜头安装在激光切割头上, 因此在图像中激光焦点位置是固定的, 以激光焦点为中心, 按水平、垂直、 45° 、 135° 、 225° 和 315° 8 个方向由内向外寻找切割区域边缘点, 为了减小图像中个别野点对搜索的干扰, 对每个待搜索点进行均值滤波处理, 其模板如图 3 所示。图 3 为 $3 \text{ pixel} \times 3 \text{ pixel}$ 模板, 黑色像素表示被判断点, 计算被判断点 (x, y) 处统计小块的灰度均值可表示为

$$M(x, y) = \frac{\sum_{m=-1, n=-1}^{m=1, n=1} Z(x+m, y+n)}{9}, \quad (1)$$

式中 $M(x, y)$ 为 (x, y) 点处的统计小块内部灰度均值; $Z(x+m, y+n)$ 为坐标 $(x+m, y+n)$ 处的灰度值。通过分析图像, 在激光切割区域边缘处像素值为 210 pixel 左右, 因此采用阈值为 210 pixel, 由激光焦点向外搜索, 当判断点 $M(x, y) < 210 \text{ pixel}$ 时即认为该点为边缘点, 搜索结果如图 4 所示, 图像中坐标原点为激光焦点。

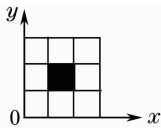


图 3 均值滤波模板

Fig. 3 Template of averaging filtering

图 4 中黑点为各个方向激光切割区域边缘点位置, 分别用 1~8 表示。分析图中水平和垂直方向激光焦点到切割区域边缘的距离, 可得到这 4 个边缘点与激光焦点距离最小的为激光切割进给大致方向, 距离第二小边缘点、距离最小边缘点与激光焦点组成的区域存在激光切割点顶点的概率最大; 距离第三小边缘点、距离最小边缘点与激光焦点组成的区域存在激光切割点顶点的概率次之。以图 4(a) 说明激光切割点顶点的识别方法, 首先利用边缘点 2 和边缘点 7 在图像中的坐标求经过两点的直线斜率 k 与 y 轴的交点坐标。然后以步长为 1 沿 y 轴正

向按斜率 k 做直线进行搜索, 判定该直线中经过均值滤波大于阈值 210 pixel 点的个数, 当满足阈值点的个数大于等于 1 且为最小值时, 该点即为激光切割点顶点坐标。

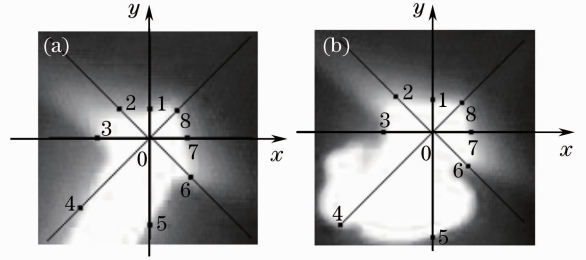


图 4 激光切割区域搜索结果。(a) 搜索图 1; (b) 搜索图 2

Fig. 4 Search result of laser cutting region. (a) Search graph one; (b) search graph two

4 激光切割点几何形状识别方法

4.1 边缘边界抛物线模型

根据图 4 可知, 激光切割点上部边缘纹理接近直线, 为了更准确拟合边缘形状, 这里采用抛物线拟合边缘, 抛物线模型可表示为

$$y_1 = a_1 x_1^2 + b_1 x_1 + c_1, \quad (2)$$

$$x_2 = a_2 y_2^2 + b_2 y_2 + c_2. \quad (3)$$

从(2)式和(3)式可以看出: 1) a_1 和 a_2 的值反映了抛物线的大致形状与弯曲程度。(2), (3)式能够统一表示直线边缘和弯曲边缘, 即当 $a_1 = a_2 = 0$ 时, 表示直线边缘; 当 $a_1 \neq 0, a_2 \neq 0$ 时, 表示边缘线为弧线; 2) 假设(2)式和(3)式中二次项是高阶无穷小, 即假定 $a_1 = a_2 = 0$, 方程简化为 $y_1 = b_1 x_1 + c_1$ 和 $x_2 = b_2 y_2 + c_2$, 因此 b_1 和 b_2 的值大致反映了在图 3 坐标系 x 轴和 y 轴上边缘边界的斜率。3) c_1 和 c_2 的值反映了边缘边界与 y 轴和 x 轴的交点坐标。由于直线斜率变化范围为 $[-\infty, +\infty]$, 不利于边缘拟合时对 b_1 和 b_2 的搜索, 为此, 当 $|b_1| \leq 1$ 时采用(2)式拟合边缘, 当 $|b_2| \leq 1$ 时采用(3)式拟合边缘。

4.2 边缘识别目标函数建立

目标函数是用来评价拟合质量的指标。在边缘一定范围内搜索到多条抛物线方程, 比较并找到目标函数值最大的一条作为边缘边界的拟合线。因此, 分析图像构建合适的目标函数是边缘识别的关键问题。如图 4 所示, 边缘的方向特征主要由曲线方程如(2)式和(3)式中的参数 b_1 和 b_2 决定; 边缘处与激光焦点之间存在较大灰度差异, 此为边缘的灰度特征; 边缘两侧的平均灰度间有明显差异, 即在

边缘的垂直方向上由边缘到非边缘存在明显的过渡,此为边缘的梯度特征。

4.2.1 边缘特征提取

边缘特征图如图 5 所示,每个特征单元为 $5 \text{ pixel} \times 5 \text{ pixel}$,特征图的中心黑色点为待识别点,灰色部分为子块方向,以 15° 为间隔分为 12 种情况,分别对应图 4(a)和(l),其中边缘(黑色和灰色)5 个像素,边缘两侧各 10 个像素,其分别大致对应着不

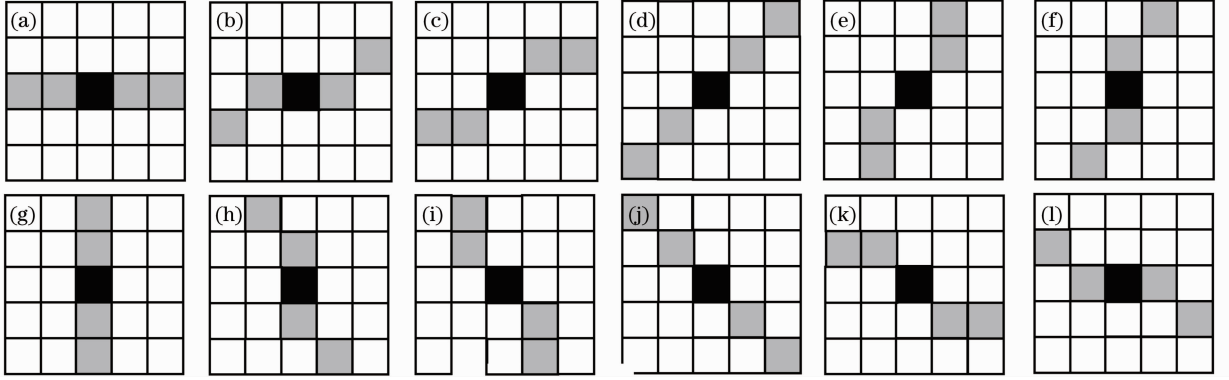


图 5 边界特征。(a) $b_{11}=0, b_{21}=0$;(b) $b_{12}=0.26, b_{22}=3.732$;(c) $b_{13}=0.26, b_{23}=1.732$;(d) $b_{14}=1, b_{24}=1$;(e) $b_{15}=1.732, b_{25}=0.577$;(f) $b_{16}=3.732, b_{26}=0.26$;(g) $b_{17}=0, b_{27}=0$;(h) $b_{18}=-3.732, b_{28}=-0.26$;(i) $b_{19}=-1.732, b_{29}=-0.577$;(j) $b_{1(10)}=-1, b_{2(10)}=-1$;(k) $b_{1(11)}=-0.577, b_{2(11)}=-1.732$;(l) $b_{1(12)}=-0.26, b_{2(12)}=-3.732$

Fig. 5 Boundary characteristic. (a) $b_{11}=0, b_{21}=0$;(b) $b_{12}=0.26, b_{22}=3.732$;(c) $b_{13}=0.26, b_{23}=1.732$;(d) $b_{14}=1, b_{24}=1$;(e) $b_{15}=1.732, b_{25}=0.577$;(f) $b_{16}=3.732, b_{26}=0.26$;(g) $b_{17}=0, b_{27}=0$;(h) $b_{18}=-3.732, b_{28}=-0.26$;(i) $b_{19}=-1.732, b_{29}=-0.577$;(j) $b_{1(10)}=-1, b_{2(10)}=-1$;(k) $b_{1(11)}=-0.577, b_{2(11)}=-1.732$;(l) $b_{1(12)}=-0.26, b_{2(12)}=-3.732$

$$h = \begin{cases} m_r - m_i, & m_r - m_i \leq 50 \\ 0, & m_r - m_i > 50 \end{cases} \quad (4)$$

式中 h 为特征单元灰度特征; m_i 为特征单元黑色点经(1)式滤波后的灰度值; m_r 为激光焦点灰度。梯度特征 g_i 是特征单元中边缘两侧像素灰度均值之差的绝对值,可表示为

$$g_j = |d_{j1} - d_{j2}| \quad (5)$$

式中 d_{j1} 和 d_{j2} 分别为特征单元边缘两侧的灰度均值。用(2)式和(3)式拟合边缘边界,式中参数 b_1 和 b_2 必在相邻特征单元 b_{ij} 与 $b_{i(j+1)}$ 中。边缘处梯度特征由相邻的特征单元 b_{ij} 与 $b_{i(j+1)}$ 的梯度特征值按 g_j 和 g_{j+1} 比例加权求得,这样可将方向特征融入最终的梯度特征计算中,待识别点梯度 t 可表示为

$$t = \left[\frac{b_i - b_{ij}}{b_{i(j+1)} - b_{ij}} \right] g_j + \left[\frac{b_{i(j+1)} - b_i}{b_{i(j+1)} - b_{ij}} \right] g_{j+1}, \quad (6)$$

式中 $b_i (i = 1, 2)$ 为待搜索抛物线参数。

4.2.2 目标函数确立与边缘识别

以图 4(a)为例说明切割点区域边缘识别过程,先将激光切割点顶点定为坐标系原点,根据顶点坐标、位置 2 点坐标 (x_2, y_2) 和位置 7 点坐标 (x_7, y_7)

同的 b_1 和 b_2 值。此 12 种特征单元分别用 $b_{ij} (i = 1, 2) (j = 1, \dots, 12)$ 表示。特征单元的灰度特征是激光焦点灰度与特征单元中黑色点经(1)式滤波后灰度值之差,根据采集实验图像可知,激光焦点处灰度通常为 254,边缘处灰度为 210 左右,为了消除图像中黑色部分对灰度特征提取的影响,灰度特征可计算为

利用式 $y = kx + b$ 分别计算顶点与位置 2 点和位置 7 点在坐标系中斜率;如果 $k \leq 1$ 采用(2)式拟合边缘,如果 $k > 1$ 采用(3)式拟合边缘。顶点与位置点 2 采用(2)式拟合边缘,顶点与位置点 7 采用(3)式拟合边缘。以当前激光顶点为起始点,分别依照等间隔(间隔为 2)向 x 坐标和 y 坐标依次取一定的特征单元,通过分析实验图像,蓝色通道图像特征单元数为 50,绿色通道图像特征单元数为 60,红色通道图像特征单元数为 100。由于激光切割顶点可能存在一定的误差,抛物线 3 个参数搜索范围分别为 $-0.01 \leq a_1 \leq 0.01, k_1 - 0.3 \leq b_1 \leq k_1 + 0.3, -5 \leq c_1 \leq 5, k_1 = y_2/x_2, -0.01 \leq a_2 \leq 0.01, k_2 - 0.3 \leq b_2 \leq k_2 + 0.3, -5 \leq c_2 \leq 5, k_2 = x_7/y_7$ 。

考虑边缘处特征单元的灰度特征和梯度特征,综合抛物线上各特征单元的统计信息,构建评价目标函数,函数最大值为最优拟合边缘。所构建目标函数可表示为

$$f(h_k, t_k) = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n (ah_k + \beta t_k) \quad (7)$$

式中 h_k 为抛物线上第 k 个统计点的灰度特征, α 为

权系数; t_k 为抛物线上第 k 个统计点的梯度特征, β 为权系数, n 为特征单元个数。(7) 式中权系数 α 和 β 大小对识别有一定影响, 不同权系数下激光切割点顶点两侧边缘局部识别效果图如图 6 所示, 图 6(a), (b) 分别为 $\alpha = 0.9, \beta = 0.1$ 和 $\alpha = 0.1, \beta = 0.9$ 的识别效果图。权系数取值大小反应对各特征的重视程度, 从图 6 可知当 α 较小时识别效果不是很理想。说明灰度特征在两个特征中起主要作用, 但是灰度特征权系数过大不利于对边缘细节的提取, 因此选取权系数 $\alpha = 0.6, \beta = 0.4$ 。

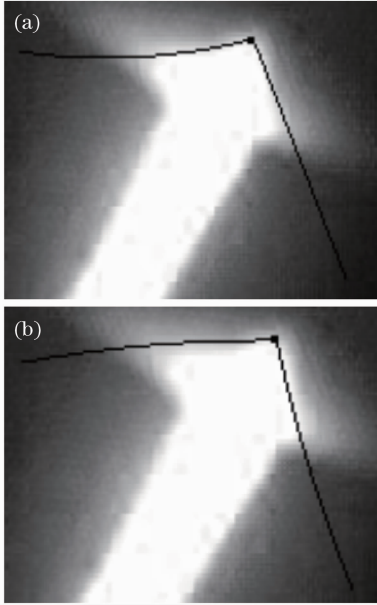


图 6 切割点边缘识别效果。(a)效果 1;(b)效果 2

Fig. 6 Recognition effect at edge of cutting spot.

(a) Recognition effect 1; (b) recognition effect 2

为了确定顶点两侧边缘线边界点, 在最终拟合边缘线上由外向内依次读取经(1)式滤波后的灰度值, 当灰度值大于 210 时, 即为边缘点两侧端点, 识别效果图如图 7 所示, 图中 r, l 和 m 分别为两侧边缘点端点和中点, p 为顶点, θ 为顶点夹角。

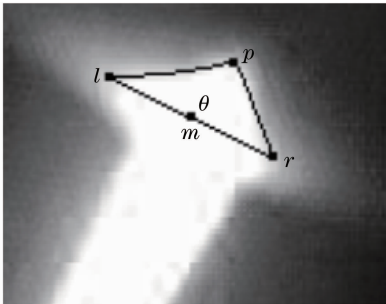


图 7 切割点边缘最终识别效果

Fig. 7 Final recognition effect at edge of cutting spot

由于激光切割点区域下侧边缘长度通常较小,

有时甚至不明显, 其纹理变化较为复杂, 按照激光切割点区域上侧边缘识别方法识别下侧边缘较为困难, 同时很难准确判定激光切割点与已完成切割的边界。为此采用下面方法识别下侧边界点和确定边缘。如图 7 所示, 根据点 r, l 坐标求连接两点线段斜率, 以此斜率值为直线斜率, 由点 m 为起始点沿 y 轴与顶点 p 相反方向做直线(步长为 1, 范围为 m 点向下取 40), 求得该直线两侧边缘点线段长度, 由上至下依次选取与某线段上下相邻 5 条线段长度方差小于 1 时停止搜索, 该线段两个端点即为激光切割点顶点反方向边界点, 如图 8(a) 所示; 如果未发现边缘点, 即选取线段长度最小的为边界点, 如图 8(b) 所示。

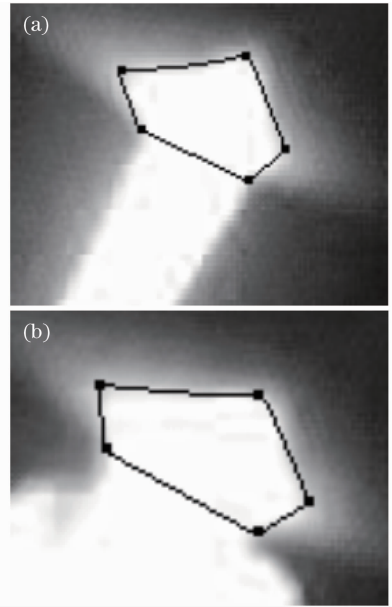


图 8 切割点边缘识别效果。(a)状态 1;(b)状态 2

Fig. 8 Recognition effect at edge of cutting spot.

(a) First case; (b) second case

5 识别效果演示

不同工况下激光切割点状态识别效果图如图 9~12 所示(彩图请见网络电子版), 各图中(a)为彩色图像, (b)为蓝色通道激光切割点局部识别图。图 9 中激光切割点边缘形状较为规则, 图 10 为穿孔过程的初始状态, 图 11 和图 12 中激光切割点边缘形状较为复杂。从各局部识别效果图可知, 激光切割点区域边缘识别准确, 切割点顶点和 4 个边界点定位较为准确。

激光切割后切割缝图像如图 13 所示(彩图请见网络电子版)。图 13(a)中点 1 对应图 9 中切割点状态, 此工况切割缝较宽, 点 2 对应图 12 切割点状

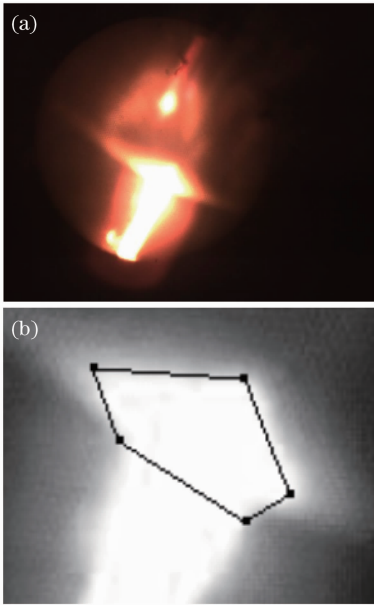


图 9 工况一识别效果。(a)彩图;(b)局部识别
Fig. 9 Recognition effect of first cutting condition.
(a) Chromogram; (b) local recognition

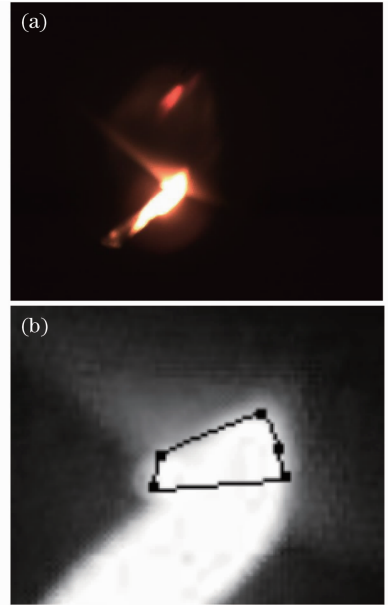


图 11 工况三识别效果图。(a)彩图;(b)局部识别
Fig. 11 Recognition effect of third cutting condition.
(a) Chromogram; (b) local recognition

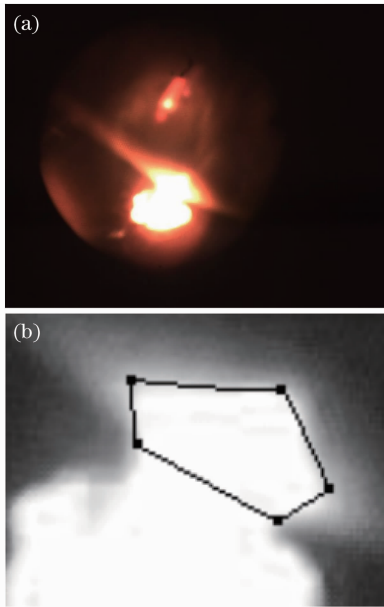


图 10 工况二识别效果图。(a)彩图;(b)局部识别
Fig. 10 Recognition effect of second cutting condition.
(a) Chromogram; (b) local recognition

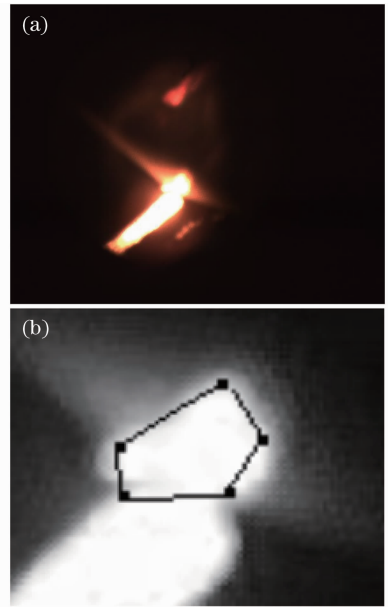


图 12 工况四识别效果图。(a)彩图;(b)局部识别
Fig. 12 Recognition effect of fourth cutting condition.
(a) Chromogram; (b) local recognition

态,此工况切割缝宽度适中;图 13(b)中点 3 对应图 10 切割点状态,此工况为激光加工打孔后开始切割局部图像;图 13(c)对应图 11 工况,为切割缝存在挂渣情况。根据识别的切割点状态和切缝质量的对应关系,取顶点 p 的夹角 θ 为识别参数。图 12 显示的切割点状态可以保证切缝质量,设图 12 为识别的标准状态,其识别参数为 θ_0 。对于图 9 的工况和图 11 的工况,其由切割点状态识别给出参数 θ 为 θ_i ,

比较 θ_0 和 θ_i ,如果两者的偏差大于质量参数 Δ (该参数由大量的切割试验数据确定,另文介绍),则控制切割状态系统显示报警状态,并给出控制参数,通过激光切割设备的反馈控制系统,自动修改加工参数。

6 结 论

1) 利用激光切割彩色图像获取红色、绿色和蓝色通道灰度图像,分析各通道图像差异,得出激光切

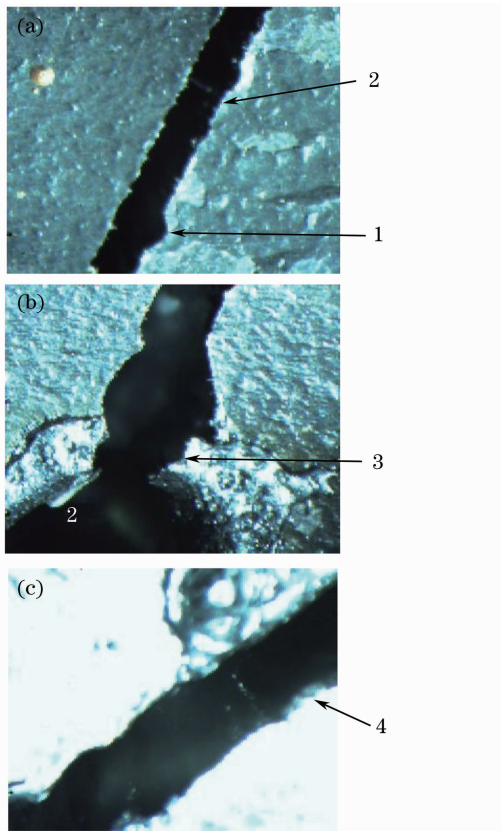


图 13 激光切割点状态。(a)切割点状态一；
(b)切割点状态二；(c)切割点状态三

Fig. 13 Laser cutting point state. (a) Cutting point state one; (b) cutting point state two; (c) cutting point state three

割点在图像中为箭头形状。

2) 根据激光切割点几何形状特点,给出激光切割方向与切割点顶点识别方法,该方法能准确获取切割方向和切割点位置。

3) 建立识别用抛物线方程,构建 12 特征单元,提取切割点边缘处的灰度特征和梯度特征,建立识别目标函数对激光切割点顶点两侧边缘进行准确识别,并给出切割点下部区域识别方法。该方法识别准确,稳健性较强。

4) 通过对激光切割点区域边缘形状识别,可以准确判定激光切割加工中切割点状态,在不良情况下及时报警。同时为后续设备闭环控制提供基础。

参 考 文 献

- 1 A. F. M. Arif, B. S. Yilbas, B. J. Abdul Aleem, Laser cutting of thick sheet metals; residual stress analysis[J]. *Opt. & Laser Technol.*, 2009, **41**(3): 224~232
- 2 B. S. Yilbas, Laser cutting of thick sheet metals; effects of cutting parameters on kerf size variations [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2008, **201**(1-3): 285~290
- 3 E. Fallahi Sichani, J. De Keuster, J.-P. Kruth, Monitoring and adaptive control of CO₂ laser flame cutting[J]. *Physics Procedia*, 2010, **5**(8): 483~492
- 4 D. Leidinger, A. Penz, D. Schuöcker, Improved manufacturing processes with high power lasers [J]. *Infrared Physics & Technology*, 1995, **36**(1): 251~266
- 5 M. Y. Huang, C. R. Chatwin, A knowledge-based adaptive control environment for an industrial laser cutting system[J]. *Opt. and Lasers in Engng.*, 1994, **21**(5): 273~295
- 6 H. Kaebnick, A. Jeromin, P. Mathew, Adaptive control for laser cutting using striation frequency analysis [J]. *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, 1998, **47**(1): 137~140
- 7 W. Schulz, V. Kostykin, H. Zefferer *et al.*, A free boundary problem related to laser beam fusion cutting; ODE approximation [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 1997, **40**(12): 2913~2928
- 8 P. Sheng, G. Chryssolouris, Investigation of acoustic sensing for laser machining processes Part 2: Laser grooving and cutting[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 1994, **43**(2-4): 145~163
- 9 K. Danisman, B. S. Yilbas, A. Gorur *et al.*, Study of some characteristics of the plasma generated during a CO₂ laser beam cutting process [J]. *Opt. & Laser Technol.*, 1992, **24**(1): 33~38
- 10 B. S. Yilba, Experimental investigation into CO₂ laser cutting parameters[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 1996, **58**(2-3): 323~330
- 11 Li Shuyu, Tian Xinguo, He Jingdi *et al.*, Laser cutting flow curve of automatic flow control valves[J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(10): 1003008
李淑玉, 田新国, 贺敬地 等. 自动流量平衡阀过流曲线激光切割工艺[J]. *中国激光*, 2011, **38**(10): 1003008
- 12 Reinhart Poprawe, Wolfgang Schulz, Robert Schmitt, Hydrodynamics of material removal by melt expulsion: perspectives of laser cutting and drilling[J]. *Physics Procedia*, 2010, **5**(A): 1~18

栏目编辑: 宋梅梅