

# 一种新型漫反射空间测距传感器

朱晓华 田松亚 史如森 文芳 顾海涛

(河海大学机电工程学院, 江苏 常州 213022)

**摘要** 采用直线跟踪加斜线插补的方法焊接集装箱波纹板的折线焊缝,其关键是折弯点的检测。设计了一种能检测波纹板折线位置的激光传感器,前置于焊枪的该传感器采用主动激光光源照射波纹板表面,漫反射光线通过限位孔后照射到线阵 CCD 上,通过计算曝光宽度获得光斑到 CCD 的距离。在检测波纹板折线位置时采用最小二乘法,回归直线段和折线段的直线方程,计算两条直线的交点,准确获取折弯点。对采样信号采用模板匹配的方法来减少波纹板表面状态对成像影响,经过实验证明该传感器的直线跟踪精度满足焊缝跟踪要求,折弯位置的检测误差在  $\pm 0.5$  mm 内,为集装箱波纹板自动焊接在折弯点焊枪姿态改变提供了有效的判断。

**关键词** 几何光学; 激光传感器; 焊缝跟踪; 图像处理; 线阵 CCD; 波纹板

**中图分类号** TP212.14 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS20092912.3440

## A New Detective Distance Sensor by Diffuse Reflection Laser

Zhu Xiaohua Tian Songya Shi Rusen Wen Fang Gu Haitao

(College of Mechanical and Electrical Engineering, Hohai University, Changzhou, Jiangsu 213022, China)

**Abstract** This paper use the method of plane tracking and inclined plane interpolation to weld the container's corrugated plate, the acquirement of broken line intercept point is the key point. A laser sensor is designed, which can detect broken line intercept point of the corrugated plate. The sensor placed in front of welding torch adopts initiative laser to illuminate the surface of the corrugated plate, the reflection light pass through the limit hole then illuminate linear Charge Coupled Device (CCD), the sensor obtains the distance from spot to CCD by calculating the exposure width. Using least squares to regress plane and inclined plane into two lines and get the intersection by calculating equations of two lines and then to get the accurately broken line intercept point. Surface condition has little influence on photograph sample signal forms by the way model template in order to get boundary between exposure and no exposure. The sensor has high line precision and meets the requirement of seam tracking by experiment. The tolerance of broken line intercept point is in  $\pm 0.5$  mm, it provides great helpful evidence to get broken line intercept point when container corrugated plate is welded automatically.

**Key words** geometric optics; laser sensors; weld tracking; image processing; linear CCD; corrugated plate

## 1 引 言

目前,焊接机器人在工厂已广泛应用,但这些机器人所适用的焊缝都具有一定的规则且较少使用传感器。而实际的产品有各种各样的焊缝,不适合通用机器人焊接,因此开发适合于特定非结构化环境的具有一定自主性的、智能的移动式焊接机器人成为机器人工业应用研究的一个重要发展方向。在集装箱自动化焊接工业生产中,常常会遇到垂直的波

纹板与平板(方梁)进行焊接,而波纹板形状的不一致性,以及工件位置的装配误差、焊接过程中的焊接变形等因素使得在焊接过程中采用通用焊接机器人变得困难。

集装箱中波纹板与上梁和下梁的焊缝,12 m 多长,而侧板厚仅 1.5~2 mm,共有大约 154 个折角。焊接过程中,焊枪在折弯处调整姿态时不能停留,否则会烧穿薄板。波纹板折角大于  $45^\circ$  时在焊接折弯

收稿日期: 2008-12-02; 收到修改稿日期: 2009-03-11

基金项目: 河海大学研究生优秀毕业论文培育基金(xzx/07b011-04)资助课题。

作者简介: 朱晓华(1984—),男,硕士研究生,主要从事焊接机器人视觉跟踪方面的研究。E-mail: xhz20022001@yahoo.com.cn

导师简介: 田松亚(1963—),男,副教授,主要从事焊接自动化方面的研究。E-mail: tiansongya@126.com

点时需要调整焊枪姿态,因此需要精确检测折角位置并实时调整姿态<sup>[1]</sup>,这成为集装箱自动焊接系统至关重要的一环。

目前,市场上已经存在针对折角小于  $45^\circ$  的专用自动焊接设备,如韩国某公司研制的针对折角小于  $30^\circ$  的波纹板自动焊接设备,使用的是接触式传感器,不能检测折角。用于焊接机器人上的激光直反射光测距系统能实现焊缝识别和跟踪,但是价格非常高,且精度不够。基恩士(KEYENCE)国际贸易有限公司提供的基于三角坐标测量法的激光测距传感器能精确测得表面距离,且响应速度快,但是不

能直接用于焊接环境中,检测波纹板折线位置还需要进行二次开发,且相对价格也比较高。

## 2 激光传感器的设计

传感器系统如图 1 所示,主要包括一个中心波长为  $650\text{ nm}$ ,功率为  $10\text{ mW}$  的半导体激光二极管,一个松下 TCD1208AP 型线阵 CCD 及窄带滤波片、中性减光片、镜头暗箱和限位孔等光学组件构成的光学系统,采用 TI 公司 TMS320LF2407 产生脉冲驱动 CCD 和进行数据采集。设备包括电焊机、四轴直线导轨焊机机器人和焊接工作台等。

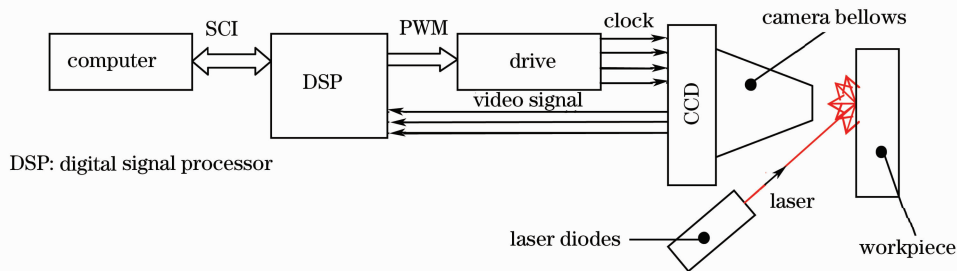


图 1 传感器系统组成

Fig. 1 Block diagram of sensor system

### 2.1 光学系统设计

激光传感器的测量原理如图 2 所示,接收器轴线垂直于波纹板平面,激光发生器固定在接收器的正下方,发射的激光束照亮接收器正前方的工件。激光照射到经过喷沙处理而坑凹不平的表面,形成了激光漫反射光点,漫反射光强分布近似服从 Phong 光照模型,表面粗糙度对漫反射和镜面反射的能力有相应的影响。CCD 上的影像宽度  $d$  是反射光线透过方形限位孔形成的光锥,照射到 CCD 上的部分的长度。由于激光发生器轴线与接收器轴线构成一个夹角  $\theta$ ,当工件到传感器之间的距离  $L$  增大时,漫反射光点相对接收器轴线上偏移,此时限

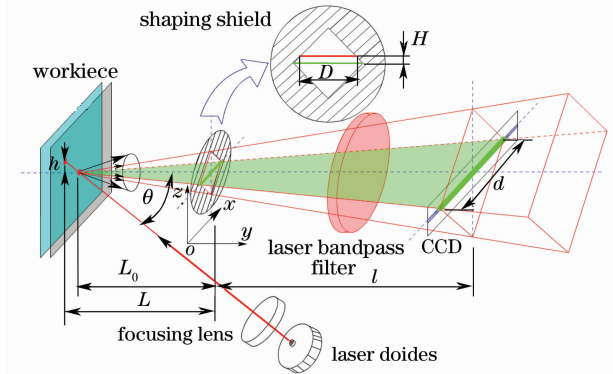


图 2 传感器测量原理

Fig. 2 Principle of sensor measure diagram

位孔的特殊形状形成的光锥在接收器内向下偏移,使得  $d$  变小。同时因为光斑的远离使得结构光锥收缩变小,也导致  $d$  变小。影像宽度随着工件到传感器之间的距离增大而减小,存在一一对应关系,从而实现被测工件到传感器之间距离的检测<sup>[4,5]</sup>。

当  $L$  增大时,漫反射光点距离轴线位置  $h$  变高

$$h = (L - L_0) \tan \theta, \quad (1)$$

其中  $L_0$  是漫反射光点在 CCD 轴线位置时与限位孔之间的距离。 $D$  为激光光斑反射通过限位孔所形成的光锥中投射在线阵 CCD 上的光平面与限位孔所在平面的交线。 $D$  到限位孔中心的高度记为  $H$ , 根据几何关系可知

$$H = \frac{l}{L+l} h. \quad (2)$$

由于限位孔的特殊形状使得被投影的线段  $D$  随  $H$  的变化而变化,将其关系记为如下方程

$$D = f(H), \quad (3)$$

CCD 上的被照亮的宽度  $d$  变化随  $D$  的变化而变化,其关系如下方程所示

$$d = \frac{L+l}{L} D. \quad (4)$$

由(1)式~(4)式计算得到工件到传感器之间的距离  $L$  变化和 CCD 上被照亮的宽度  $d$  变化之间的关系式

$$d = \frac{L+l}{L} f \left[ \frac{l}{L+l} (L-L_0) \tan \theta \right], \quad (5)$$

要得到  $d$  的值唯一对应  $L$  的值, 需要设计限位孔的形状来确定  $f(H)$ 。由(5)式可以看出,  $\frac{L+l}{L}$  和  $f \left[ \frac{l}{L+l} (L-L_0) \tan \theta \right]$  都为非负函数, 且  $\frac{L+l}{L}$  为  $L$  的减函数,  $\frac{l}{L+l} (L-L_0) \tan \theta$  为  $L$  的增函数, 因此设计限位孔的形状函数  $f(H)$  必须为减函数, 保证  $d$  与  $L$  的一一对应关系。

本例中设计的传感器参数  $Q=30^\circ$ ,  $l=60$  mm,  $L_0=30$  mm, 设计限位孔为对角线长 8 mm 的正方形, 其方程  $D=8-2H$ 。代入(5)式可得传感器的成像宽度和工件距离关系公式如下

$$L = \frac{2558.46}{61.28+d}. \quad (6)$$

由此可知, 测量出  $d$ , 可计算出  $L$ 。CCD 感光单元阵列总长为 30.2 mm, 相邻感光单元间距为 14  $\mu\text{m}$ , 根据(6)式可得传感器设计测距范围为 30~41.75 mm, 检测精度为  $\pm 0.005$  mm。从(5)式可以看出传感器的测距精度与  $Q$  以及  $f(H)$  有关。

## 2.2 抗环境光干扰的设计

由于焊接现场, 不仅有激光, 还有弧光和自然光, 这些光进入 CCD, 会对跟踪系统造成干扰, 这是光学传感器在焊接领域的应用都需要设计考虑的问题。选择了高性能滤波片固定在 CCD 的前端, 其中心波长为 650 nm 带宽 10 nm, 有效消除弧光的影响。接收器内部刷哑光黑漆, 可最大程度避免非轴向光线进入传感器后, 再次反射形成干扰信号。

同时设计了一种补偿系统, 考虑焊接中弧光和自然光的干扰, 如图 3 所示用同一线阵两端的光电耦合器  $AA'$  和  $BB'$ , 接受同等强度的弧光和自然光进行补偿。这种方法不仅可以有效避免不同器件造成的误差, 消除弧光和自然光的干扰。图 3 中区域 2 的环境光不能进入传感器内。区域 1 中的环境光可以进入传感器, 产生误信号。因此在  $AB$  之外的 CCD 仅感受环境光, 将感受激光信号的 CCD 值与环境光的 CCD 信号求差。如果环境光在 CCD 上  $AA'$  区产生的信号强度非常接近激光信号在  $AB$  区的强度, 则返回跟踪失败的报告, 有效保护传感器和焊接系统。

实验表明, 激光照射波纹板表面反射回传感器, 同时考虑环境光和能量衰减模型的影响<sup>[6]</sup>, 传感器接收光强在激光照射和环境光共同照射的光电耦合器呈现叠加效果, 而仅存在环境光照射的光电耦合

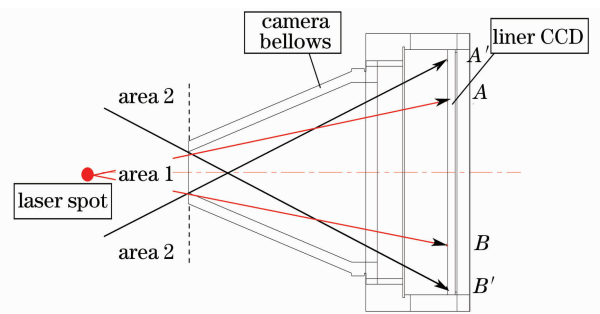


图 3 补偿设计

Fig. 3 Compensation design

器曝光量很小。

## 2.3 CCD 驱动和采集电路

系统选用东芝公司的 TCD1208P 线阵 CCD, 其有效像素为 2160 pixel, 工作频率为 0.3~2 MHz, 驱动需要两路完全反向的移位时钟信号  $\varphi_1$  和  $\varphi_2$ , 转移脉冲 SH, 复位脉冲 RS。选用 TI 公司 TMS320LF2407 的数字信号处理器 (DSP) 作为驱动和数据采集芯片, 采用事件 A 全比较单元 1 在 PWM1 脚产生 400 kHz 的脉冲信号, 经过 74LS74 的一个 D 触发器分频产生两路反相占空比为 50% 的时钟信号  $\varphi_1$  和  $\varphi_2$ 。PWM2 产生 RS 信号, 通过反向器 74HC4049 两次反向后送出驱动, 通过设置死区和 PWM 全比较单元的占空比时间实现同  $\varphi$  和 RS 相位关系, 这样 DSP 输出的信号经过处理后产生了完全同步反相的  $\varphi_1$  和  $\varphi_2$ , 并且 RS 和  $\varphi_1, \varphi_2$  的相位关系可调。T2PWM 输出作为转移脉冲 SH。

为了加快系统的采样速率, 采用查询方式 AD 对信号采集<sup>[7]</sup>。实验表明, SH 信号为高的持续时间不能太长, 否则 CCD 输出第一帧的像素无效, 而 SH 信号为高的典型时间为 1000 ns, 数据处理和发送不能在这么短的时间内完成。设计固定频率和占空比的 SH 信号, 保证 CCD 正常工作。捕捉 SH 信号的下降沿, 启动 DSP 的 AD 转换, 此时 CCD 输出有效像素, 然后进行数据处理和发送, 发送完数据 DSP 等待最近一次 SH 信号下降沿, 再次启动 AD 转换。即 AD 采样为一个 SH 周期获得完整的 2212 图像数据, 接着一个 SH 周期进行处理和发送, 再等待下一个 SH 的下降沿进行图像采集。综合考虑将 CCD 工作在 400 KB/s 的时钟下, DSP 对每帧图像数据处理时间与采样时间相等, 计算可得图像帧频为 90 frame/s 左右, 可以满足焊接高精度的要求。

## 3 传感器距离识别

线阵 CCD 输出图像如图 4 中的细实线所示,  $r$  表示 CCD 行坐标, 灰度值 (0~255) 表示纵坐标。近

似在 0~800 pixel 和在 2100~2160 pixel 时,输出曝光强度约为 160,为环境光照射影响;在 800~2100 pixel 输出的曝光强度在 63 附近,为主动光源和环境光共同作用。从图中可以看出,在有激光光源照射的部分 CCD 明显曝光充分,但是也有许多较暗的斑点,而真正曝光的宽度应该从被主动光源照亮的边缘开始算起。

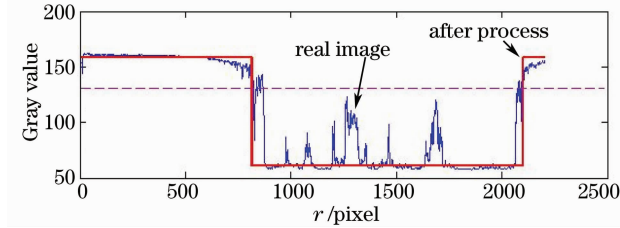


图 4 线阵 CCD 上每个耦合器的灰度值

Fig. 4 Gray value of each couple in linear CCD

将上述图像的进行二值化处理就是将 256 个亮度等级的灰度图像通过适当的阈值选取而获得仍然可以反映图像整体和局部特征的二值化图像。为了得到理想的二值图像,一般采用封闭、连通的边界定义不交叠的区域。所有灰度大于或等于阈值的像素被判定为属于特定物体,其灰度值为 255 表示,否则这些像素点被排除在物体区域以外,灰度值为 0,表示背景或者例外的物体区域。如果某特定物体在内部有均匀一致的灰度值,并且其处在一个具有其它等级灰度值的均匀背景下,使用阈值法就可以得到比较好的分割效果<sup>[8,9]</sup>。对获得的 CCD 输出位置-灰度图转化为灰度直方图,然后选取阈值进行二值化。

步骤 1:计算图像灰度直方图

设一幅图像的灰度级数为  $P(0,1,2,\dots,p,\dots,255)$ ,  $v(1,x)$ , 表示一幅  $1 \times L$  的一维图像,其中  $x$  为 CCD 的像素,  $v$  为 CCD 中  $x$  像素的灰度值。其直方图表达式可以写为

$$h_f(k) = |\{(1,x): v(1,x) = k\}|, \quad (7)$$

$$k \in P$$

式中  $|\dots|$  表示计数操作。

步骤 2:为了最大程度快而且精确的计算出曝光宽度,需要将图像进行预处理,得到环境光强以及在环境光影响下的主动光源照射部分光强,并给出一个动态的阈值,将图像进行二值化处理。

先将灰度直方图平滑处理,方程如下

$$f(k) = \frac{1}{7} \sum_{i=k-3}^{k+3} h(i), \quad (8)$$

$$k = 3, 4, \dots, 252$$

将图 4 平滑处理后变为图 5,图中前景和背景为直

方图的两个峰值点。

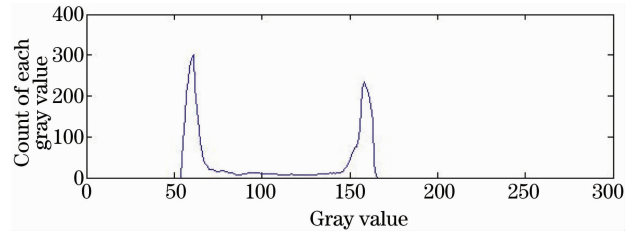


图 5 直方图平滑后的曲线

Fig. 5 Smoothed curve of histogram

那么极大值点应该满足

$$\frac{\partial f(k)}{\partial k} = 0, \quad \frac{\partial^2 f(k)}{\partial k^2} < 0, \quad (9)$$

这些极大值点对应的值可以参考为前景灰度  $p_f$  和背景灰度  $p_b$ ,离散的数据处理通过差分方法实现。

阈值取值定义为

$$T = p_f + 0.8(p_f - p_b), \quad (10)$$

图 4 中的虚线为计算所得的阈值,将图像二值化

$$V(1,k) = \begin{cases} p_f, & v(1,k) < T \\ p_b, & v(1,k) \geq T \end{cases} \quad (11)$$

步骤 3:计算合理的边缘,检测亮斑的宽度。

对离散的数字图像,差分测度公式如下:

$$S_j(1,k) = \sum_{i=1}^{2R} |M_j(1,i) - V(1,k+i)|, \quad (12)$$

$$k \in (1, 2, 3, \dots, L - 2R), \quad j = 1, 2$$

其中  $M_j$  为模板,  $V$  为搜索区,  $R$  为模板半径,  $|\dots|$  表示取模。由暗到明位置匹配模板规定为<sup>[10]</sup>

$$M_1(1,x) = \begin{cases} p_b, & x \in (0, R] \cup x \in Z \\ p_f, & x \in [R, 2R] \cup x \in Z \end{cases} \quad (13)$$

由明到暗位置匹配模板规定为

$$M_2(1,x) = \begin{cases} p_f, & x \in (0, R] \cup x \in Z \\ p_b, & x \in [R, 2R] \cup x \in Z \end{cases} \quad (14)$$

当  $S_1$  最小时对应图像点  $k+R$  图像明暗和当  $S_2$  最小时对应图像点  $k+R$  暗明交界位置,从而计算出曝光宽度。

通过 DSP 编译器编曝光宽度识别程序,并将处理前后的数据通过串口发送回上位机。图 4 粗实线代表经宽度识别程序处理后还原的图像灰度值曲线。在实际工作过程,只需要将图像处理后的数据发送回上位机,通过(6)式将曝光宽度换算成 CCD 到激光光斑的距离。

在非焊接环境下,将超声波测距传感器和激光传感器固定在同一平面,测量波纹板表面距离 10 组,实验结果如表 1。

表 1 多种方法测量数值

Table 1 Data of different measure methods

NO.	Ruler /mm	Ultrasonic range finder /mm	New sensor /mm
1	31.3	31.27	31.268
2	32.4	32.46	32.455
3	33.5	33.48	33.482
4	34.4	34.43	34.433
5	35.4	35.37	35.372
6	36.7	36.72	36.716
7	37.5	37.54	37.544
8	39.0	38.98	38.978
9	40.1	40.09	40.093
10	41.6	41.64	41.639

直尺为普通测量用直尺,精度为 1 mm。超声波测距传感器为美国邦纳(BANNER)公司的 q45ur3liu64c 型传感器,其测量精度为  $\pm 0.01$  mm。从表 1 中可以看出直尺测量的数据、超声波传感器测量数据和激光传感器的测量数据基本吻合,激光传感器的测距精度达到  $\pm 0.05$  mm 以上,已经满足焊接跟踪精度要求。由于实验条件有限,直尺测量和超声波测距精度都没能反应出激光传感器的设计测距精度,传感器的测距精度还有待于进一步标定。

## 4 实 验

实验用波纹板样品取自一般工业生产用波纹板,在实际焊接弧光照射环境下,用激光传感器测量波纹板折线位置。图 6 为实际的波纹板,波纹板折线位置是平面段和斜面段所近似的直线段延长交点,是焊枪调整姿态以及焊接轨迹的重要参照。

传感器安装前置于焊枪 15 mm,如图 7 所示,离散的数据点是波纹板表面到焊接小车参考面的实际距离。在折线位置之前任意处标记绝对零点,焊接小车从绝对零点位置以恒速度平行于波纹板平面段向

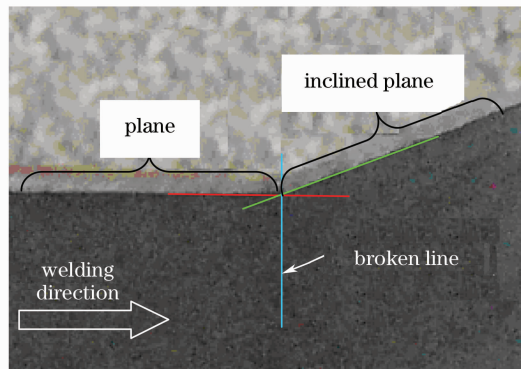


图 6 波纹板以及其折线位置  
Fig. 6 Corrugated plate and the curve

前行走。通过实验测量出小车速度和采样速度的匹配关系,可以将测量的数据和焊接位置相匹配。

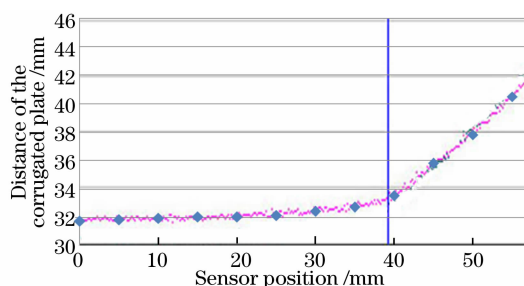


图 7 表面轮廓跟踪以及折线位置检测

Fig. 7 Contour track on the surface and curve position detect

在系统辨识领域中,最小二乘法是利用实验数据进行参数估计的主要手段<sup>[11]</sup>。根据前置传感器检测所形成的表面轮廓偏差序列,通过速度配准和时间配准来确定被测点与点之间的距离,最后采用了最小二乘法而求出两直线的方程并计算它们的交点,给出折线位置。在上位机采用 C++ 编制拟合程序,对波纹板折线位置进行多次测量,结果如表 2 所示,测量误差在  $\pm 0.5$  mm 范围内,符合焊接跟踪的要求。

表 2 折线位置多次测量结果

Table 2 Broken line measurement results

NO.	Results /mm	Error /mm
1	39.33475	-0.33475
2	38.85714	0.14286
3	39.40299	-0.40299
4	39.19829	-0.19829
5	38.57484	0.42516
6	39.09595	-0.09595
7	38.65245	0.34755
8	38.61365	0.38635
9	38.68657	0.31343
10	38.96785	0.03215

## 5 结 论

集装箱中波纹板的自动焊接是制约集装箱自动化生产的瓶颈,而关键在于波纹板折线位置的检测,本研究根据波纹板和底板的特点,设计激光测距传感器通过提前扫描波纹板来计算得到波纹板折线位置。主要结论如下:

设计了一种新型的激光测距光路,实现了高精度的检测,测量范围和线性度可以通过改变遮光孔的形状方便实现,是一种比三角测量法更加方便的测量方法。选择激光波长时避开弧光的波长,使用带通滤波

片消除弧光的干扰。采用 TMS320LF2407 设计了 CCD 的驱动和图像采集处理系统。通过计算该图像的直方图,选取二值化的阈值,将采集的图像二值化处理。通过模板匹配的方式求取 CCD 感光区域的长度,从而求得焊枪到波纹板的距离。通过最小二乘法求得平面段和斜面段的方程,其交点即为所求的折弯点。

实验证明该传感器的采样速率为 90 frame/s,直线跟踪精度满足焊缝跟踪要求,折弯的检测误差在±0.5 mm 内,为集装箱波纹板自动焊接在折弯点焊枪姿态改变提供了有效的判据。

### 参 考 文 献

- 1 Qin Jingxiang, Zhou Min, Cao Gang *et al.*. Investigation on neurobehavior function of welders in container manufacture[J]. *J. Labour Medicine*, 2005, **22**(4): 335~337  
秦景香,周敏,曹刚等. 集装箱制造业电焊工神经行为功能的调查分析[J]. *环境与职业医学*, 2005, **22**(4): 335~337
- 2 Hu Jingping. 50-year history of container manufacturing [J]. *Containerization*, 2005, 01  
胡锦涛. 集装箱 50 年制造史[J]. *集装箱化*, 2005, 01
- 3 Xu Jianhua, Qian Liwu. Container manufacturing crisis [J]. *Containerization*, 2006, 05  
徐剑华,钱立武. 集装箱制造业遭遇寒流[J]. *集装箱化*, 2006, 05
- 4 Zhao Xiangbin, Li Liangyu, Xia Changliang *et al.*. Image processing of seam tracking system with laser vision [J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2006, **27**(12): 42~48  
赵相宾,李亮玉,夏长亮等. 激光视觉焊缝跟踪系统图像处理[J]. *焊接学报*, 2006, **27**(12): 42~48
- 5 Xu Peiquan, Tang Xinhua, Lu Fenggui *et al.*. Three-dimensional recovery using vision sensor based on circular laser [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(12): 2215~2219  
徐培全,唐新华,芦凤桂等. 利用环形激光视觉传感器的焊缝三维恢复[J]. *光学学报*, 2007, **27**(12): 2215~2219
- 6 Zhang Jinsheng, Wang Shicheng, Wang Zhixian *et al.*. Research on diffuse reflectivity of the reflective screen for a laser-guided weapon simulation system [J]. *Electronics Optics & Control*, 2005, **12**(3): 27~35  
张金生,王仕成,王志贤等. 某激光制导武器仿真系统反射屏漫反射特性研究[J]. *电光与控制*, 2005, **12**(3): 27~35
- 7 Zhang Zhengyu, Sui Xiaolin. Faint signal digital correlation detection of laser ranging study and simulation [J]. *Chinese J. Lasers*, 2002, **29**(7): 661~665  
章正宇,眭晓林. 激光测距弱信号数字相关检测技术的研究和仿真[J]. *中国激光*, 2002, **29**(7): 661~665
- 8 Qiu Tian, Guo Li, Li Donghui *et al.*. Digital speckle marginal correlation measuring method [J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(8): 1092~1096  
邱天,郭立,李东晖等. 数字散斑的边缘相关测量法[J]. *中国激光*, 2006, **33**(8): 1092~1096
- 9 Zhang Yujin. *Image Processing and Analysis* [M]. Beijing: Tsinghua university press, 2003  
章毓晋. *图像处理和与分析*[M]. 北京:清华大学出版社, 2003
- 10 Yan Solihin, C. G. Leedham. Integral ratio: a new class of global thresholding techniques for handwriting images [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1999, **21**(8): 761~768
- 11 Zhang Ke, Wu Yixiong, Lü Xueqin *et al.*. Real-time identification of heading angle based on least squares estimator for welding mobile robot [J]. *Transaction of the China welding institution*, 2007, **28**(6): 13~16  
张轲,吴毅雄,吕学勤等. 基于最小二乘法的小车方位角实时辨识[J]. *焊接学报*, 2007, **28**(6): 13~16