

文章编号: 0253-2239(2003)02-0225-06

结构光焊缝检测传感器设计理论的研究*

孙立新 韩 炜 刘冰清 李 慨 张明路 岳 宏

(河北工业大学机械学院机械系, 天津 300130)

蔡鹤皋

(哈尔滨工业大学机器人研究所, 哈尔滨 150001)

摘要: 对电弧光的干扰进行了深入的研究,建立了电弧干扰的光照模型;依据透视变换理论,给出了光源倾斜照射和摄像机倾斜接收情况下,被检测物体与摄像机之间的一般坐标变换数学模型。这两个模型对结构光传感器的设计具有非常重要的指导意义,基于这两个模型设计的结构光传感已在自动焊接实验中获得了成功的应用。

关键词: 应用光学; 传感器技术; 结构光传感器; 成像理论; 电弧光照模型

中图分类号: TP212 文献标识码: A

1 引 言

常用的焊缝检测方法有:机械式、电弧传感式、声学式、电磁式和光学传感式等多种方法,各种方法各有其优缺点,而光学传感方法不仅能检测出焊缝的中心位置,而且还能获得焊缝的形状和尺寸等特征参量,并且是无接触的,因而是目前使用较多、很有前途的一种方法。主动三角法中的线结构光法由于抗干扰能力较强,能检测出焊缝的截面形状,因而是最有前途的一种方法^[1]。

2 线结构光检测原理

线结构光法是一种直接获取深度图像的方法,它可以比较简单地获得焊缝的二维半信息。线结构光传感器主要由 CCD 摄像机[或位置敏感元件(PSD)光电检测器]、镜头、带通滤光片、激光二极管和圆柱透镜等组成,其中摄像机和光源成一已知角度 β 固定于焊缝的对称面上。工作时,激光二极管发出的光经圆柱透镜后变成一个平面光即结构光照射到工件上,这样就在工件上形成一条宽度很窄的光带。当该光带被工件反射或散射后,经滤光片保留激光二极管发出的特定波长的光,而把其它波长的光滤掉,最后进入摄像机成像。这样,由于有角度 β 的

存在,当光带照射到待焊工件时,如图 1 中虚线所示,由于各点的深度不同,因而通过针孔成像后,反射到摄像机上的位置就不同。或者说,原先打到焊件上的是一条直光带,而在摄像机上则产生了形变(不是直光带了),此时就可根据光带各点形变程度的不同计算出焊缝沟槽各点的深度。

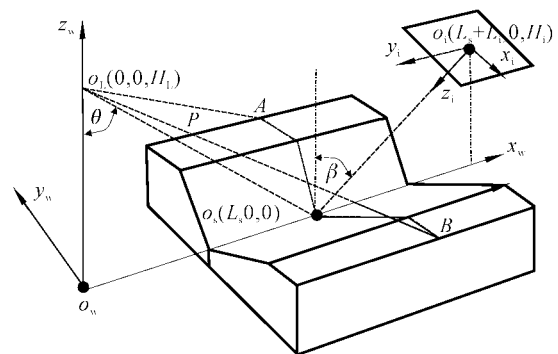


Fig. 1 Module of line structure light

3 线结构光传感器数学模型的建立

摄像机的透镜成像通常可以近似地看作是针孔成像。假设物体上任意一点的广义矢量坐标为

$$\mathbf{V}_w = [x_w, y_w, z_w, 1]^T, \quad (1)$$

成像到成像面上的广义矢量坐标为

$$\mathbf{V}_i = [\omega x_i, \omega y_i, \omega z_i, \omega_i]^T = [x'_i, y'_i, z'_i, \omega'_i]^T, \quad (2)$$

根据小孔成像理论则有

$$\mathbf{V}_i = \mathbf{P} \cdot \mathbf{V}_w, \quad (3)$$

其中 \mathbf{P} 为透视变换矩阵。

* 河北省重点攻关基金(9821320D)、天津市自然科学基金(003601211)和河北省自然科学基金(501031)资助课题。

E-mail:lixin_sun@cyou.com

收稿日期:2001-11-15; 收到修改稿日期:2002-02-25

从最一般的情况出发,如图 1 所示,即光源 O_i 以 θ 角射向待焊工件,从而形成一折线光带,摄像机相对于 z 轴倾斜 β 角采集图像.设总体坐标系为 $x_w y_w z_w$,摄像机成像坐标系为 $x_i y_i z_i$,那么光平面 P 的方程如(4)式所示:

$$z_w = H_L - \cot \theta \cdot x_w. \quad (4)$$

设折线上任一点的坐标为 (x_w, y_w, z_w) ,把它透视变换到摄像机的成像坐标系 (x_i, y_i, z_i) 中则得

$$\mathbf{V}_i = \mathbf{H} \cdot \mathbf{V}_w, \quad (5)$$

其中

$$\mathbf{H} = \mathbf{P} \cdot \mathbf{R}_y(\beta) \cdot \mathbf{R}_x(180^\circ) \cdot \mathbf{T}_i, \quad (6)$$

$$\mathbf{R}_y(\beta) = \begin{bmatrix} \cos \beta & 0 & -\sin \beta & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ \sin \beta & 0 & \cos \beta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (7)$$

$$\mathbf{R}_x(180^\circ) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (8)$$

$$\mathbf{T}_i = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & -(L_s + L_i) \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -H_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (9)$$

将(6)式~(9)式代入(5)式,得

$$\left. \begin{aligned} x_i &= \frac{fx_w \cos \beta + fz_w \sin \beta - (L_s + L_i) f \cos \beta - H_i f \sin \beta}{x_w \sin \beta - z_w \cos \beta - (L_s + L_i) \sin \beta + H_i \cos \beta + f} = F(x_w, z_w), \\ y_i &= -\frac{f}{x_w \sin \beta - z_w \cos \beta - (L_s + L_i) \sin \beta + H_i \cos \beta + f} y_w = F(x_w, y_w, z_w), \\ z_i &= \frac{fx_w \sin \beta - fz_w \cos \beta - (L_s + L_i) f \sin \beta + H_i f \cos \beta}{x_w \sin \beta - z_w \cos \beta - (L_s + L_i) \sin \beta + H_i \cos \beta + f} = \\ &= f - \frac{f^2}{x_w \sin \beta - z_w \cos \beta - L_i \sin \beta + H_i \cos \beta + f} = F(x_w, z_w). \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

式中 f 为摄像机镜头的焦距.在已知焊缝尺寸 \mathbf{V}_w 的情况下,就可根据(10)式计算出它在摄像机成像面上的位置 \mathbf{V}_i .但在实际应用中,通常是已知 \mathbf{V}_i 来计算 \mathbf{V}_w ,即根据摄像机所采集到的数据来求焊缝的实

际位置,因而通常使用的是(5)式的逆变换,即

$$\mathbf{V}_w = \mathbf{H}^{-1} \mathbf{V}_i. \quad (11)$$

将广义坐标转化为直角坐标,并消去 z_i 后得投影线方程为

$$\left. \begin{aligned} x_w &= -\frac{y_w(x_i \cos \beta + f \sin \beta) + y_i(f \sin \beta - L_s - L_i)}{y_i}, \\ z_w &= -\frac{y_w(x_i \sin \beta - f \cos \beta) - y_i(f \cos \beta + H_i)}{y_i}. \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

该投影线与光平面 P 相交后,交线即为焊缝的横截面。

$$\left. \begin{aligned} x_w &= -\frac{(f \cos \beta + H_i - H_L)(x_i \cos \beta + f \sin \beta) + (f \sin \beta - L_s - L_i)(x_i \sin \beta - f \cos \beta)}{(x_i \sin \beta - f \cos \beta) + (x_i \cos \beta + f \sin \beta) \cot \theta}, \\ y_w &= \frac{\tan \theta (f \cos \beta + H_i) - (f \sin \beta - L_s - L_i) - H_L \tan \theta}{\tan \theta (x_i \sin \beta - f \cos \beta) + (x_i \cos \beta + f \sin \beta)} y_i, \\ z_w &= \frac{(f \cos \beta + H_i)(x_i \cos \beta + f \sin \beta) + (f \sin \beta - L_s - L_i + H_L \tan \theta)(x_i \sin \beta - f \cos \beta)}{\tan \theta (x_i \sin \beta - f \cos \beta) + (x_i \cos \beta + f \sin \beta)}. \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

当 $\theta = 0, \beta \neq 0$,即光源垂直照射,摄像机倾斜接收时,由(13)式可得焊缝的横截面坐标为

$$\left. \begin{aligned} x_w &= 0, \\ y_w &= -\frac{f \sin \beta - L_s - L_i}{x_i \cos \beta + f \sin \beta} y_i, \\ z_w &= \frac{(f \cos \beta + H_i)(x_i \cos \beta + f \sin \beta) + (f \sin \beta - L_s - L_i)(x_i \sin \beta - f \cos \beta)}{x_i \cos \beta + f \sin \beta}. \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

由此可以看出, 因为 $x_w = 0$, 此时的 y_w 和 z_w 是共截面的, 即摄像机采集到的数据反应了被焊工件上某一截面的形状和尺寸。当 $\beta = 0, \theta \neq 0$, 即光源倾斜照射, 摄像机垂直接收时, 因为 x_w, y_w, z_w 均与 x_i 或 y_i 有关, 因此它们三者不共截面, 因而给图像处理带来了很大的麻烦。

4 电弧干扰光照模型的建立

在焊缝自动跟踪系统中, 焊缝位置和形状的检测是一个非常关键的问题, 由于有强烈的电弧光、焊接火花和飞溅以及熔池金属的影响, 给焊缝图像的检测和处理带来了很大困难。为此对这种干扰进行仔细分析, 建立其光照模型, 对结构光视觉检测传感器的设计具有重要的意义。

在电弧焊接过程中主要的干扰源有强烈的电弧光、焊接时通过摄像机视场的火花和飞溅以及熔化金属所产生的辐射等。在焊接过程中电弧中心附近的温度可达 10000 K 以上, 而飞溅的金属液滴与之相比温度要低得多, 因此它们的辐射能量大多数在波长为 1000 nm 以上的范围内; 摄像机在焊枪的前方, 一般来说熔池不在其视场范围之内, 另外, 熔池所辐射的能量大多数也在 1000 nm 波长以外; 尽管保护气体发出的等离子体的温度可高达 6000 K, 但是它的辐射系数很低, 在可见光范围内和近红外波长范围内的辐射并不太强。因此电弧光是最主要的干扰噪声^[2,3]。图 2 为焊缝检测的示意图。

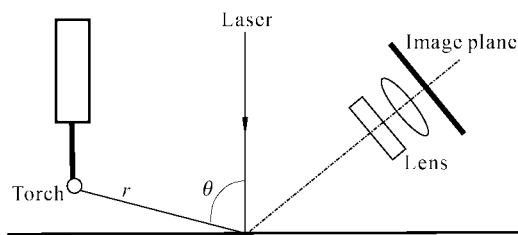


Fig. 2 Diagram of joint detection

由于在焊接电弧中温度很高部分的有效面积 A 很小 (0.5 mm^2 左右), 它与电弧中心到工件之间距离的平方 (r^2) 相比要小得多, 即 $A/r^2 \ll 1$, 因此, 可以把焊接电弧看成是一个点光源。根据点光源照度的距离平方反比定律有

$$E(\lambda) = I(\lambda) = \cos \theta / r^2.$$

式中 $E(\lambda)$ 为电弧光的光照度, $I(\lambda)$ 为电弧光的发光强度, 可近似认为是常量, r 为电弧中心与视场内被照点的距离, θ 为电弧中心与视场内被照点连线和基体表面法线之间的名义入射角度, 根据普朗克定

律, 黑体的光谱为

$$I(\lambda) = AL(\lambda) = A\epsilon(\lambda) \frac{2hc^2}{\lambda^5 [e^{hc/(\lambda kt)} - 1]},$$

式中 $\epsilon(\lambda)$ 为电弧辐射系数, h 为普朗克常量, c 为光速, k 为玻尔兹曼常量, t 为电弧温度, A 为电弧有效发光面积, 这样, 在投射点处电弧光产生的光照度为

$$E(\lambda) = AL_{\text{arc}}(\lambda) \frac{\cos \theta}{r^2} = \frac{hA}{r^3} L_{\text{arc}}(\lambda).$$

该电弧光照到工件表面上后, 被工件表面所反射和散射, 设表面作用系数为

$$f_r = \frac{L_{\text{arc}}(\lambda)}{E(\lambda)},$$

式中 $f_r = f_{\text{rd}} + f_{\text{rs}}, L_{\text{arc}}(\lambda)$ 为电弧光的光亮度, f_{rd} 为表面漫反射作用系数, 根据朗伯模型, 可看作常量, f_{rs} 为表面全反射作用系数, 与表面不平度值、光波波长等有关, 由此可以得出在摄像机视场范围内反射的电弧光的光亮度为

$$L_r(\lambda) = f_r E(\lambda) = \frac{hA}{r^3} f_r L_{\text{arc}}(\lambda).$$

该反射电弧光再通过一个中心波长为 780 nm 的干涉滤光片进行滤波, 减小电弧光的干扰。干涉滤光片的光学特性可用高斯函数来描述:

$$F_G(\lambda) = t_r \exp\left(-\frac{\lambda^2}{2\sigma^2}\right),$$

式中 $\sigma = 0.2B_w, B_w$ 为滤光片的通带宽, t_r 为峰值透射系数。设滤光片的中心波长为 λ_c , 则滤光片的作用函数为

$$F_G(\lambda - \lambda_c) = t_r \exp\left(-\frac{\lambda - \lambda_c}{2\sigma^2}\right),$$

经滤光片后的电弧光再经过摄像机透镜, 最后成像在像平面上, 如图 3 所示。

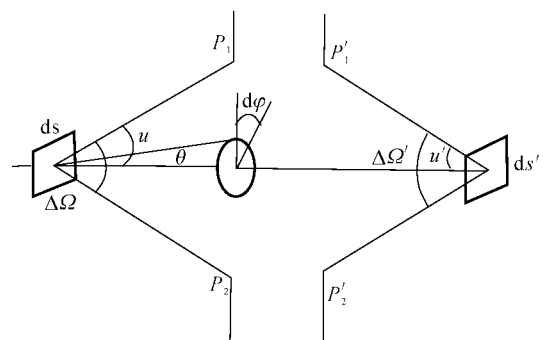


Fig. 3 Diagram of camera lens working

假设 ds 为垂直于光轴的小面元, 经透镜系统后所成的像为 ds' , $P_1, P_2, u, \Delta\Omega$ 分别为系统的入瞳、入射孔径角和入瞳对 ds 的中心所张的立体角; $P_1', P_2', u', \Delta\Omega'$ 分别为系统的出瞳、出射孔径角和出瞳对 ds' 的中心所张的立体角。 L 和 L' 分别为物面元 ds 和像

面元 ds' 的亮度。来自面元 ds 在 θ 方向 $d\Omega$ 立体角内的光通量为

$$d^2F = Lds\cos\theta d\Omega.$$

由于面元 ds 可以看作余弦发射体, L 与方向无关, 因此 ds 在 $\Delta\Omega$ 立体角内进入系统的光通量为

$$dF = Lds \int_{\Delta\Omega} \cos\theta d\Omega.$$

因为

$$d\Omega = \sin\theta d\theta d\phi, \quad (15)$$

所以

$$dF = Lds \int_0^u \cos\theta \sin\theta d\theta \int_0^{2\pi} d\phi = \pi Lds \sin^2 u.$$

相应的光照度为

$$E = \frac{dF}{ds} = \pi L \sin^2 u. \quad (16)$$

同样可得在立体角 $\Delta\Omega'$ 范围内投射到像面元 ds' 上的光通量为

$$dF' = \pi Lds' \sin^2 u'. \quad (17)$$

进入光学系统的光通量 dF , 除去被媒体吸收、散射和界面的反射外, 实际到达像面的光通量为

$$dF' = k_t dF.$$

其中 k_t 为与波长有关的小于 1 的系数, 叫做光学系统的透射系数。由(15)式~(17)式得

$$L' = k_t \frac{ds}{ds'} \frac{\sin^2 u}{\sin^2 u'} L. \quad (18)$$

设物和像的大小分别为 y 和 y' , 物空间和像空间的折射率分别为 n 和 n' , 且系统满足正弦条件

$$nys \sin u = n'y' \sin u', \quad (19)$$

而

$$\frac{ds}{ds'} = \frac{y^2}{y'^2}, \quad (20)$$

由(18)式~(20)式可得

$$L' = k_t L (n'/n)^2.$$

这样, 在像元 ds' 上产生的照度为

$$E' = \frac{dF'}{ds'} = \pi L' \sin^2 u' = k_t \pi L \left(\frac{n'}{n}\right)^2 \sin^2 u'.$$

对于摄像机来说, 一般情况下其物距远远大于焦距, 这时即使物体的位置在很大范围内改变, 像平面也总是在像方焦距附近, 出射孔径角 u' 近似是常量。在这里摄像机的光学系统可看作是一个薄透镜, 孔径光阑和光瞳就可以被视为透镜本身, 若透镜直径为 D , 像方焦距为 f , 那么

$$\sin u' = D/(2f),$$

因此

$$E' = \frac{k_t \pi L}{4} \left(\frac{D}{f}\right)^2 \left(\frac{n'}{n}\right)^2,$$

其中 f/D 为相对孔径的倒数, 叫做 F 数。由于在实际使用时物空间与像空间的介质相同, 因此 $n'/n = 1$, 所以

$$E' = \frac{k_t \pi L}{4} \left(\frac{D}{f}\right)^2$$

假设像平面上各像点对应的光束都充满出瞳, 即无渐晕, 光轴与透镜中心和基体金属上反射点之间的夹角为 ω , 那么轴外像点周围的实际光照度 E'_ω 为

$$E'_\omega = E' \cos^4 \omega,$$

而在实际的光学系统中通常都存在斜光束渐晕, 假设渐晕系数为 k_2 , 则

$$E'_\omega = k_2 \cos^4 \omega E',$$

所以实际到达像平面的光照度为

$$E'_\omega = k_2 \cos^4 \omega \frac{k_t \pi L(\lambda)}{4} \left(\frac{D}{f}\right)^2 = \frac{k_0 \pi h A}{4r^3} \cos^4 \omega \left(\frac{D}{f}\right)^2 f_r L(\lambda).$$

其中 $k_0 = k_1 k_2$ 。因此, 反(散)射光经滤光片和透镜后到达像平面上的光照度为

$$E''(\lambda) = \frac{k_0 \pi h A}{4r^3} \left(\frac{D}{f}\right)^2 \cos^4 \omega \int_0^\infty f_r L(\lambda) F_G(\lambda - \lambda_c) d\lambda. \quad (21)$$

再经图像传感器将光照度 E 转换成灰度级 G 为

$$G(\lambda) = p E''(\lambda)^\gamma, \quad (22)$$

其中 p 为比例常数, γ 为摄像机的特性系数。

将(21)式代入(22)式得

$$G(\lambda_c) = p \left[\frac{k_0 \pi h A}{4r^3} \left(\frac{D}{f}\right)^2 \cos^4 \omega \right]^\gamma \times \left[\int_0^\infty f_r L(\lambda) F_G(\lambda - \lambda_c) d\lambda \right]^\gamma.$$

根据上述公式可以得出电弧中心与视场内被照点的距离 r 与灰度的关系曲线(图 4) 以及光轴与

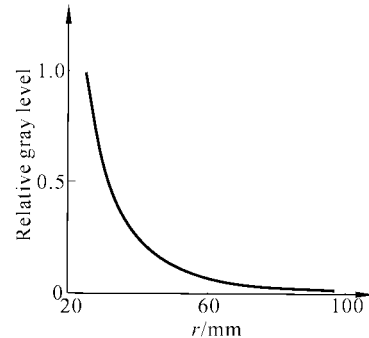


Fig. 4 Curve of relative gray level vs r

透镜中心和基体金属上反射点之间连线的夹角 ω 与灰度的关系曲线(图 5)。

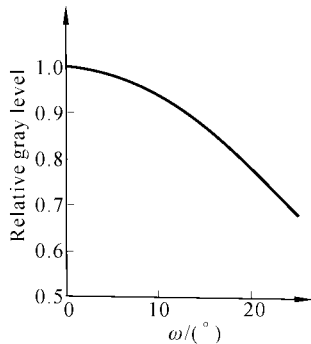


Fig. 5 Curve of relative gray level vs ω

由图 5 可以看出,随着光轴与透镜中心和基体金属上反射点之间夹角 ω 的加大,在同样光照度的作用下,边缘处的灰度要比中心处的低,当 ω 增大到 25° 时,由于电弧光的亮度已经远远超过了 CCD 摄像机的灰度上限 255,因此即使边缘处的灰度减小 20%,其灰度值也在 255 之上,因此这种作用对电弧光来说关系并不大;但是由于对激光束来说,这种作用同样也存在,而激光光束的灰度值在 255 左右,因此将对成像质量产生很大的影响。因此,为了保证良好的成像质量,应使 ω 在 15° 范围内,这样可以使中心与边缘的灰度之差在 10% 左右。所以应选择合适的摄像机镜头以及选取适当的工作视野和摄像机与工作表面的距离。

5 结构光视觉传感器的结构设计

为了简化图像处理,提高图像处理速度,采用激光二极管垂直照射、CCD 摄像机倾斜接收的方式,这样可以保证每一幅图像描述了焊缝的一个垂直截面,如图 6 所示。

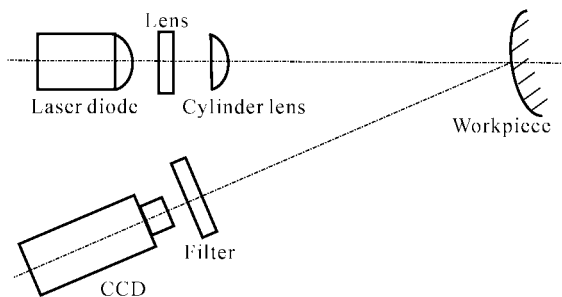


Fig. 6 Principle of structure light sensor

摄像机选用 MTV1881EX 黑白 CCD 摄像机,选用 Sharp 公司生产的 LT022MCO 型红外半导体激光二极管,其中心波长为 780 nm,功率为 5 mW,发散角为 $34.7^\circ \times 10.9^\circ$ 。

由激光二极管发出的激光束经过准直透镜后得到平行性较好的椭圆形光斑,然后再经过一个 $25 \text{ mm} \times 15 \text{ mm}$ 、焦距约为 40 mm 的圆柱透镜使激光光斑在短轴方向进行准直,而在长轴方向自由发散,在空间形成一个光平面,此光平面与待焊工件相交后,形成一条很窄的亮带,这就是所需的结构光光条。综合考虑分辨率和结构尺寸两方面因素的影响,取 CCD 摄像机与激光光轴的夹角为 30° 。为了更好地消除电弧光的干扰,CCD 摄像机的前面安装了一个中心波长为 780 nm,带宽为 $\pm 20 \text{ nm}$ 的干涉滤光片。由于电弧光的干扰太强,因此为了提高系统的抗干扰能力,采用了三个 5 mW 激光二极管组合使用的方案,实际焊缝跟踪实验证明效果很好。如图 7 所示,第十道焊接过程中的跟踪轨迹与理想轨迹的误差在 $\pm 0.5 \text{ mm}$ 之内。

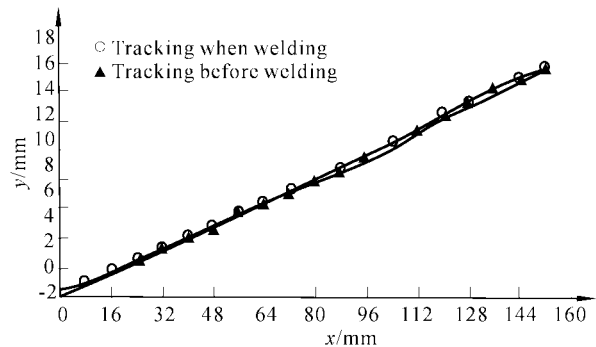


Fig. 7 Comparison of 10th joint before and after welding

参 考 文 献

- 1 Zhang Fumin. *Robotics* (机器人学). Beijing: Electronic Industry Press, 1996. 216~223 (in Chinese)
- 2 Dufour M, Cielo P. Optical inspection for adaptive welding. *Appl. Opt.*, 1984, **23**(94):1132~1134
- 3 Lee C W, Na S J. A study on the influence of reflected arc light on vision sensors for welding automation. *Welding J.*, 1996, **75**(12):379~387
- 4 Li Bofeng, Ma Qiqun, Zhang Xueru *et al.*. Properties of phase evolution of spontaneous emission in the k -photon ($k > 2$) Jaynes-Cummings model. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 1998, **18**(8):1040~1044 (in Chinese)

Study on the Theory of Welding Seam Detecting Sensor Based on Structure Light

Sun Lixin Han Wei Liu Bingqing Li Kai Zhang Minglu Yue Hong
(*Department of Mechanical Engineering, School of Mechanical Engineering,
Hebei University of Technology, Tianjin 300130*)

Cai Hegao

(*Research Institute of Robotics, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001*)
(Received 15 November 2001; revised 25 February 2002)

Abstract: The influence of arc noise to laser strip image is studied comprehensively, and the arc noise model is established. Originating from the principles of projective and perspective transformation, the models of coordinate transformation between workpiece and camera with arbitrary angle of laser light and camera are presented. Both of the models are very useful to the design of structure light sensor. The sensor designed based on the theory above is used in automatic welding.

Key words: applied optics; sensor technology; structure light sensor; imaging theory; arc illumination model