

基于明暗恢复形状的焊缝外形尺寸检测

杜全营, 陈善本, 林 涛
(上海交通大学 焊接技术研究所, 上海 200030)



杜全营

摘 要: 通过 CCD 获得焊缝图像, 再根据图像中的灰度变化来计算焊缝的外形尺寸, 从而实现焊缝外形尺寸的自动化检测, 大大的提高了检测效率。采用计算机视觉中明暗恢复形状(Shape from shading, 简称 SFS)技术对焊缝图像进行处理, 用迭代计算来实现该图像处理过程, 并利用多分辨率等级结构来加速计算过程。试验表明, 该方法使用设备简单、成本低、易于实现、计算精度高, 为焊缝外形质量检测实现智能化和自动化奠定基础。

关键词: 明暗恢复形状; 焊缝; 外形尺寸

中图分类号: TG44 文献标识码: A 文章编号: 0253-360X(2004)05-49-04

0 序 言

焊接是制造业中重要的工艺之一。随着现代高科技产品对焊接质量的要求越来越高, 对数量和品种的要求越来越多及先进制造技术的不断发展, 迫切要求焊接工艺实现自动化与智能化。而计算机视觉技术, 尤其是三维计算机视觉技术即三维重建技术, 以其丰富的信息量在焊接中的应用必将大大的推动焊接自动化与智能化的进程。

从明暗恢复形状(Shape from shading, 简称 SFS)是计算机视觉中三维形状恢复(3D shape recovery)问题的关键技术之一, 其任务是利用单幅图像中物体表面的明暗变化来恢复其表面各点的相对高度或表面法线方向等参数值, 为进一步对物体进行三维重构奠定基础。SFS 与其它三维重建技术相比设备简单、价格便宜、易于实现, 在遥感、模式识别和工业检测当中得到了很好的应用^[1~4]。

1 测量原理

对实际图像而言, 其表面各点图像亮度受到许多因素的影响, 如光源、物体表面材料性质和形状, 以及摄像机(或观察者)位置和参数等的影响, 为简化问题, 传统 SFS 方法均进行了如下假设: (1)光源为无限远处点光源; (2)反射模型为朗伯体表面反射模型(Lambertian surface model); (3)成像几何关

系为正交投影^[5], 这样物体表面的图像点亮度 I 仅由该点光源入射角 θ_i 的余弦决定, 具体光照模型如下

$$R(p, q) = \eta \cos \theta_i + \sigma_0 = I(x, y) = \eta(N, L) + \sigma_0 = \eta \frac{N_z - pN_x - qN_y}{\sqrt{1+p^2+q^2}} + \sigma_0 \quad (1)$$

式中: $R(p, q)$ 为图像照度方程; (p, q) 为待计算表面的梯度; $I(x, y)$ 为图像点的亮度; η 为反射系数, 取决于光源的强度和表面的反射特性; $N = (-p, q, 1) / \sqrt{1+p^2+q^2}$ 为表面的法线方向; $L = (N_x, N_y, N_z)$ 为沿光源方向的单位法向量; σ_0 为亮度偏移量, 依赖于背景亮度、校正等。

由单幅图像恢复表面形状的阴影恢复算法正是对图像照度方程的逆求解过程, 一般情况下, 仅由该模型所确定的 SFS 问题是病态的(一个方程有两个未知数, 没有唯一解)^[6,7], 因此为消除其病态性, 并建立相应的正则化模型, 必须对其表面形状进行约束。根据建立正规化模型方式的不同, 现有的 SFS 算法大致可分为最小值方法、演化方法、局部分析方法和线性化方法^[8]。由于后三种方法对图像的要求条件苛刻, 如演化方法要求图像清晰, 不含有噪声; 局部分析方法要求物体局部的形状与假设的模型十分的贴近; 线性化方法要求物体的表面不含有高阶项等, 不太适合于焊接中的应用。该文主要是采用最小值方法中 Zheng Q^[9] 的算法来对问题求解的。

1.1 计算模型

在计算 SFS 问题时, 最小值方法的思想是将由

物体表面反射模型所确定的照度方程式(1)和光滑表面模型均表示为能量函数的形式,然后再将它们联合表示为一个泛函极值问题或最优化控制问题,并获得该泛函在取最小值时的解,即为问题的解。

Zheng^[9]的泛函数值表示形式为

$$F = \iint F(p, q, Z) dx dy$$

$$F = [R(p, q) - I(x, y)]^2 + [R_p(p, q)P_x + R_q(p, q)q_x - I_x(x, y)]^2 + [R_p(p, q)P_y + R_q(p, q)q_y - I_y(x, y)]^2 + \mu[(p - Z_x)^2 + (q - Z_y)^2], \quad (2)$$

$$\begin{cases} \hat{p} = \frac{4}{\Delta} [(C_1 - \frac{1}{4}\mu C_3)(5R_q^2 + \frac{5}{4}\mu) - (C_2 - \frac{1}{4}\mu C_3)(5R_p R_q + \frac{1}{4}\mu)] \\ \hat{q} = \frac{4}{\Delta} [(C_2 - \frac{1}{4}\mu C_3)(5R_q^2 + \frac{5}{4}\mu) - (C_1 - \frac{1}{4}\mu C_3)(5R_p R_q + \frac{1}{4}\mu)] \\ \hat{z} = \frac{1}{4}(C_3 + \hat{p} + \hat{q}) \end{cases} \quad (3)$$

$$\Delta = 4[(5R_p^2 + \frac{5}{4}\mu)(5R_q^2 + \frac{5}{4}\mu) - 5R_p R_q + \frac{1}{4}\mu]^2 = 4\left\{5\mu[R_p^2 + R_q^2 + \frac{1}{4}(R_p - R_q)^2] + 1.5^2\mu\right\} > 0,$$

式中: $C_1 = (-R + I + R_p P_{xx} + R_q q_{xx} - I_{xx} + R_p q_{yy} + R_q q_{yy} - I_{yy})R_p - \mu(p - Z_x);$
 $C_2 = (-R + I + R_q q_{xx} + R_p p_{xx} - I_{xx} + R_p p_{yy} + R_q q_{yy} - I_{yy})R_q - \mu(q - Z_y);$
 $C_3 = -p_x + Z_{xx} - q_y + Z_{yy} .$

1.2 算法实现

采用多分辨率的等级结构来加速计算过程,最低分辨率为 32×32,图像尺寸依次以 2 的倍数增大(如 128×128, 64×64, 32×32),最低分辨率到最高分辨率的扩展采用插值的办法。具体计算过程见图 1。首先赋图像模型的参数,然后对输入图像标准化,使图像的灰度值在 0~1 之间,根据输入的图像生成不同分辨率的图像,首先计算最低分辨率的图像,赋 (p^0, q^0, z^0) 的初值为零,然后根据迭代公式(3)计算该层的解,再采用插值的办法把本层的解扩展到更高分辨率的下一幅图像作为初值进行迭代计算,直到计算到最高层的图像的解作为最终的解。

2 试验结果

在控制光源方向的前提下利用 CCD 摄像机对实际的焊缝进行拍摄,然后利用上述算法提取焊缝外形。焊缝、摄像机和光源的位置关系见图 2。摄

式中: $[R(p, q) - I(x, y)]^2$ 为亮度误差; $[R_p(p, q)p_x + R_q(p, q)q_x - I_x(x, y)]^2 + [R_p(p, q)p_y + R_q(p, q)q_y - I_y(x, y)]^2$ 为图像梯度误差; $[(p - Z_x)^2 + (q - Z_y)^2]$ 为物体表面的可积性约束; μ 为可积性因子。

这种约束的优点与 Hom^[7] 相比在于避免了光滑约束使恢复表面过于光滑和光滑因子难于调节。

对式(2)应用变分法求其欧拉方程并对 $R(p, q)$ 在 (p, q) 处进行泰勒展开到一次项,最终得到的迭代公式为

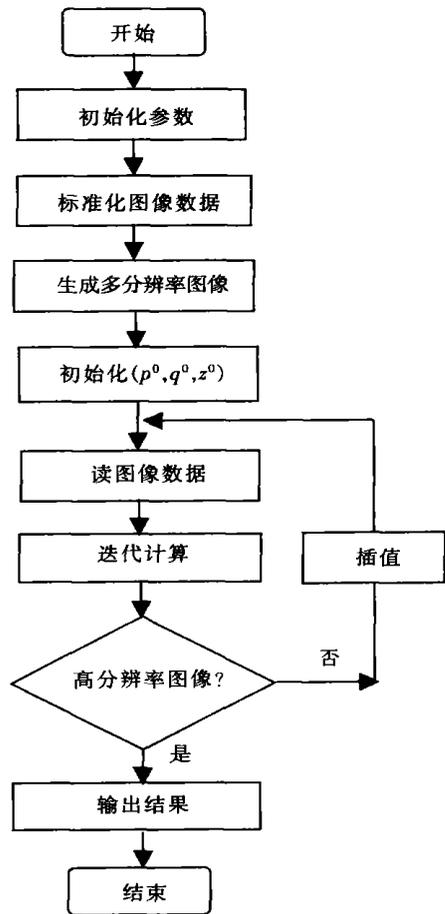


图 1 计算流程图

Fig. 1 Flowchart of algorithm

像在焊缝的正上方与 z 轴平行,光源与 z 轴的夹角为 45°,与 x 轴的夹角为 -135°。图 3 为摄取的一

幅焊缝图像,图像尺寸为 128×128 像素,对应于实际 60 mm×60 mm 的焊件,通过多次试验测得表面的反射率为 220.0,偏移量为 22.0。图 4 为采用上述算法而计算的高度结果。

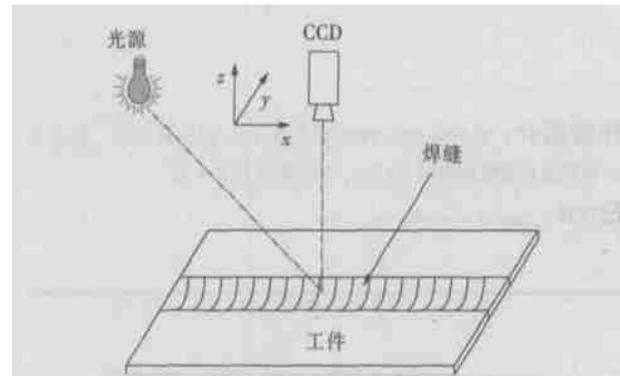


图 2 视觉位置关系
Fig.2 Position of vision



图 3 焊缝图像
Fig.3 Image of weld

为了进一步的说明计算的精确性,对计算的结果沿焊缝方向即图 4 中的 x 方向进行统计,具体统计公式如下

$$m(y) = \frac{1}{128} \sum_{x=0}^{127} z(x, y), \quad (4)$$

式中: $z(x, y)$ 为初始计算的高度值; $m(y)$ 为统计出的焊缝截面高度值。统计的曲线如图 5 中的“—”所示。为了验证计算的可靠性,在被测焊缝的区域沿 y 方向均匀的取 11 个测量点,然后在这 11 个测量点上分别沿焊缝方向 (x 方向) 取 10 个点并求平均值作为该测量点的测量值。最终计算出的测量值如图 5 中的“+”所示。从图 3 和图 4 可以看出在焊缝的右侧由于受到光源的直接照射,灰度变化小,对应的图像照度方程非线性问题严重,使得计算效果较差;而左侧灰度变化明显,使得计算结果较为接近实际测量点。根据这一特点,在用于焊缝外形的实际

检测中可以采用仅取左侧计算结果来推算右侧结果的办法并且采用高度补偿的办法可以得到较好的效果。

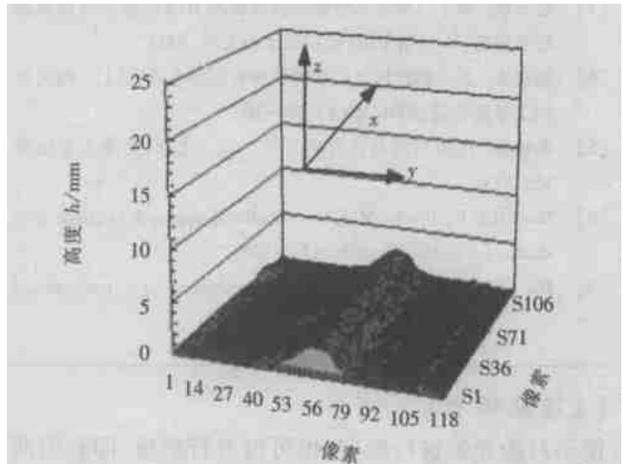


图 4 焊缝恢复计算结果
Fig.4 Computed results of weld

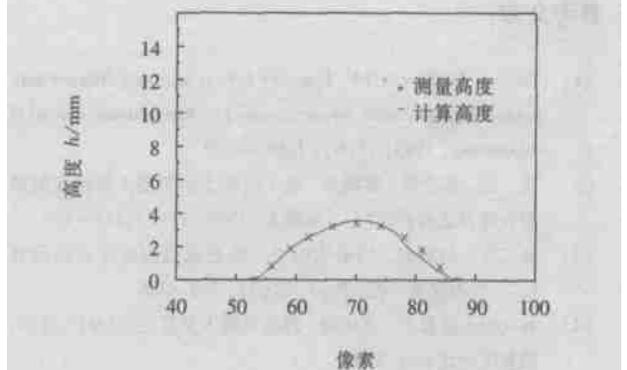


图 5 重建点与测量点的比较
Fig.5 Compare between reconstructed and measured

3 结 论

成功地把计算机视觉中基于单幅图像明暗恢复形状的技术应用于焊缝外形尺寸的检测。该方法与传统的结构光检测方法相比设备简单、价格便宜,仅需要一台 CCD 摄像机、一个图像卡、一台 PC 机和一个普通光源即可;该算法易于实现,避免了普通立体视觉中图像匹配的困难;计算精度高,能够准确的计算出焊缝的三维外形尺寸。

参考文献:

[1] Robert T, Frankot, Rama Chellappa. A method for enforcing integrability in shape from shading algorithms[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1988, 10(8): 439-451.

- [2] Lee K M, Kuo C J. Surface reconstruction from photometric stereo images[J]. Journal of Optical Society of America, 1993, 10(5): 855—868.
- [3] 赵冬斌. 基于三维视觉传感的填丝脉冲 GTAW 熔池现状动态智能控制[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2000.
- [4] 杨晓波. 基于阴影恢复形状的织物表面形态研究[J]. 西北纺织工学院学报, 2001, 15(4): 33—38.
- [5] 章毓晋. 图象理解与计算机视觉[M]. 北京: 清华大学出版社, 2000.
- [6] Horn B K P, Brooks M J. The variational approach to shape from shading[C]. CVGIP, 1986. 174—208.
- [7] Horn B K P. Height and gradient from shading [J]. International

Journal of Computer Vision, 1990, 5(1): 37—75.

- [8] 廖 熠, 赵荣春. 从明暗恢复形状(SFS)的几类典型算法分析与评价[J]. 中国图象图形学报, 2001, 6(10): 953—961.
- [9] Zheng Q, Chellappa R. Estimation of illuminant direction, albedo, and shape from shading[J]. IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1991, 13(7): 680—702.

作者简介: 杜全营, 男, 1978年5月出生 博士研究生。研究方向为复杂系统智能控制; 计算机视觉, 发表论文4篇。

Email: duqy@sjtu.edu.cn

[上接第 48 页]

使不对激光器进行标定, 也可以进行测量, 即利用两台摄像机的图像获得三维坐标信息。该方法可以大幅度提高视觉测量的可用性。

(4) 通过信息融合, 可以提高测量精度。

参考文献:

- [1] Bakos G C, Tsagas N F, Lygouras J N, *et al.* Long distance non-contact high precision measurements [J]. International Journal of Electronics, 1993, 75(6): 1269—1279.
- [2] 岳 宏, 孙立新, 蔡鹤皋. 基于结构光的机器人焊接实时图像处理方法的研究[J]. 机器人, 1999, 21(2): 144—147.
- [3] 张广军, 马骥群. 网条结构光三维视觉检测标定方法研究[J]. 仪器仪表学报, 2000, 21(3): 283—286.
- [4] 林尚扬, 陈善本, 李成桐. 焊接机器人及其应用[M]. 北京: 机械工业出版社, 2000.
- [5] 吴 林, 陈善本. 智能化焊接技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2000. 192—205.
- [6] Ma S D. A self-calibration technique for active vision system[J]. IEEE Transaction on Robotics and Automation, 1996, 12(1): 114—120.
- [7] Basu A. Active calibration: alternative strategy and analysis[A]. In proceeding of IEEE conference on computer vision and

pattern recognition[C]. New York, 1993. 495—500.

- [8] Du F, Brady M. Self-calibration of the intrinsic parameters of camera for active vision system[A]. In Proceeding of IEEE conference on computer vision and pattern recognition[C]. New York, 1993. 477—482.
- [9] Hartley R. Self-calibration of stationary cameras[J]. International Journal of Computer Vision, 1997, 229(1): 2—5.
- [10] Bilibon H Yoshimi, Peter K Allen. Active, uncalibrated visual servoing[A]. In IEEE international conference on robotics & automation [C]. San Diego, 1994. 156—161.
- [11] Faugeras O D, Toscani G. The calibration problem for stereo[A]. IEEE computer society conference on computer vision and pattern recognition[C]. Miami Beach Florida, 1986. 15—20.
- [12] 张艳珍, 欧宗瑛. 一种新的摄像机线性标定方法[J]. 中国图象图形学报, 2001, 6(8): 727—731.
- [13] 衡 伟. 用于高精度三维计算机视觉的图像系统标定和误差补偿[J]. 中国图象图形学报, 2001, 6(10): 988—992.
- [14] 马颂德, 张正友. 计算机视觉—计算理论与算法基础[M]. 北京: 科学出版社, 1997. 257—259.

作者简介: 徐 德, 男, 1965年12月出生, 工学博士, 副研究员。主要研究方向为机器人控制 视觉测量与控制, 发表论文36篇。

Email: xude@compsys.ia.ac.cn