

基于亚像素边缘定位的排针参数精密测量^①

顾裕丰, 刘国栋

(江南大学 物联网工程学院, 无锡 214122)

摘要: 为了提高排针参数的检测效率和精度, 提出了一种利用亚像素边缘定位对排针进行非接触测量的方法。首先采用 LOG 算子对图像进行整像素级的边缘粗定位, 在抑制噪声的同时, 保持图像边缘的完整性。然后采用改进的 Zernike 矩进行亚像素边缘定位。最后通过最小二乘法拟合离散的边缘点得出排针的精确边缘。实验结果表明, 该方法边缘定位精度高, 稳定性好, 满足排针在线检测的要求。

关键词: 边缘定位; 排针; 亚像素; LOG 算子; Zernike 矩

Accurate Measurement for Pin Parameters Based on Subpixel Edge Localization

GU Yu-Feng, LIU Guo-Dong

(School of Internet of Things Engineering, Jiangnan University, Wuxi 214122, China)

Abstract: In order to improve detection efficiency and accuracy of pin parameters, a non-contact measurement method of pin based on subpixel edge localization is presented in this paper. Firstly, LOG operator is used to seek approximate localization on pixel level, which can keep the intact edge information of image while restraining the noise. Then, improved Zernike moment is used to abstract subpixel edge localization. Finally, the exact edge of pin is gained from the discrete subpixel points using the least square fitting method. The experimental results show that this method can locate the edge with high accuracy and good stability, and satisfy the request of the on-line detection of pin.

Key words: edge localization; pin; subpixel; LOG operator; Zernike moment

数字图像的边缘检测是图像分割、目标区域识别、区域形状提取等图像分析领域十分重要的基础, 在工程应用中占有十分重要的地位。基于机器视觉的精密测量方法具有非接触、高精度、高自动化以及全视场测量的特点, 从而被广泛的应用于几何尺寸的测量以及精密零部件的外形检测。提高视觉测量系统精度可从软硬件两个方面考虑: 在硬件上, 通过提高 CCD 摄像机分辨率实现, 但成本较高; 在软件上, 通过把图像目标定位在亚像素级别, 从而提高测量精度。

排针是一种连接器原材料, 用于板与板之间的连接, 广泛应用于通讯设备、安防、工控、数码产品等新兴电子领域。排针从规格上可分为 1.27mm 排针、2.0mm 排针、2.54mm 排针。排针的针间距是

作为判断排针合格率的一个关键性指标。随着工业检测对产品精度的不断提高, 像素级边缘定位算法很难满足实际要求。亚像素边缘定位采用浮点运算, 利用预知的目标特性, 对图像目标的形状、灰度等属性问题进行处理分析、识别并确定与目标特征相吻合的位置^[1]。目前常用的亚像素边缘定位算法主要有 Lyvers 等提出的空间矩法^[2]、Tabatabai 等提出的灰度矩法^[3]、K.Jensen 等提出的非线性插值法^[4]、Ghosal 等提出的 Zernike 矩法。基于 Zernike 矩具有正交性、对噪声图像不敏感等优点, 本文通过 LOG 算子像素级粗定位后, 采用改进的 Zernike 矩亚像素定位算法, 实现了对排针针间距的精密测量。该方法避免了接触式测量对排针的损伤, 满足了排针高精度实时在线测量的要求。

① 收稿时间:2011-03-27;收到修改稿时间:2011-04-23

1 视觉测量系统概述

本文的视觉测量系统基于嵌入式实时操作系统，如图 1 所示，采用了 DSP 和 FPGA 的双 CPU 架构，便于平衡处理负担，提高处理效率。采用 DSP 作为主处理器，主要完成图像处理和在工作模式的判别功能；采用 FPGA 作为协处理，主要完成图像的采集和对 FLASH 的分页控制功能，并对外提供数字 I/O 接口。集图像采集、图像处理、网络传输等多模块于一体，功能完整。

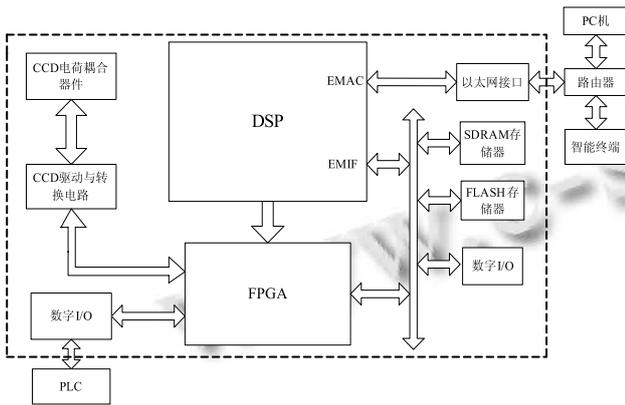


图 1 视觉测控系统结构图

2 像素级边缘定位

像素级的边缘定位是通过使用像素级的边缘检测算法对目标初步定位，从而得到整像素精度的定位过程。本文采用传统的边缘检测算子对排针进行快速定位，因为其模板简单、速度快。在像素级粗定位的基础上再运用亚像素定位算法进行重新定位，避免了对整幅图像的计算，从而减少了运算时间。

LOG 算子具有较好的尺度特性，基本思想是先对原始图像进行平滑处理，对图像噪声实现最大程度的抑制，再对平滑后的图像求取边缘。二维高斯函数表示如下：

$$G(x,y) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} \exp\left(-\frac{x^2+y^2}{2\sigma^2}\right) \tag{1}$$

其中， σ 是高斯分布的均方差，图像的被模糊程度与其成正比。平滑图像 $h(x,y)$ 由高斯函数 $G(x,y)$ 和原始图像 $M(x,y)$ 卷积得到，即

$$h(x,y) = G(x,y) * M(x,y) \tag{2}$$

采用 Laplacian 算子获取平滑图像的二阶方向导数图像 $h(x,y)$ ，如下所示：

$$\begin{aligned} \nabla^2 h(x,y) &= \nabla^2(G(x,y) * M(x,y)) \\ &= (\nabla^2 G(x,y)) * M(x,y) \end{aligned} \tag{3}$$

求出 $\nabla^2 h(x,y)$ 的零交叉点即为原始图像 $M(x,y)$ 的边缘点。式(3)中， $\nabla^2 G(x,y)$ 即为 LOG 算子，它的形式如下：

$$\nabla^2 G(x,y) = \frac{-1}{\pi\sigma^4} \left(1 - \frac{x^2+y^2}{\sigma^2}\right) \exp\left(-\frac{x^2+y^2}{2\sigma^2}\right) \tag{4}$$

LOG 算子边缘检测的结果可以通过高斯函数 $G(x,y)$ 中 σ 的来进行调整。 σ 值越大，噪声滤波效果越好，但也丢失了重要的边缘信息，影响边缘检测的性能； σ 值越小，就可能平滑不完全而留有太多噪声。通过实验，本文采用 $\sigma=0.5$ 进行图像平滑。

3 亚像素边缘定位

Zernike 矩边缘定位利用 Zernike 多项式的正交性、完备性以及复数矩的旋转不变性，算出图像边缘的亚像素位置。

二维连续函数 $f(x,y)$ 的 Zernike 矩为：

$$Z_{nm} = \frac{n+1}{\pi} \iint_{x^2+y^2 \leq 1} f(x,y) V_{nm}^*(\rho,\theta) dx dy, x^2+y^2 \leq 1 \tag{5}$$

式(5)中 $n+1/\pi$ 是标准系数，多项式 $V_{nm}(\rho,\theta)$ 是极坐标系中单位圆的 n 阶 m 次 Zernike 多项式，表示复共轭。 $V_{nm}(\rho,\theta)$ 可以表示为：

$$V_{nm}(\rho,\theta) = R_{nm}(\rho) e^{im\theta} \tag{6}$$

其中， m, n 为多项式阶次并满足条件： $n \geq 0, n-|m|$ 为偶数且 $|m| \leq n$ ， i 为虚数单位。 $R_{nm}(\rho)$ 是一个半径多项式，它可以表示为：

$$R_{nm}(\rho) = \sum_{s=0}^{(n-|m|)/2} \frac{(-1)^s (n-s)! \rho^{n-2s}}{s! \left(\frac{n+|m|}{2}-s\right)! \left(\frac{n-|m|}{2}-s\right)!} \tag{7}$$

对于离散的数字图像，Zernike 矩表示为：

$$Z_{nm} = \frac{n+1}{\pi} \sum_x \sum_y f(x,y) V_{nm}^*(\rho,\theta), x^2+y^2 \leq 1 \tag{8}$$

Zernike 矩算子^[5]的基本思想是计算图像中每个像素点的四个参数，从而判断该点是否为边缘点。二维图像边缘模型的四个参数分别为 h, k, θ, l ，如图 2(a)所示。其中， h 为背景灰度， k 为边缘跳变， θ 为边缘法线相对于 x 轴的角度， l 为单位圆中心到边缘的垂直距离。根据旋转不变性，将图像边缘模型顺时针旋转 θ 角，直至边缘与 y 轴平行，如图 2(b)所示。

旋转图像的 Zernike 矩 Z'_{nm} 与原始图像的 Zernike 矩 Z_{nm} 有如下关系：

$$Z'_{00} = Z_{00}; Z'_{11} = Z_{11}e^{-i\theta}; Z'_{20} = Z_{20} \quad (9)$$

设 $f'(x, y)$ 为旋转后的图像, 则有

$$\iint_{x^2+y^2 \leq 1} f'(x, y) dx dy = 0 \quad (10)$$

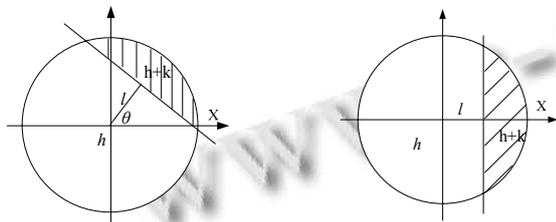
式(10)表示边缘与 y 轴平行的 Zernike 矩 Z'_{11} 的虚部为零, 即

$$\text{Im}[Z'_{11}] = \sin\theta \text{Re}[Z_{11}] - \cos\theta \text{Im}[Z_{11}] = 0 \quad (11)$$

其中 $\text{Re}[Z_{11}]$ 、 $\text{Im}[Z_{11}]$ 分别为 Z_{11} 的实部和虚部。

所以:

$$\theta = \arctan\left(\frac{\text{Im}[Z_{11}]}{\text{Re}[Z_{11}]}\right) \quad (12)$$



(a) 理想平面示意图 (b) 平面旋转示意图

图 2 亚像素理想阶跃模型

根据图 2 所示的边缘模型, 结合式(9)中旋转图像与原始图像 Zernike 矩的关系, 可得边缘模型的三个参数:

$$l = \frac{Z_{20}}{Z'_{11}} = \frac{Z_{20}}{Z_{11}} e^{-i\theta} \quad (13)$$

$$k = \frac{3Z'_{11}}{2(1-l^2)^{3/2}} = \frac{3Z_{11}}{2(1-l^2)^{3/2}} e^{i\theta} \quad (14)$$

$$h = \frac{Z_{00} - \frac{k\pi}{2} + k \arcsin l + kl\sqrt{1-l^2}}{\pi} \quad (15)$$

图像边缘的亚像素计算公式表示为:

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} + l \begin{bmatrix} \cos\theta \\ \sin\theta \end{bmatrix} \quad (16)$$

其中, $[x' \ y']$ 和 $[x \ y]$ 分别为边缘的亚像素坐标和像素级坐标。

在离散条件下, Zernike 矩的计算可以通过模板卷积算法^[6]来简化。Ghosal 等人提出的 Zernike 矩算法^[7]由于没有考虑模板效应, 从而使边缘亚像素坐标的计算产生偏差。假设模板为 $N \times N$, 模板覆盖的是模板中心周围 N^2 个像素, 单位圆半径变为 $N/2$, 应该把单位圆上计算得到的垂直距离 l 扩大 $N/2$ 倍。因此图像边

缘的亚像素坐标公式为:

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} + \frac{N}{2} l \begin{bmatrix} \cos\theta \\ \sin\theta \end{bmatrix} \quad (17)$$

模板的尺寸越大, 边缘细化能力和噪声抑制越好, 边缘定位就越精确。本文采用 7×7 的 Zernike 矩模板与原始图像进行卷积。推导的 7×7 模板如表 1~3 所示。式(17)中得到的亚像素边缘点是离散的, 因此采用最小二乘法^[8]把各边缘上的所有离散点进行拟合, 得到实际的亚像素边缘。

表 1 Z_{11} 实数模板

0	0.015	0.019	0	-0.019	-0.015	0
0.022	0.047	0.023	0	-0.023	-0.047	-0.022
0.057	0.047	0.023	0	-0.023	-0.047	-0.057
0.07	0.047	0.023	0	-0.023	-0.047	-0.07
0.057	0.047	0.023	0	-0.023	-0.047	-0.057
0.022	0.047	0.023	0	-0.023	-0.047	-0.022
0	0.015	0.019	0	-0.019	-0.015	0

表 2 Z_{11} 虚数模板

0	-0.022	-0.057	-0.07	-0.057	-0.022	0
-0.015	-0.047	-0.047	-0.047	-0.047	-0.047	-0.015
-0.019	-0.023	-0.023	-0.023	-0.023	-0.023	-0.019
0	0	0	0	0	0	0
0.019	0.023	0.023	0.023	0.023	0.023	0.019
0.015	0.047	0.047	0.047	0.047	0.047	0.015
0	0.022	0.057	0.07	0.057	0.022	0

表 3 Z_{20} 模板

0	0.028	0.039	0.041	0.039	0.023	0
0.023	0.027	-0.013	-0.026	-0.013	0.027	0.023
0.039	-0.013	-0.053	-0.066	-0.053	-0.013	0.039
0.041	-0.026	-0.066	-0.081	-0.066	-0.026	0.041
0.039	-0.013	-0.053	-0.066	-0.053	-0.013	0.039
0.023	0.027	-0.013	-0.026	-0.013	0.027	0.023
0	0.028	0.039	0.041	0.039	0.023	0

4 实验结果及分析

本实验采用相机是拓尔公司的敏通 MTC-63V5HP 面阵 CCD 摄像机, 像素为 800×600 , 像元大小为 $4.65 \mu\text{m} \times 4.65 \mu\text{m}$ 。光源使用的是 LED 平行光源。排针采用的是针间距为 2.54mm 的工业级标准件。通过视觉测量系统采集到的排针图像如图 3 所示。由于排针的针头和针尾部分对图像测量有干扰, 截取红框中的有效部分进行亚像素边缘定位。采用本文改进的 LOG-Zernike 算法进行亚像素边缘定位后得到的图像

如图4所示。其中，绿点为排针的亚像素边缘点。

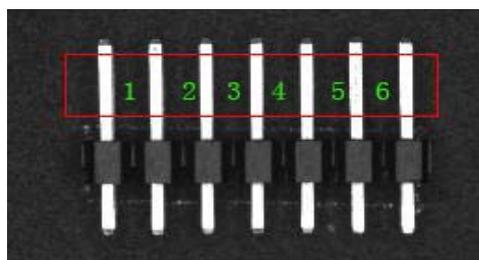


图3 排针原始图像

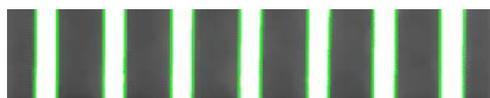


图4 亚像素边缘定位后的图像

根据检测要求，排针的针间距允许误差范围是 $\pm 0.01\text{mm}$ 。针间距在 $2.53\text{mm} \sim 2.55\text{mm}$ 范围内的排针都可视为合格件。在对 CCD 摄像机进行标定后，排针的六段针间距测量数据如表4所示。由测量结果可见，采用 LOG 算子像素级边缘定位方法测量出的第1段和

第6段针间距绝对偏差超过 0.01mm ，未满足检测要求，造成了对排针的误检测。而采用 Ghosal 提出的算法和本文算法测得的针间距都满足了检测要求。

由表4可得，采用 Ghosal 的算法得到的针间距尺度分散性^[9] $d_{\max} - d_{\min}$ 为 0.0162 ，其中 d_{\max} 和 d_{\min} 分别对应排针六段针间距的最大值和最小值。本文算法的尺度分散性为 0.0072 。另外，Ghosal 算法的测量精度为 0.0082mm ，本文算法的精度为 0.0038mm 。因此，相比 Ghosal 的算法，本文算法的尺度分散性较小，稳定性好，测量精度高。

5 结论

本文提出了一种应用于排针检测的亚像素边缘定位算法。首先通过 LOG 算子进行边缘粗定位，减小计算量，然后通过改进的 Zernike 矩对边缘进行亚像素定位。实验结果表明，该算法应用在排针的针间距测量上，稳定性好，测量精度高，满足工业在线检测的要求，具有较高的实用价值。

表4 测量结果比较 (单位: mm)

针间距序号	1	2	3	4	5	6
LOG 算子	2.5262	2.5316	2.5473	2.5425	2.5413	2.5527
偏差	-0.0138	-0.0084	0.0073	0.0025	0.0013	0.0127
Ghosal 的算法	2.5320	2.5341	2.5476	2.5413	2.5343	2.5482
偏差	-0.0080	-0.0059	0.0076	0.0013	-0.0057	0.0082
本文算法	2.5362	2.5376	2.5412	2.5396	2.5381	2.5434
偏差	-0.0038	-0.0024	0.0012	-0.0004	-0.0019	0.0034

参考文献

- 1 于起峰,陆宏伟,刘肖琳.基于图像的精密测量与运动测量.北京:科学出版社,2002.132-134.
- 2 Lyvers EP, Mitchell OR. Subpixel measurements using a moment-based edge operator. IEEE Trans. on PAMI, 1989, 11(12): 1293-1309.
- 3 Tabatabai AJ, Mitchell OR. Edge location to subpixel values in digital imagery. IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1984,6(2):188-201.
- 4 Jensen K. Subpixel edge localization and the interpolation of still images. IEEE Trans. on PAMI,1995,17(6):629-634.

- 5 曲迎东,李荣德,袁晓光等.两级 Zernike 矩算子在喷射沉积坯尺寸检测中的应用.光电子·激光,2006,17(5):600-603.
- 6 高世一,赵明扬,张雷,邹媛媛.基于 Zernike 正交矩的图像亚像素边缘检测算法改进.自动化学报,2008,34(9):1163-1168.
- 7 Ghosal S, Mehrotra R. A moment-based unified approach to image feature detect. IEEE Trans. on Image Processing, 1997,6(6):781-793.
- 8 张起贵,张魁.基于最小二乘直线拟合的小目标检测.电子设计工程,2010,18(7):176-180.
- 9 张永宏,胡德金,徐俊杰.基于视觉图像的机加工零部件亚像素边缘定位.机械工程学报,2004,40(6):179-182.