基于机器视觉的零件特征尺寸提取算法

杨仁民¹,郑洲¹,陈斌²,张学昌¹,张炜¹

(1.浙江大学宁波理工学院,宁波 315100; 2.宁波六和包装有限公司,宁波 315100)

摘要:目的复杂型面零件功能特征多样,结构尺寸呈现空间分布,传统的手工检测方法无法满足检测 工作要求,为提升检测效率,提出一种基于机器视觉的非接触式测量方法。方法 使用 CCD 相机采集图 像信息,对图像进行分析处理,获得圆的亚像素边缘轮廓,再通过最小二乘法进行圆拟合求得圆的参数 方程,最后利用几何距离公式求得像素距离。通过系统标定求出像素当量,由像素当量最终求得圆与圆 之间的实际距离。结果 最小二乘拟合圆亚像素边缘检测算法稳定,抗噪性能较好,算法的分辨率为 0.001 个像素。结论 该方法可正确、方便、有效地对零件进行尺寸测量。

关键词:像素当量;亚像素边缘轮廓;最小二乘法拟合;提取特征尺寸 中图分类号:TP391 文献标识码:A 文章编号:1001-3563(2017)09-0151-06

Extraction Algorithm of Part Feature Sizes Based on Machine Vision

YANG Ren-min¹, ZHENG Zhou¹, CHEN Bin², ZHANG Xue-chang¹, ZHANG Wei¹
(1.Ningbo Institute of Technology, Zhejiang University, Ningbo 315100, China;
2.Ningbo Liu He Packing Co., Ltd., Ningbo 315100, China)

ABSTRACT: The work aims to propose a non-contact measurement method based on machine vision, in order to improve the testing efficiency with respect to the situation that the traditional testing method cannot meet the testing requirements as the function features of complex surface part are diverse and the structure size takes on spatial distribution. The image data was collected with CCD camera to analyze and process the images, so as to obtain the sub pixel edge contour of a circle. The parameter equation of circle was obtained based on circle fitting by using the least square method. Lastly, the pixel distance could be calculated with the geometric distance formula. Pixel equivalent was got by system calibration and the actual distance between circle and circle could be obtained based on pixel equivalent. The testing algorithm of sub pixel edge of circle by the least square fitting was stable with good anti-noise performance and 0.001 pixel resolution. The proposed method is correct, convenient and effective when it is used to measure the part size.

KEY WORDS: pixel equivalent; sub pixel edge contour; least squares fitting; extract the feature sizes

随着工业 4.0 进程的不断推进,企业的生产模式 正经历着由传统模式向自动化、智能化模式转变。工 业产品为满足功能需要,工件往往具有复杂几何型 面,且其尺寸分布呈空间分布,依靠传统的人工检测 方法难以保证其测量精度。接触式三坐标测量机 (CMM)在精度和检测灵活性方面能够满足复杂型 面检测要求,但其检测效率低,只能用于抽样检测。 视觉检测是一种非接触式的检测方法,利用视觉检测 不仅可以保证测量精度,其测量效率也得到了明显的 提升。基于视觉检测精度和效率的优点,视觉检测在 实际生产中已得到了广泛的应用^[1-3]。

零件图像特征轮廓提取是复杂型面零件几何特 征检测的关键技术^[4]。目前常采用的图像分割方法 有:颜色区分法、纹理区分法、形态特征分析法等^[5]。 崔永杰、Domingo Mery 等^[6—7]通过比对不同颜色空 间,进行一系列的阈值分割和去噪处理,将水果从图

收稿日期: 2016-06-21

基金项目:国家自然科学基金 (51075362); 宁波市鄞州区科技局区重大产业技术创新专项 (2016G002)

作者简介:杨仁民(1991-),男,浙江大学宁波理工学院硕士生,主攻机械结构设计及运动学与动力学仿真技术。

通讯作者:张学昌(1969-),男,博士,浙江大学宁波理工学院教授,主要研究方向为复杂产品逆向建模关键技术。

像中分离出来,但由于零件的颜色单一,很难依靠颜 色来进行特征的识别。刘小勇等^[8]通过对光纤表面图 像信息的处理,提取目标区域的特征,获取缺陷处的 图像数据,通过改进的基于形态特征的 AdaBoost 级 联分类器,实现了光纤缺陷的实时监测,Xu 等^[9]应 用剪力波实现了表面缺陷特征的提取, 吕文阁等^[10] 基于 TRIZ 算法开发出了一种新算法,该算法能够对 含噪声图像的目标边缘进行有效地检测。罗元等[11] 通过混合分形和小波变换实现亚像素下目标边缘的 提取,其余常用的算子有 Robert, Sobel, Prewitt, LOG 等^[12], 但其算法均并未给出测量特征的实际尺 寸。文中采用的是一种建立在 Canny 边缘检测算法上 的方法,确定圆弧轮廓,再用最小二乘拟合圆确定圆 心位置,这种基于机器视觉的边缘检测尺寸的方法能 够实现了一种非接触式的测量,节省了时间、降低成 本、提高产量和产品质量、减轻测试及检测人员的劳 动力度。

1 基于机器视觉的特征尺寸提取原理

1.1 边缘检测的基本步骤

边缘轮廓提取的本质是运用特定算法在图像域 求出特征图像轮廓线。由于受设备等随机因素的影 响,原始图像总存在一定的噪声点,所以需采用滤波 算法对图像进行噪声去除。为了准确提取边界点,需 要对图像进行锐化处理,以突出像素灰度的变化。边 缘轮廓则由图像的梯度信息来确定,为得到实际边缘 特征,需要对所提取的边缘信息进行有效判别,整个 边缘检测的基本步骤见图 1。



图 1 边缘检测的基本步骤 Fig.1 The basic steps of edge detection

1.2 边缘检测算法

Canny 算子作为一种边缘检测常用算子^[13], 在检测过程中, 具有良好的抗噪性, 检测到的边缘连续性、 完整性较好, 效果优于其他算子。传统算法只能精确 到像素级, 实际测量精度需要精确到亚像素级^[14], 因 此, 文中研究了一种基于传统边缘检测算法的亚像素 边缘检测算法。Canny 边缘检测算法的具体步骤如下 所述。

1)用高斯滤波器平滑图像。利用省略系数的高

斯函数 H(x,y):

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

$$G(x, y) = f(x, y) \times H(x, y)$$
(2)
式中: $f(x, y)$ 为图像数据。

2)梯度计算中的一阶偏导由有限差分来获得, 其实现方法是模板卷积。

 $H_1 = \begin{pmatrix} -1 & -1 \\ 1 & 1 \end{pmatrix} \tag{3}$

$$H_2 = \begin{pmatrix} 1 & -1 \\ 1 & -1 \end{pmatrix} \tag{4}$$

$$\varphi_1(x, y) = f(x, y) \times H_1(x, y)$$
(5)

 $\varphi_2(x, y) = f(x, y) \times H_2(x, y)$ (6) 得到幅值:

$$\varphi(x, y) = \sqrt{\varphi_1^2(x, y) + \varphi_2^2(x, y)}$$
(7)
$$\hat{T} \stackrel{\text{(i)}}{=} :$$

$$\theta_{\varphi} = \arctan \frac{\varphi_2(x, y)}{\varphi_1(x, y)}$$
(8)

3)对梯度幅值进行非极大值抑制。为保证边缘 特征准确,需要保留局部梯度最大的点,而非局部极 大点则需要设为0,从而得到细化的边缘特征。标记 为0到3的4个区域对应3×3邻域的4种组合,见图 2。对邻域中心M沿梯度方向进行比较,如果其梯度 值小于相邻像素的梯度值,则M=0。



4) 双阈值检测及连接边缘。阈值 T₁和 T₂(T₁<T₂) 可以得到 2 个阈值边缘图像 N₁(*i*, *j*)和 N₂(*i*, *j*)。使用高 阈值得到的 N₂(*i*, *j*)有不闭合边缘,双阈值法在 N₂(*i*, *j*) 中把边缘连接成轮廓,在 N₁(*i*, *j*)的 8 邻域点位置寻找 可以连接到轮廓上的边缘,直到将 N₂(*i*, *j*)连接起来。 T₂用来找到每条线段,T₁用来在这些线段的 2 个方向 上寻找断裂边缘并进行连接。

用最小二乘法拟合圆确定圆心的位置。设零件像 素级的边缘点坐标为(*i*, *j*)。获得它在8邻域梯度方向 的图像信息,通过最小二乘曲线拟合获得零件在亚像 素级的中心位置^[15]。

1.3 最小二乘法拟合圆

通过最小二乘法对圆的亚像素特征信息进行中

心位置的拟合。最小二乘法拟合通过最小误差平方和 找到一组数据的最佳函数匹配。对于给定的离散测量 点集 $(x_i, y_i) \in (i = 1, 2 \cdots m)$,设理想圆的圆心为O(A,B), 半径为R。由圆的曲线方程:

$$R^{2} = (x - A)^{2} + (y - B)^{2}$$
可得:
(9)

$$R^{2} = x^{2} - 2Ax + A^{2} + y^{2} - 2By + B^{2}$$
(10)
$$\widehat{\Rightarrow}:$$

$$a = -2A b = -2B c = A^{2} + B^{2} - R^{2}$$
(11)
得出:

$$x^{2} + y^{2} + ax + by + c = 0$$
(12)

$$A = -\frac{a}{2} \tag{13}$$

$$B = -\frac{b}{2} \tag{14}$$

$$R = \frac{1}{2}\sqrt{a^2 + b^2 - 4c}$$
(15)

边缘检测到的点样本集 $(x_i, y_i) \in (i = 1, 2 \cdots m)$,中心点到圆心的距离为 d_i ,见图 3。



图 3 点到圆心的距离 Fig.3 The distance from the point to the center

$$d_i^2 = (x_i - A)^2 + (y_i - B)^2$$
 (16)
点 (x_i, y_i) 到圆边缘的距离与半径的平方差为:

$$\delta_i = d_i^2 - R^2$$
(17)

把式(11)带入式(17)得:

$$\delta_i = x_i^2 + y_i^2 + ax_i + by_i + c \tag{18}$$

令
$$\beta(a,b,c)$$
为 δ_i 的平方和,则:

$$\beta(a,b,c) = \sum \delta_i^2 = \sum \left[\left(x_i^2 + y_i^2 + ax_i + by_i + c \right) \right]^2 (19)$$

求参数 *a*, *b*, *c* 使得 $\beta(a,b,c)$ 的值最小。由于

 $\sum \delta_i^2 \ge 0$,则函数存在大于或等于 0 的极小值。

$$\beta(a,b,c)$$
对 a, b, c 求偏导:

$$\frac{\partial \beta(a,b,c)}{\partial a} = \sum 2(x_i^2 + y_i^2 + ax_i + by_i + c)x_i = 0 \quad (20)$$

$$\frac{\partial \beta(a,b,c)}{\partial b} = \sum 2(x_i^2 + y_i^2 + ax_i + by_i + c)y_i = 0 \quad (21)$$

$$\frac{\partial \beta(a,b,c)}{\partial c} = \sum 2(x_i^2 + y_i^2 + ax_i + by_i + c) = 0$$
(22)

由式(20)×*m*-(22)×
$$\sum x_i$$
得:

$$m\sum_{i}(x_{i}^{2} + y_{i}^{2} + ax_{i} + by_{i})x_{i} - \sum_{i}(x_{i}^{2} + y_{i}^{2} + ax_{i} + by_{i}) \times \sum_{i} x_{i} = 0$$
(23)
$$(m\sum_{i}X_{i}^{2} - \sum_{i}X_{i}\sum_{i}X_{i})a + \sum_{i}X_{i} = 0$$

$$(m\sum_{i}x_{i}y_{i} - \sum_{i}x_{i}\sum_{j}y_{i})b+$$

$$m\sum_{i}x_{i}^{3} + m\sum_{i}x_{i}y_{i}^{2} - (\sum_{i}x_{i}^{2} + \sum_{j}y_{i}^{2})\sum_{i}x_{i} = 0 \quad (24)$$

$$\# = (21) \times m - (22) \times \sum_{i}y_{i} + \sum_{i}y_{i}^{2} + \sum_{i}y_{i}^{$$

$$m \sum (x_i^2 + y_i^2 + ax_i + by_i)y_i - \sum (x_i^2 + y_i^2 + ax_i + by_i) \times \sum y_i = 0$$
(25)

$$n \sum x_i y_i - \sum x_i \sum y_i \right) a^+$$

$$\left(m \sum y_i^2 - \sum y_i \sum y_i \right) b^+ m \sum y_i^3 + m \sum x_i^2 y_i - \left(\sum x_i^2 + \sum y_i^2\right) \sum y_i = 0$$
(26)

$$\stackrel{\text{\tiny (27)}}{\approx} : \quad C = m \sum x_i^2 - \sum x_i \sum x_i \tag{27}$$

$$D = m \sum x_i y_i - \sum x_i \sum y_i$$
(28)
$$E = m \sum x_i^3 + m \sum x_i y_i^2 - (\sum x_i^2 + \sum y_i^2) \sum x_i$$
(29)

$$G = m \sum y_i^2 - \sum y_i \sum y_i$$
(30)

$$H = m \sum y_i^3 + m \sum x_i^2 y_i - \left(\sum x_i^2 + \sum y_i^2\right) \sum y_i \quad (31)$$
得出:

$$Ca + Db + E = 0$$

$$Da + Gb + H = 0$$
(32)
(33)

联立式(32)与式(33)解得:

$$a = \frac{GE - DH}{D^2 - CG} \tag{34}$$

$$b = \frac{HC - DE}{D^2 - CG}$$
(35)

$$c = -\frac{\sum (x_i^2 + y_i^2) + a \sum x_i + b \sum y_i}{m}$$
(36)

由此,得出圆心与半径的拟合值。求出圆心的 坐标位置,再根据几何两点间距离公式 $d = \sqrt{(x-a)^2 + (y-b)^2}$,最终求得出它们之间的距离。

1.4 标定

标定的目的是求出亚像素当量,对于标定尺而 言,需要用亚像素边缘轮廓提取出尺寸的2个边缘轮 廓,然后求出这2条直线间的距离。试件实际尺寸与 拍摄图像在某个焦距下有一个比例关系,即每个像素 所代表的实际尺寸,即为像素当量。文中主要测得圆 孔之间的实际距离,即为像素当量与像素距离的乘 积。通过 Canny 算子边缘检测的亚像素边缘轮廓,计 算出定刻度间的像素距离。

2 实验验证

2.1 三坐标测量机测量

以减速器箱体为测量对象,见图4,基于机器视

觉的特征尺寸亚像素边缘轮廓提取出 6 个圆孔的 坐标位置,计算出了 5 个小圆孔距离大圆孔的实际 距离,见图 5。



图 4 减速器的箱体 Fig.4 The reducer box



图 5 三坐标测量仪测距离 Fig.5 Measuring distance by using the three coordinate measuring instrument

2.2 亚像素边缘轮廓提取

为了尽可能较多地获取图像信息,用 CCD 相机 采集到的图像尺寸为 2452×2054,见图 6。为减小 CCD 相机采集图像边缘提取的误差,文中采用双线 性插值方法来处理图像,双线性插值公式(37),插值 后的亚像素边缘提取结果见图 7。

$$f(x,y) = \frac{y_2 - y_1}{y_2 - y_1} \left(\frac{x_2 - x}{x_2 - x_1} f(x_2, y_2) + \frac{x - x_2}{x_2 - x_1} f(x_1, y_2) \right) + \frac{y - y_2}{y_2 - y_1} \left(\frac{x_2 - x}{x_2 - x_1} f(x_2, y_1) + \frac{x - x_2}{x_2 - x_1} f(x_1, y_1) \right)$$
(37)

2.3 最小二乘法拟合圆

亚像素边缘轮廓提取后,再用最小二乘法拟合圆,确定圆心位置,见图 8。由距离公式求得它们的像素距离。测得的 1—5 圆孔到大圆孔的实际像素距离分别为 694.265, 885.736, 855.789, 855.789, 1145.800, 1224.070 像素,见图 9。



图 6 采集到的原始图像 Fig.6 The original image



图 7 亚像素边缘提取 Fig.7 Sub-pixel edge extraction



图 8 最小二乘拟合圆 Fig.8 Fitting circle with least square



图 9 像素距离 Fig.9 Pixel distance

2.4 标定

系统标定采用高精度标定尺,标定尺放在与被测 目标同一水平面上,见图 10。拍摄尺子图像时所设 定的焦距、光源、光圈和相机姿态与之前拍摄减速器 箱体时一致。然后对尺子的一段刻度进行提取,测得 它们之间的实际像素距离,见图 11。



图 10 标定尺图像 Fig.10 The calibration board



图 11 边缘对 Fig.11 The edge pair

由 $L = p\delta$ 中L为求得实际距离(mm), p为像素 距离, δ 为像素当量。在标定中求得出 δ 。最终求得 出 1—5 小圆孔到大圆孔的实际距离分别为 72.1843, 92.0920, 88.9783, 119.0314, 127.2693 mm。在三坐标 测量机(LK G90C)上,测量减速器箱体上1—5小 圆孔到大圆孔之间的实际距离分别为 72.1588, 92.0679, 89.0183, 119.0274, 127.2420 mm。将以上数 据与三坐标测量机测得的距离进行对比,其误差范围 在 0.02~0.04 mm之间,说明算法结果可靠、满足要 求,此方法在实际测量中可以测得较为精确的尺寸。

3 结语

研究了一种基于 Canny 算子的亚像素边缘提取 算法来确定空间圆特征之间的几何尺寸,通过双阈值 检测及连接边缘,结合最小二乘法拟合圆来确定亚像 素圆心间距离,通过高精度标定实现像素空间到实际 空间的尺度转换,从而得到零件特征间测量尺寸。经 过实例验证,结果表明,提出的最小二乘拟合圆亚像 素边缘检测算法可行,算法的分辨率为0.001个像素, 算法稳定性,抗噪性能较好,对带干扰图像中的边缘 特征能够进行有效的尺寸提取。

参考文献:

李旭, 王俊元, 曾志强, 等. 色差对机器视觉尺寸测量精度的影响研究[J]. 包装工程, 2015, 36(19): 93—96.

LI Xu, WANG Jun-yuan, ZENG Zhi-qiang, et al. Influence of Chromatic Aberration on the Size Measurement Accuracy of Vision[J]. Packing Engineering, 2015, 36(19): 93—96.

- [2] 张川川, 吴秀玲, 曾志强, 等. 基于视觉的某炮弹药 筒退弹槽槽底宽度精确测量研究[J]. 包装工程, 2014, 35(3): 74—77.
 ZHANG Chuan-chuan, WU Xiu-ling, ZENG Zhi-qiang, et al. Groove Width Detection of Right-angle Trapezoidal Groove Based on Vision[J]. Packaging Engi-
- neering, 2014, 35(3): 74—77.
 [3] 李红钢,杜文华,曾志强,等.基于机器视觉的圆筒 形零件直角梯形槽槽宽检测研究[J].包装工程, 2013, 34(3): 83—87.
 LI Hong-gang, DU Wen-hua, ZENG Zhi-qiang, et al. Research on Groove Width Detection of Right-angle Trapezoidal Groove of Cylindrical Parts Based on Machine Vision[J]. Packaging Engineering, 2013, 34(3): 83—87.
 [4] MILAN S, VACLAV H, ROGER B. Image Processing,
- Analysis, and Machine vision[M]. CL-Engineering, USA, 2007: 175–320.
- [5] 苗玉彬,王浙明,刘秦.水果轮廓特征提取的 Zernike 矩分水岭分割方法[J].农业工程学报, 2013(1): 158—163.
 MIAO Yu-bin, WANG Zhe-ming, LIU Qin. Application of Zernike-moment-based Watershed Segmentation on Fruit Features Extraction[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2013, 29(1): 158—163.
 [6] 崔永杰,苏帅,王霞霞,等.基于机器视觉的自然环 接中激蛋排识别与转行提取UPL 专动性机械学报。

境中猕猴桃识别与特征提取[J]. 农业机械学报, 2013, 44(5): 247—252. CUI Yong-jie, SU Shuai, WANG Xia-xia, et al. Recognition and Feature Extraction of Kiwifruit in Natural Environment Based on Machine Vision[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(5): 247—252.

- [7] MERY D, PEDRESCHI F. Segmentation of Colour Food Images Using a Robust Algorithm[J]. Journal of Food Engineering, 2005, 66(3): 353–360.
- [8] 刘小勇,郑琨. 光纤缺陷实时检测与分类方法研究
 [J].西安交通大学学报, 2014, 48(9): 1—5.
 LIU Xiao-yong, ZHENG Kun. Research on Optical fi-

ber Defect Real-Time Detection and Classification[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2014, 48(9): 1-5.

- [9] XU Ke, LIU Shun-hua, AI Yong-hao. Application of Shearlet Transform to Classification of Surface Defects for Metals[J]. Image and Vision Computing, 2015, 35: 23–30.
- [10] 吕文阁, 涂晓斌, 成思源, 等. 基于 TRIZ 的含噪声图像目标边缘检测算法[J]. 计算机集成制造系统, 2013, 19(2): 399—403.
 LYU Wen-ge, TU Xiao-bin, CHENG Si-Yuan, et al. Study of the Noise Image Target Edge Detection Algorithm Based on TRIZ[J]. Computer Integrated Manu-
- facturing Systems, 2013, 19(2): 399—403. [11] 罗元, 计超, 胡章芳. 混合分形和小波变换亚像素图 像边缘检测算法[J]. 南京理工大学学报, 2013, 37(2): 275—279.

LUO Yuan, JI Chao, HU Zhang-fang. Sub-pixel Image Edge Detection Algorithm Based on Mixed Fractal and Wavelet Transform[J]. Journal of Nanjing University of Science and Technology, 2013, 37(2): 275—279.

[12] 刘娟, 巨辉. 一种改进的基于机器视觉的边缘检测 算法[J]. 微计算机技术, 2007, 23(11): 256—258.
LIU Juan, JU Hui. An Improved Edge Detection Method Based on Machine Vision[J]. Microcomputer Information, 2007, 23(11): 256—258. 李俊山,马颖,赵方舟,等.改进的 Canny 图像边缘 检测算法[J]. 光子学报, 2011, 40(S1): 50—54. LI Jun-shan, MA Yin, ZHAO Fang-zhou, et al. An Novel

Arithmetic of Image Edge Detection of Canny Operator[J]. Acta Photonica Sinica, 2011,40(S1): 50–54.

[13] 李帅, 卢荣胜, 史艳琼, 等. 基于高斯曲面拟合的亚 像素边缘检测算法[J]. 工具技术, 2011, 45(7): 79—82.

LI Shuai, LU Rong-sheng, SHI Yan-qiong, et al. Subpixel Edge Detection Algorithm Based on Gauss Surface Fitting[J]. Tool Engineering, 2011, 45(7): 79–82.

- [14] 祝宏,曾祥进. Zernike 矩和最小二乘椭圆拟合的亚 像素边缘提取[J]. 计算机工程与应用, 2011, 47(17): 148—150.
 ZHU Hong, ZENG Xiang-jin. Sub-Pixel Edge Detection Algorithm of Zernike Moments and Least-Squares Ellipse Fitting[J]. Computer Engineering and Applications, 2011, 47(17): 148—150.
- [15] 刘其和, 沈国良. 机械密封微小形变图像测量系统 像素当量的标定[J]. 计算机测量与控制, 2012, 20(9):
 2353—2356.
 LIU Oi-he, SHEN Guo-liang, Pixel Equivalent De-

LIU QI-he, SHEN Guo-Iiang. Pixel Equivalent Demarcating for Minute Image Deform Measuring System of Mechanical Seal[J]. Computer Measurement &Control, 2012, 20(9): 2353—2356.