小尺寸传火孔直径图像精确测量技术研究

段能全,曾志强,张川川,杜文华

(中北大学,太原 030051)

摘要:目的研究适用于某弹体药筒传火孔的检测系统及精确测量技术。方法 搭建典型的机器视觉 硬件系统和专用台架;采用Canny算子和Otsu算法定位像素级边缘,沿其梯度方向运用多项式拟合, 以精确定位小孔边缘轮廓,并据此编制软件系统;分别多次测量同一和多个小孔做对比试验。结果 该系统的检测精度能够达到5μm,具有较高的重复性,且测量过程不受主观因素的影响。结论 系统 能够满足±0.01 mm的检验精度指标,所采用的图像测量技术可用于小尺寸孔径的精确测量。 关键词:图像测量;孔径检测;边缘检测;亚像素;阈值计算

中图分类号: TS807 文献标识码: A 文章编号: 1001-3563(2014)19-0088-05

Image Accurate Measurement Technique of Small Size Fire Hole Diameter

DUAN Neng-quan, ZENG Zhi-qiang, ZHANG Chuan-chuan, DU Wen-hua (North University of China, Taiyuan 030051, China)

ABSTRACT: Objective To investigate the detection system and the precision measurement technology applicable for the small size fire hole of cartridge case. **Methods** A typical machine vision hardware and a dedicated bench were built. After pixel–level edge detection using Canny operator and Otsu algorithm, polynomial fitting along the gradient direction was used to precise positioning edge profile, and the corresponding program was compiled. Multiple measurements were performed with the same and a plurality of holes for comparison tests. **Results** The detection accuracy of the system could reach 5 μ m. The measurement process, with a high reproducibility, was not affected by subjective factors. **Conclusion** The system could meet the inspection accuracy specifications of ±0.01mm, and the technique could be used for precise measurement of small pore size.

KEY WORDS: image measurement; trigger keyhole detection; edge detection; sub-pixel; threshold calculation

某弹体药筒传火孔直径基本尺寸约1mm左右, 公差为±0.01mm,加工完成后需全检,该尺寸的超差 很可能会造成炮弹发射故障^[1]。针对小孔内径测量 通常的量具为小孔内径千分表或针规,而该药筒的 传火孔孔径很小,工作现场用针规人工测量虽然能 满足测量精度要求,但需要检验员手工操作,效率很 低,且易受人为主观因素影响,不能满足大批量产品 的全检要求。

在图像分割、识别、形状提取等图像分析及基于 图像的测量等应用中,图像边缘检测占有十分重要的 地位^[2]。系统采用自适应的Canny算子提取小孔像素 级边缘轮廓和边缘梯度方向^[3-5],在梯度方向上用三次 多项式拟合计算亚像素点,最小二乘法拟合求解出小 孔直径,配合专用测量台架以实现高效、精确的自动 化测量。

1 测量系统

测量系统采用典型的机器视觉系统架构和工作 流程,见图1,采用专用台架的自定心装置确保待测弹

收稿日期: 2014-03-10

基金项目:山西省研究生优秀创新项目(20133095)

作者简介:段能全(1976—),男,安徽肥西人,硕士,中北大学讲师,主要研究方向为装备设计与颗粒力学。

体药筒上关注区域的重复精确定位,以便采集到较高 质量的原始图像(见图2),从而为后续的轮廓提取和 精确测量提供必要的保障。根据小孔尺度的特点,选 用规格为30 mm × 35 mm的可调式 LED 平面光源,采 用背光照明方式。图像的采集装置为 CCD 面阵摄像 机,其信噪比为40 dB。



图 1 图像采集系统示意 Fig.1 Diagram of image acquisition system



2 图像分析及处理

2.1 自适应Canny算子边缘轮廓提取

根据图像采集系统的参数性能及测量对象,选取 合适的边缘轮廓提取算子。首先需要进行滤波处理, 其次是提供边缘的方向梯度,最后是能准确的检测像 素级边缘。在测量精度方面,Canny算子能同时满足这 3个要求。Canny算子是John F. Canny于1986年开发 的多级边缘检测算法,是最优的阶梯缘检测算子^[6-7]。 根据系统获取的原始图像特点如下所述。

1)利用2D高斯滤波模板对原始图像作消噪平滑 处理;

2)借助导数算子和式(1),确定经消噪平滑处理 过的图像的梯度大小*IG*I和方向 *θ*^[7]。

$$\begin{cases} |G| = \sqrt{G_x^2 + G_y^2} \\ \theta = \arctan(G_y/G_x) \end{cases}$$
(1)

式中G_x和G_y分别为灰度沿图像x和y方向的导数; 3) 双阈值精确定位图像的像素级边缘。

2.1.1 Guass 滤波器

作为一种典型的线性平滑滤波方法,Guass(高 斯)滤波是利用一个模板逐一扫描像素,将模板邻域 内像素的加权平均灰度值设定为模板中心像素点的 值^[8,9],可表达为: $G(x,y) = (1/(2\pi \sigma^2)) \exp[-(x^2 + y^2)/(2\sigma^2)]$ (2)

其中, σ和高斯滤波模板宽度是高斯滤波2个非 常重要的参数。高斯函数曲线见图3,可见高斯函数 97%的能量集中在6×σ的范围内,由此可以确高斯 滤波模板宽度与σ的关系。





在C#程序中可以做如下定义,其中r为模板半径, filterW为模板宽度,代码如下:

r=Convert.ToInt16(Math.Ceiling(3 * sigma)); filterW=2·r + 1°

从图3中不同 σ 的高斯函数曲线对比来看, σ 越 大,高斯滤波器的频带范围就越宽,滤波后的图像就 越模糊。通过程序提取图像某边缘点附近像素点灰 度值及梯度值,其中k点是图像的边缘点,见图4。 σ = 0.5时边缘不是特别平滑,可知滤波效果不是很好。而 σ =1.5时图像太过于平滑,k点和k+1点梯度值近似相 等,边缘轮廓提取时有可能产生双边缘。由此,可以 把 σ 的值设定为1,高斯模板的宽度设定为7。



图4 某边缘附近不同 σ的灰度和梯度曲线



2.1.2 Otsu阈值计算

传统的Canny算子阈值需要设定1个阈值,但是 每次拍摄的图像在阈值上还是有数值的差别,所以在 Canny算子中添加自动阈值算法。常用的阈值算法有 迭代法、Otsu法、一维最大熵法、二维最大熵法和简单 统计法。其中,Otsu算法是最适用于该项目的阈值计 算方法。Otsu法也称最大类间方差法^[10-12],该方法具 有简单、处理速度快的特点,其基本思想是:在1幅灰 度范围为[0,L-1]的图像中,用灰度阈值T将全部像素 区分成2类,分别记为C₁(灰度值在[0,T]之间的像素) 和C₂(灰度值在[T+1,L-1]之间的像素),按式(3)计算 2类之间的类间方差。

 $\sigma^{2} = \omega_{1}(t) \,\omega_{2}(t) [\,\mu_{1}(t) - \mu_{2}(t)\,] \tag{3}$

式中, $\omega_1(t)$ 为 C_1 中包含的像素数, $\omega_2(t)$ 为 C_2 中 包含的像素数, $\mu_1(t)$ 为 C_1 中所有像素的平均灰度值, $\mu_2(t)$ 为 C_2 中所有像素的平均灰度值。让T在[0, *L*-1] 范围内依次取值,使最大的T即为Otsu的最佳阈值。

2.2 三次多项式拟合亚像素提取

目前,国内外研究的亚像素边缘检测理论与技术 分为插值法、拟合法和矩保持法¹¹³3类。其中,基于拟 合的亚像素定位法抗干扰性强、检测精度高,最重要 一点是适用于简单边缘的处理。这种方法适用于小 孔的测量。

在研究中采用三次多项式拟合亚像素提取^[14-15]。 根据图像边缘梯度方向的灰度值,利用三次多项式 *f*(*x*)=*ax*³+*bx*²+*cx*+*d*,进行最小二乘法拟合,并根据拟 合出的曲线来确定亚像素点的位置,亚像素的坐标 为-*b*/(3*a*)。

在小孔边缘处分别沿0,45,90,135°方向设定为 4个梯度取向,拟合时像素点在边缘的梯度方向上选 取。在程序中首先判断该边缘的梯度方向,再进行三 次多项式拟合。

2.3 小孔直径测量

系统经标定之后,对某帧原始图像作亚像素提取 后,用最小二乘法拟合得到小孔直径的像素值¹¹⁶⁻¹⁷,小 孔尺寸=小孔直径像素值×像元标定值,再取同次采 集的多帧图像作如此处理,最后将各帧测量尺寸求平 均值作为小孔直径的测量结果,此结果与设计尺寸比 较进而判定合格与否。系统测量程序的调试界面与 某测量后台数据见图5。



图5 测量程序调试界面 Fig.5 Measurement program debug interface

考虑重复性偏差等会导致出现"存伪"或"弃真" 的检验结果,对于该测量对象,"存伪"的结果会导致 使用安全性,因而当小孔测量尺寸处于允许的上、下 极限时,对其要做必要的数据处理,避免"存伪"结果 的出现。

3 测量结果分析

为了验证测量系统的精确性和结果数据的可靠 性,首先选用符合传火孔基本尺寸、间隔为10μm规 格的针规对孔径进行检验,然后利用上述系统测量, 比较二者检验的结果。用针规检测记录可入的上限 数据,基于图像测量记录测量值与基本尺寸的偏差。

选取经资深检验员多次检验合格,且尺寸位于下 偏差带的某个零件作为待测件,选择10位普通检验员 使用针规每人检测1次,再利用上述系统对该样品测 量10次,结果见表1。

由表1可知,人工检验出现1次"弃真"结果;而基 于图像测量的数据都处于-0.01 mm 偏差范围之内,认 为被检测件合格,且避免了人为主观性的影响,其重 复性约为2.2 μm。

随机抽取10个零件作为待测件,选择资深检验员 与该测量系统作对比检验试验。同时,为检验测量系 统精度,人工测量时分别使用与基本尺寸相同及上、

表1 单件重复检验结果 Tab.1 The results of repeated testing of a single part

										μm
序号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
针规测量	-10	-10	-10	-20	-10	-10	-10	-10	-10	-10
图像测量	-7.7	-2.4	-7.0	-3.9	-9.1	-6.9	-5.7	-7.7	-9.7	-6.8

下临近的2个间隔规格的针规测量,数据记录见表2。

表2 多件检验结果 Tab.2 The check results of the multiple parts

										1	LIII
序	夛	1	2	3	4	5	6	7	8^*	9	10
针规 规格	+10	$N^{\#}$			Ν	Ν		Ν	Y		Ν
	0	Y ^{&}	Ν	Ν	Y	Y	Ν	Y		Ν	Y
	-10		Y	Y			Y			Υ	
图	象	0.1	-0.6	-1.0	4.2	1.9	-3.9	9.7	10.7	-2.3	4.5

注:*表示采用+20µm针规不可入;#和&分别表示针规不可入和可入。

由表2可知,在0.01 mm 精度条件下,该系统测量 的数据与针规检测结果一致,其中8号件上的小孔直 径超差不合格。结合表1的数据可得,基于图像的检 测精度不低于5μm,能够满足系统的检验要求,检验 结果可靠。此外,通过现场试验发现该系统检验效率 远高于人工检测。

4 结语

该系统可以替代生产现场的某弹体药筒上小尺 寸传火孔的人工检验,满足在±0.01 mm精度条件下 的检验要求,测量精度可达5μm,重复性精度为2.2 μm,检验结果可避免人工因素干扰。配合相应的自 动化装置则可以提升检验效率。研究的基于图像的 精确测量技术可用于小尺度孔径检验与精确测量。

参考文献:

- 杜文华,李红钢,曾志强,等. 基于LabVIEW的小孔尺寸精 确测量系统研究[J]. 测试技术学报,2013,27(4):300—303.
 DU Wen-hua, LI Hong-gang, ZENG Zhi-qiang, et al. The Accurate Measurement System for Micropore Diameter Based on LabVIEW[J]. Journal of Test and Measurement Technology,2013,27(4):300—303.
- [2] BOBY R A, SONAKAR P S, SINGAPERUMAL M, et al. Identification of Defects on Highly Reflective Ring Components and Analysis Using Machine Vision[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2011, 52 (1/4):217-233.
- [3] 张平生,张桂梅.基于机器视觉的管孔类零件尺寸测量方法[J].机械设计与制造,2012(12):139—141.
 ZHANG Pin-sheng,ZHANG Gui-mei. Automatic Dimensions

Measuring Method of Pore Part's Based on Machine Vision[J]. Machinery Design & Manufacture, 2012(12):139-141.

- [4] STEGER C, ULRICH M, WIEDEMANN C. Machine Vision Algorithms and Applications[M]. YANG Shao-rong, Translation.Beijing: Tsinghua University Press, 2008.
- [5] 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.

- [6] CANNY J. A Computational Approach to Edge Detection[J]. Pattern Analysis and Machine Intelligence, IEEE Transactions on, 1986 (6):679—698.
- [7] 周春霞,魏敏,唐正宁.基于数学形态学的印刷网点图像分割方法[J].包装工程,2007,28(6):14—15.
 ZHOU Chun-xia, WEI Min, TANG Zheng-ning. Printing Dot Image Segmentation Method Based on the Mathematical Morphologic[J]. Packaging Engineering, 2007, 28(6):14—15.
- [8] 赵海玉,谷吉海,迟广志,等. 基于图像处理的卷烟圆周检测方法研究[J]. 包装工程,2011,32(17):52—55.
 ZHAO Hai-yu, GU Ji-hai, CHI Guang-zhi, et al. Development of Cigarette Circumference Detection Method Based on Image Processing[J]. Packaging Engineering, 2011, 32(17): 52—55.
- [9] 李雪威,张新荣.保持边缘的高斯平滑滤波算法研究[J].计算机应用与软件,2010,27(1):83—84.
 LI Xue-wei, ZHANG Xin-rong. On Edge-preserved Gaussian Smoothing Filtering Algorithm[J]. Computer Application and Software, 2010,27(1):83—84.
- [10] 张帆,彭中伟,蒙水金.基于自适应阈值的改进Canny边缘 检测方法[J]. 计算机应用,2012,32(8):2296—2298.
 ZHANG Fan, PENG Zhong-wei, Meng Shui-jin. Improved Canny Edge Detection Method Based on Self-Adaptive Threshold[J]. Computer Applications, 2012, 32(8):2296— 2298.
- [11] WHARTON E J, PANETTA K, AGAIAN S S. Logarithmic Edge Detection with Applications[C]// Systems, Man and Cybernetics, 2007. ISIC. IEEE International Conference on. IEEE, 2007: 3346-3351.
- [12] ZHANG Y, ROCKETTT P I. The Bayesian Operating Point of the Canny Edge Detector[J]. Image Processing, IEEE Transactions on, 2006, 15(11): 3409—3416.

[13] 盛遵冰,崔贤玉,高国安. 通用亚像素边缘检测算法[J]. 上海交通大学学报,2008,41(6):911—915.
 SHENG Zun-bing, CUI Xian-yu, GAO Guo-an. A Univer-

sal Algorithm for Sub-pixel Edge Detection[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2007, 41(6):911-915.

- [14] 陈静,尚雅层,田军委.快速多项式拟合亚像素边缘检测算法的研究[J].应用光学,2011,32(1):91—95.
 CHEN Jing, SHANG Ya-ceng, TIAN Jun-wei. Fast Polyno-mial Fits Sub-pixel Edge Detection Algorithms[J]. Journal of Applied Optics,2011,32(1):91—95.
- [15] 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. Sub-pixel Edge Detection Algorithm Based on Gauss Surface Fitting[J]. Tool Engineering,2011,45(7):79—82.
- [16] 王芳. 一种新的最小二乘法图像复原算法的研究[J]. 包装 工程,2009,29(12):151—153.
 WANG Fang. Development of a New Algorithm of Image Restoration by Least Square Methods[J]. Packaging Engineering, 2009,29(12):151—153.

(上接第76页)

计北京航空航天大学学报[J]. 2013,39(6):808—812.
TANG Jia-peng, XI Ping, HU Bi-fu, et al. Knowldge-driven
Rapid Design on Aircraft Wing Structure[J]. Journal of
Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2013, 44
(2):552—556.

- [6] CHEN He-ping, FUHLBRIGGE T, CHOI S, et al. Practical Industrial Robot Zero Offset Calibration[C]// Proceeding of the 4th IEEE Conference on Automation Science and Engineering, August 2008, Washington DC, USA.2008:516-521.
- [7] EDALEW K O, ABDALLA H S, NASH R J. A computer-based Intelligent System for Automatic Tool Selection[J]. Materials and Design, 2001, 22(5):337-351.
- [8] AAMODT A, PLAZA E, Case Based Reasoning: Foundational Issues, Methodogical Variations, and System Approach[J].
 AICom-artificial Intelligence Communications, 1994, 7(1): 39-59.
- [9] CHIU Chuang-cheng, TAI Chi-yuan. A Weighted Future Means Clustering Algorithm for Case Indexing and Retrieval in Case-based Reasoning[J]. New Trends in Applied Artificial Intelligence, 2007(7):541-551.
- [10] 于芳芳. 基于实例推理的冲模 CAD 系统的研究与实现[D]. 南京:南京航空航天大学,2005.
 YUN Fang-fang. Research and Implementation of CBR on Punch Die Design[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics The Graduate School,2005.
- [11] 龚箭,张红,周敏. 案例推理技术在包装设计系统中的应用
 [J]. 包装工程,2010,31(11):77—79.
 GONG Jian, ZHANG Hong, ZHOU Min. Application of CBR
 in Product Packaging Design System[J]. Packaging Engineering,2010,31(11):77—79.
- [12] 丁华,杨兆建,姚晶.采煤机概念设计的知识表示与知识推

理[J]. 机械设计与制造, 2011, (6): 216-218.

DING Hua, YANG Zhao-jian, YAO Jing. Knowledge representation and reasoning of shearer conceptual design[J]. Machinery Design & Manufacture, 2011, (6):216-218.

- [13] PERNER P. Incremental Learning of Retrieval Knowledge in a Case-Based Reasoning System[C]// Springer Verlag Berlin Herdelberg 2003, 2003: 422—436.
- [14] 张禹,白晓兰,张朝彪,等. 基于实例推理的数控车床智能 模块组合方法[J]. 机械工程报,2014,50(1):120—128.
 ZHANG Yu, BAI Xiao-lan, ZHANG Chao-biao, et al. CBR-based Intelligent Modular Combination Method for CNC Lathe[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2014, 50(1): 120—128.
- [15] 王玉,左敦稳,薛善良,等. 基于CBR的自动开箱机相似设 计推理技术研究[J].中国制造业信息化,2012,41(17): 32—39.

WABNG Yu, ZUO Dun-wen, XUE Shan-liang, et al. Research on Rapid Design of Automatic Case erecting Machine Based on Case-based Reasoning[J]. Manufacture Information Engineering of China, 2012, 41(17): 32-39.

[16] 汪云祥,柯旭贵. 基于实例推理方法在机构运动方案设计中的应用[J]. 机械设计与制造工程,2002,31(3):56—58.
WANG Yun-xiang, KE Xu-gui. Application of the CBR in the Kinetic Scheme Design of Mechanism[J]. Manufacture Information Engineering of China,2002,31(3):56—58.

[17] 方坤礼,蒋晓英.基于实例推理的机床专用夹具虚拟装配 技术[J].机电工程,2009,26(8):25-26.

FANG Kun-li, JIANG Xiao-ying. Technology of Virtual Assembly of Machine Tool Fixture Based on Typical Instance[J]. Mechanical & Electrical Engineering Magazine, 2009, 26(8): 25—26.