

文章编号 1004-924X(2012)04-0880-08

微型铣刀外径视觉测量的不确定度

王磊^{1*}, 郭淑霞¹, 张凤玲¹, 冯彬¹, 张建城²

(1. 厦门大学机电工程系, 福建 厦门 361005; 2. 厦门钨业股份有限公司, 福建 厦门 361005)

摘要:建立了基于机器视觉的测量系统,实现了微型铣刀外径的在线测量,并对测量不确定度进行了分析。测量系统由背光源、夹头与旋转平台、旋转编码器、摄像机和相应的测量软件组成。系统运行时,铣刀匀速旋转,由旋转编码器触发相机对其进行采样拍照并完成测量。从照明光源平行性、摄像机的镜头畸变与CCD噪声、调焦效果、待测物体表面几何特性、算法设计5个方面分析了测量结果不确定度来源及其影响。实验表明,当系统采样率不足时,对于铣刀外径测量不确定度影响最大的是待测物体表面几何特性;在采样率足够大的情况下,外径测量不确定度主要由光源平行性确定。本文系统采样率为33 frame/circle,系统测量不确定度为4 μm ,可满足生产要求。

关键词:机器视觉;微型铣刀;外径测量;不确定度

中图分类号:TP242.62;TB92 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20122004.0880

Uncertainty in vision based diameter measurement of mini milling cutter

WANG Lei^{1*}, GUO Shu-xia¹, ZHANG Feng-ling¹, FENG Bin¹, ZHANG Jian-cheng²

(1. Department of Mechanical and Electrical Engineering, Xiamen University, Xiamen 361005, China; 2. Xiamen Tungsten Co., Ltd., Xiamen 361005, China)

* Corresponding author, E-mail: wanglei33@xmu.edu.cn

Abstract: A machine vision system is proposed to measure the diameter of a mini milling cutter on line, and the measurement uncertainty is analyzed in this paper. The system consists of a back-light source, a rotate stage, a rotary encoder, a camera and corresponding software. While the milling cutter rotates, the camera is triggered by the rotary encoder and a series of images are captured. The sources of uncertainty and their effects are analyzed, including the parallelism of the light source, lens distortion, CCD noise, focusing situation, the geometric properties of tested objects and the algorithm design. According to results of experiments, the uncertainty mainly depends on the geometric property of the tested object when sampling rate is not enough, otherwise, it is mainly relative to the parallelism of the light source. In the experiment performed, the system uncertainty is 4 μm with a sampling rate of 33 frame/circle, both accuracy and efficiency meet the requirement of manufacturing.

Key words: machine vision; mini milling cutter; diameter measurement; uncertainty

收稿日期:2011-12-02;修订日期:2011-12-29.

基金项目:福建省自然科学基金资助项目(No. 2011J01361)

1 引言

机器视觉是用计算机实现人的视觉功能,即用机器代替人眼来做测量和判断。其系统主要由图像的采集、图像的处理和分析、图像输出或显示三部分组成^[1]。随着生产技术与科技的不断发展,机械零部件的加工精度不断提高,加工对象不断变化,对几何量的测量要求也越来越高^[2]。基于机器视觉的几何量测量技术具有非接触、柔性好、精度高、速度快、自动化和智能化水平高,不影响被测物表面特性^[3-5]等优点,可以达到较高的测量精度,因此在相关测量领域倍受关注。

通常,测量结果是一个分布区间,而不是一个确定的数^[6],即存在测量不确定度。测量不确定度是用来表征测量结果不能确定的程度,是衡量测量质量的重要指标,同时直接影响到深层次测试信息处理的结果^[7]。测量不确定度的评定决定了测量结果的可靠程度,对于测量结果不确定度因素的分析,可为测量系统的完善提供可靠依据,是建立测量系统不可缺少的环节。

本文建立了基于机器视觉的微型铣刀外径测量系统,以测量结果标准差作为不确定度评估标准^[8],分析了照明光源、摄像机、待测物体表面几何特性、算法设计4个因素对微型铣刀外径测量结果不确定度的影响,得出了系统测量不确定度。

2 系统设计

基于机器视觉的微型铣刀外径测量系统由CCD相机(UI-2250SE-M-GL)、双远心镜头(NAVITAR 1-17797 2/3", 1.3)、平行背光源、精密旋转平台组成。为了得到锐利的边缘,采用



图1 测量系统实物图

Fig.1 Image of the system

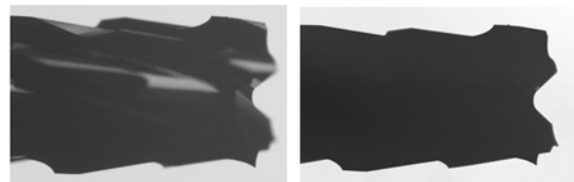
明场背光照方式^[1,9],并设计一种平行光源,由蓝色LED前置远心镜头保证平行度。测量系统实物图如图1,其中,精密旋转平台与旋转编码器(E6B2-CWZ6C)相连。工作状态下,精密旋转平台带动铣刀匀速旋转,由旋转编码器触发相机采集图像,本系统采集率为33 frame/cycle。

3 不确定度影响因素分析

由文献[9]所述可知,若测量结果标准差为 $\varphi(X)$,则测量结果可表示为 $(\bar{X} - k\varphi(\bar{X}), \bar{X} + k\varphi(\bar{X}))$,其中 k 为包含因子,且 $\{k \in \mathbf{R} | 0 \leq k \leq 3\}$,当 $k=1$ 时,测量数据分布在 $(\bar{X} - \varphi(\bar{X}), \bar{X} + \varphi(\bar{X}))$ 区间的概率为68.3%,当 $k=2$ 时,测量数据分布在区间 $(\bar{X} - 2\varphi(\bar{X}), \bar{X} + 2\varphi(\bar{X}))$ 的概率为95.4%,当 $k=3$ 时,测量数据分布在区间 $(\bar{X} - 3\varphi(\bar{X}), \bar{X} + 3\varphi(\bar{X}))$ 的概率为99.7%,因而,测量不确定度可以用标准差表征^[4,10]。

3.1 照明光源

明场背光照方式分为漫射背光照和平行背光照两种^[1,10-11]。LED平面光源实现的漫射背光照方式所得的图像如图2(a)所示,此类照明方式受漫反射因素影响,对于有一定厚度的被测物体,它在摄像机一侧的某些部分也会被照亮^[1],此时垂直方向上灰度值剖面如图3(a),其边缘位置灰度值过渡平滑,即边缘不够锐利;由远心镜头与LED设计组成的平行背光照方式所得的图像见图2(b),此类照明方式有效消除了漫反射因素的影响^[1],垂直方向上灰度值剖面如图3(b),灰度值变化迅速,边缘更加锐利。



(a)漫射光源

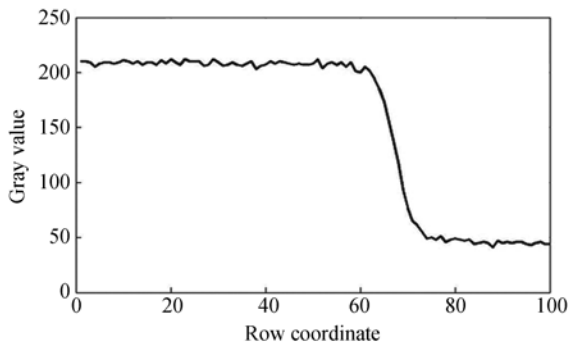
(b)平行光源

(a)Diffuse illumination (b)Telecentric illumination

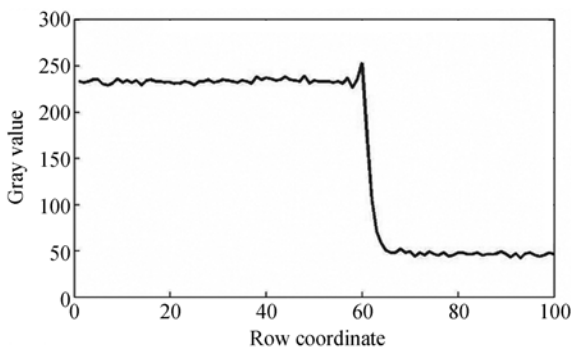
图2 两种光源所得图像比较

Fig.2 Image comparison of two illumination methods

采用漫射光源和平行光源背光照方式对同一支微型铣刀分别测量15次,所得结果如图4,其标准差分别为1.45和0.59 μm 。因此,平行背



(a) 漫射光源
(a) Diffuse illumination



(b) 平行光源
(b) Telecentric illumination

图 3 2 种光源所得图像灰度度剖面比较

Fig. 3 Comparison of gray value profile with different illuminations

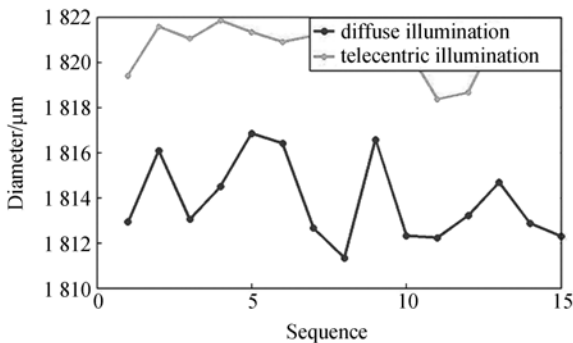


图 4 不同照明方式所测结果比较

Fig. 4 Measurement result comparison of two illumination methods

光照明方式可以得到更好的测量不确定度。

同时,由图 4 可看出,2 种光源所测结果存在偏差,若该偏差为系统偏差,则对于漫射背光照明的系统可通过标定对测量结果进行校正。以标称直径分别为 1 000,1 800,2 400 μm 3 种规格的铣

刀为样本,采用 2 种不同光源分别测量,所得测量结果间偏差值变化情况如图 5 所示,即:1)同一种规格的铣刀所得偏差值成随机分布;2)偏差值与标称直径无关。因而,系统应选用平行光源照明。

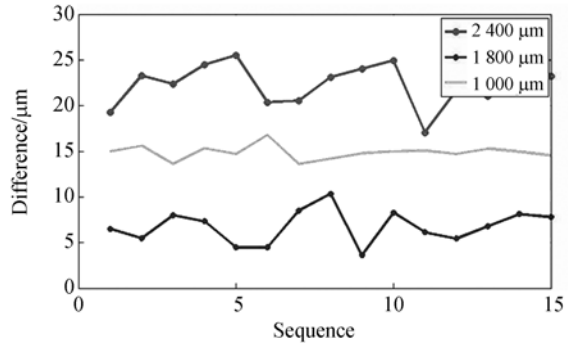


图 5 2 种光源所得结果偏差曲线

Fig. 5 Difference of result in two illumination methods

3.2 摄像机

摄像机主要由镜头和面阵 CCD 组成,镜头畸变和 CCD 噪声是不确定度主要来源。

3.2.1 镜头畸变

相机标定可以得出相机内、外部参数和在世界坐标系中目标物体米制单位的坐标,是准确测量目标物体的必要过程^[1]。

采用二维精密移动平台(Steinmeyer, KDT 105)和精密栅格的移动完成相机标定:移动步长为 100 μm ,共采集 119 幅图像,得到 118 个像素位移值,取其平均值 30.293 8 pixel,CCD 像素尺寸 p_s 为:

$$p_s = \frac{ad}{pd} = \frac{100 \mu\text{m}}{30.2938 \text{ pixel}} = 3.3010 \mu\text{m}/\text{pixel}, \quad (1)$$

其中, ad 为边缘实际位移, pd 为图像中栅格边缘位移的像素值。

镜头畸变主要是由镜头像差造成的,分为枕形畸变和桶形畸变,可通过相机标定评估并消除。对于理想摄像机,矩形所成像如图 6 实线所示;由于镜头畸变的影响,实际所成像如图 6 虚线所示。实际高度为 D ,由畸变引入的测量误差为 ΔD ,则畸变系数 k 可由式(2)求得:

$$k = \frac{\Delta D/p_s}{D/p_s} \times 100\% = \frac{\Delta D}{D} \times 100\%, \quad (2)$$

根据本文设计测量要求, $\Delta D < 4 \mu\text{m}$, D 越大,对畸变系数要求越高,则以所测量铣刀最大外径 2 400 μm 为准, $k < 0.17\%$ 。

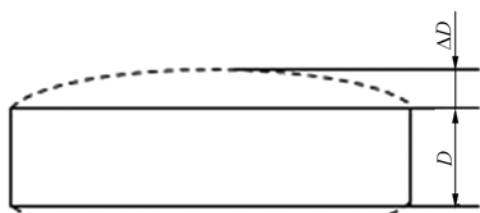


图 6 镜头畸变对成像影响示意图

Fig. 6 Effect of lens distortion on imaging

对于本文所选用摄像机,由上述标定所得 118 个像素位移数据的最大偏差为 0.68 pixel,即对于 1 200 个像素,最大畸变量为 0.68 pixel,即畸变系数:

$$k = \frac{0.68}{1\ 200} \times 100\% = 0.057\%, \quad (3)$$

满足测量要求。

将上述所得 118 个像素位移拟合多项式,即得到镜头畸变曲线,三次以下多项式拟合结果如式(4)~(6),可见,高次项系数均近似为零,因而所得结果满足线性度要求,进一步证明了可忽略镜头畸变对测量结果的影响。

$$f(x) = 8.551x - 0.018\ 09, \quad (4)$$

$$f(x) = (-8.527 \times 10^{-6})x^2 + 8.552x - 0.034\ 21, \quad (5)$$

$$f(x) = (-5.514 \times 10^{-6})x^3 + 0.000\ 299\ 3x^2 + 8.555x - 0.289\ 2. \quad (6)$$

其中, x 为精密移动平台给出的位移量, $f(x)$ 为以像素为单位的基准边缘位置偏移量。

3.2.2 CCD 噪声

图像定位性能主要决定于信号强度、CCD 噪声和像点尺寸等^[12],其中,CCD 噪声是最主要的影响因素。CCD 噪声导致图像中物体位置产生偏移,这种偏移依赖于图像亮度以及物体在 CCD 阵列中的位置,因而该误差难以校正^[13-15]。根据 Healy 和 Kondepudy 所建立的 CCD 噪声理论^[16-17],单像素 CCD 噪声模型如式(7):

$$D = (KI + N_{DC} + N_s + N_R) \times A + N_Q, \quad (7)$$

其中, D 为实测像素光亮度, KI 为 CCD 接收的光子总数, N_{DC} 为暗电流所造成的光子数, N_s 为光子射击泊松分布噪声, N_R 为读出噪声, A 为系统增益, N_Q 为光子噪声。

图 7(a) 为所采集图像第 420 列横截面的灰度值曲线,图像亮部平均灰度值 MS 为 235,两个

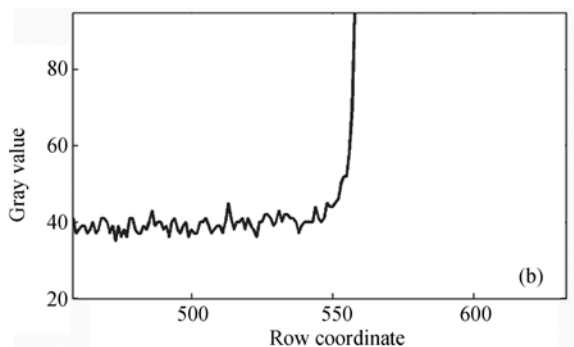
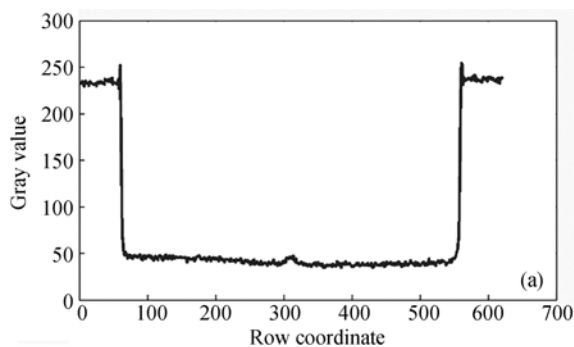


图 7 垂直线方向度值剖面(a)及局部放大图(b)

Fig. 7 Vertical gray value profile (a) and its enlargement (b)

阶跃分别代表了微铣的上下边缘。图 7(b) 为该变化曲线局部放大图,清晰地反应了图像叠加的随机噪声,噪声方差 SN 为 3.06,由式(8)可得图像信噪比 SNR 。

$$SNR = 20 \times \lg \frac{MS}{SN} = 20 \times \lg \frac{235}{3.06} = 37.7\ \text{dB}. \quad (8)$$

以相机实际所采集图像所得测量结果为标准值。图像被加入灰度值标准差为 0.5~10(方差为 0.25~100)的 14 组高斯噪声,得到信噪比为 37.02~7.16 dB 的 14 组仿真图像,对其进行图

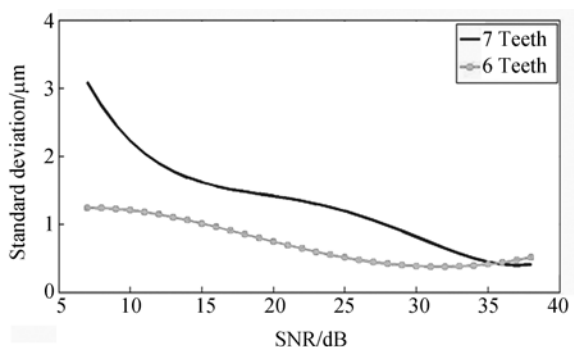


图 8 信噪比与测量结果标准差关系图

Fig. 8 Relation between SNR and measured standard deviation

像处理,以所测外径与标准值差值的标准差作为不确定度评估标准,图像信噪比与此类不确定度的关系见图 8:当信噪比高于 15 dB 时,测量不确定度低于 $1 \mu\text{m}$ 。

3.3 调焦准确度

精密测量中,调焦效果的好坏直接影响所采集的图像边缘的锐利程度,从而影响待测物体边缘的准确度。选用标称直径为 $2\ 400 \mu\text{m}$ 的铣刀为样本,从理想焦平面前的某一位置开始,以步长为 0.1 mm ,共移动 11 次,每次完成 30 次测量,得到 11 组测量值,并计算测量不确定度。不确定度值随调焦位移变化曲线如图 9 所示,可以看出,(1)不确定度成“V”型变化,当调焦位移为 0.6 mm 时,不确定度最小,表明该位置为最佳调焦;(2)当要求不确定度小于 $4 \mu\text{m}$ 时,调焦误差应小于 0.2 mm 。

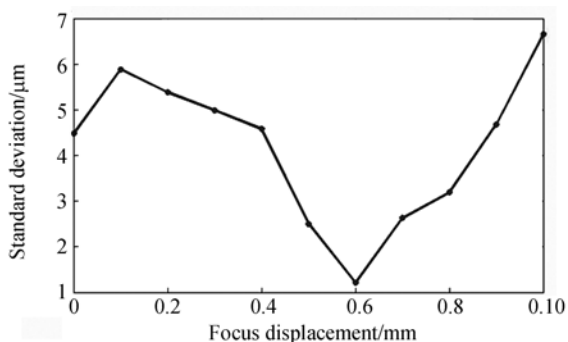


图 9 测量标准差随调焦位移变化曲线

Fig. 9 Relation between focus and measured standard deviation

3.4 待测物体

待测微型铣刀实物图如图 10,铣刀刃部最小外接矩形的高度即铣刀外径 D_1 ,如图 11。

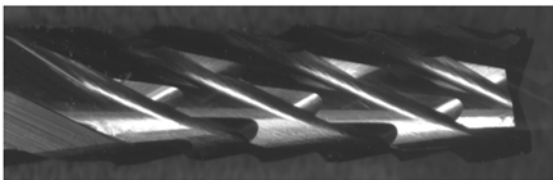


图 10 微型铣刀实物图

Fig. 10 Image of mini milling cutter

待测铣刀表面几何特性对测量结果不确定度有很大的影响^[4],主要表现在:铣刀绕轴旋转过程中,同一径向横截面上齿和沟位置交替变化,因而图像中铣刀刃部的轮廓峰谷位置周期性交替出现,如图 12 所示虚线①所截位置,从图像 A~D

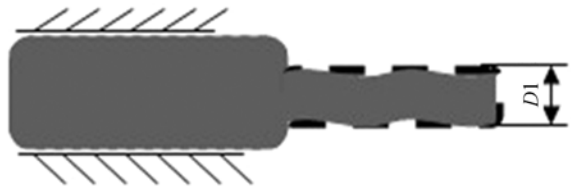


图 11 待测参数示意图

Fig. 11 Description of tested geometric values

轮廓由峰变为谷,而虚线②所截位置变化趋势相反,由此变化导致所测外径呈现周期性变化,变化曲线如图 13。由于铣刀旋转一周多次采样所测外径最大值最可靠地反映铣刀外径真值,因而本文选取该最大值作为测量结果。

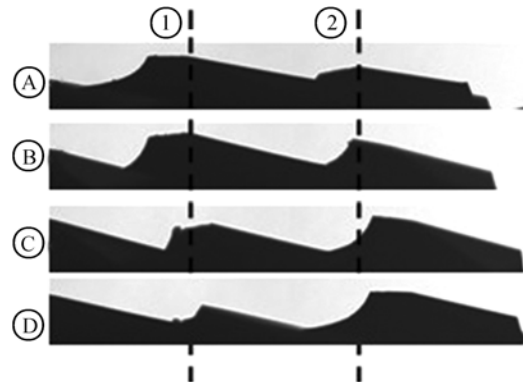


图 12 铣刀轮廓变化图

Fig. 12 Change of milling cutter contour

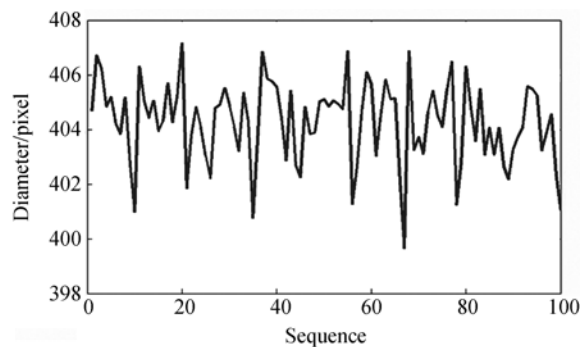


图 13 铣刀外径随旋转位置变化曲线

Fig. 13 Curve of diameter rotated with milling cutter

系统采样率为铣刀旋转一周所采集图像数量,外径测量结果不确定度是关于采样率的函数。根据上述分析,铣刀外径变化可看作周期性信号,旋转编码器触发相机采集图像,可看作对该信号采样并数字化的过程。对于齿数为 N 的铣刀,信号基波频率为 N ,根据奈奎斯特采样定理,最小采样率为 $2N$ 。但是,由于铣刀齿形并非简单正

弦波,即含有频率高于 N 的高次谐波成分,因而实际所需最小采样率大于 $2N$ 。

选用 3 种齿数分别为 6,7,8 的铣刀作为样本,外径测量标准差与采样率关系曲线见图 14。假设测量不确定度标准为 $2 \mu\text{m}$,则上述 3 种规格的铣刀所需最小采样率分别为 30,55,80 frame/cycle;而测量不确定度标准为 $4 \mu\text{m}$ 时,上述 3 种规格的铣刀所需最小采样率分别为 8,18,20 frame/cycle。

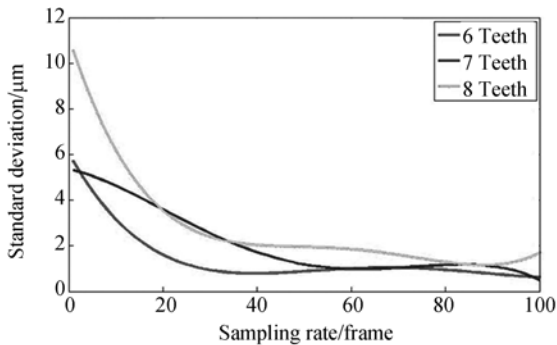


图 14 不同齿数铣刀外径测量标准差随采样率变化曲线

Fig. 14 Relation between diameter standard deviation and sampling rate of cutters with different number of teeth

3.5 算法设计

算法的主要任务是铣刀边缘提取与外径计算。图像测量系统的测量原理是通过处理被测物体图像的边缘而获得物体的几何参数,图像边缘提取是测量的基础和关键^[18]。精密测量中常用的边缘提取方法有亚像素边缘提取与基于灰度直方图的亚像素阈值分割方法。亚像素边缘提取算法用边缘幅度最大值附近 3 个点拟合一条抛物线,抛物线的最大值点作为目标物体亚像素精度的边缘。亚像素阈值分割算法基于灰度插值的思想,得到比像素精度阈值分割更精确的结果。灰度阈值由对图像灰度直方图做高斯拟合得到,具有更高的自适应性和鲁棒性^[1]。

任选 5 支铣刀为样本,采用上述两种算法分别重复 10 次测量,所得测量不确定度结果变化曲线如图 15,可见亚像素灰度阈值分割算法具有更高的稳定性。这是由于亚像素阈值分割点由灰度直方图得到,具有更高的鲁棒性和自适应性;而亚像素边缘特征提取依赖于对图像采集设备的精心挑选^[1],受光源平行度和轮廓清晰度影响较大,对

于轮廓清晰度较差的图像,难以得到理想的边缘,因此本文使用了亚像素阈值分割方法。

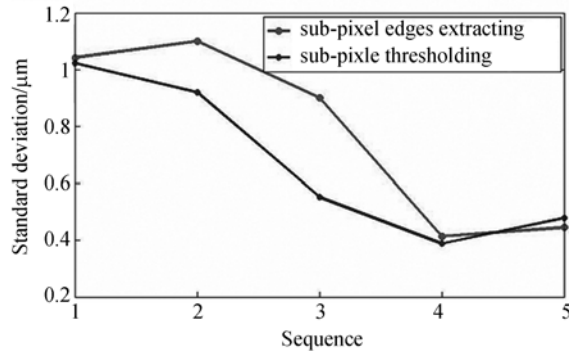
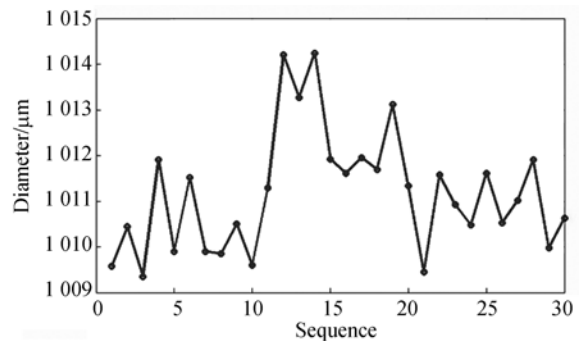


图 15 不同算法所得结果不确定度变化曲线

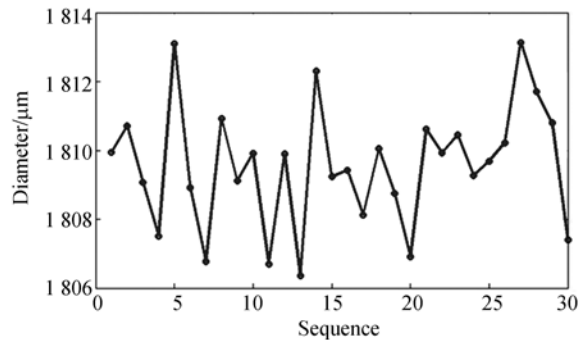
Fig. 15 Curve of uncertainty using different algorithms

4 实验及分析

选取标称外径为 $1\ 000, 1\ 800, 2\ 400 \mu\text{m}$ 3 种规格的铣刀为样本,各测量 20 次,所得结果如图 16,测量的标准差分别为 $1.77, 3.58, 1.31 \mu\text{m}$ 。



(a) $1\ 000 \mu\text{m}$



(b) $1\ 800 \mu\text{m}$

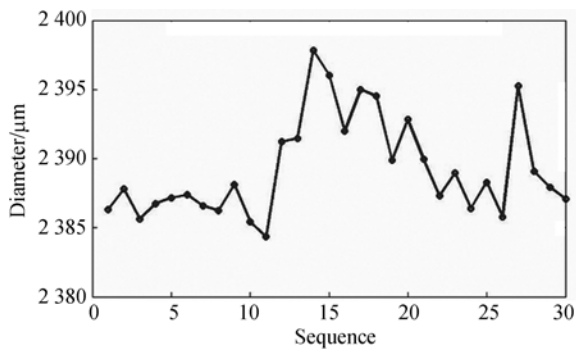
(c) 2 400 μm

图 16 不同规格铣刀测量结果

Fig. 16 Measurement results of different kinds of milling cutters

参考文献:

- [1] CARSTEN S, MARKUS U. 机器视觉算法与应用 [M]. 北京:清华大学出版社, 2009.
CARSTEN S, MARKUS U. *Machine Vision Algorithms and Application* [M]. Beijing: Hsinghua University Publishing, 2009. (in Chinese)
- [2] ANDERS R, ANNA-KARIN C, KENNETH E. Accuracy investigation of a vision based system for pose measurements [J]. *Control, Automation, Robotics and Vision*, 2006, 5-8: 1-6.
- [3] LIU M L, LI K J, CAI H M, et al.. Vision measurement method for impact point in large planar region [J]. *Intelligent Control and Information Processing (ICICIP)*, 2010, 13-15: 379-83.
- [4] WANG X J, GAO J, WANG L, et al.. Robust processing method for rotationally symmetric triangulation sensor [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2007, 28(2): 203-211.
- [5] 伍济钢, 宾鸿赞. 机器视觉的薄片零件尺寸检测系统 [J]. *光学精密工程*, 2007, 15(1): 124-130.
WU J G, BIN H Z. Dimensional inspecting system of thin sheet parts based on machine vision [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 15(1): 124-130. (in Chinese)
- [6] AGGARWAL C C, YU P S. A survey of uncertain data algorithms and applications [J]. *IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering*, 2009, 21(5): 609-623.
- [7] 彭宇, 罗清华, 彭喜元. 网络化测试体系中不确定性数据处理方法浅析 [J]. *仪器仪表学报*, 2010, 31(1): 229-240.
PENG Y, LUO Q H, PENG X Y. Analysis of uncertain data processing methods in networking test framework [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2010, 31(1): 229-240. (in Chinese)
- [8] 彭宇, 罗清华, 彭喜元. UIDK-means: 多维不确定性测量数据聚类算法 [J]. *仪器仪表学报*, 2011, 32(1): 1201-1207.
PENG Y, LUO Q H, PENG X Y. UIDK-means: A multi-dimensional uncertain measurement data clustering algorithm [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2011, 32(1): 1201-1207. (in Chinese)
- [9] LIU ZH M, LIU F. Evaluation and expression of uncertainty in measurement [J]. *China Academic Journal Electronic Publishing House*, 1996(2): 96-99.
- [10] RAFAEL C C, RICHARD E W. 数字图像处理 [M], 2 版. 北京: 电子工业出版社, 2009.
RAFAEL C C, RICHARD E W. *Digital Image Processing* [M]. 2nd ed. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2009. (in Chinese)
- [11] ZHAO L P, LI X, FANG ZH P. 塑料眼镜内外缺陷检测的全内反射照明技术 [J]. *光学精密工程*, 2011, 19(9): 2247-2254.
ZHAO L P, LI X, FANG ZH P. TIR illumination technology for defect inspection of plastic ophthalmic lens [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(9):

5 结 论

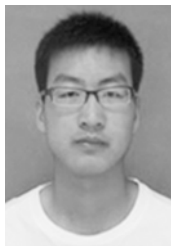
本文建立了基于机器视觉的微型铣刀外径测量系统, 该系统已成功应用于厦门钨业股份有限公司生产线上。随机选取标称外径为 1 000, 1 800, 2 400 μm 3 种规格的铣刀为样本, 研究了系统中测量不确定度受照明光源、摄像机、调焦效果、待测物体表面几何特性、算法设计 5 个因素的影响。结果表明, 当系统采样率不足时, 对于微型铣刀测量不确定度影响最大的是待测物体表面几何特性; 在采样率足够大的情况下, 测量不确定度主要由照明光源决定。因此, 本文系统使用平行背光照明, 采样率为 33 frame/cycle, 测量不确定度小于 4 μm , 达到了实际使用要求。

- 2247-2254. (in Chinese)
- [12] KIM A. Cramér-Rao lower bounds on the performance of charge-coupled-device optical position estimators[J]. *Journal of the Optical Society of America*, 1986,3(11):1809-1815.
- [13] BRUCE R H, ROBERT C S, THOMAS J, *et al.*. CMOS active pixel sensor specific performance effects on star trackermager position accuracy[J]. *SPIE*, 2001, 4284:43-53.
- [14] WANG L, GAO J, WANG X J, *et al.*. Fundamental uncertainty in rotationally symmetric and anamorphic laser triangulation[J]. *Chinese Journal of Electronics*, 2008,17(1):8-11.
- [15] WANG L, GAO J, WANG X J, *et al.*. Eccentric error and compensation in rotationally symmetric laser triangulation[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2007,28(9):1548-1553.
- [16] HEALEY G E, KONDEPUDY R. Radiometric CCD camera calibration and noise estimation[J]. *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell.*, 1994,16(3):267-276.
- [17] WU Q, CHI Y B, WANG ZH Y. CCD noise effect on data transmission efficiency of onboard lossless-compressed remote sensing images[J]. *Information Engineering and Computer Science*, 2009,19-20:1-4.
- [18] 贺忠海, 王宝光, 廖怡白. 理想边缘产生方法的研究[J]. *光学精密工程*, 2002, 10(1):89-93.
- HE ZH H, WANG B G, LIAO Y B. Study of method for generating ideal edges[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2002,10(1):89-93. (in Chinese)

作者简介:



王磊(1977—),男,安徽合肥人,博士,副教授,2002年于厦门大学获硕士学位,2007年于合肥工业大学获博士学位,主要研究领域为机器视觉与光学测量。E-mail:wanglei33@xmu.edu.cn



冯彬(1987—),男,河北唐山人,硕士研究生,2010年于北华航天工业学院获得学士学位,主要研究方向为机器视觉。E-mail:teaoo@126.com



郭淑霞(1989—),女,山西介休人,硕士研究生,2011年于厦门大学获得学士学位,主要从事机器视觉的研究。E-mail:shuxiapeggy@hotmail.com



张建城(1978—),男,福建永定人,硕士,工程师,2001年、2005年于南京航空航天大学分别获学士、硕士学位,主要从事机器视觉的研究。E-mail:13599526821@163.com



张凤玲(1988—),女,辽宁抚顺人,硕士研究生,2011年于厦门大学获得学士学位,主要从事机器视觉的研究。E-mail:zhangfengling1218@yahoo.com.cn