

移动式三维测量用圆形标记点提取算法

解则晓 高翔* 崔健

(中国海洋大学工程学院, 山东 青岛 266100)

摘要 针对移动式三维视觉测量系统所采用的圆形标记点成像亮度较低且不均匀等问题,提出了一种基于灰度差重心法的识别与提取算法。获取标记点近似成像中心及成像区域,在成像区域内沿四个方向扫描得到像素级边缘点;利用灰度差重心法进行亚像素定位;对亚像素级边缘点进行椭圆拟合,得到标记点成像中心位置。实验结果表明,像素级边缘检测算法运行时间为 3 ms 左右;亚像素定位算法椭圆拟合最大偏差小于 0.08 pixel,平均偏差小于 0.03 pixel。与其他提取算法相比,该算法在速度及定位精度方面有一定的提高,更适用于移动式三维测量用圆形标记点的提取。

关键词 机器视觉;灰度差重心法;边缘检测;圆形标记点;亚像素定位

中图分类号 TP391.41 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201340.1208002

Extraction Algorithm of Circular Targets Used for Mobile Three-Dimensional Measurement

Xie Zexiao Gao Xiang Cui Jian

(Engineering College, Ocean University of China, Qingdao, Shandong 266100, China)

Abstract Circular targets used for mobile three-dimensional (3D) vision measurement system have apparent disadvantages such as low and uneven imaging brightness. An approach based on gray difference weighted centroid algorithm is proposed for the targets' recognition and extraction. Approximate imaging centers and imaging areas of the circular targets are acquired, and then the pixel edge points are detected by scanning the imaging areas in four directions. Sub-pixel edge is located by using gray difference weighted centroid algorithm. And sub-pixel edge points are fitted with ellipse and thus the imaging center positions of the circular targets are acquired. Experimental results indicate that with the proposed algorithm, the elapsed time is about 3 ms, the maximum error of ellipse fitting is less than 0.08 pixel and the average error is less than 0.03 pixel. Compared with other traditional extraction algorithms, it makes great improvement in speed and localization precision, and is more appropriate for the extraction of circular targets used for mobile 3D vision measurement system.

Key words machine vision; gray difference weighted centroid algorithm; edge detection; circular targets; sub-pixel localization

OCIS codes 150.0155; 110.2970; 150.1135

1 引言

近年来基于计算机视觉理论的视觉测量系统因具有非接触、测量速度快、效率高、自动化程度高以及测量精度较高等优点,广泛应用于加工制造业中^[1-5]。随着制造业工艺水平的提高,工业制件的设计趋向尺寸大型化、表面复杂化,传统视觉测量系

统由于测量范围受限,难以实现对大型工件的全范围、高精度测量。基于标记点的移动式三维视觉测量系统可利用贴在工件表面的标记点作为定位基准实现扫描测量,又具有体积小、便携性好等优点,受到了越来越多的关注^[6]。本文采用内部为白色亮圆、周围带有黑圈的圆形标记点。黑圈用来区分亮

收稿日期: 2013-07-22; **收到修改稿日期**: 2013-08-01

基金项目: 国家自然科学基金(61171162)、教育部博士点专项基金(20110132110010)

作者简介: 解则晓(1968—),男,博士,教授,主要从事机器视觉和机器人运动控制及机器人测量等方面的研究。

E-mail: xiezexiao@ouc.edu.cn

* **通信联系人**。E-mail: gx_whz@yeah.net

圆与工件背景,此种标记点具有普遍的适用性。

根据高等几何知识,空间圆形特征经过透视投影变换会退化为椭圆特征^[7],测量系统中标记点的提取问题即图像中椭圆的提取问题。因此图像中椭圆特征的快速识别及椭圆中心的精确定位对整体测量精度影响显著,具有极为重要的研究意义^[8-9]。

椭圆特征提取主要分为两部分:像素级边缘检测和边缘亚像素定位。传统像素级边缘检测算法有Roberts算法、Sobel算法、Prewitt算法、Canny算法等^[10]。其中前三种算法为基于梯度的边缘检测算法,形式简单、易于实现,但检测结果存在多像素边缘且对噪声敏感。Canny算法^[11]是基于边缘检测最优准则的一种像素级边缘检测算法,该算法的定位精度优于基于梯度的边缘检测算法且能够得到单像素边缘,但同样存在对噪声敏感的问题。另外所有传统像素级边缘检测算法均对整幅图像进行处理,速度较慢且不能直接剔除非标记点边缘信息。针对传统像素级边缘检测算法存在的不足,本文提出了一种新的像素级边缘检测算法。对图像进行隔行隔列扫描,获取标记点近似成像中心及成像区域,以近似成像中心为基准,在成像区域内沿四个方向扫描得到标记点像素级边缘点。该算法与传统像素级边缘检测算法相比,速度快、定位准确且不包含非标记点边缘信息。

常用亚像素定位算法有曲线拟合法与Zernike正交矩法两种。贺忠海等^[12]根据电荷耦合器件(CCD)成像原理与方形孔径采样定理得到边缘灰度变化的数学模型,并给出了基于高斯曲线拟合的亚像素定位算法。Ghosal等^[13]建立了理想的阶跃边缘灰度模型,通过图像不同阶次Zernike矩计算模型参数,进行亚像素定位。上述两种算法在成像较好的情况下定位效果好,然而移动式三维测量用标记点具有成像亮度较低且不均匀等问题,对其采用上述算法,定位效果较差。对此提出了一种基于灰度差重心的亚像素定位算法,沿提取的像素级边缘点扫描方向计算灰度差重心,并在此方向上进行亚像素定位。该算法形式简单,可以实现标记点边缘的精确亚像素定位。

2 标记点中心定位算法

以标记点的识别与近似成像中心定位为基础,实现成像中心的精确定位。提出的算法流程如图1所示。该算法主要由像素级边缘检测和边缘亚像素定位两个模块组成。下面具体介绍各模块的实现过程。

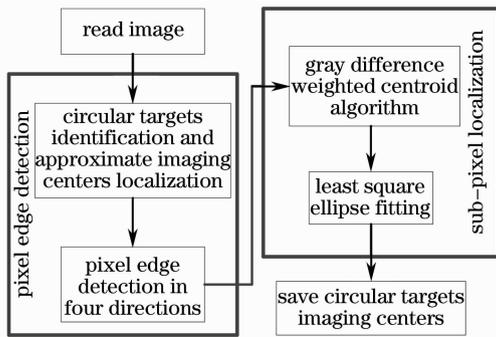


图1 算法流程图

Fig. 1 Algorithm flow chart

2.1 标记点识别与近似成像中心定位

标记点识别与近似成像中心定位是像素级边缘检测、边缘亚像素定位的基础,直接影响标记点成像中心的最终提取结果。此外受光照、拍摄距离、角度以及被测工件表面特性等外界因素变化的影响,标记点成像效果差异很大。因此需要一种高效、稳健的标记点识别算法及较为精确的近似成像中心定位算法。

提出的“六点法”可满足上述要求,该算法具体过程如图2所示。

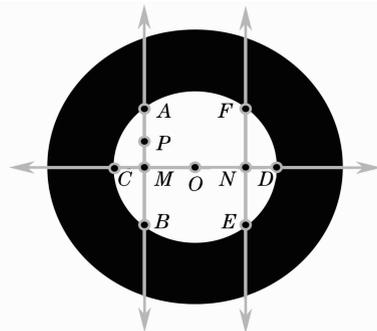


图2 “六点法”具体过程示意图

Fig. 2 Scheme of “6 points algorithm” detailed process

对图像进行隔行隔列扫描,当扫描至标记点成像区域内部(以点P为例)时,向上扫描图像,得到识别点A,判断条件如图3所示, $ip_{i,j}$ 为图像在 (j,i) 处像素点的灰度值。

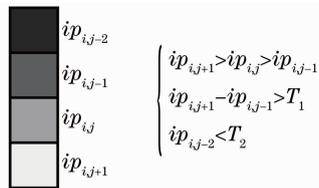


图3 识别点判断条件

Fig. 3 Identification points judgment condition

满足图3的像素点即为识别点A,图中 T_1, T_2 为判断阈值,需要根据具体成像情况进行确定,取 $T_1=30, T_2=50$ 。

以 A 点为基准, 向下扫描图像, 得到识别点 B; 取 A、B 中点 M 为基准, 向左向右扫描图像, 得到识别点 C、D; 求取 M 点关于 C、D 中点 O 的对称点 N, 以 N 为基准, 向上向下扫描图像, 得到识别点 E、F。6 个识别点确定过程均基于上述判断条件并作相应改动, 当六个识别点均被确定时, 认为此标记点识别完成。上述“六点法”不会因为外界因素变化而出现误识别、漏识别等现象, 可满足近似成像中心定位的稳健性要求。

对完成确定的 6 个识别点进行最小二乘椭圆拟合^[14], 得到的椭圆方程为

$$x^2 + Axy + By^2 + Cx + Dy + E = 0, \quad (1)$$

椭圆中心 $\left(\frac{2BC - AD}{A^2 - 4B}, \frac{2D - AC}{A^2 - 4B}\right)$ 即近似成像中心。

2.2 像素级边缘检测

像素级边缘检测的具体过程如图 4 所示, 图 4(a) 为上下边缘检测过程, 图 4(b) 为左右边缘检测过程。

以标记点近似成像中心为基准, 限制左右扫描范围, 在成像区域内进行上下搜索, 将满足判断条件的像素点分别记为标记点上下像素级边缘点, 判断条件同图 3。左右边缘检测具体过程类似于上下边缘检测, 只需将判别条件与扫描范围做相应改动即可。

上述像素级边缘检测算法基于近似成像中心,

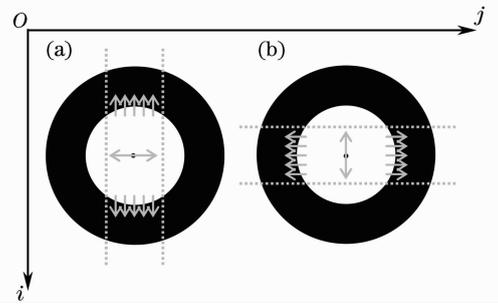


图 4 像素级边缘检测示意图。

(a) 上下边缘检测; (b) 左右边缘检测

Fig. 4 Scheme of pixel edge detection. (a) Upper and lower edge detection; (b) left and right edge detection

只对标记点成像区域进行检测, 速度快且不会检测到标记点之外的“伪边缘点”。

2.3 亚像素定位

对于移动式三维测量系统, 标记点的像素级边缘检测已经满足不了系统的精度要求^[15]。因此需要对像素级边缘点进行亚像素定位。

2.3.1 标记点成像效果分析

图 5(a) 为标记点成像效果图, 标记点成像亮度较低且不均匀。白框区域为一个左像素级边缘点及其左右各三个邻域点, 设灰度值为 g_i ($i = -3, -2, \dots, 3$), 相应的灰度差值可表示为

$$f_i = \frac{g_{i+1} - g_{i-1}}{2} \quad (i = -2, -1, \dots, 2), \quad (2)$$

此 7 个像素点 g_i, f_i 的变化趋势如图 5(b) 所示。

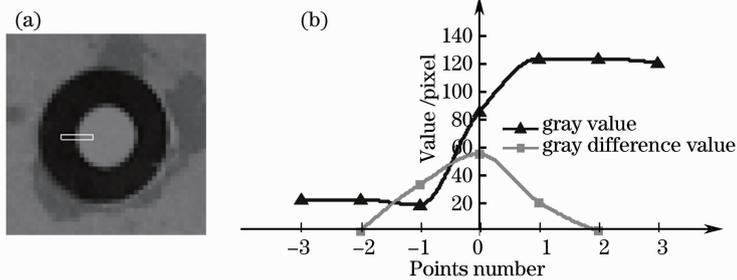


图 5 标记点成像效果分析。(a) 标记点成像效果图; (b) 像素级边缘点邻域灰度、灰度差变化趋势示意图

Fig. 5 Imaging effect analysis of circular targets. (a) Circular targets imaging effect diagram;

(b) gray and gray difference trends scheme of pixel edge neighborhood points

可以看出, 标记点成像后, 并不符合理想的阶跃边缘灰度模型, 而且边缘邻域灰度差变化趋势也不符合高斯分布。因此常用的亚像素定位算法如曲线拟合法与 Zernike 正交矩法在此并不适用, 需要根据标记点成像特点提出一种亚像素定位算法。

2.3.2 基于灰度差重心的亚像素定位算法

图像的边缘即为图像灰度值变化最剧烈的位置^[16], 亚像素定位实际上就是在求得的像素级边缘

点的邻域内求出灰度值变化最大的位置, 即图像真实边缘。

基于上述分析, 提出了一种基于灰度差重心的亚像素定位算法, 算法原理如图 6 所示。点 $P(x, y)$ 为像素级边缘点, 点 A、B、C、D 为点 P 沿扫描方向的邻域像素点。对上述五点根据 (2) 式求灰度差 f_i ($i = -2, -1, \dots, 2$), 图像真实边缘位置可由 f_i 关于灰度差坐标 i 的重心表示。

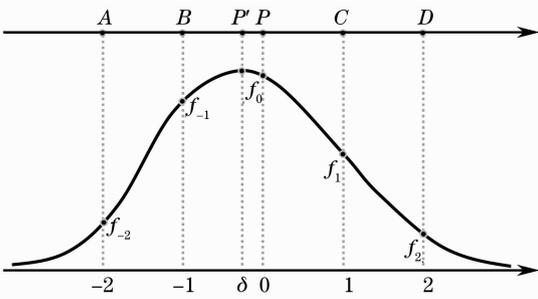


图 6 灰度差重心法示意图

Fig. 6 Scheme of gray difference weighted centroid algorithm

对于左像素级边缘点来说,亚像素定位公式为

$$\begin{cases} \delta = \frac{-2f_{-2} - f_{-1} + f_1 + 2f_2}{f_{-2} + f_{-1} + f_0 + f_1 + f_2} \\ x' = x + \delta \\ y' = y \end{cases}, \quad (3)$$

另外三个方向的定位公式做相应改动即可。 $P'(x', y')$ 即为所求的亚像素级边缘点。

3 实验验证

为验证提出的各种算法的可行性及与其他算法相比的优势,对标记点提取的各个环节均进行了实验,实验平台为 VC++ 语言。实验采用的相机为加拿大 Point Grey 公司生产的 FL3-FW-03S3M 相机,分辨率为 640 pixel×480 pixel。

3.1 标记点识别与近似成像中心定位实验

将一幅包含多个标记点的图像读入计算机,采用提出的“六点法”对标记点进行识别与近似成像中心定位。定位完成后将近似成像中心在图中通过黑色“十”字标示出来,图 7 为标记点识别与近似成像中心定位实验结果。其中,图 7(a)为原图,图 7(b)为局部

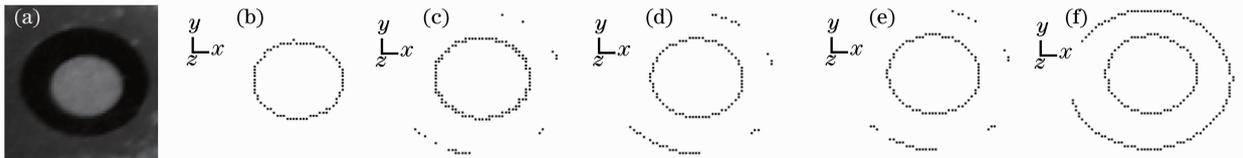


图 8 像素级边缘检测对比实验结果。(a) 待检测图像; (b) 本文算法; (c) Roberts 算法; (d) Sobel 算法; (e) Prewitt 算法; (f) Canny 算法

Fig. 8 Contrast experimental results of pixel edge detection. (a) Image to be detected; (b) algorithm proposed; (c) Roberts algorithm; (d) Sobel algorithm; (e) Prewitt algorithm; (f) Canny algorithm

可以看出,相对其他传统像素级边缘检测算法,提出的算法进行像素级边缘检测,只会检测到由标记点亮圆到黑圈过渡的边缘,且为单像素,不会检测到非标记点边缘信息。因此此算法适用于标记点的

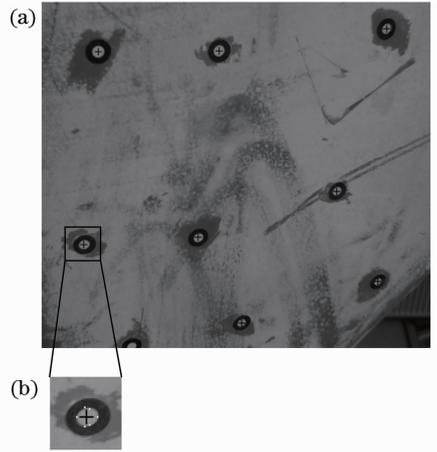


图 7 标记点识别与近似成像中心定位实验结果。

(a) 原图; (b) 局部放大图

Fig. 7 Experimental results of circular targets identification and approximate imaging center localization. (a) Original image; (b) partial enlarged image

放大图,并将 6 个识别点在图 7(b)中用白色点标出。

从图 7(a)中可以看到,当标记点成像完整时,不同大小、倾斜程度、亮度的标记点成像椭圆均可通过该算法识别。而成像不完整的标记点则被剔除,不会发生漏识别、误识别。从图 7(b)可以看到,近似成像中心定位准确且 6 个识别点均位于标记点成像边缘。

3.2 像素级边缘检测对比实验

在标记点识别与近似成像中心定位完成的基础上,采用提出的像素级边缘检测算法以及传统像素级边缘检测算法进行对比实验,图 8(a)为一待检测标记点的图像。图 8(b)为提出的像素级边缘检测算法实验结果,图 8(c)~(f)分别为 Roberts 算法、Sobel 算法、Prewitt 算法、Canny 算法实验结果。

像素级边缘检测,便于后续亚像素定位的进行。

另外,为验证提出的像素级边缘检测算法的加速性,对三幅含若干标记点的图像采用提出的像素级边缘检测算法以及传统像素级边缘检测算法进行

处理并记录运行时间,实验结果如表 1 所示。

表 1 像素级边缘检测运行时间对比实验结果(单位: ms)

Table 1 Contrast experimental results of pixel edge detection elapsed time (unit: ms)

Algorithms for comparison	Algorithm proposed	Roberts algorithm	Sobel algorithm	Prewitt algorithm	Canny algorithm
Test 1	3.13	42.25	71.78	75.31	450.18
Test 2	2.57	42.36	72.48	72.15	457.52
Test 3	2.78	42.54	73.19	70.56	456.45

由表 1 可知,由于提出的像素级边缘检测算法基于标记点近似成像中心,只在标记点成像区域进行检测,故算法运行时间仅为 3 ms 左右,远小于传统像素级边缘检测算法,可以满足系统实时测量的要求。

3.3 亚像素定位算法对比实验

通过像素级边缘检测,得到标记点像素级边缘

点,在此基础上,分别采用提出的灰度差重心法、曲线拟合法和 Zernike 正交矩法进行亚像素定位实验。取其中 9 个标记点,将得到的亚像素级边缘点通过逆向工程专业软件 Imageware 打开并进行椭圆拟合处理,以各标记点椭圆拟合最大偏差和平均偏差以及其方差作为算法定位精度的评价标准,结果如表 2 及图 9 所示。

表 2 亚像素定位对比实验结果

Table 2 Contrast experimental results of sub-pixel localization

Circular targets number	Gray difference weighted centroid algorithm		Curve fitting algorithm		Zernike algorithm	
	Maximum	Average	Maximum	Average	Maximum	Average
1	0.0468	0.0193	0.0699	0.0352	0.0637	0.0257
2	0.0523	0.0207	0.0740	0.0282	0.1035	0.0451
3	0.0742	0.0268	0.0709	0.0387	0.0994	0.0334
4	0.0598	0.0273	0.0703	0.0346	0.0788	0.0329
5	0.0672	0.0258	0.1023	0.0403	0.0994	0.0297
6	0.0478	0.0201	0.1224	0.0538	0.0841	0.0251
7	0.0687	0.0267	0.0994	0.0453	0.0995	0.0407
8	0.0543	0.0179	0.0751	0.0346	0.0621	0.0260
9	0.0653	0.0260	0.1081	0.0484	0.0902	0.0335
Average	0.0596	0.0234	0.0880	0.0399	0.0867	0.0325
Variance	8.56×10^{-5}	1.25×10^{-5}	3.58×10^{-4}	5.68×10^{-5}	2.20×10^{-4}	4.21×10^{-5}

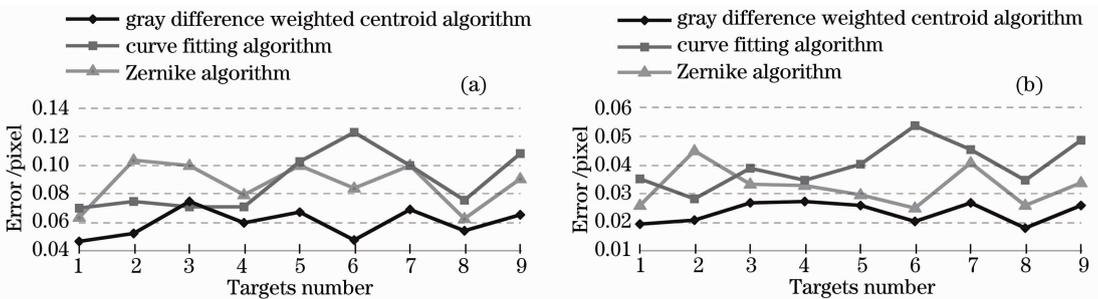


图 9 亚像素定位对比实验结果。(a) 最大值; (b) 平均值

Fig. 9 Contrast experimental results of sub-pixel localization. (a) Maximum value; (b) average value

由表 2 及图 9 可知,对多个标记点进行亚像素定位,通过灰度差重心法求得的亚像素级边缘点拟合椭圆的最大偏差和平均偏差总体上小于曲线拟合法及 Zernike 正交矩法。另外比较三种亚像素定位算法最大偏差和平均偏差的方差,灰度差重心法小于曲线拟

合法及 Zernike 正交矩法。可知,针对不同情况标记点,灰度差重心法亚像素定位结果最稳定。通过上述实验结果分析可知,对于移动式三维测量用圆形标记点,提出的灰度差重心法亚像素定位精度及适应性均优于曲线拟合法和 Zernike 正交矩法。

4 结 论

针对移动式三维视觉测量系统所采用的圆形标记点的成像特点,提出了一种基于灰度差重心法的识别与提取算法。对该算法各个环节进行了分析、介绍以及实验验证。实验结果表明,该像素级边缘检测算法快速、有效;亚像素定位算法准确、适应性强。该算法对移动式三维测量用标记点进行处理时,像素级边缘检测算法运行时间为 3 ms 左右;亚像素定位算法椭圆拟合最大偏差小于 0.08 pixel,平均偏差小于 0.03 pixel。通过实验验证了该算法的可行性及实用价值。

参 考 文 献

- Zhang Guangjun. Vision Measurement [M]. Beijing: Science Press, 2008. 1—22.
张广军. 视觉测量[M]. 北京: 科学出版社, 2008. 1—22.
- Yang Bowen, Zhang Liyan, Ye Nan, *et al.*. Camera calibration technique of wide-area vision measurement [J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(9): 0915001.
杨博文, 张丽艳, 叶南, 等. 面向大视场视觉测量的摄像机标定技术[J]. 光学学报, 2012, 32(9): 0915001.
- Zhang Xuping, Wang Jiaqi, Zhang Yixin, *et al.*. Large-scale three-dimensional stereo vision geometric measurement system [J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(3): 0315002.
张旭苹, 汪家其, 张益昕, 等. 大尺度三维几何尺寸立体视觉测量系统实现[J]. 光学学报, 2012, 32(3): 0315002.
- Zeng Xiangjun, Huo Jincheng, Wu Qingyang. Calibrate method for scanning direction of 3D measurement system based on linear-structure light[J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(1): 0108002.
曾祥军, 霍金城, 吴庆阳. 线结构光三维测量系统扫描方向的标定[J]. 中国激光, 2012, 39(1): 0108002.
- Xie Zexiao, Li Xuyong, Xin Shaohui, *et al.*. Underwater line structured-light self-scan three-dimension measuring technology [J]. Chinese J Lasers, 2010, 37(8): 2010—2014.
解则晓, 李旭勇, 辛少辉, 等. 水下线结构光自扫描三维测量技术[J]. 中国激光, 2010, 37(8): 2010—2014.
- Sun Junhua, Zhang Guangjun, Wei Zhenzhong, *et al.*. Mobile 3D vision measurement system form large-scale free form surface [J]. Chinese J Scientific Instrument, 2006, 27(12): 1688—1691.
孙军华, 张广军, 魏振忠, 等. 大型自由曲面移动式三维视觉测量系统[J]. 仪器仪表学报, 2006, 27(12): 1688—1691.
- J Heikkila, O Silven. A four-step camera calibration procedure with implicit image correction[C]. IEEE Proceedings of the 1997 Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 1997. 1106—1112.
- Zhu Jigui, Zou Jian, Lin Jiarui, *et al.*. Error-compensation algorithm with high-accuracy for photographic image processing [J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(9): 0912004.
郝继贵, 邹剑, 林嘉睿, 等. 摄影测量图像处理的高精度误差补偿法[J]. 光学学报, 2012, 32(9): 0912004.
- Feng Xinxing, Zhang Liyan, Ye Nan, *et al.*. Fast algorithm on center location of two dimensional Gaussian distribution spot[J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(5): 0512002.
冯新星, 张丽艳, 叶南, 等. 二维高斯分布光斑中心快速提取算法研究[J]. 光学学报, 2012, 32(5): 0512002.
- Duan Ruiling, Li Qingxiang, Li Yuhe. Summary of image edge detection[J]. Optical Technique, 2005, 31(3): 415—419.
段瑞玲, 李庆祥, 李玉和. 图像边缘检测方法研究综述[J]. 光学技术, 2005, 31(3): 415—419.
- J Canny. A computational approach to edge detection[J]. IEEE Trans Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1986, 8(6): 679—698.
- He Zhonghai, Wang Baoguang, Liao Yibai, *et al.*. Subpixel algorithm using a curve fitting method[J]. Chinese J Scientific Instrument, 2003, 24(2): 195—197.
贺忠海, 王宝光, 廖怡白, 等. 利用曲线拟合方法的亚像素提取算法[J]. 仪器仪表学报, 2003, 24(2): 195—197.
- S Ghosal, R Mehrotra. Orthogonal moment operators for subpixel edge detection[J]. Pattern Recognition, 1993, 26(2): 295—306.
- Liu Shugui, Li Peng, Na Yonglin. Evaluation of the form of ellipse based on least square method[J]. Acta Metrologica Sinica, 2002, 23(4): 245—247.
刘书桂, 李蓬, 那永林. 基于最小二乘原理的平面任意位置椭圆的评价[J]. 计量学报, 2002, 23(4): 245—247.
- Liu Guodong, Liu Bingguo, Chen Fengdong, *et al.*. Study on the method of the accuracy evaluation of sub-pixel location operators [J]. Acta Optica Sinica, 2009, 29(12): 3446—3451.
刘国栋, 刘炳国, 陈凤东, 等. 亚像素定位算法精度评价方法的研究[J]. 光学学报, 2009, 29(12): 3446—3451.
- R C Gonzalez, R E Woods. Digital Image Processing[M]. Ruan Qiuqi, Ruan Yuzhi, Transl. Beijing: Science Press, 2003. 463—467.
冈萨雷斯, 伍兹. 数字图像处理[M]. 阮秋琦, 阮宇智译. 北京: 科学出版社, 2003. 463—467.

栏目编辑:何卓铭