

文章编号: 0258-7025(2010)02-0543-06

基于双激光准直电荷耦合器的 弯曲度测量方法

卢 泉 韩保君 刘上乾 王会峰

(西安电子科技大学技术物理学院, 陕西 西安 710071)

摘要 为了满足特殊管道弯曲度的高精度测量要求,提出了一种基于双激光准直电荷耦合器(CCD)的测量方法,介绍了单激光准直与双激光准直 CCD 的弯曲度测量原理,建立了靶标的动态旋转模型,通过双激光光斑的精确定位与同心圆的现场标定准确地提取靶标的旋转角度,对测量结果进行校正,从而实现特殊管道弯曲度的精确测量。实验结果表明,幅值偏差为 ± 0.01 mm,方位角偏差为 $\pm 10''$,该方法具有较高的测量精度且稳定性好,可满足特殊管道弯曲度的高精度测量要求。

关键词 测量;弯曲度测量;双激光准直;电荷耦合器;动态旋转模型;现场标定

中图分类号 TP391 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL20103702.0543

A Method of Curvature Measurement Based on Charge Coupled Device Dual-Laser Collimation

Lu Quan Han Baojun Liu Shangqian Wang Huifeng

(School of Technical Physics, Xidian University, Xi'an, Shaanxi 710071, China)

Abstract To meet the requirement for the high accuracy curvature measurement of special pipe, a method based on charge coupled device (CCD) dual-laser collimation is proposed. The curvature measurement theories based on both CCD single-laser collimation and dual-laser collimation are introduced. A dynamic rotation model of target is established, and the rotation angle is extracted accurately by the pinpoint method of the dual-laser spots and field calibration method of the concentric circles. Finally, the accurate curvature of special pipe is acquired after correcting the measurement results. Experimental results show that the amplitude errors is ± 0.01 mm, and the azimuth angle errors is $\pm 10''$. This method is quite stable and accurate, which can meet the requirement for the high accuracy curvature measurement of special pipe.

Key words measurement; curvature measurement; dual-laser collimation; charge coupled device; dynamic revolution model; onsite standard

1 引 言

特殊管道在航空航天、能源、化工、武器等行业有着广泛的应用,如发射管、发动机气道、核反应堆蒸气发生器热交换管、火炮身管、枪管等。这些管道往往承担着高压高速流体的输送任务,但在加工或使用过程中难免会产生弯曲变形,影响其正常使用,有时甚至会造成严重的后果,因此必须对其进行及

时检测。目前常用的管道弯曲度测量方法^[1~5]主要有:光学像限仪法、激光准直位置传感器(PSD)法、单激光准直电荷耦合器(CCD)法等。但光学像限仪的适应性较差、易受管内条件干扰、试验工作量大;PSD感受的是光斑的能量中心,当激光器光源强度不均匀时光的能量中心并不是几何中心,引起较大的偏差;单激光准直 CCD 法具有较高的弯曲度幅值

收稿日期:2009-04-13;收到修改稿日期:2009-05-13

基金项目:国家自然科学基金(60377034)资助项目。

作者简介:卢 泉(1982—),男,博士研究生,主要从事光电成像与实时图像处理、高精度光电测量方面的研究。

E-mail: luquanwater@163.com

导师简介:刘上乾(1937—),男,教授,博士生导师,主要从事高精度图像测量和实时图像处理方面的研究。

E-mail: shqliu@xidian.edu.cn

测量精度,然而在特殊管道的实际进深测量中,内壁的复杂结构可能引起 CCD 摄像机和靶标的随机旋转,单激光准直不能表征系统的变化情况,难以实现弯曲度方位角的精确测量。

针对上述测量工程中的实际问题^[6,7],提出了一种基于双激光准直 CCD 的弯曲度测量方法,建立了靶标的动态旋转模型,通过双激光光斑的精确定位与同心圆的现场标定^[8~10],准确地提取靶标的旋转角度,对测量结果进行校正,从而实现特殊管道弯曲度的精确测量。

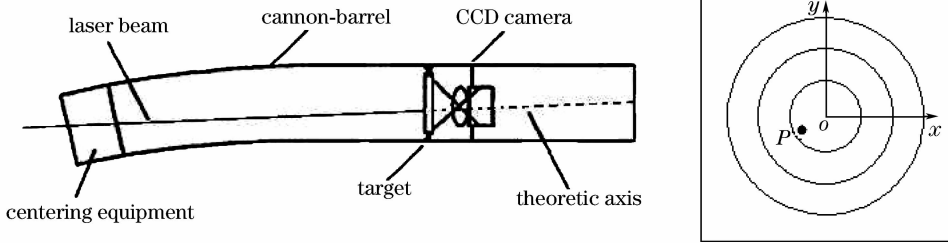


图 1 单激光准直弯曲度测量原理框图

Fig. 1 Frame of curvature measuring system of single-laser collimation

x, y 分别为身管的实际轴线相对于理论轴线在两个方向上的实际偏移量,即弯曲度的两个分量,而弯曲度的方向正好与其相反,据此可以求出弯曲度的大小 ρ 和方位角 θ ,

$$\rho = \sqrt{x^2 + y^2}, \quad (1)$$

$$\tan \theta = y/x. \quad (2)$$

3 双激光准直的弯曲度测量原理

在实际进深测量过程中,由于受管道内壁复杂结构的影响,CCD 摄像机和靶标在进深过程中可能

2 单激光准直的弯曲度测量原理

特殊管道由于身管自重、悬臂梁结构、不均匀加热以及其他加工、使用等原因,使得实际轴线偏离理论轴线,偏离量的大小叫作弯曲度。根据弯曲度的定义,采用准直激光作为弯曲度的测量基准^[5]。测量前先调整管口定中装置中的激光器,使激光光束打在靶面的中心位置,此时激光光束与身管的理论轴线重合,然后由爬行载体推动自定中靶标到达指定的进深位置,靶面上激光光斑的位置 $P(x, y)$ 表征该测量点的弯曲度,其原理模型如图 1 所示。

产生微小的随机旋转,从而引起准直激光光斑在靶面上位置的相对变化,难以获得较高的方位角测量精度。为了消除这种影响,同时采用两束激光作为测量基准^[6,7],测量前先调整管口定中装置中的激光器,使中心激光光束打在靶面的中心位置,然后在平行槽内安装另一激光器使激光光束沿相同方向打在靶面上,并保持两个激光器的位置不变,爬行载体推动自定中靶标到达指定的进深位置,此时双激光光斑位置的变化表征弯曲度的变化以及靶标的动态旋转情况,其原理模型如图 2 所示。

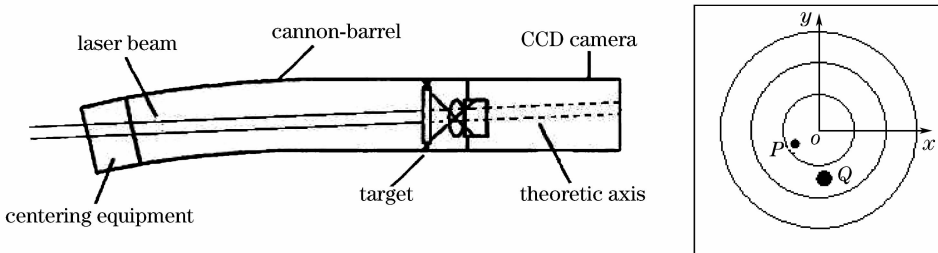


图 2 双激光准直弯曲度测量原理框图

Fig. 2 Frame of curvature measuring system of dual-laser collimation

令 xoy 为身管某一进深测量点所对应的靶面坐标系, P 和 Q 分别为两束激光打在靶面上激光光斑形心的位置; $x'oy'$ 为下一个进深测量点所对应的靶面坐标系, P' 和 Q' 分别为两束激光打在靶面上激光光斑形心的位置,假如此时引入的旋转角度为 α ,将前后两帧图像进行叠加可以得到靶标的动态旋转模

型,如图 3 所示。

由图 3 可见,前后两帧图像中双激光光斑形心位置的连线 PQ 和 $P'Q'$ 之间的夹角为 β ,根据几何关系,则

$$\angle oQP = \angle oQ'P', \quad (3)$$

$$\alpha = \angle QoQ', \quad (4)$$

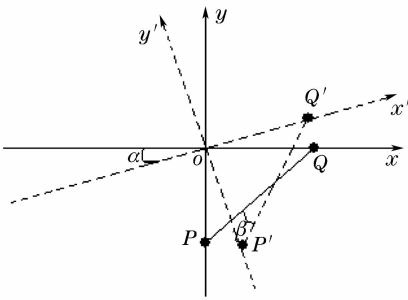


图3 靶标的动态旋转模型

Fig. 3 Dynamic rotation model of target

$$\beta + \angle oQP = \angle QoQ' + \angle oQ'P', \quad (5)$$

$$\alpha = \beta. \quad (6)$$

由此可得,在实际进深测量过程中,CCD摄像机和靶标产生的随机旋转角度 α 可以通过前后两帧图像中双激光光斑形心位置的连线夹角 β 获得

$$\cos \beta = \frac{\overrightarrow{PQ} \cdot \overrightarrow{P'Q'}}{|\overrightarrow{PQ}| |\overrightarrow{P'Q'}|}. \quad (7)$$

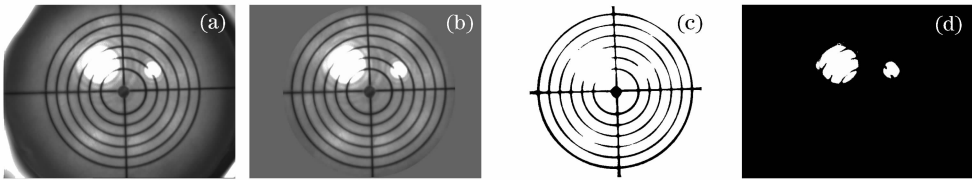


图4 图像分割。(a) 原始图像;(b) 背景剪除;(c) 靶标;(d) 双激光光斑

Fig. 4 Imaging segmentation. (a) original image; (b) background pruning; (c) target; (d) dual-laser spots

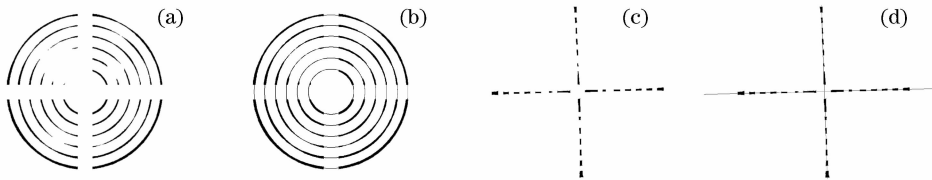


图5 靶标定位。(a) 同心圆区域;(b) 同心圆定位;(c) 十字区域;(d) 十字定位

Fig. 5 Target location. (a) concentric circles region; (b) concentric circles location;

(c) crossing region; (d) crossing location

4.1 靶标的精确定位

靶标由同心圆和十字标尺组成,十字标尺为水平和竖直定位提供参考,同心圆标尺为径向畸变校正和系统光学变化提供现场标定参考^[8,10]。由于同心圆与十字标尺的相互交叠,难以同时获得同心圆与十字标尺的精确定位,先采用一定宽度的十字模板对靶标中心进行匹配搜索,对图4(c)的标尺交叠处进行剪除,保留同心圆区域,如图5(a)所示。根据空间径向距离对其进行区域聚类划分,然后在各区域内进行最小二乘圆拟合可实现同心圆标尺的亚像素精确定位,结果如图5(b)所示。同心圆标尺所在的区域为 C ,则有

对双激光光斑图像进行适当处理和计算,可间接获得靶标在进深测量过程中引入的动态旋转角度 α ,对测量结果进行校正,从而提高系统的测量精度。

4 图像处理

图4(a)为在弯曲度实际测量中采集的一幅图像。为了消除系统光学变化的影响,提高测量精度,以同心圆十字靶标作为双准直激光的定位参考。然而由于光电噪声和火炮内膛复杂空间结构等多种因素的作用,内场空间的小尺寸照明系统难以提供理想的均匀照度,成像背景比较复杂,所以必须先对图像进行中值滤波和背景剪除,然后利用自适应最大类间方差双阈值法^[8]将背景、同心圆十字靶标、激光光斑分离。图4(b)为图4(a)经中值滤波和背景剪除后的图像,对其分割后得到的靶标和光斑分别如图4(c)和图4(d)所示。

$$C = \{c(n) = [x(n), y(n)] \mid (r_i - d/2)^2 \leq$$

$[x(n) - a]^2 + [y(n) - b]^2 \leq (r_i + d/2)^2\}$, (8)
式中 r_i 为同心圆的半径($i = 1, 2, 3, 4, 5, 6$), a, b 为同心圆的坐标, d 为标尺的宽度。

为了消除同心圆标尺对十字标尺的影响,以 C 作为几何约束特征先对图4(c)的靶标进行剪除,保留十字标尺,如图5(c)所示。根据水平与竖直距离对其进行区域聚类划分,然后在各区域内进行最小二乘直线拟合,可实现十字标尺的亚像素快速精确定位,结果如图5(d)所示。

4.2 双光斑的精确定位

激光光斑经边缘检测、轮廓提取后的轮廓线如

图 6(a)所示。由于光斑和标尺间存在灰度重建,经轮廓提取后所得的边缘残差较大,而且光斑的位置随弯曲度的变化而变化,残差也随机变化,直接进行拟合难以获得较高的定位精度,如图 6(b)所示。对复杂靶标的成像特点进行分析,发现激光光斑对标尺的影响很小,结合靶标标尺的精确定位,采用几何

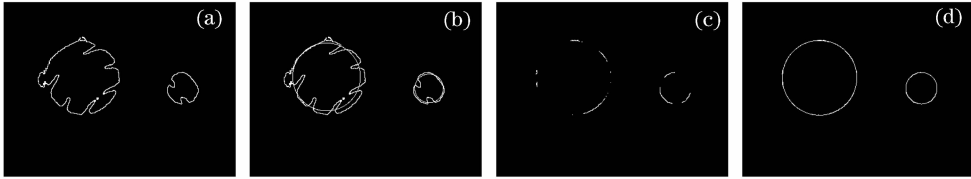


图 6 双激光光斑的定位。(a) 光斑的边缘;(b) 直接拟合;(c) 残差修剪;(d) 修剪后的拟合

Fig. 6 Dual-laser spots location. (a) edge of spots; (b) direct fitting; (c) residual pruning; (d) fitting after pruning

由图 6(c)可见,修剪后的边缘有了较大的改善,对其进行最小二乘圆拟合^[9]可实现双激光光斑的精确定位,结果如图 6(d)所示。

4.3 现场的标定校正

双激光光斑的定位得到的只是相对靶心在面阵 CCD 上的成像位置,难以准确地表述实际轴线相对于理论轴线的实际偏移量,由于激光光斑与刻度都在同一靶面上,结合靶标的实际物理尺寸进行现场标定校正,可以准确地获得双激光光斑相对靶心在 x 和 y 方向上的实际偏移量 $\Delta x_i, \Delta y_i$

$$\Delta x_i = (x_i - x_0)dx, \quad (10)$$

$$\Delta y_i = (y_i - y_0)dy, \quad (11)$$

式中 $i = 1, 2, (x_i, y_i)$ 和 (x_0, y_0) 分别为激光光斑和靶心在面阵 CCD 上校正后的成像坐标, dx 和 dy 分别为图像中每个像素对应光靶上的实际距离,根据 (7) 式可计算出靶标的动态旋转角度 α 。

将中心准直激光光斑的实际偏移量代入 (1), (2) 式可得到弯曲度幅值大小 ρ 及方位角 θ , 根据提取的旋转角度 α 进行校正,从而实现该位置弯曲度

特征约束残差修剪的方法对光斑的边缘进行优化,结果如图 6(c)所示。残差修剪后激光光斑的边缘为

$$L = \{l(n) = [x(n), y(n)] | n = 0, 1, \dots, M\}, \quad (9)$$

式中 M 为修剪后的边缘点数。

5 实验验证与数据分析

为了验证上述方法的测量精度及其稳定性,在同一管道内进行多次测试实验,实验条件为:高分辨率、高灵敏度的微型 CCD 黑白摄像机 LCL-902HS,像素数为 $768 \text{ pixel} \times 576 \text{ pixel}$; SSE0612, 6.0 mm, F1.2 镜头;波长为 650 nm, 功率为 10 mW 的固体激光器;分辨率为 $1 \mu\text{m}$ 的 GCM-127502AM 二维精密平台;旋转编码器分辨率为 $0.36''$, 绝对精度为 $0.5''$ 的 PM MOT 高精密度测角仪。计算机的配置为:中央处理器奔腾 IV 2.8 GHz, 内存 512 Mb, 整个测量系统的软件控制和图像处理都是 VC++ 6.0 在 Windows2000 操作系统开发完成的。

图 7 为其中一组测量结果,进深速度为 10 mm/s , 采样步长为 20 mm 。表 1 还给出了等间距

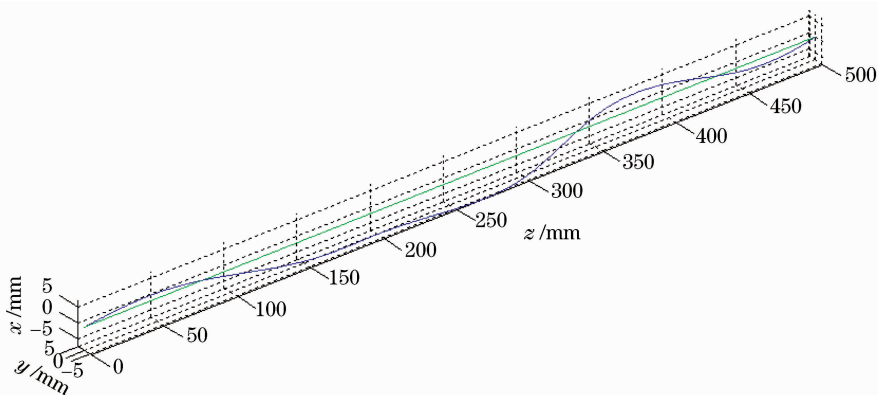


图 7 弯曲度空间曲线

Fig. 7 Space curve of curvature

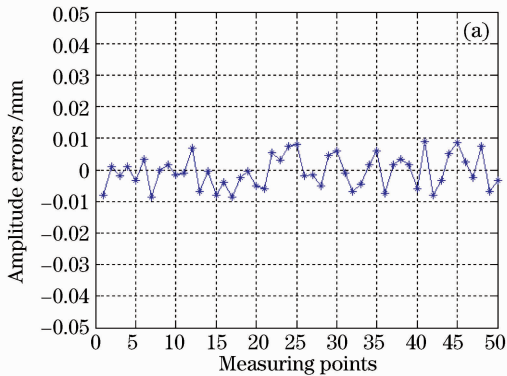
抽取的弯曲度测量均方误差。

表 1 弯曲度测量均方误差

Table 1 Average errors of curvature measurement

Number	$\Delta\rho$ /mm	$\Delta\theta$ /(")
1	0.007	3.2
2	0.004	6.3
3	0.005	1.9
4	0.003	5.7
5	0.004	4.8
6	0.002	6.1
7	0.006	5.0
8	0.006	3.3
9	0.004	3.9
10	0.003	3.7
11	0.001	5.2

由图 7 和表 1 可以看出,生成的空间曲线直观地表述了管道弯曲度的变化,且该系统具有较强的稳定性。为了进一步验证上述方法的测量精度及其稳定性,将激光定中装置与靶标摄像装置分别固定在二维精密平台和测角自旋转平台上,先调整二维平台使中心激光束打在靶心位置,然后沿 x, y 两个方向改变二维平台的平移量使准直激光打在靶面的不同位置,同时控制自旋转平台使靶标摄像装置按



一定的角度自旋转,进而模拟特殊管道的弯曲度变化以及内壁结构引入的靶标旋转。

为了比较,二维平台沿 x, y 两个方向的单次平移量均为 0.1 mm,自旋转平台的单次旋转角度为 $50''$,进行了多次测量实验,表 2 给出了旋转角度测量实验的部分测量结果以及偏差。以精密平台的实际调整值作为测量基准,随机抽取其中 50 组弯曲度的测量结果,图 8 分别给出了相应的幅值偏差以及方位角偏差。

表 2 旋转角度的测量结果及偏差

Table 2 Measurement results and errors of revolution angle

Number	α /(")	$\Delta\alpha$ /(")
1	54	+4
2	52	+2
3	55	+3
4	47	-3
5	46	-4
6	49	-1
7	56	+6
8	42	-8
9	53	+3
10	51	+1
11	48	-2

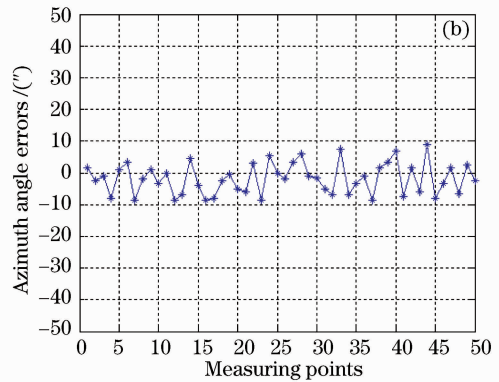


图 8 弯曲度测量。(a) 幅值偏差;(b) 方位角偏差

Fig. 8 Curvature measurement. (a) amplitude errors; (b) azimuth angle errors

由图 8 可以看出,该方法具有较高的测量精度且稳定性好,与传统的弯曲度测量方法相比^[3~5],幅值偏差由 ± 0.05 mm 提高到 ± 0.01 mm,方位角偏差由 $\pm 51''$ 提高到 $\pm 10''$,有效地提高了特殊管道弯曲度的测量精度。

6 结 论

提出了一种基于双激光准直 CCD 的测量方法,建立了靶标的动态旋转模型,通过双激光光斑的定位与同心圆的现场标定准确地提取靶标的旋转角

度,对测量结果进行校正后获得特殊管道弯曲度的精确测量。实验结果表明,该方法与传统的弯曲度测量方法相比,幅值偏差由 ± 0.05 mm 提高到 ± 0.01 mm,方位角偏差由 $\pm 51''$ 提高到 $\pm 10''$,有效地提高了特殊管道弯曲度的测量精度,为管道参数的非接触式高精度测量提供新的参考方法。

参 考 文 献

- 1 F. Chen, G. M. Brown, M. Song. Overview of three-dimensional shape measurement using optical methods [J]. *Opt. Eng.*, 2000, **39**(1):10~22
- 2 Tang Xiaojun, Li Yujun, Liu Junhua *et al.*. Alignment and

- micro-displace measurement with four-quadrant photo-detector by system modeling [J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(3):746~751
- 汤晓君,李玉军,刘君华等. 基于系统建模的四像限光电探测器对准与微位移测量系统[J]. *中国激光*, 2009, **36**(3):746~751
- 3 Sun Jihong, Zhang Wenjie, Yang Qingwen. Measuring system of gun barrel straightness based on PSD [J]. *Computer Measurement & Control*, 2006, **14**(6):814~816
- 孙吉红,张文杰,杨清文. 火炮身管弯曲度检测仪的研制[J]. *计算机测量与控制*, 2006, **14**(6):814~816
- 4 Wang Peichang, Chang Zhixue, Zhang Xiufeng. Development of straightness inspection system for long shaft [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2008, **35**(3):63~67
- 王培昌,常治学,张秀峰. 长轴直线度检测系统[J]. *光电工程*, 2008, **35**(3):63~67
- 5 Cheng Shi, Huang Ping. Straight line measuring of cannon barrel and choosing component [J]. *Technology Foundation of National Defence*, 2007, **2**(2):53~55
- 程石,黄平. 火炮身管直线度检测方法及其测量元件选择[J]. *国防技术基础*, 2007, **2**(2):53~55
- 6 Wei Pengfei, Liu Jun, Li Xiaofang *et al.*. Design of laser beam real-time monitoring and adaptive collimation system [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(8):1590~1595
- 尉鹏飞,刘军,李晓芳等. 激光光束实时监测与自动准直系统设计[J]. *光学学报*, 2008, **28**(8):1590~1595
- 7 Feng Qibo, Zhang Zhifeng, Chen Shiqian *et al.*. A novel method for dynamically measuring diameters of train wheels using laser displacement transducers [J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(7):1059~1062
- 冯其波,张志峰,陈士谦等. 一种激光位移传感器动态测量列车车轮直径的新方法[J]. *中国激光*, 2008, **35**(7):1059~1062
- 8 Yu Jun, Lin Jiaming, Yang Jianyu *et al.*. Distortion measurement and calibration technology for CCD camera system based on new target board [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(8):1440~1442
- 余俊,林家明,杨建宇等. 基于新型靶的CCD摄像系统畸变测量与校正[J]. *光学学报*, 2007, **27**(8):1440~1442
- 9 Lu Quan, Liu Shangqian, Wang Hui Feng. Precise location of laser spot center based on residual pruning [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(12):2311~2315
- 卢泉,刘上乾,王会峰. 基于残差修剪的激光光斑高精度定位方法[J]. *光学学报*, 2008, **28**(12):2311~2315
- 10 Richard Hartley, Sing Bing Kang. Parameter-free radial distortion correction with centre of distortion estimation [J]. *IEEE Transaction on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2007, **29**(8):1309~1321