

文章编号 1004-924X(2012)09-1953-07

加权整体最小二乘法在光学自准直法 测量挠曲角中的应用

乔培玉^{1,2}, 何 昕^{1*}, 魏仲慧¹

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;

2. 中国科学院 研究生院, 北京 100039)

摘要:建立了基于光学自准直法的测量系统,利用该系统提取转台的十字丝坐标,完成了对三维物体的挠曲角测量。首先,采用 Sobel 提取算子对 CCD 拍摄到的十字丝图像进行边缘检测。然后,采用了自适应的阈值分割进行直线提取;由于转台上有其它划痕存在,采用局部最小二乘进行十字丝的提取。最后,采用加权整体最小二乘法进行十字丝两条线的直线拟合,联立两方程,得出交点坐标值。结果表明,此方法获取的两直线斜率之积的精度在 $\pm 1\%$ 以内,非常接近十字丝斜率之积的真值(理论真值为 -1)。使用徕卡经纬仪(精度为 $0.5''$)的角度值作为真值进行精度标定,测得 α 的精度为 $3.59''$, β 的为 $3.76''$,完全满足系统挠曲角测量的精度要求。

关键词:挠曲角测量;自准直法;Sobel 算子;直线拟合;局部最小二乘法;加权整体最小二乘法

中图分类号: V556; TH741.14 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20122009.1953

Application of weighted total least squares in measurement of deflection angle with optical self-collimation method

QIAO Pei-yu^{1,2}, HE Xin^{1*}, WEI Zhong-hui¹

(1. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,
Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;

2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

* Corresponding author, E-mail: hexin6627@sohu.com

Abstract: A self-collimating optical measurement system was set up to measure the deflection angles of three-dimensional objects, in which the values of the deflection angles were obtained by extracting the coordinate of a turntable cross wire. First, Sobel operator was used to detect the image edge of the cross wire taken by a CCD camera, then lines of the cross wire were extracted through self-adaptive threshold division. Because of other turntable scratches, the partial least square method was used to extract the cross wire, and the weighted total least squares was adapted to fit the cross-wire lines. Thus two equations were set up, and the intersection coordinate was obtained through solving the two equations. Experimental results show that the precision of the two line-slope product is within $\pm 1\%$, very close to the true value (theoretical true value is -1). By taking the angle from Leica theodolite (the accuracy is $0.5''$) as the true value to calibrate the precision, the measured precision angles for α and β are $3.59''$ and $3.76''$, respectively, which satisfies the requirements of deflection angle measurement.

收稿日期: 2012-03-15; 修订日期: 2012-05-10.

基金项目: 国家 863 高技术研究发展资助项目

Key words: deflection angle measurement; self-collimation method; Sobel operator; line fitting; partial least squares; weighted total least squares

1 引言

挠曲角测量在物体三维变形测量中非常重要,其测量方法很多,根据不同的测量精度、测量范围等要求,有机械测量、电磁测量、电子测量、光学测量以及光电测量等。其中,由于光电测量方法具有非接触、高精度等特点而应用最为广泛。目前,光电测角方法主要有激光干涉法、干涉图法、圆光栅法等。此类方法虽然测量精度较高,但它们对环境的光照条件亦要求较高,图像的后期处理也比较复杂,若成像质量不好其精度不能得到保证^[1]。为了提高光电系统测角的稳定性,并降低其对周围环境光照的要求,简化系统结构,有学者提出了利用光学自准直法,以刻有十字丝的转台代替干涉系统来进行挠曲角的测量。该方法首先通过 CCD 相机拍摄转台上刻有十字丝图像,然后通过计算十字丝交点的坐标来实现挠曲角测量。

十字丝交点计算是光学自准直法测量挠曲角的关键,首先提取直线,通过拟合两条十字丝的直线方程,然后联立两方程解得交点坐标。直线提取一般要建立在边缘检测的基础上,依据一定的规

则,确定属于同一条直线的边缘点,然后对直线进行参数估计。边缘检测通常使用的方法是 Hough 变换,把图像平面的边缘点按待求曲线的函数关系映射到参数空间,进行投票累加后找出最大峰值点。对于共线的边缘点,即使它们是相互孤立、间断的, Hough 变换也能检测出直线。但是 Hough 变换存在计算量大、内存占用多、提取的直线受空间量化的制约,不能直接获得直线端点,长度参数以及检测出伪直线等缺陷^[2]。传统的最小二乘法简单实用,应用广泛,但因其选择不同的自变量和因变量,拟合直线也不相同。理论分析表明,加权整体最小二乘直线拟合可以获得最好的拟合结果。本文结合传统最小二乘法和加权整体最小二乘法完成了十字丝两条线的直线拟合,得到的拟合结果完全满足挠曲角测量的精度要求。

2 自准直测角原理

图 1 所示为自准直测量原理图^[1],光源发出的光透过星点分划板,经过分光棱镜的折转到达物镜,经过物镜后光束变为平行光,沿光轴射向平面反射镜。

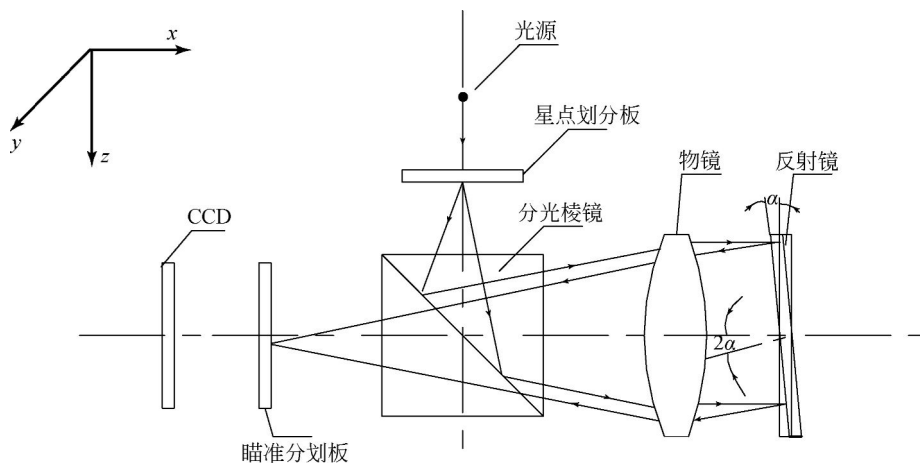


图 1 自准直测角原理图

Fig. 1 Block diagram of angle measurement by self-collimation method

若反射镜法线与光轴平行则光线原路返回,星点分划板的星点像与瞄准分划板的十字丝中心重合;若反射镜法线绕 y 轴旋转倾角 α ,光线经过反射镜后其偏转角是反射镜倾角的 2 倍,即光线已与光轴成 2α 角返回,星点像发生偏移, S 与 α 角的关系为^[1]:

$$S = f \times \tan 2\alpha, \quad (1)$$

式中: S 为星点像偏移量,可通过 CCD 探测器测得; f 为物镜焦距; α 为反射镜法线绕 y 轴旋转的倾角。

由式(1)可得反射镜的偏转角^[1]:

$$\alpha = \frac{1}{2} \arctan \left[\frac{S}{f} \right]. \quad (2)$$

若 α 很小,则满足:

$$\alpha = S/2f. \quad (3)$$

线阵 CCD 只能实现一维角变形的测量,而面阵 CCD 探测器可以实现二维角变形的测量。同理,可以通过上述方法求得绕 z 轴的二维变形角。因此,利用自准直法就可以实现船体纵挠角和艏挠角的测量,但该方法无法实现绕 x 轴扭转角的测量。

3 自准直法测角关键算法

3.1 图像预处理

CCD 相机拍摄的转台图像如图 2 所示。



图 2 原始图像
Fig. 2 Original image

首先,利用边缘检测算子进行边缘提取,去除背景的影响。常用的图像边缘提取的梯度算子有 Roberts 算子、Sobel 算子, Prewitt 算子和 Laplace 算子,但这几种算法并不能保证完整的连续边缘的提取,故其不能满足工业机器视觉应用中的很多场合。本文在 Sobel 算子的基础上,进行了适当的改进,并利用两次最小二乘法成功提取出十字丝直线的拟合方程,然后通过联立两方程

求交点坐标,取得了很高的精度。

Sobel 算子大小采用 3×3 ,若开窗过大,将会导致边缘模糊,对后续的提取精度会有较大的影响。

Sobel 边缘检测算子是在以像素点为中心的邻域内做灰度加权运算,根据该点是否处于极值状态来进行边缘的检测,其本质是一种梯度幅度。令 $f(x, y)$ 为像素点的灰度值, f_x 为水平方向上的梯度, f_y 为垂直方向上的梯度。

Sobel 边缘检测算子定义为^[2-3]:

$$S(i, j) = \sqrt{f_x^2 + f_y^2}. \quad (4)$$

$$f_x = (f(i-1, j-1) + 2f(i-1, j) + f(i-1, j+1)) - (f(i+1, j-1) + 2f(i+1, j) + f(i+1, j+1)), \quad (5)$$

$$f_y = (f(i-1, j-1) + 2f(i, j-1) + f(i+1, j-1)) - (f(i-1, j+1) + 2f(i, j+1) + f(i+1, j+1)). \quad (6)$$

f_x, f_y 可采用如下的卷积模板来描述,两个模板分别负责检测水平和垂直边缘。

$$f_x: \begin{bmatrix} -1 & 0 & 1 \\ -2 & 0 & 2 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad f_y: \begin{bmatrix} 1 & 2 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ -1 & -2 & -1 \end{bmatrix}.$$

Sobel 边缘检测算子综合了图像每个像素点的上、下、左、右邻点灰度的加权和,接近模板中心的权值较大。适当选取阈值门限 τ ,如果 $S(i, j) > \tau$,则认为点 (i, j) 是边缘点^[3-5]。

预处理结果如图 3 所示。

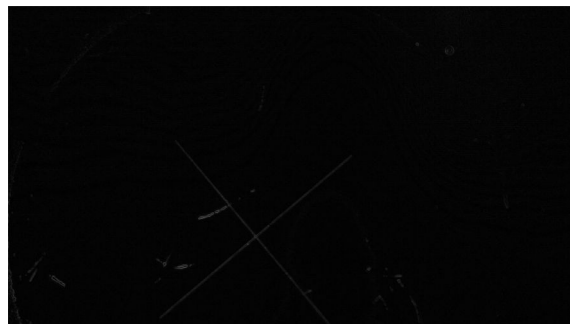


图 3 Sobel 边缘检测后的图像
Fig. 3 Image of Sobel edge detection

3.2 阈值分割

利用 Sobel 算子很好地提取了十字丝的边缘,不过由于十字丝宽度稍大,造成了两个边缘都被提取的情况,并且边缘处的灰度值也比较低。因此需要进行阈值分割,对边缘图像进行二值化。

由于受光线的影响,所采集的图像上不同位置,灰度值也不尽相同,因此不能使用单一的阈值

进行分割。故采用分行的处理方法,即先计算每一行的像素均值和方差,然后将阈值设定为:均值+系数×方差,系数根据实际情况设定,一般设定为 $0 < \text{阈值} < 1$ 。此时直线为两个边缘,为了减小后续的计算量,对两个边缘进行进一步的处理,使之成为一条直线。处理方法为:遍历整幅图像,若当前像素值为 0,而前一个像素和后一个像素均为 255,则把当前像素值设为 255;否则,设置为 0。处理后的图像如图 4 所示。



图 4 阈值分割后的图像

Fig. 4 Image after threshold segmentation

由图可以看到,十字丝被很好地提取出来。当十字丝水平时,则采用分列的处理方法。

3.3 普通最小二乘法

由于转台上有其它的划痕存在,有些划痕和十字丝交互在一起,影响了十字丝的提取精度,为了消除划痕的影响,本文利用局部最小二乘法,以去除划痕,保留十字丝。

设图像空间中欲拟合的各像素点的坐标用 (x_i, y_i) 表示, $i=1, 2, \dots, n$, n 是拟合点个数,拟合函数为:

$$\varphi(x) = a^* x + b^* \quad (6)$$

依据最小二乘法的性质,得^[5]:

$$a^* = \frac{n \times \sum_{i=1}^n x_i y_i - \sum_{i=1}^n x_i \sum_{i=1}^n y_i}{n \times \sum_{i=1}^n x_i^2 - (\sum_{i=1}^n x_i)^2} \quad (7)$$

$$b^* = \frac{n \times \sum_{i=1}^n y_i - a^* \times \sum_{i=1}^n x_i}{n} \quad (8)$$

设 V 是图像中欲拟合的点集,遍历点集中所有点 $V_i(x_i, y_i)$,其中 $i=1, 2, \dots, n$, n 是点集中元素的个数,把每个点的 $x_i, y_i, x_i \times y_i, x_i^2$ 分别累加,最后把累加值带入式(6),即可得到直线参量 (a^*, b^*) ^[6]。

具体方法为:遍历整幅图像,开窗大小为 30×30 ,对窗内所有值为 255 的点进行最小二乘直

线拟合,此时能得到斜率和截距两个值,把这两个值对应数组的地址加一。整幅图像处理完成以后,选择数组中累加值比较大的点,把大于零和小于零的斜率相乘,取出乘积为-1的两个斜率值以及对应的截距。处理后的图像如图 5 所示。

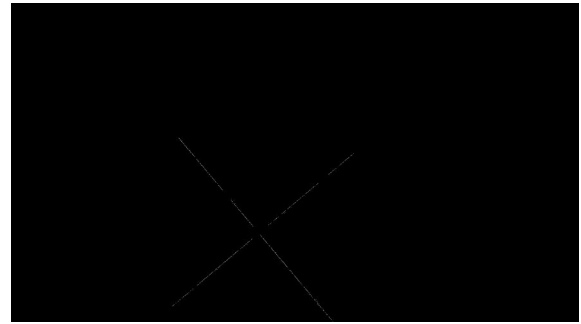


图 5 普通最小二乘法提取结果图像

Fig. 5 Image extracted with ordinary least squares

如图所示,经过传统局部最小二乘法处理后,受其它划痕以及噪声影响的部分十字丝线段得到了很好的滤除,保留了非常好的十字丝图像,通过这些剩余线段数据,可以进一步求出两直线的拟合方程。

3.4 加权整体最小二乘法

直线拟合问题在试验和工程实际问题中都会遇到,它可以描述为:对于给定的 m 个测量点,寻找一条最佳的拟合直线,使其尽可能通过或靠近这些点。拟合的实质是求直线参数斜率和截距的最佳估计,拟合方法通常采用普通最小二乘法求解拟合参数。然而,值得注意的是自变量和因变量的选择不同,所得拟合直线也不同。理论上讲,无论自变量如何选取,最佳的拟合结果只能有一个^[7-9]。

当系数矩阵和观测值都含有误差时,整体最小二乘的模型为: $\mathbf{y} - \mathbf{e}_y = (\mathbf{A} - \mathbf{E}_A) \cdot \boldsymbol{\xi}$ 。式中: \mathbf{e}_y 和 \mathbf{E}_A 分别为观测值和系数矩阵元素的随机误差,具有独立、同分布,服从零均值和相同的方差; $\text{rank}(\mathbf{A}) = m \times n$; \mathbf{y} 是 $n \times 1$ 的观测值向量; \mathbf{A} 是 $m \times n$ 的系数矩阵; $\boldsymbol{\xi}$ 是 $m \times 1$ 的待估参数。

整体最小二乘的准则为:

$$\min_{[\mathbf{e}_y, \mathbf{E}_A]} \|\ [\mathbf{E}_A, \mathbf{e}_y] \|_F$$

式中: $\|\ \|_F$ 表示 Frobenius 范数; $[\mathbf{E}_A, \mathbf{e}_y]$ 表示 $n \times (m+1)$ 的增广矩阵。

将增广矩阵 $[\mathbf{A}; \mathbf{Y}]$ 进行奇异值分解(SVD)得:

$$[\mathbf{A}; \mathbf{Y}] = \mathbf{U} \boldsymbol{\Sigma} \mathbf{V}^T \quad (9)$$

式中: $\mathbf{U} = [u_1, \dots, u_n] \in R^{m+n}$; $\mathbf{V} = [v_1, \dots, v_{m+1}] \in R^{(m+1) \times (m+1)}$; $\hat{\Sigma} = \text{diag}(\sigma_1, \dots, \sigma_{m+1})$ 。

因此,当 $\sigma_m > \sigma_{m+1}$ 且 $v_{m+1,m+1} \neq 0$ 时,系数矩阵和观测值的整体最小二乘估计为:

$$[\hat{\mathbf{A}}; \hat{\mathbf{y}}] = \mathbf{U} \hat{\Sigma} \mathbf{V}^T. \quad (10)$$

向量 $[\hat{\xi}; -1]$ 是 $[\hat{\mathbf{A}}; \hat{\mathbf{y}}]$ 的零空间,因此参数的整体最小二乘估计可以通过奇异值分解(SVD)得到,即有:

$$\hat{\xi} = -\frac{1}{v_{m+1,m+1}} [v_{1,m+1}, \dots, v_{m+1,m+1}]^T. \quad (11)$$

系数矩阵及观测值的改正数 $[\Delta \mathbf{A}; \Delta \mathbf{y}]$ 为:

$$[\Delta \mathbf{A}; \Delta \mathbf{y}] = [\mathbf{A}; \mathbf{y}] - [\hat{\mathbf{A}}; \hat{\mathbf{y}}] = \sigma_{m+1} u_{m+1} v_{m+1}^T. \quad (12)$$

因为 $[\hat{\xi}; -1]^T$ 是 $[\mathbf{A}; \mathbf{Y}]^T$ 的最小 σ_{m+1} 特征值

的特征向量,所以有:

$$[\mathbf{A}; \mathbf{Y}]^T [\mathbf{A}; \mathbf{Y}] \begin{bmatrix} \hat{\xi} \\ -1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{A}^T \mathbf{A} & \mathbf{A}^T \mathbf{Y} \\ \mathbf{Y}^T \mathbf{A} & \mathbf{Y}^T \mathbf{Y} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{\xi} \\ -1 \end{bmatrix} = \sigma_{m+1}^2 \begin{bmatrix} \hat{\xi} \\ -1 \end{bmatrix}. \quad (13)$$

由式(13)可得:

$$(\mathbf{A}^T \mathbf{A} - \sigma_{m+1}^2 \mathbf{I}) \hat{\xi} = \mathbf{A}^T \mathbf{Y}. \quad (14)$$

当 $\sigma_m > \sigma_{m+1}$, 且 $v_{m+1,m+1} \neq 0$ 时, $(\mathbf{A}^T \mathbf{A} - \sigma_{m+1}^2 \mathbf{I})$ 为

$$\text{正定矩阵,所以未知参数的整体最小二乘估计为:} \quad (15)$$

根据以上理论,对数据进行加权拟合,将其拟合结果与传统最小二乘法进行比较,结果如表 1 所示。

表 1 普通最小二乘法和加权整体最小二乘法结果比较

Tab.1 Comparison of results between ordinary least squares and weighted total least squares

	普通最小二乘法	斜率乘积	加权整体最小二乘法	斜率乘积
拟合方程	$Y_1 = 0.84629 X_1 - 412.3846$	-1.0124	$Y_1 = 0.84452 X_1 - 410.609$	-1.007
	$Y_2 = -1.19631 X_2 - 1311.9636$		$Y_2 = -1.19241 X_2 - 1309.251$	
	$Y_1 = 0.95368 X_1 - 421.5746$	-1.0251	$Y_1 = 0.95253 X_1 - 419.824$	-1.004
	$Y_2 = -1.07478 X_2 - 1210.8592$		$Y_2 = -1.05403 X_2 - 1208.513$	
	$Y_1 = 1.08964 X_1 - 434.9325$	-1.0092	$Y_1 = 1.08762 X_1 - 433.5624$	-1.001
	$Y_2 = -0.92618 X_2 - 1111.5966$		$Y_2 = -0.92036 X_2 - 1110.2560$	
	$Y_1 = 1.16851 X_1 - 444.5327$	-1.0965	$Y_1 = 1.13195 X_1 - 441.9871$	-1.009
	$Y_2 = -0.93837 X_2 - 1025.9562$		$Y_2 = -0.89138 X_2 - 1019.8422$	
	$Y_1 = 1.24638 X_1 - 452.9354$	-1.1012	$Y_1 = 1.20627 X_1 - 456.610$	-1.010
	$Y_2 = -0.88352 X_2 - 941.1368$		$Y_2 = -0.83729 X_2 - 943.401$	

精度评定采用斜率乘积方法。由于十字丝的两条直线理论上是绝对垂直的,斜率的乘积理论值为-1,斜率乘积的平均值为-1.006 2,精度达到 1% 以内,完全符合标定精度要求;而传统最小二乘法斜率之积均值为-1.048 8,误差非常大,不能应用于系统的计算。

4 测量实验与结果

4.1 偏移量求解偏转角

利用偏移量求解偏转角的方法如图 6 所示。图中虚十字丝线的中心点为挠曲测量的零

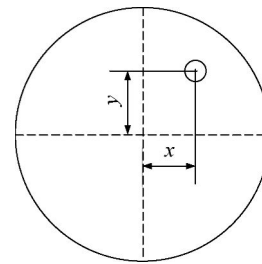


图 6 十字丝的偏移

Fig.6 Offset of cross wire

点,求出 x, y 以后,进一步计算出脱靶量 $(\Delta x, \Delta y)$,则两偏转角分别为^[1]:

$$\alpha = \frac{1}{2} \arctan(\Delta x / f) \approx \Delta x / 2f, \quad (16)$$

$$\beta = \frac{1}{2} \arctan(\Delta y / f) \approx \Delta y / 2f. \quad (17)$$

式中: f 为测量系统的焦距, α 和 β 分别为绕曲角的艏绕角和纵绕角。

4.2 算法误差

相机的分辨率为 $1\,936 \times 1\,088$, 主点坐标为 $(964.53, 547.69)$, 脱靶量 $\Delta x = x - 964.53$; $\Delta y = y - 547.69$ 。

把上述两数据带入公式(16),(17),可以计算出物体的变形角度。

在实验中通过徕卡高精度经纬仪进行系统验证,如图 7 所示,其结果如表 2 所示。



图 7 系统实物图

Fig. 7 Physical map of system

参考文献:

- [1] 李向荣. 基于莫尔条纹法的扭转测量技术研究[D]. 北京:中国科学院,2006.
LI X R. *The research on roll measurement based on Moiré fringe*[D]. Beijing: Graduate University of the Chinese Academy of Sciences, 2006. (in Chinese)
- [2] 孙辉,郎小龙,李志强,等. 动载体光电平台视轴稳定精度的检测[J]. 光学精密工程,2011,19(9): 2131-2137.
SUN H, LANG X L, LI ZH Q, *et al.*. Measurement for LOS stabilization accuracy of electro-optical imaging system on moving carrier[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011,19(9): 2131-2137. (in Chinese)
- [3] 秦富林. 基于光栅成像船体三维变形测量技术研究[D]. 北京:中国科学院,2010.

表 2 实验结果

Tab. 2 Experimental results (")

徕卡 α	测角 α	误差 α	徕卡 β	测角 β	误差 β
100	98.3	1.7	100	98.1	1.9
200	196.9	3.1	200	203.5	-3.5
300	304.1	-4.1	300	304.8	-4.8
-100	-103.2	3.2	-100	-103.7	3.7
-200	-203.4	3.4	-200	-196.4	-3.6
-300	-296.1	-3.9	-300	-302.7	2.7

将上表数据进行计算,得出 α 的标准差为 $3.59''$; β 的为 $3.76''$ 。

系统的精度要求为: α 为 $5''$, β 为 $5''$, 实验结果完全满足系统的指标要求。

5 结 论

本文为了满足三维变形高精度测量角度的要求,采用自准直法测量绕曲角,结合传统的最小二乘法和加权整体最小二乘法进行图像处理,从而获取高精度的拟合直线,保证整个系统的计算精度。通过实验实际测得首绕角 α 的精度为 $3.59''$, 纵绕角 β 的精度为 $3.76''$, 完全满足了三维变形绕曲角测量精度的要求。

QIN F L. *Research on hull's three-dimension angle measurement based on grating imaging* [D]. Beijing: Graduate University of the Chinese Academy of Sciences, 2010. (in Chinese)

- [4] 张春森,胡平波. 基于 CAD 技术实现工业零部件图像直线特征提取[J]. 光学精密工程,2011,19(9): 2214-2221.

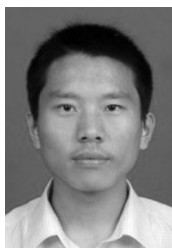
ZHANG CH S, HU P B. Line extraction from images of industrial components based on CAD [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011,19(9): 2214-2221. (in Chinese)

- [5] 刘锦,杨顺,余焕明. Sobel 算法在车牌识别系统中的改进与实现[J]. 计算机系统应用,2010,19(5): 209-211.

LIU J, YANG SH, YU H M. Improvement and realization of sobel algorithm in license plate recognition system [J]. *Computer System Applications*,

- 2010,19(5):209-211. (in Chinese)
- [6] 潘明华,文香稳,朱国力. 俯仰角组合测量系统的设计[J]. 光学精密工程,2011,19(3):599-604.
PAN M H, WEN X W, ZHU G L. Design of combination measurement system for pitching angles[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(3): 599-604. (in Chinese)
- [7] 佟刚,王芳. 车载平台变形对测角误差的影响分析与修正[J]. 光学精密工程,2011,19(4):775-782.
TONG G, WANG F. Analysis and correction for influence of vehicle platform deformation on measuring errors[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(4): 775-782. (in Chinese)
- [8] 丁克良,沈云中,殴吉坤. 整体最小二乘法直线拟合[J]. 辽宁工程技术大学学报(自然科学版),2010,29(2):44-47.
DING K L, SHEN Y ZH, OU J K. Methods of line-fitting based on total least-squares[J]. *Journal of Liaoning Technical University (Natural Science)*, 2010, 29(2):44-47. (in Chinese)
- [9] 李红伟,魏少春,陈安平,等. 总体最小二乘法在直线拟合中的应用[J]. 地矿测绘,2010,26(2):4-5.
LI H W, WEI SH CH, CHEN A P, et al.. Application of total least squares in straight line fitting[J]. *Surveying and Mapping of Geology and Mineral Resources*, 2010, 26(2):4-5. (in Chinese)
- [10] 刘万里,欧阳健飞,曲兴华. 入射角度变化对角锥棱镜测量精度的影响[J]. 光学精密工程,2009,17(2):286-291.
LIU W L, OUYANG J F, QU X H. Effect of incident angle varying on cube corner retro-reflector measurement accuracy[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2009, 17(2):286-291. (in Chinese)
- [11] 赵小川,罗庆生,陈少波. 改进型图像中的直线快速检测[J]. 光学精密工程,2010,18(7):1654-1660.
ZHAO X CH, LUO Q SH, CHEN SH B. Improved fast line detection method in images[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(7):1654-1660. (in Chinese)

作者简介:



乔培玉(1984—),男,山东菏泽人,博士研究生,2007年于东北师范大学获学士学位,主要从事光电测量及图像处理等方面的研究。E-mail: qiaopy033@yahoo.com.cn



魏仲慧(1961—),女,吉林长春人,研究员,博士生导师,主要从事图像处理、图像存储等方面的研究。E-mail: wzhlyp@sohu.com

导师简介:



何昕(1966—),男,吉林长春人,研究员,博士生导师,主要从事图像处理、光电测量等方面的研究。E-mail: hexin6627@sohu.com

(本栏目编辑:曹金)