

改进型 LOG 算子在偏振片绝对角度中的应用

陈银平¹, 涂碧海¹, 张毅², 陈立刚¹, 洪津¹

- (1. 中国科学院合肥物质研究院安徽光机所, 安徽合肥 230031;
2. 中国科学院合肥物质研究院智能研究所, 安徽合肥 230031)

摘要:光学成像系统自身通常都具有一定的偏振效应,严重影响仪器偏振测量精度,而提高仪器中偏振片绝对角度精度能提高偏振定标精度,对校正光学系统自身的偏振特性具有重要的意义。对偏振片直线透光轴 Raw 图像高精度边缘定位和直线检测是偏振片绝对角度计算的关键步骤。针对传统 LOG 算子各向同性及虚假边缘与边缘定位精度相矛盾的缺陷,提出改进型一阶导阈值旋转式椭圆对称 LOG 算子。该算子不仅保留了经典 LOG 算子的优点,还具有对不同角度的边缘更加有效地进行检测,在保持边缘定位精度下,减少虚假边缘的特点。在处理得到的边缘二值图像上,进行直线检测求出偏振片绝对角度,通过对比分析最小二乘法线性拟合和霍夫变换的直线检测效果,得出霍夫变换能精确计算出偏振片绝对角度。实验证明改进型 LOG 算子与霍夫变换相结合提高了偏振片绝对角度测量精度,对偏振定标精度具有很大的提高。

关键词:偏振定标;绝对角度;高斯拉普拉斯算子;椭圆对称;一阶导阈值;霍夫变换

中图分类号:TP39

文献标识码:A

文章编号:1673-629X(2014)05-0164-04

doi:10.3969/j.issn.1673-629X.2014.05.040

Application of Improved LOG Operator in Absolute Angle of Polarizer

CHEN Yin-ping¹, TU Bi-hai¹, ZHANG Yi², CHEN Li-gang¹, HONG Jin¹

- (1. Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China;
2. Institute of Intelligent Machines, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China)

Abstract: Optical imaging system itself generally exhibits inevitable polarization effects that seriously affect the instrument's polarization measurement accuracy. To improve accuracy of the instrument's absolute angle of polarizer can improve accuracy of polarization calibration and it has a significance to correct optical polarization characteristics of the system. Precision edge location and line detection of raw image of polarizer's linear transmission axis are the key steps in computing the absolute angle of polarizer. For traditional LOG operator, it has defects of isotropic and false edge which is in contradiction with the accuracy of edge positioning. In order to solve these defects, propose an improved LOG operator called as the threshold of first derivative rotary elliptical symmetry LOG operator. The operator not only retains the advantages of classical LOG operator, but also has the advantage to detect edges of different angles more efficiently and reduce the quantity of false edges with maintaining the accuracy of edge's positioning. Line detection operation is taken on the binary image after edge detection to computing absolute angle of polarizer. By analyzing and comparing results of line detection of least-squares linear fitting and Hough transform, it is known that Hough transform can accurately calculate the absolute angle of polarizer. Experiments show that improved LOG operator combined with Hough transform can enhance the accuracy of absolute angle of polarizer and the calibration accuracy of polarization.

Key words: polarization calibration; absolute angle; Laplacian of Gaussian; elliptical symmetry; threshold of first derivative; Hough transform

0 引言

气溶胶对气候有着不可忽视的影响,偏振遥感作

为一项新技术将在气溶胶探测中发挥重要作用,偏振成像仪的研制已成为世界热点研究内容。在国内,中

收稿日期:2013-07-04

修回日期:2013-10-16

网络出版时间:2014-02-11

基金项目:国家自然科学基金资助项目(41201368)

作者简介:陈银平(1989-),女,硕士研究生,研究方向为图像处理、模式识别等;洪津,正研究员,研究方向为光学偏振技术、对地遥感技术。

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1450.TP.20140211.1717.060.html>

国科学院安光所对多角度偏振成像仪(简称 DPC)进行了设计并研制成功,不久也将装载在卫星上在轨运行。DPC(Direction Polarized Camera)相机的最主要任务是通过偏振和强度信息探测气溶胶^[1]。其最大的特点是采用宽视场光学系统进行高精度偏振测量。但光学成像系统自身通常都具有一定的偏振效应,并且偏振效应会随着视场角的增大而更加明显,严重影响仪器偏振测量精度及宽视场偏振成像技术的发展。对偏振通道来说,参数 $p_i^{k,a}(\theta, \varphi)$ 是关于 DPC 相机内偏振片绝对角度的函数^[2],提高偏振片绝对角度精度能提高偏振定标精度,研究如何精确获取偏振片绝对角度对校正光学系统自身的偏振特性具有重要的意义。

偏振片绝对角度就是偏振片直线透光轴方向和 CCD 的 X 坐标轴的夹角,由于工艺原因,偏振片透光轴与 CCD 的 X 坐标轴的夹角事先测量不出来。只能利用图像处理技术来测量偏振片绝对角度,对偏振片直线透光轴 RAW 图像进行边缘检测和直线检测求出偏振片绝对角度,如何高精度定位边缘和直线检测成为研究的重点。

文中通过分析传统 LOG 算子^[3-5]各向同性及虚假边缘与边缘定位精度相矛盾的缺陷,提出改进型一阶导阈值旋转式椭圆对称 LOG 算子来进行边缘检测。通过对比分析最小二乘法线性拟合和霍夫变换两种方法进行直线检测,得出改进型 LOG 算法和霍夫变换相结合能精确计算出偏振片绝对角度。

1 偏振片绝对角度测量原理

1.1 RAW 图像的获取

如图 1 所示,是一个辅助偏振片,刻度 A 和 B 的连线是辅助偏振片的透光轴。将某种条形刚性物质的直边沿着 AB 轴无缝贴合。刚性物质在受力情况下具有不易形变的特点,保证条形物质边缘的直线性。用积分球发射无偏振的光,然后利用辅助偏振片与 DPC 相机偏振片的正交消光的原理,调节辅助偏振片与 DPC 相机偏振片(0° 放置偏振片)的透光轴平行,此时,辅助偏振片绝对角度等于 DPC 相机内偏振片绝对角度。最后在 DPC 相机产生辅助偏振片透光轴 RAW 图像,实验过程如图 2 所示。

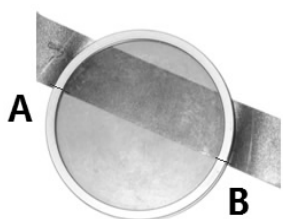


图 1 辅助偏振片

(黑色刻度 A,B 的连线是偏振片的透光轴)

1.2 偏振片绝对角度的计算

如图 3 所示,原点(0,0)是 CCD 芯片的原点, X 坐标轴和 Y 坐标轴分别代表 CCD 芯片的 X, Y 坐标轴。图中光斑中间条形黑色区域是条形刚性物质遮挡辅助偏振片所造成的,直线 AB 表示的就是偏振片的透光轴,图中 θ 角度就是偏振片的绝对角度。DPC 相机中存在三个偏振片,绝对角度都需要测量出来。

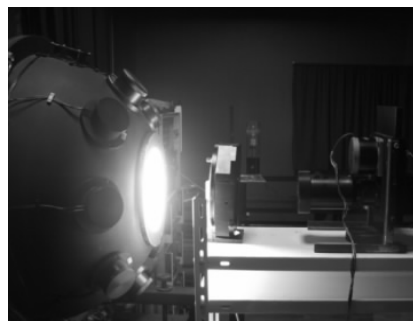


图 2 DPC 相机获取处理图像

(左边为积分球,中间为辅助偏振片,右边为 DPC 相机)

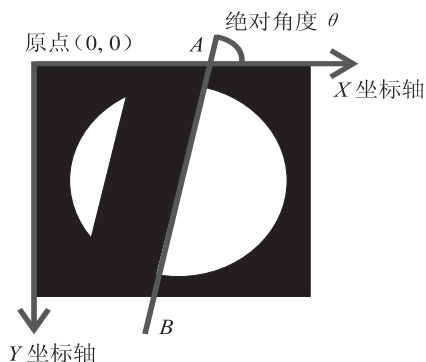


图 3 求偏振片绝对角度的基本原理

2 改进型一阶导阈值旋转式椭圆对称 LOG 算子

传统 LOG 算子是由 Marr 和 Hildredth 依据人类视觉特点提出的一种新的边缘检测方法^[6]。用 LOG 算子对图像进行卷积运算,提取图像的边缘工作就变成求卷积运算结果的零穿点工作^[7-8]。

在实际应用 LOG 算子中,存在以下两个问题。

①LOG 算子各向同性,LOG 算子是关于圆对称的, σ 的取值对 x, y 的影响都是一样的,也就是它在各个方向的边缘检测尺度都是一样的,但边缘发生在各个角度,对不同角度的边缘应采用不同尺度进行检测,这样检测效果才好。

②LOG 算子的噪声平滑能力与边缘定位相矛盾。小 σ 值能提高边缘定位精度,但这将导致高斯模板变小,平滑能力下降,图像将出现大量的虚假边缘。大 σ 值使高斯模板变大,能有效抑制噪声,但使图像变得更加模糊,直接影响边缘定位的精度。如何在保持边缘

定位精度下噪声的抑制,减少虚假边缘的数量,成为要研究的内容。

为解决上述两个缺陷,文中提出改进型一阶导阈值旋转式椭圆对称 LOG 算子。

为了解决传统 LOG 算子各向同性的缺陷,即在 x, y 方向上取相同的 σ 值,在水平方向和垂直方向的尺度相同,提出在 x, y 方向上取不同的高斯空间系数 σ_x, σ_y 值,即在水平方向和垂直方向采取不同的尺度,则具有不同尺度的二维高斯函数 $G(x, y, \sigma_x, \sigma_y)$ 为:

$$G(x, y, \sigma_x, \sigma_y) = \frac{1}{2\pi \left(\frac{\sigma_x + \sigma_y}{2}\right)^2} \exp\left(-\frac{x^2}{2\sigma_x^2} - \frac{y^2}{2\sigma_y^2}\right) \quad (1)$$

原来的高斯函数 $G(x, y, \sigma)$ 是关于圆对称的函数,新的高斯函数 $G(x, y, \sigma_x, \sigma_y)$ 是关于椭圆对称的函数。若 $\sigma_x > \sigma_y$ 时,椭圆的长轴落在 x 轴上,短轴落在 y 轴上。若 $\sigma_x < \sigma_y$ 时,椭圆的长轴落在 y 轴上,短轴落在 x 轴上。当 $\sigma_x = \sigma_y$ 时,椭圆对称高斯函数又转变成圆对称高斯函数。

若将椭圆以坐标原点为中心向逆时针方向旋转 α 角度,则旋转后的倾斜椭圆方程为:

$$\frac{(x \cos \alpha + y \sin \alpha)^2}{a^2} + \frac{(y \cos \alpha - x \sin \alpha)^2}{b^2} = 1 \quad (2)$$

将角度信息带入式(1)中,得到旋转式椭圆对称二维高斯函数 $G(x, y, \sigma_x, \sigma_y, \alpha)$ 为:

$$G(x, y, \sigma_x, \sigma_y, \alpha) = \frac{1}{2\pi \left(\frac{\sigma_x + \sigma_y}{2}\right)^2} \exp\left(-\frac{(x \cos \alpha + y \sin \alpha)^2}{2\sigma_x^2} - \frac{(y \cos \alpha - x \sin \alpha)^2}{2\sigma_y^2}\right) \quad (3)$$

将式(3)进行拉普拉斯求导,得旋转式椭圆对称 LOG 算子 $\nabla^2 G(x, y, \sigma_x, \sigma_y, \alpha)$ 为:

$$\begin{aligned} \nabla^2 G(x, y, \sigma_x, \sigma_y, \alpha) = & \frac{1}{2\pi \left(\frac{\sigma_x + \sigma_y}{2}\right)^2} \left[\left(\frac{(x \cos \alpha + y \sin \alpha)^2}{\sigma_x^2} + \right. \right. \\ & \left. \left(\frac{(y \cos \alpha - x \sin \alpha)^2}{\sigma_y^2} \right) - \frac{1}{\sigma_x^2} - \frac{1}{\sigma_y^2} \right] \exp\left[-\frac{(x \cos \alpha + y \sin \alpha)^2}{2\sigma_x^2} - \frac{(y \cos \alpha - x \sin \alpha)^2}{2\sigma_y^2} \right] \end{aligned} \quad (4)$$

新 LOG 算子变成关于 x 轴成 α 角度的直线对称椭圆墨西哥帽,椭圆长轴落在与 x 轴成 α 角度的直线上。将图像与式(4)生成的模板进行卷积运算,当 α 取不同的角度时,即对不同角度的边缘进行检测,同时当 $\sigma_x > \sigma_y$ 时,算子在相应 α 角度方向的平滑程度比

在 α 角度垂直方向的平滑程度大,因此算子能更好检测 α 角度方向的边缘。如果 $\sigma_x < \sigma_y$,算子在相应 α 角度方向的平滑程度比在 α 角度垂直方向的平滑程度小,因此算子能更好检测与 α 角度方向垂直的边缘。当 $\alpha = 0, \sigma_x = \sigma_y$ 时,该算子蜕化成经典 LOG 算子,成为新 LOG 算子的一个特殊情况。

由于 LOG 算子对边缘检测存在 2σ 的几何偏移^[9],说明 σ 值越小,边缘的几何偏移就越小,边缘的定位精度就越高。但小 σ 会使高斯模板变小,平滑能力下降,图像将出现大量的虚假边缘。LOG 算子进行边缘检测出现虚假边缘的原因是,LOG 算子本质上是二阶微分算子,利用二阶导数零穿来检测边缘,图像中微小的灰度值变化也会被当成虚假边缘检测出来。为了排除图中所有微小灰度变化,使其具有良好的噪声抑制效果,提出用一阶导数极大值设置阈值减少虚假边缘的数量。

改进型一阶导阈值旋转式椭圆对称 LOG 算子不仅保留了经典 LOG 算子的优点,同时具有变尺度,变方向性,保持边缘定位精度的同时减少了虚假边缘的数量。

3 霍夫变换和最小二乘法拟合

经过改进型 LOG 算子边缘检测处理后的 RAW 图像,将它转变为二值图像进行直线检测,从而求偏振片绝对角度。

3.1 最小二乘法拟合

人工选定偏振片透光轴所在边缘上的点,即边缘 AB 上的点,像素点将用坐标值定位。设集合 $Q = \{(x_i, y_i) | (x_i, y_i) \in \text{直线}\}$,对于二值图像 $f(x_i, y_i) = 255$,即边缘上的像素灰度值为 255。设直线的拟合公式为 $y = b_1 x + b_0$,通过公式(5)和公式(6)可以计算出 b_1, b_0 。

$$b_1 = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x}) y_i}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (5)$$

$$b_0 = \bar{y} - b_1 \bar{x} \quad (6)$$

$$\text{其中, } \bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}, \bar{y} = \frac{\sum_{i=1}^n y_i}{n}, (x_i, y_i) \in Q, n \text{ 是集合 } Q$$

元素的总个数。

由于 CCD 芯片的坐标系是水平向右为 X 正轴,垂直向下为 Y 正轴,而线性拟合中的坐标系与 CCD 芯片坐标系相反,它是水平向右为 Y 正轴,垂直向下为 X 正轴。所以在线性拟合坐标系中,偏振片的绝对角度是直线与 Y 轴所夹的角度。绝对角度 θ 为:

$$\theta = \begin{cases} \frac{\pi}{2} + \arctan(b_1) & (b_1 < 0) \\ \arctan(b_1) - \frac{\pi}{2} & (b_1 > 0) \end{cases} \quad (7)$$

3.2 霍夫变换

霍夫(Hough)变换常常运用于图像的直线、圆、椭圆等几何特征提取^[10-11]。在极坐标系中,直线表示为式(8)的形式^[12],即

$$x\cos\theta + y\sin\theta = \rho \quad (8)$$

极坐标中的 Hough 变换将图像坐标空间中的点变换到参数 ρ, θ 空间中,图像坐标空间中共线的点变换到参数空间中后,在参数空间都相交于同一点。将二维累加器中 $[\theta_{\min}, \theta_{\max}]$ 和 $[\rho_{\min}, \rho_{\max}]$ 分别以 $\Delta\theta$ 和 $\Delta\rho$ 为步长进行划分。对图像中每个点,依据式(8)对参数空间中所有可能的 θ 值,计算出相应的 ρ 值,并在二维参数累加器对应的 (ρ, θ) 对中进行累加。累加器中值大于阈值的 (ρ, θ) 对将对应图像中所检测的直线,其中累加器值最大的 (ρ, θ) 对表示偏振片透光轴所在直线, θ 即为所求的偏振片绝对角度。

4 实验结果和分析

设置 $\alpha, \sigma_x, \sigma_y$ 的值代入式(4)中,生成对应的模板,对图 4(a)进行卷积运算提取边缘,并根据经验设置一阶导阈值减少虚假边缘。为提高边缘定位的精度, σ_x, σ_y 应取较小的值。从图 4(b)~(e)可知,当 $\sigma_x < \sigma_y, \alpha$ 取 $0, \pi/4, \pi/2, 3\pi/4$ 时,新 LOG 算子能更

好检测出与 α 垂直的边缘。将四个方向的边缘合成图 4(a)的全方位边缘图,如图 4(f)所示。

各偏振片透光轴 RAW 图像运用新 LOG 算子边缘检测二值化图上运用 Hough 变换进行直线检测如图 5 所示,累加器 $\Delta\theta = 0.01$ 。从三幅图可知,Hough 变换检测出的直线并没有与边缘检测出的透光轴边缘完全重叠,在透光轴的上方有小许的偏差,而透光轴的边缘理应是直线。利用最小二乘法线性拟合进行偏振片绝对角度的计算,不仅存在拟合误差,还存在因把不在直线上的点也进行拟合而造成的进一步误差。运用 Hough 变换来计算偏振片的绝对角度可避免最小二乘法线性拟合计算偏振片绝对角度而引起的两类误差,从而提高偏振片绝对角度的精度。

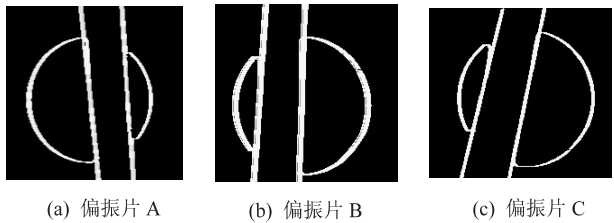


图5 Hough 变换直线检测

三个偏振片,用不同的边缘检测法分别结合最小二乘法拟合和 Hough 变换计算偏振片绝对角度,结果如表 1 所示。从表中可知,霍夫变换可以消除最小二乘法拟合求出的角度误差 1.17° 。新 LOG 算子边缘检测结合最小二乘法拟合和 Hough 变换计算的偏振片绝对角度的差值相对较小,这也侧面反映出新 LOG 算子边缘检测对边缘的定位精度高,所以造成的差值小。

表1 偏振片绝对角度

	偏振片 A			偏振片 B			偏振片 C		
	最小二乘法拟合	霍夫	差值	最小二乘法拟合	霍夫	差值	最小二乘法拟合	霍夫	差值
sobel	-84.86	-85.68	0.82	88.51	89.68	-1.17	78.57	78.37	0.2
roberts	-85.28	-85.12	-0.16	88.42	89.14	-0.72	78.48	78.40	0.08
prewitt	-84.91	-84.96	0.05	88.56	89.59	-1.03	78.56	78.34	0.22
新 LOG	-85.21	-85.14	-0.07	88.78	89.68	-0.9	78.45	78.38	0.07

5 结束语

文中提出改进型一阶导阈值旋转式椭圆对称 LOG 算子,对偏振片透光轴 RAW 图像进行边缘检测和直线提取。新 LOG 算子不仅保留了经典 LOG 算子的优点,同时具有变尺度,变方向性,保持边缘定位精度的同时减少了虚假边缘的数量,再结合霍夫变换精确计算出偏振片绝对角度。新 LOG 算子中的高斯空间系数和一阶导阈值是人工随机确定的,不具有自适应性。为精确计算出偏振片绝对角度,霍夫变换累加

(下转第 172 页)

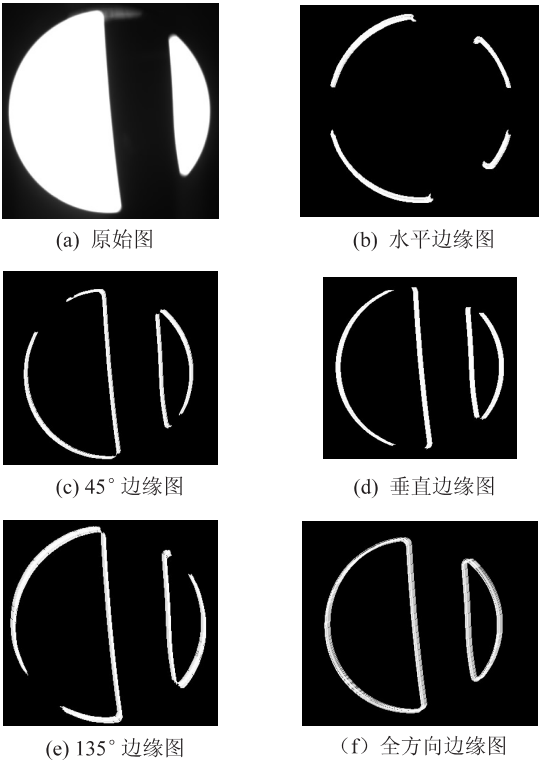


图4 偏振片边缘检测效果图

台能够将 EJB 会话 Bean(业务流程组件)和实体 Bean(数据组件)通过 JAX-RPC (Java API for XML-based RPC, 基于 XML 的 RPC 的 Java API)提供的 Web 服务接口利用工具生成 WSDL 文件, 将其封装为服务组件^[14]。目前可进行封装的工具具有 Eclipse+Axis, visual Studio.net 等。

3 结束语

文中重构了煤炭销售运输调度业务流程并建立了以降低运输成本为目标的运输调度数学模型。在优化后的业务流程基础上研究了煤炭销售运输调度信息系统集成方案。虽然文中是在现实背景下抽象出问题, 并进行了详细分析与研究, 且给出了研究结果, 但是还缺乏在实践中更进一步的检验。

参考文献:

- [1] Hajiaghaei-Keshteli M, Molla-Alizadeh-Zavardehi S, Tavakkoli-Moghaddam R. Addressing a nonlinear fixed-charge transportation problem using a spanning tree-based genetic algorithm[J]. Computers & Industrial Engineering, 2010, 59(2):259-271.
- [2] Lau H C W, Chan T M, Tsui W T, et al. A fuzzy guided multi-objective evolutionary algorithm model for solving transportation problem[J]. Expert Systems with Applications, 2009, 36(4):8255-8268.

(上接第 167 页)

器 $\Delta\theta, \Delta\rho$ 要足够小, 增加霍夫变换的计算量和计算机内存存储空间。提高偏振片绝对角度精度能提高偏振定标精度, 两者量化关系不明确。这些问题有待以后进行研究。

参考文献:

- [1] 顾行发, 陈兴峰, 程天海, 等. 多角度偏振遥感相机 DPC 在轨偏振定标[J]. 物理学报, 2011, 60(7):165-172.
- [2] 陈立刚. 宽视场航空偏振成像仪的实验室定标研究[D]. 合肥: 中国科学院合肥物质科学研究院, 2008.
- [3] Xu Zhixiang, Xia Qiang, Chen Jianfeng. The performances of the Laplacian of binomial distribution and the discrete Laplacian of Gaussian edge detection operators[C]//Proc of IEEE international conference on system, man and cybernetics. Vancouver; IEEE, 1995:673-678.
- [4] Pei Liang, Xie Zhiwei, Dai Jiguang. Joint edge detector based on Laplacian pyramid[C]//Proc of 3rd international congress on image and signal processing. [s. l.]: [s. n.], 2010:978-982.
- [5] Huertas A, Medioni G. Detection of intensity changes with subpixel accuracy using Laplacian-Gaussian masks[J]. IEEE

- [3] 任中明. 运输调度问题的智能求解机制研究[D]. 广州: 广东工业大学, 2011.
- [4] 周先东, 杨大地, 马 翠. 求解运输问题的 GAPS0 算法[J]. 计算机仿真, 2008, 25(2):286-289.
- [5] 邵泽军. 几类车辆调度问题的研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2009.
- [6] 白国仲, 毛经中. C 运输问题[J]. 数学的实践与认识, 2004, 34(7):91-96.
- [7] 韩伟一, 张庆普. 有整数限制的运输问题[J]. 运筹与管理, 2008, 17(4):12-15.
- [8] 郭 强, 陈新庄. 平衡和不平衡运输问题与分配问题的通用迭代算法[J]. 运筹与管理, 2007, 16(6):57-62.
- [9] 谢凡荣. 运输网络中求最小费用最大流的一个算法[J]. 运筹与管理, 2000, 9(4):33-38.
- [10] 谢凡荣. 求解运输问题的一个算法[J]. 运筹与管理, 2002, 11(3):69-73.
- [11] 王卫星, 王晨光. 基于 SOA 的企业信息系统集成框架[J]. 计算机工程, 2010, 36(18):29-31.
- [12] 马 俊, 丁晓明. 基于 SOA 的异构系统集成研究[J]. 计算机工程与设计, 2008, 29(14):3638-3641.
- [13] Scholl H J, Kubicek H, Cimander R, et al. Process integration, information sharing, and system interoperation in government: a comparative case analysis [J]. Government Information Quarterly, 2012, 29(3):313-323.
- [14] Wu Yingpei, Shu Tingting. Research on information system integration in colleges based on SOA[J]. Procedia Engineering, 2011, 24:345-349.

Trans on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1986, PAMI-8(5):651-664.

- [6] Marr D, Hildreth E C. Theory of edge detection[J]. Proceedings of the Royal Society of London, 1980, 207(1167):187-217.
- [7] Zhang Mengmeng, Li Xia, Yang Zhihui. A novel zero-crossing edge detection method based on multi-scale space theory [C]//Proc of ICSP. Beijing; IEEE, 2010:1036-1039.
- [8] Haralick R M. Digital step edges from zero crossings of second directional derivatives [J]. IEEE Trans on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1984, PAMI-6(1):58-68.
- [9] 杨振亚, 王 勇, 王成道. LOG 算子边缘检测方法的改进方案[J]. 计算机应用与软件, 2004, 21(9):87-89.
- [10] 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.
- [11] Dai Bo, Pan Ye, Liu Hui, et al. An improved RHT algorithm to detect line segments[C]//Proc of international conference on image analysis and signal processing. Zhejiang: [s. n.], 2010:407-410.
- [12] Nguyen T T, Pham X D, Jeon J W. An improvement of the standard Hough transform to detect line segments[C]//Proc of ICIT. Chengdu; IEEE, 2008:1-6.

改进型LOG算子在偏振片绝对角度中的应用

作者:

[陈银平](#), [涂碧海](#), [张毅](#), [陈立刚](#), [洪津](#), [CHEN Yin-ping](#), [TU Bi-hai](#), [ZHANG Yi](#), [CHEN Li-gang](#), [HONG Jin](#)

作者单位:

[陈银平, 涂碧海, 陈立刚, 洪津, CHEN Yin-ping, TU Bi-hai, CHEN Li-gang, HONG Jin\(中国科学院 合肥物质研究院安徽光机所, 安徽 合肥, 230031\)](#), [张毅, ZHANG Yi\(中国科学院 合肥物质研究院智能研究所, 安徽 合肥, 230031\)](#)

刊名:

[计算机技术与发展](#) 

英文刊名:

[Computer Technology and Development](#)

年, 卷(期):

2014(5)

本文链接: http://d.wanfangdata.com.cn/Periodical_wjfz201405040.aspx