



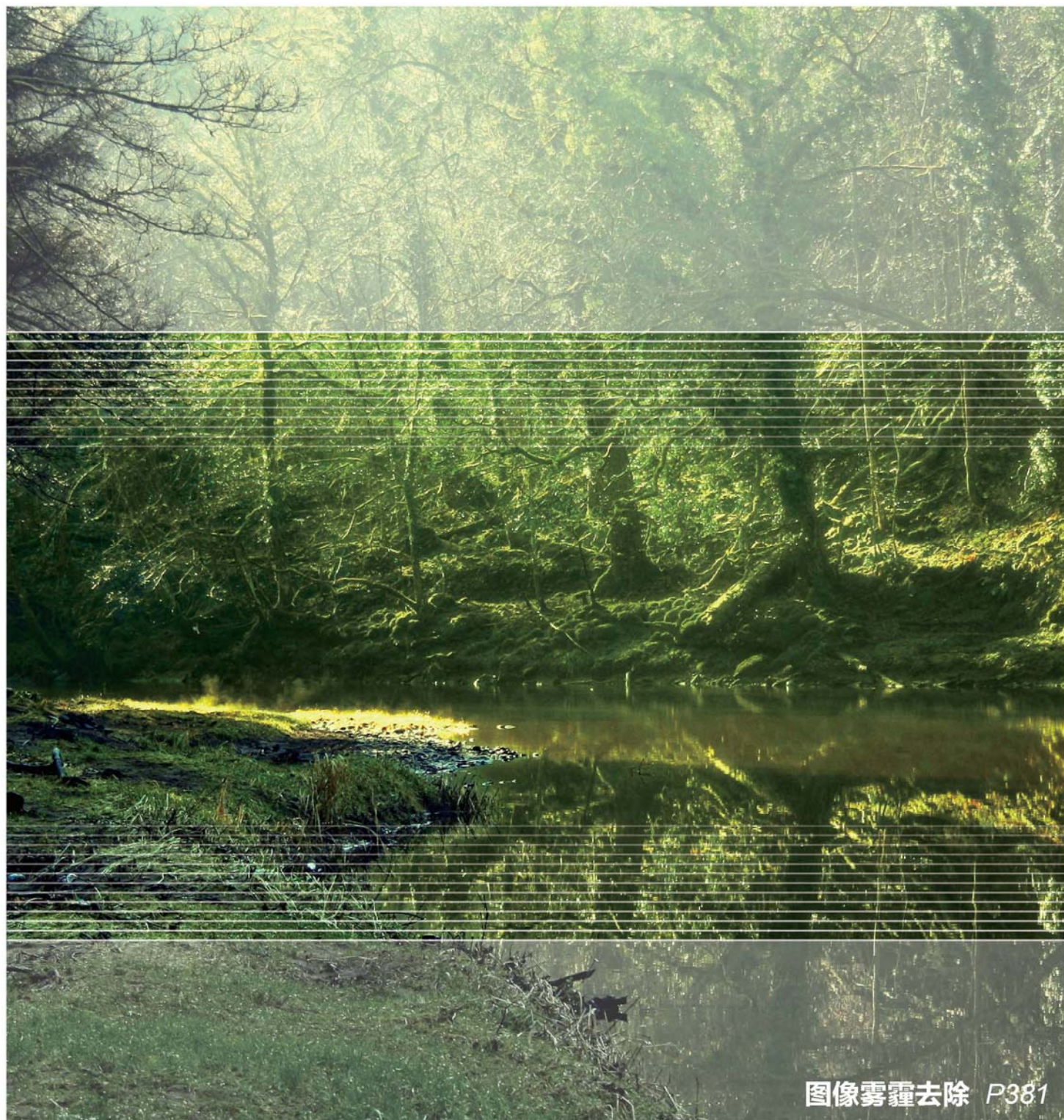
JOURNAL OF IMAGE AND GRAPHICS

主办: 中国科学院遥感与数字地球研究所
中国图象图形学学会
北京应用物理与计算数学研究所

中国图象学报 中国图形学报

2014
03
VOL.19

ISSN1006-8961
CN11-3758/TB



图像雾霾去除 P381



第19卷第3期（总第215期）

2014年3月16日

中国精品科技期刊
中国国际影响力优秀学术期刊
中国科技核心期刊

版权声明

凡向《中国图象图形学报》投稿，均视为同意在本刊网站及CNKI等全文数据库出版，所刊载论文已获得著作权人的授权。本刊所有图片均为非商业目的使用，所有内容，未经许可，不得转载或以其他方式使用。

Copyright

All rights reserved by Journal of Image and Graphics, Institute of Remote Sensing and Digital Earth, CAS. The content (including but not limited text, photo, etc) published in this journal is for non-commercial use.

主管单位 中国科学院

主办单位 中国科学院遥感与数字地球研究所
中国图象图形学学会
北京应用物理与计算数学研究所

主 编 李小文

编辑出版《中国图象图形学报》编辑出版委员会

邮政信箱 北京9718信箱

邮 编 100101

电子信箱 jig@irsa.ac.cn

电 话 010-64807995

网 址 www.cjig.cn

广告经营许可证 京朝工商广字第0361号

总 发 行 北京报刊发行局

订 购 全国各地邮局

海外发行 中国国际图书贸易集团有限公司
(邮政信箱：北京399信箱 邮编：100048)

印刷装订 北京科信印刷有限公司

Journal of Image and Graphics

Title inscription: Song Jian

Monthly, Started in 1996

Superintended by Chinese Academy of Sciences

Sponsored by Institute of Remote Sensing and Digital Earth, CAS
China Society of Image and Graphics

Institute of Applied Physics and Computational Mathematics

Editor-in-Chief LI Xiaowen

Editor, Publisher Editorial and Publishing Board of Journal of
Image and Graphics

P.O.Box 9718, Beijing, P.R.China

Zip code 100101

E-mail jig@irsa.ac.cn

Telephone 010-64807995

Website www.cjig.cn

Distributed by Beijing Bureau for Distribution of Newspapers and Journals

Domestic All Local Post Offices in China

Overseas China International Book Trading Corporation
(P.O.Box 399, Beijing 100048, P.R.China))

Printed by Beijing Kexin Printing Co., Ltd.

CN 11-3758/TB

ISSN 1006-8961

CODEN ZTTXFZ

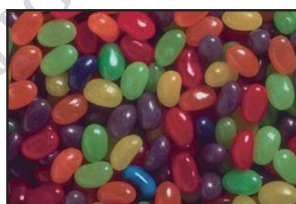
国外发行代号 M1406

国内邮发代号 82-831

国内定价 50.00元



控制关键帧选择的H.264熵编码加密算法(第358页)



显著性检测指导的高光区域修复(第393页)



由灭点进行径向畸变的自动校正(第407页)

综述

图像场景分类中视觉词包模型方法综述

赵理君, 唐娉, 霍连志, 郑柯 0333

面向对象的高分辨率SAR图像处理及应用

张红, 叶曦, 王超, 张波, 吴樊, 汤益先 0344

图像处理和编码

控制关键帧选择的H.264熵编码加密算法

张小红, 袁春经 0358

小波域视觉密码零水印算法

曲长波, 杨晓陶, 袁铎宁 0365

双重轮廓演化曲线的图像分割水平集模型

王相海, 李明 0373

暗原色先验单幅图像去雾改进算法

孙小明, 孙俊喜, 赵立荣, 曹永刚 0381

基于双边滤波的图像去雾

王一帆, 尹传历, 黄义明, 王洪玉 0386

显著性检测指导的高光区域修复

王祎璠, 姜志国, 史骏, 张浩鹏 0393

应用DCT块标准差的自适应隐写算法

凌轶华, 蔡晓霞, 陈红 0401

由灭点进行径向畸变的自动校正

刘丹, 刘学军, 王美珍 0407

图像分析和识别

黎曼流形上的保局投影在图像集匹配中的应用

曾青松 0414

结合全局和局部信息的“两阶段”活动轮廓模型

戚世乐, 王美清 0421

图像理解和计算机视觉

基于超像素的点追踪方法

罗会兰, 钟睿, 孔繁胜 0428

遥感图像处理

结合相位一致与全变差模型的高分辨率遥感图像边缘检测

黄秋燕, 肖鹏峰, 冯学智, 王珂 0439

第9届和谐人机环境联合学术会议专栏

人眼视觉感知特性的非下采样Contourlet变换域多聚焦图像融合

杨勇, 郑文娟, 黄淑英, 方志军, 袁非牛 0447

面向手绘军标图形的旋转自由识别方法

吴玲达, 张友根, 邓维, 宋汉辰 0456

基于深度相机的手腕识别与掌心估测

姚争为, 潘志庚, 滕国栋 0463

多信息融合的快速车牌定位

王永杰, 裴明涛, 贾云得 0471

H.264/AVC中基于决策树的P帧快速模式选择

王萍, 张晓丹, 张磊 0476

互信息域中的无参考图像质量评价

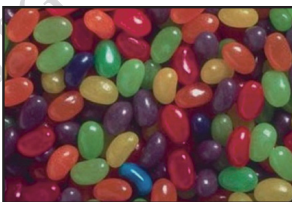
董宏平, 刘利雄 0484

CONTENTS

JOURNAL OF IMAGE AND GRAPHICS



H.264 video entropy coding encryption by controlling key frames(P358)



Algorithm for highlight area inpainting guided by saliency detection(P393)



Automatic approach of lens radial distortion correction based on vanishing points(P407)

Review

- Review of the bag-of-visual-words models in image scene classification
Zhao Lijun, Tang Ping, Huo Lianzhi, Zheng Ke 0333
- The processing and applications of high resolution SAR images with object-based image analysis
Zhang Hong, Ye Xi, Wang Chao, Zhang Bo, Wu Fan, Tang Yixian 0344

Image Processing and Coding

- H.264 video entropy coding encryption by controlling key frames
Zhang Xiaohong, Yuan Chunjing 0358
- Zero-watermarking visual cryptography algorithm in the wavelet domain
Qu Changbo, Yang Xiaotao, Yuan Duoning 0365
- Level set model for image segmentation based on dual contour evolutionary curve
Wang Xianghai, Li Ming 0373
- Improved algorithm for single image haze removing using dark channel prior
Sun Xiaoming, Sun Junxi, Zhao Lirong, Cao Yonggang 0381
- Image haze removal using a bilateral filter
Wang Yifan, Yin Chuanli, Huang Yiming, Wang Hongyu 0386
- Highlight area inpainting guided by saliency detection
Wang Yifan, Jiang Zhiguo, Shi Jun, Zhang Haopeng 0393
- Adaptive steganographic algorithm utilizing block standard deviation of DCT coefficients
Ling Yihua, Cai Xiaoxia, Chen Hong 0401
- Automatic approach of lens radial distortion correction based on vanishing points
Liu Dan, Liu Xuejun, Wang Meizhen 0407

Image Analysis and Recognition

- Locality preserving projection on Riemannian manifold for image set matching
Zeng Qingsong 0414
- "Two-stage" active contour model driven by local and global information
Qi Shile, Wang Meiqing 0421

Image Understanding and Computer Vision

- Method of point tracking based on superpixel
Luo Huilan, Zhong Rui, Kong Fansheng 0428

Remote Sensing Image Processing

- Edge detection from high resolution remote sensing image combining phase congruency with total variation model
Huang Qiuyan, Xiao Pengfeng, Feng Xuezhi, Wang Ke 0439

Special Issue on HHME 2013

- Multi-focus image fusion based on human visual perception characteristic in non-subsampled Contourlet transform domain
Yang Yong, Zheng Wenjuan, Huang Shuying, Fang Zhijun, Yuan Feiniu 0447
- Rotation free recognition of hand-drawn military marking symbols
Wu Lingda, Zhang Yougen, Deng Wei, Song Hanchen 0456
- The wrist recognition and the center of palm estimation based on depth camera
Yao Zhengwei, Pan Zhigeng, Teng Guodong 0463
- License plate detection based on multiple features
Wang Yongjie, Pei Mingtao, Jia Yunde 0471
- Fast intermode decision based on the decision tree for H.264/AVC P-frame encoding
Wang Ping, Zhang Xiaodan, Zhang Lei 0476
- No-reference image quality assessment in mutual information domain
Dong Hongping, Liu Lixiong 0484

中图法分类号: TP391.41 文献标识码: A 文章编号: 1006-8961(2014)03-0407-07

论文引用格式: 刘丹, 刘学军, 王美珍. 由灭点进行径向畸变的自动校正[J]. 中国图象图形学报, 2014, 19(3): 407-413. [DOI: 10.11834/jig.20140310]

由灭点进行径向畸变的自动校正

刘丹, 刘学军, 王美珍

南京师范大学 虚拟地理环境教育部重点实验室, 地理科学学院, 南京 210023

摘要: **目的** 镜头畸变影响着 3 维重建、几何量测等工作的质量。根据图像中的灭点几何约束条件, 提出一种根据灭点进行弱径向畸变自动校正方法。**方法** 为避免包含畸变中心参数的非线性模型优化结果的不稳定性, 在求解径向畸变系数之后进一步对畸变中心进行优化。首先根据灭点几何约束条件建立关于灭点与径向畸变系数的非线性模型, 使用 Levenberg-Marquardt (LM) 算法估计灭点坐标与径向畸变参数, 然后根据质量评价准则对畸变中心和径向畸变系数进一步迭代优化; 最后, 通过真实图像对该方法的可行性进行分析验证。**结果** 采用不同的数据对径向畸变进行了有效地校正, 并采用校正后的数据进行了相机标定, 标定结果相对于传统基于非量测校正方法有明显的提高。**结论** 充分利用图像中的灭点属性, 提出一种新的镜头径向畸变校正方法。实验结果表明, 该方法能够有效地对径向畸变进行校正, 并克服了传统基于非量测畸变校正方法的不稳定性。

关键词: 3 维重建; 灭点; 径向畸变; 畸变中心; 自动校正

Automatic approach of lens radial distortion correction based on vanishing points

Liu Dan, Liu Xuejun, Wang Meizhen

Key Laboratory of Virtual Geographic Environment Ministry of Education, Nanjing

School of Geography Science, Nanjing Normal University, Nanjing 210023, China

Abstract: **Objective** Lens distortion, which is a fundamental problem in photogrammetry and computer vision, has serious effects on the three-dimensional reconstruction and on the geometric image measurements. **Method** In this paper, an automatic correction of weak radial distortions based on vanishing points from a single image is presented. In order to reduce the effects caused by the nonlinear model included in the distortion center, the distortion center is further optimized after the radial distortion is estimated. A nonlinear model of vanishing points and radial distortion, which can be estimated by the Levenberg-Marquardt (LM) algorithms, is established based on the geometric constraint of vanishing points; then, the distortion center and radial distortion is optimized by an iterative method based on a suitable quality measurement. At last, the presented method is tested and verified. **Result** The radial distortions using different data are all effectively corrected. Compared with the traditional methods based on non-metric distortion correction, the results of camera calibration after correction are significantly improved. **Conclusion** The results of our experiments indicate that the approach can effectively correct radial lens distortion, while effectively overcome the instability of the traditional methods based on non-metric distortion correction.

Key words: 3D reconstruction; vanishing points; radial distortion; distortion center; automatic correction

收稿日期: 2013-06-25; 修回日期: 2013-09-10

基金项目: “十二五”国家支撑计划项目(2012BAH35B02); 江苏省高校自然科学重大基础研究项目(10KJA420025); 高等学校博士学科点专项科研基金项目(新教师类)(2013207120017)

第一作者简介: 刘丹(1989—), 女, 现为南京师范大学地图学与地理信息系统专业博士研究生, 主要研究方向为影视 GIS、单像解析等。

E-mail: demondan@163.com

0 引言

畸变校正是计算机视觉和摄影测量学领域中的一项基础研究工作,影响着3维重建、几何量测等后续处理工作的质量。现有的畸变校正方法主要可以分为两类:一类是传统的校正方法,即将相机参数与畸变参数放在一起进行估计^[1-3]。该方法的标定精度比较高,但其缺点是需要已知的模板或者图像序列,过程复杂,适用性不强。另一类是基于非量测畸变校正方法,该方法将畸变参数分离出来单独标定,无需特定的标定物,而是利用图像中的几何特征约束(直线^[4-6]、灭点^[7]、平行性^[8])估计镜头畸变系数,其中,基于直线约束的畸变校正方法是当前使用最普遍的方法之一。该方法基于直线的射影不变性原理,首先提取图像中的畸变直线(即曲线),然后利用直线畸变点的共线条件建立目标函数估计镜头畸变系数。但是当畸变较小时,如现代 CCD(电荷耦合元件)相机拍摄的自然场景图像的畸变系数,图像中畸变直线的曲率很小,从图像中提取畸变直线非常困难。

目前,大多数基于非量测畸变校正方法都假设畸变中心位于图像中心,但这种假设的可靠性低。实际中,畸变中心可能受某些因素的影响而偏离图像中心,如透镜中心与 CCD 中心不重合,传感器平面相对于透镜发生轻微的倾斜,各镜片间的轴向间距存在误差,图像的裁剪等。因此对于普通数码相机,不应简单地假设相机的光心是精确的,而应该进行校正。

基于非量测畸变校正方法通常是将畸变中心和畸变系数一起参与非线性模型优化求解,但是 Brown^[9] 和 Swaminathan 等人^[10] 已经证明若将畸变中心与畸变系数放在一起进行迭代优化可能会导致计算结果不稳定。郑继贵等人^[11] 将畸变系数与畸变中心进行分离,分别求解,利用射影变换的交比不变性建立只包含畸变中心的估计模型,从而得到稳定的求解结果,但是该方法需要已知的模板,不适用于基于自然场景图像的校正。镜头畸变主要包括径向畸变、切向畸变和薄棱镜畸变。Weng 等人^[12] 已经证明非径向畸变的误差总和只有径向畸变的 1/7 ~ 1/8。Tsai^[1] 也认为过多地考虑畸变可能增加计算的复杂程度,反而影响计算结果的精度,所以只考虑一阶径向畸变。

因此,针对现代 CCD 相机的弱径向畸变参数,提出了一种根据灭点几何约束进行径向畸变自动校

正方法。首先利用 LSD(直线段检测器)^[13] 提取图像中的小直线段,并利用 J-Linkage(多模型稳健估计)^[14] 对提取的直线聚类分组,得到每个方向的直线段组。然后根据灭点的属性建立关于径向畸变系数与灭点坐标参数的非线性模型,对该模型优化估计径向畸变系数和灭点坐标。再根据所估计的径向畸变系数进一步优化畸变中心和畸变系数,直至满足优化目标。最后根据所估计的灭点坐标可以实现基于单幅图像的相机自标定。

1 原理与方法

1.1 相机成像模型

相机通过成像透镜将3维场景投影到相机2维像平面上,这个投影可用相机成像模型表示。相机的针孔成像模型如图1所示。

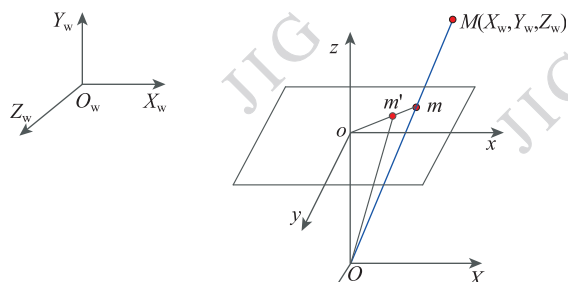


图1 考虑镜头畸变的相机模型

Fig. 1 Camera model with lens radial distortion

图1中, $O_w-X_w-Y_w-Z_w$ 为世界坐标系, $O-XYZ$ 为相机坐标系,其中, O 点为相机光心, X 轴和 Y 轴与图像坐标系的 x 轴和 y 轴平行, Z 轴(相机的光轴)与图像平面垂直。图像平面与相机光轴的交点即为图像坐标系的原点 o 。 Oo 为相机的焦距 f 。在理想的针孔成像模型情况下,空间点 $M(X_w, Y_w, Z_w)$ 在图像平面上的投影为像点 $m(x_u, y_u)$,但是由于镜头畸变的存在,其实际像点为 $m'(x_d, y_d)$ 。

采用 Brown 的多项式模型^[15],径向畸变模型为

$$\begin{cases} x_u = x_d + (x_d - u_0) \times \\ \quad (k_1 r_d^2 + k_2 r_d^4 + \cdots k_i r_d^{2i} + \cdots) \\ y_u = y_d + (y_d - v_0) \times \\ \quad (k_1 r_d^2 + k_2 r_d^4 + \cdots k_i r_d^{2i} + \cdots) \end{cases} \quad (1)$$

式中, (x_d, y_d) 为像点的实际物理坐标, (x_u, y_u) 为像点经校正后的坐标, k_i 为相机的 i 阶径向畸变参数

($i = 1, 2, 3, \dots$), $r_d = \sqrt{(x_d - u_0)^2 + (y_d - v_0)^2}$ 为畸变点到畸变中心的距离, 即畸变半径, 其中 (u_0, v_0) 为畸变中心坐标。对于现代非量测 CCD 相机, 只考虑一阶径向畸变即可满足标定精度, 则有

$$\begin{cases} x_u = x_d + (x_d - u_0)k_1r_d^2 \\ y_u = y_d + (y_d - v_0)k_1r_d^2 \end{cases} \quad (2)$$

1.2 基于灭点几何约束的径向畸变系数求解方法

3 维场景中平行的直线组投影到图像平面上并不平行, 而是交于一点, 即灭点。但是由于畸变等因素的影响, 同一方向的平行直线并不会交于一点。

如图 2 所示, l_1, l_2, l_3 是空间上平行的直线在图像中的投影, 交点分别为 v_1, v_2, v_3 。假设此方向的实际灭点坐标为 $v(x_v, y_v)$, $A(x_A, y_A)$ 、 $B(x_B, y_B)$ 分别为直线 l_2 上的任意两点, 连接 Av , 则直线 l_{Av} 可以表示为

$$y = \frac{y_v - y_A}{x_v - x_A}x + y_A - \frac{y_v - y_A}{x_v - x_A}x_A$$

则点 B 到直线 l_{Av} 的距离为

$$\begin{cases} d = \frac{|(x_B - x_A)(y_v - y_A) - (y_B - y_A)(x_v - x_A)|}{s_{Av}} \\ s_{Av} = \sqrt{(x_v - x_A)^2 + (y_v - y_A)^2} \end{cases} \quad (3)$$

$$\begin{cases} F_{ij} = \left| \frac{[(x_{B'} + k_1(r_{B'})^2(x_{B'} - u_0)) - (x_{A'} + k_1(r_{A'})^2(x_{A'} - u_0))](y_v - (y_{A'} + k_1(r_{A'})^2(y_{A'} - v_0))) - [(y_{B'} + k_1(r_{B'})^2(y_{B'} - v_0)) - (y_{A'} + k_1(r_{A'})^2(y_{A'} - v_0))](x_v - (x_{A'} + k_1(r_{A'})^2(x_{A'} - u_0)))}{\sqrt{(x_v - (x_{A'} + k_1(r_{A'})^2(x_{A'} - u_0)))^2 + (y_v - (y_{A'} + k_1(r_{A'})^2(y_{A'} - v_0)))^2}} \right| \\ r_{A'} = \sqrt{(x_{A'} - u_0)^2 + (y_{A'} - v_0)^2}, r_{B'} = \sqrt{(x_{B'} - u_0)^2 + (y_{B'} - v_0)^2} \end{cases}$$

由此, 可以得到目标函数

$$F = \sum_{j=1}^m \left(\sum_{i=1}^n F_{ij} \right)^2 \quad (4)$$

式(4)是一个参数为 (x_v, y_v, k_1) 的非线性模型, 利用 LM 算法对此模型进行迭代优化。参数 (x_v, y_v) 的初始值可通过随机选择两条直线的交点获得, 参数 k_1 的初始值可设为 0。优化后, 可以得到灭点的坐标 (x_v, y_v) 和径向畸变系数 k_1 , 此时就可以直接利用求得的灭点坐标进行相机标定。

1.3 畸变中心与径向畸变系数的优化

通常, 基于非量测畸变校正方法都假设畸变中心位于图像中心, 这可以简化校正过程, 在一般情况下, 利用式(4)优化得到径向畸变系数, 即已完成畸变校正。但为提高校正的精度, 采用一定的评价准

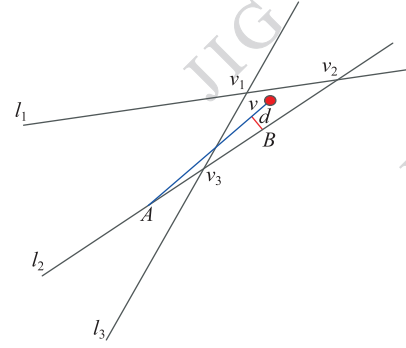


图2 径向畸变影响下平行直线与灭点的关系

Fig. 2 Relationship between parallel lines and vanishing point under the influence of radial distortion

式中, s_{Av} 为线段 Av 的长度。在没有畸变的理想情况下, A, B, v 这 3 点应该在一条直线上, 距离 d 应该为 0。因此, 若假设 $(x_{A'}, y_{A'})$ 、 $(x_{B'}, y_{B'})$ 分别为原始图像上的畸变点 A', B' 的坐标, (x_A, y_A) 、 (x_B, y_B) 分别为经校正的校正点 A, B 的坐标, $r_{A'}, r_{B'}$ 分别为畸变点 A', B' 到畸变中心 $C(u_0, v_0)$ 的畸变半径。则对于 $j = 1, 2, \dots, m$ 条直线, 每条直线上 $i = 1, 2, \dots, n$ 对点, 所对应的灭点坐标为 $v(x_v, y_v)$, 将式(2)代入式(3)则点 B' 到直线 l_{Av} 的距离为

则进一步对径向畸变系数和畸变中心进行迭代优化。

评价准则: 为确定校正精度是否可进一步提高, 采用所有已校正点到所在直线(利用最小二乘法拟合)的平均偏差作为质量评价准则。即假设考虑 $j = 1, 2, \dots, m$ 条直线(拟合的直线表示为 $a_jx + b_jy + c_j = 0$), 每条直线上 $i = 1, 2, \dots, n$ 个已校正点, 则有评价准则 M 为

$$M = \frac{1}{mn} \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n \frac{|a_jx_i + b_jy_i + c_j|}{\sqrt{a_j^2 + b_j^2}} \quad (5)$$

首先, 假设畸变中心 C 位于图像中心, 利用式(4)计算径向畸变系数 k_1 和灭点坐标; 为提高畸变校正的精度, 在第 2 次迭代时假设当前计算的 k_1 值为真值, 在畸变中心周围选择一合适的网格窗口(对于弱径向畸变可选 3×3 大小的网格窗口)作

为畸变中心的候选值,并根据式(5)进行迭代优化,使 M 为最小值时的候选值即为新的畸变中心;接下来再根据当前畸变中心利用式(4)优化估计 k_1 ;重复以上过程,直至 M 达到最小或者畸变系数的变化很小。由灭点进行径向畸变自动校正,算法具体如下:

输入:一幅畸变图像。

输出:灭点坐标 (x_v, y_v) , 一阶径向畸变系数 k_1 , 畸变中心 $C(u_0, v_0)$ 。

- 1) 利用 LSD 提取直线,并利用 J-Linkage 将直线分组;
- 2) 初始化: $(x_v, y_v) \rightarrow$ 两直线的交点; $k_1 \rightarrow 0$; $C \rightarrow$ 图像中心;
- 3) 使用当前的 k_1 和 C ,并利用 LM 方法优化目标函数(式(4))估计 k_1 和 (x_v, y_v) ;
- 4) 以 M 为评价准则,选择一合适的网格窗口(如 3×3 窗口)迭代优化 C :

```
for i = 1:3
    for j = 1:3
         $C_{new} \rightarrow C + (i, j)$ ;
        运用当前的  $k_1$  和  $C_{new}$  校正畸变直线上的点,并运用最小二乘方法进行直线拟合;
        Calculation:运用式(5)计算  $M$ ;
        if  $M \leq \min$ 
            return;
        else
             $C \rightarrow C_{new}$ ;
            goto Calculation;
        end
    end
end
end
```

2 实验结果与分析讨论

2.1 实验数据与结果

1) 实验数据

为检验提出的由灭点几何约束进行径向畸变校正方法的有效性,采用同一型号(非量测普通相机 Nikon D80),但焦距不同的相机拍摄的两幅图像以及相机 Canon EOS 50D 拍摄的图像进行实验,采集的实验数据如表 1 所示,拍摄的图像数据如图 3 所示,图 3 中给出的是利用 LSD 进行直线段提取和 J-Linkage 进行直线聚类后,得到每个方向直线段的结果图,每一方向的直线段使用不同的颜色表示,其中红、蓝、绿色分别表示图像 3 个主方向(3 个主方向也就是基于“Manhattan world Assumption”的世界坐标系的 3 个坐标轴方向)的直线段。

2) 实验结果

利用本文算法和传统的基于直线约束的校正算法^[6]分别使用这 3 幅图像进行畸变系数求解,结果如表 2 和表 3 所示。本文算法分别使用 3 个主方向的直线段进行计算,得到 3 个方向的灭点坐标和径向畸变系数,最终的径向畸变系数为 3 个方向求解得到的径向畸变系数的平均值。从结果可以看出,本文算法与传统算法的精度相当,但是本文算法将径向畸变系数与畸变中心分离单独进行优化,克服了传统方法的不稳定性,能够有效地对畸变中心进行校正。

为比较不同相机的畸变校正结果,使用校正前的畸变半径与已校正的畸变半径差的百分比 r 作为畸变函数 $r = \frac{100 \times (r_u - r_d)}{r_d}$ 作为衡量标准。由于不同

表 1 真实场景实验数据
Table 1 Information of images

参数	图像 DSC_7495	图像 DSC_7887	图像 DSC_0101
相机型号	Nikon D80	Nikon D80	Canon EOS 50D
像片属性显示的焦距/mm	27	18	18
传感器尺寸/mm	23.6 × 15.8	23.6 × 15.8	22.3 × 14.9
像片像素/pixel	1 000 × 669 原;3 872 × 2 592	1 000 × 669 原;3 872 × 2 592	1 000 × 666 原;4 752 × 3 168
x 轴的标定焦距/pixel	1 144.1	762.7	807.2
y 轴的标定焦距/pixel	1 143.2	762.2	805.3
平均标定焦距 f /pixel	1 143.7	762.5	806.2

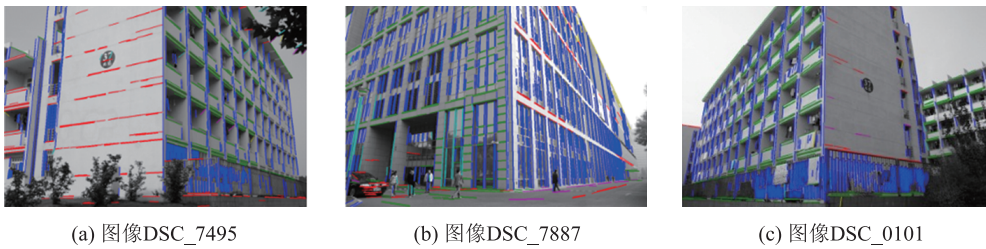


图 3 真实场景实验数据

Fig. 3 Information of images

表 2 本文算法求解的主方向灭点坐标

Table 2 Three main vanishing points estimated by our algorithm

	图像 DSC_7495	图像 DSC_7487	图像 DSC_0101
主方向灭点坐标	(518.30, -3 917.90) (1 204.94, 643.43)	(504.625 5, -2 057.8) (-690.92, 568.27)	(495.81, -1 791.6) (-203.58, 647.8)

表 3 两种算法径向畸变求解结果

Table 3 Results of radial distortion estimated by the two algorithms

算法	实验图像	径向畸变系数 k_1	畸变中心/pixel	径向畸变系数均方差/pixel
本文	图像 DSC_7495	3.65E-09	(505, 329.5)	2.04E-04
	图像 DSC_7887	4.78E-08	(496, 330.5)	6.61E-04
	图像 DSC_0101	2.02E-08	(504, 338)	5.74E-04
传统	图像 DSC_7495	2.31E-09		2.42E-04
	图像 DSC_7887	2.87E-08		5.81E-04
	图像 DSC_0101	1.89E-08		4.28E-04

相机所拍摄的图像大小可能不同,而镜头畸变系数会随着图像尺寸的缩放而变化,即畸变系数与缩放因子 s 的关系为 $k'_1 = \frac{k_1}{s}$, k_1 为原始图像大小时的一阶径向畸变系数, k'_1 为缩放因子为 s 时的一阶径向畸变系数。因此,为使畸变系数与图像尺寸无关,这里对图像尺寸进行归一化,即用畸变点到主点的畸变半径 r_d 除以图像对角线的长度 l , $re = \frac{r_d}{l}$,从而得到畸变函数图如图 4 所示。

分析表 2 和图 4 的畸变校正结果可以得出,同一相机而焦距不同的镜头畸变系数不同,焦距越大,畸变系数越小;相同焦距而相机不同的镜头畸变系数也不同。

为比较分析本文算法的有效性,采用本文算法和传统算法进行畸变校正后再分别利用这 3 幅图像进行相机标定,得到的标定结果如表 4 所示。对未校正和校正后的相机标定焦距与真实焦距 f

进行比较,两种算法都能够有效地提高相机标定结果的精度,但是本文算法校正后的标定精度明显高于传统的基于直线约束的校正算法校正后的标定精度。

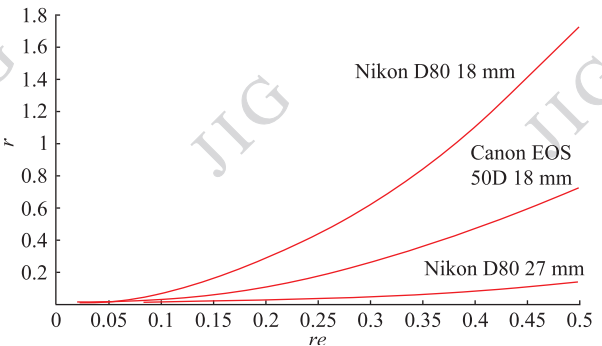


图 4 Nikon D80 27 mm、Nikon D80 18 mm 和 Canon EOS 50D 18 mm 的畸变函数 r

Fig. 4 Distortion function r of Nikon D80 27 mm、Nikon D80 18 mm 和 Canon EOS 50D 18 mm

表 4 相机自标定结果
Table 4 Results of camera self-calibration

	Nikon D80 (27 mm) ($f=1\,143.7$ pixel)		Nikon D80 (18 mm) ($f=762.5$ pixel)		Canon EOS 50D (18 mm) ($f=806.2$ pixel)	
	标定的焦距/pixel	相对误差/%	标定的焦距/pixel	相对误差/%	标定的焦距/pixel	相对误差/%
未校正时	1 052. 9	7. 93	787. 1	3. 23	828. 8	2. 80
传统算法校正后	1 090. 7	4. 63	772. 3	1. 29	819. 5	1. 65
本文算法校正后	1 150. 7	0. 61	760. 3	0. 29	808. 8	0. 32



图 5 径向畸变校正后的图像

Fig. 5 Images corrected by the radial distortion correction

为后续工作的方便,根据以上求得的畸变系数可以得到校正后的图像,结果如图 5 所示。

2.2 分析与讨论

由灭点进行径向畸变校正方法的原理简单,即理想情况下,空间上平行的直线组投影到图像平面上交于一点(灭点)。分析 2.1 节实验结果可以得知:1)本文算法与传统基于直线约束的校正算法的校正精度相当,并且能够稳定、有效地校正畸变中心。2)焦距相同而相机不同的径向畸变系数是不相同的,同一相机而焦距不同的径向畸变系数也不同,焦距越大,畸变越小。也就是说,畸变系数不仅与镜头有关,而且与相机焦距有关,所以对于变焦相机所摄的图像,应对每一视图都进行畸变校正。3)由于本文算法将灭点坐标一起加入目标函数参与优化,从而能够得到一个最优的灭点坐标值,而传统方法是在畸变校正完成后,再提取图像上的平行直线组,然后利用 SVD(奇异值分解)算法计算这些直线的交点(灭点),此时的灭点坐标并非最佳灭点位置,因此本文算法更能够有效地提高相机标定的精度。4)本文算法无需标定模板,仅利用单幅图像即可完成畸变校正,算法简单,易实现,并能够有效地提高相机标定的精度,从而为相机标定(尤其是单幅图像自标定)奠定了良好的基础。

与传统算法相比,本文算法具有如下特点:

1)结果稳定。本文算法将径向畸变系数与畸变中

心分离开来,对径向畸变系数求解之后,再进一步优化了畸变中心和径向畸变系数,克服了传统基于直线约束的校正方法求解结果的不稳定性。2)算法方便。针对现代 CCD 相机镜头弱畸变,畸变直线(曲线)难以提取的缺点,本文算法利用图像中的小直线段建立目标函数,避免了曲线的提取;并且本文算法是基于场景的单幅图像,无需特定的标定物。因此,为相机信息未知的图像如油画、来自 Internet 的图像等提供了很大的方便性;3)无需人工参与。本文算法利用 LSD 自动提取的小直线段建立与灭点的关系,无需人工参与,而传统算法多数都需要用户在待校正图像上人工的选择若干条畸变直线,校正精过度地依赖于提取的直线,导致计算结果的不稳定性。因此,本文算法的自动化有效地避免了传统方法存在的问题。

3 结 论

将图像中的几何特征灭点引入径向畸变校正中,对根据灭点几何约束的弱径向畸变系数和畸变中心的求解方法进行了详细的研究和实验分析。实验结果验证了本文算法的可行性,且实验结果表明镜头的畸变大小不仅与镜头本身有关,而且与焦距相关,同一相机,焦距越大,畸变越小。较之传统基于直线约束的校正方法,本文算法将畸变中心与径

向畸变系数分离单独标定,并且无需提取畸变直线及无需人工参与,因此具有稳定性、方便性和自动化的特点;本文算法能够有效地提高相机标定的精度,且仅需单幅图像,无需特定的标定模板,这为畸变分离的相机标定(特别是单幅图像相机自标定)提供了良好的基础,因此本文算法具有一定的适用性。

参考文献 (References)

- [1] Tsai R Y. A versatile camera calibration technique for high-accuracy 3D machine vision metrology using off-the-shelf TV cameras and lenses [J]. IEEE Journal of Robotics and Automation, 1987, 3(4): 323-344. [DOI:10.1109/JRA.1987.1087109]
- [2] Heikkila J. Geometric camera calibration using circular control points [J]. Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2000, 22(10): 1066-1077. [DOI: 10.1109/34.879788]
- [3] Wu T, Xu K J, Zhao R. Improvement of a nonlinear calibration method for cameras [J]. Chinese Journal of Science Instrument, 2005, 26(8): 695-697. [吴婷, 徐科军, 赵锐. 摄机畸变模型下的线性标定方法的改进[J]. 仪器仪表学报, 2005, 26(8): 695-697.]
- [4] Devernay F, Faugeras O. Straight lines have to be straight [J]. Machine Vision and Applications, 2001, 13(1): 14-24. [DOI: 10.1007/PL00013269]
- [5] González-Aguilera D, Gómez-Lahoz J, Rodríguez-González P. An automatic approach for radial lens distortion correction from a single image [J]. IEEE Sensors Journal, 2011, 11(4): 956-965. [DOI:10.1109/JSEN.2010.2076403]
- [6] Zhou F Q, Cai F H. Camera calibration method based on non-metric distortion correction [J]. Journal of Mechanical Engineer, 2009, 45(8): 228-232. [周富强, 蔡斐华. 基于非量测畸变校正的摄像机标定方法[J]. 机械工程学报, 2009, 45(8): 228-232.] [DOI:10.3901/JME.2009.08.228]
- [7] Btauer-Burchardt C, Voss K. Automatic correction of weak radial lens distortion in single views of urban scenes using vanishing points [C]// Proceedings of International Conference on Image Processing. Rochester, New York, USA; IEEE, 2002, 3: 865-868. [DOI:10.1109/ICIP.2002.1039109]
- [8] Van Den Heuvel F A. Estimation of interior orientation parameters from constraints on line measurements in a single image [J]. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, 1999, 32(5W11): 81-88.
- [9] Brown D C. Close-range camera calibration [J]. Photogrammetric Engineering, 1971, 37(8): 855-866.
- [10] Swaminathan R, Nayar S K. Non-metric calibration of wide-angle lenses and polycameras [C]// Proceedings of IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Fort Collins, Colorado; IEEE, 1999, 2: 413-419. [DOI:10.1109/CVPR.1999.784714]
- [11] Zhu J G, Luo M, Tao G Z, et al. The model and estimation of camera lens radial distortion center [J]. Chinese Journal of Science Instrument, 1998, 19(1): 1-6. [郑继贵, 罗明, 陶国志, 等. 摄像机镜头径向畸变中心的计算模型及求解[J]. 仪器仪表学报, 1998, 19(1): 1-6.]
- [12] Weng J, Cohen P, Hernious M. Calibration of stereo cameras using a nonlinear distortion model (CCD Sensory) [C]// Proceedings of the 10th International Conference on Pattern Recognition. Atlantic City, USA; IEEE, 1990, 1: 246-253. [DOI: 10.1109/ICPR.1990.118105]
- [13] von Gioi R G, Jakubowicz J, Morel J-M, et al. LSD: a fast line segment detector with a false detection control [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2010, 32(4): 722-732. [DOI:10.1109/TPAMI.2008.300]
- [14] Toldo R, Fusiello A. Robust multiple structures estimation with J-Linkage [C]// Proceedings of the 10th European Conference on Computer Vision. Marseille, France; Springer, 2008, 5302: 537-547. [DOI:10.1007/978-3-540-88682-2_41]
- [15] Brown D C. Decentering distortion of lenses [J]. Photogrammetric Engineering, 1966, 32(3): 444-462.