

文章编号 1004-924X(2009)05-1196-07

图像拼接中相机镜头非线性畸变的校正

兰海滨¹,王平²,龙腾¹

1. 北京理工大学 信息科学技术学院, 北京 100081;
2. 国防科技大学 电子科学与工程学院, 湖南 长沙 410073)

摘要:为满足大尺寸图像无缝拼接的需要,提出了数字相机镜头非线性畸变的高精度校正方法。分析了现有棋盘格图像特征点检测算法的不足,提出了一种新的基于棋盘格图像结构特征的特征点检测算法。该算法巧妙地利用棋盘格图像的像素点相对于方格交点对称、相对于方格交线反对称这一特点,计算交点附近区域每一像素点的对称度和反对称度,并以此为依据来判定特征点的准确位置。将该算法与多项式变换技术以及双线性插值技术相结合,提出了数字相机图像非线性畸变的精确校正方法。实验结果表明,校正后图像的横向误差均值为0.43个像素,纵向坐标误差均值为0.36个像素。该方法精度高、计算简单,对噪声、透视、畸变等鲁棒性强,便于特征点检测的自动化处理。通过对实际地图图像的校正和拼接处理,证明了该方法的有效性。

关键词:图像拼接;畸变校正;棋盘格;特征点检测;双线性插值

中图分类号:TP391.4 **文献标识码:**A

Nonlinear aberration correction of lens in image mosaic

LAN Hai-bin¹, WANG Ping², LONG Teng¹

1. *Department of Information Science, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China;*
2. *Department of Electronic Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)*

Abstract: A correction method with high precision for Digital Camera(DC) lenses is proposed to meet the needs of the seamless mosaic of large scale images. The shortcomings of present algorithms are analyzed and a kind of detecting algorithm is proposed. In consideration of the structural characteristics of a chessboard pattern that the pixels in the images are central symmetrical for the points of intersection and antisymmetric for the lines of intersection of every two adjoining square panes, the precise coordinates of feature points can be decided by calculating the symmetry index and antisymmetry index for every pixel. Then, combined with the polynomial transform and bilinear interpolation techniques, a high-precision correction method for nonlinear aberration of DC images is put forward. The experiment shows the mean of horizontal error is 0.43 pixel and the mean of vertical error is 0.36 pixel after correction. These results show that proposed method has advantages in simple calculation, robust to noise, projective and distortion aberration and convenient for automatic detection. The correction and mosaic for a map photo is carried out, results prove further the effectiveness of the method by its appli-

收稿日期:2009-01-15;修订日期:2009-03-13.

基金项目:国家重点实验室基金资助项目(No. 9140A01010507KG01)

cation in the real map photo mosaic.

Key words: image mosaic; aberration correction; chessboard pattern; feature point locating; bilinear interpolation

1 引言

图像拼接就是将若干张有重叠部分的低分辨率图像拼成一幅大尺寸的无缝高分辨率图像。但在实际应用中,由普通数码相机或摄像机获得的图像,由于加工误差和装配误差的影响,其边缘部分往往发生严重的非线性光学畸变^[1]。为保证图像拼接质量,必须首先对图像进行畸变校正处理。利用标准棋盘格图像对畸变图像进行几何校正是一种简便而有效的方法^[2-4]。一般的做法是:首先将棋盘格图像的方格交点作为特征点,并对其进行高精度的检测,确定变换前后特征点坐标的关系,从而求解变换矩阵的参数。

特征点的检测精度对校正结果有决定性的影响,但在数码相机拍摄的实际图像中,由于噪声以及分辨率等因素的影响,方格交点往往扩散为由若干像素点组成的点阵,这给特征点的高精度检测带来很大的困难。

现有的特征点检测算法主要分为三类。第一类是基于一般通用角点检测的思想^[5-6],通常使用 Harris 角点检测算法,利用高斯梯度来判断角点。但由于方格交点在实际图像中的扩散现象,这类算法的实际检测结果往往误差较大。第二类算法是基于求直线交点的思想^[7-8],首先检测方格边缘线,然后计算边缘线的交点,从而确定交点的坐标。这类算法仅适用于无畸变的图像。而在实际应用中,由于镜头畸变的影响,数码相机图像或多或少都会发生一定的变形,边缘部分尤为明显,此时方格边缘线不再是直线,而是弯曲线,求直线交点的算法已不再适用。第三类算法则利用了棋盘格图像的结构特征,具有代表性的是文献[9]提出的 SV 检测算法。该算法利用了方格交点附近像素对角对称以及灰度值变化剧烈的特点,跳出了传统角点检测的思路,但该算法在方格交点附近的响应值通常仅为局部最大值,这给检测的自动化处理带来不便。

本文首先根据棋盘格图像的结构特征,设计了能够对棋盘格图像的特征点进行高精度检测的

SAS(Symmetry and AntiSymmetry)算法,并分析了该算法的性能,然后介绍了基于多项式模型的非线性畸变图像分片校正方法,最后给出了该方法在大幅面图像拼接实验系统中的应用结果。结果表明,本文提出的方法能够很好地满足图像拼接中畸变校正的需要。

2 棋盘格图像的结构特点

2.1 棋盘格图像

棋盘格图像由黑白相间的正方格组成,方格两两相交形成交线,每 4 个方格相交形成交点,这些交点经常被用作特征点。典型棋盘格图像如图 1 所示。

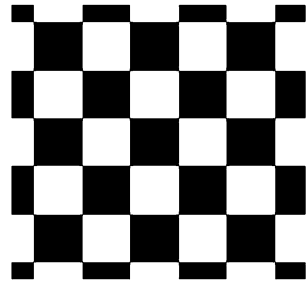


图 1 标准棋盘格图像

Fig. 1 Standard chessboard pattern

由计算机产生的棋盘格图像其交线是严格的直线段,其交点也仅是一个点。但实际由数码相机或扫描仪采集的棋盘格图像,其交线往往发生变形,其交点也扩散为由若干个像素组成的点阵,从而增加了特征点检测的难度,如图 2 所示。

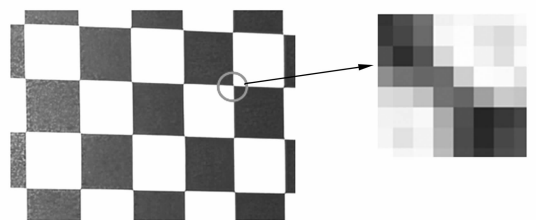


图 2 数码相机拍摄的棋盘格图像

Fig. 2 Chessboard pattern captured by digital camera

2.2 棋盘格图像的结构特点

标准棋盘格图像的像素值具有以下特点:

- (1) 相对于方格交点中心对称;
- (2) 相对于各方格交线黑白反对称。

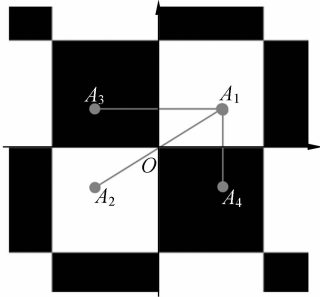


图 3 棋盘格图像的结构特点

Fig. 3 Structure characteristics of chessboard pattern

如图 3 所示,任选一点 A_1 ,以其附近某方格交点 O 为原点,通过 O 的两条交线分别为纵轴和横轴,找出 A_1 相对于原点 O 的中心对称点 A_2 、相对于纵轴的对称点 A_3 以及相对于横轴的对称点 A_4 ,则 A_1 、 A_2 、 A_3 以及 A_4 之间具有如下关系:

- (1) A_1 和 A_2 的灰度值相同;
- (2) A_1 和 A_3 的灰度值黑白相反;
- (3) A_1 和 A_4 的灰度值也是黑白相反;
- (4) A_1 位于坐标轴上时, A_2 与 A_3 或 A_4 重合。

3 SAS 算法的设计和实现

3.1 SAS 算法的设计思路

根据上面分析的棋盘格图像的结构特点,本文设计了 SAS 算法,该算法的设计思路如下:

如图 4 所示, O' 为图像中任意一点,在以图像左上角为原点的坐标系中其坐标为 (i, j) 。以 O' 为原点建立直角坐标系, W 为以 O' 为中心的方形窗口,大小为 n ;令 f 代表灰度值,定义 O' 的结构特征度 F 为:

$$F = F_1 - F_2, \quad (1)$$

其中:

$$F_1 = \sum |f(i-m, j-n) - f(i+m, j-n)| + |f(i-m, j-n) - f(i-m, j+n)|, \quad (2)$$

$$F_2 = \sum_{\substack{m \neq 0, n \neq 0 \\ W}} |f(i-m, j-n) - f(i+m, j+n)|. \quad (3)$$

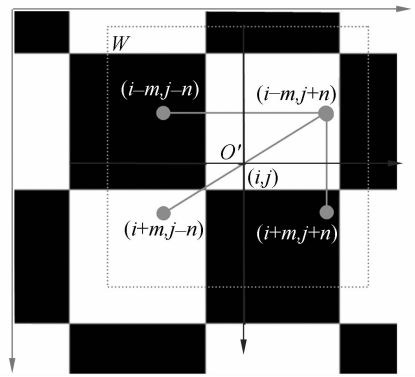


图 4 SAS 算法设计思路

Fig. 4 Design of SAS algorithm

很明显, F_1 反映的是关于纵轴和横轴对称的像素点其灰度值的综合相异程度,灰度值相差越大则 F_1 越大;而 F_2 反映的是中心对称像素点其灰度值的综合相近程度,灰度值越相近则 F_2 越小。

而 O' 越接近方格交点, F 值就越大,这就是本文设计的特征点检测算法的依据。

3.2 SAS 算法的实现

由于在校正时需要检测的特征点很多,如果采用人工检测,不但工作量大,而且检测精度差。SAS 算法响应值峰值很尖锐,单调性好,非常适合于检测的自动化处理。其自动检测流程如下:

- (1) 子确定窗口 W 的大小,一般取 7×7 即可;
- (2) 按照式(1)计算图像各像素的 F 值;
- (3) 检测出 F 值的各局部最大值;
- (4) F 值各局部最大值处即为各特征点。

图 5 为利用 SAS 算法对棋盘格图像进行自动检测的结果。从中可以看出,在各特征点处 SAS 算法均具有尖锐的响应值。

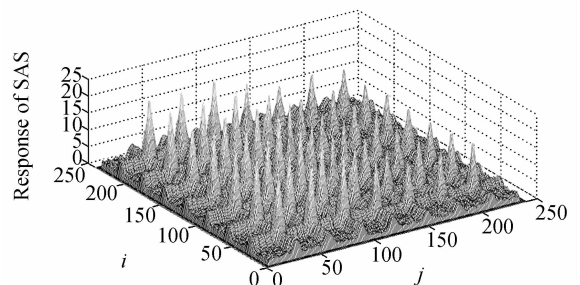


图 5 自动检测中 SAS 算法的响应值

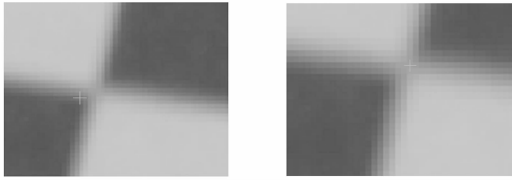
Fig. 5 Response of SAS algorithm in automatic detection

3.3 SAS 算法与 Harris 算法、SV 算法的比较

为检验 SAS 算法的性能,本文利用实际采集的图像进行了实验,比较了 Harris 角点检测算法、文献[9]的 SV 算法以及 SAS 算法的性能。结果表明:SAS 算法对噪声和图像形变的适应性强,检测精度高,便于检测的自动化处理,非常适合于在棋盘格图像特征点的检测中应用。

3.3.1 实拍倾斜图像处理结果的比较

将标准棋盘格图像通过打印机输出到打印纸上,再利用数字相机以一定的倾斜角度对其进行拍照,从而获得具有一定透视形变的实际棋盘格图像。分别使用 Harris 算法和 SAS 算法对该图像中某方格特征点进行检测,检测结果如图 6 所示,从中可以看出 SAS 算法检测出的特征点更符合人眼观察结果。

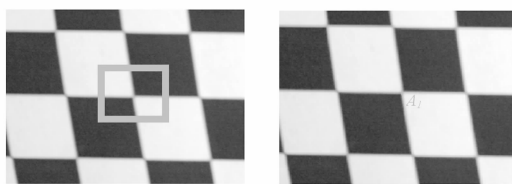


(a) Harris 算法的检测结果 (b) SAS 算法的检测结果
(a) Result of Harris algorithm (b)Result of SAS algorithm

图 6 Harris 算法和 SAS 算法的实拍图像处理结果
Fig. 6 Results of Harris algorithm and SAS algorithm based on image captured by digital camera

3.3.2 实拍畸变图像处理结果比较

利用普通家用数字相机拍摄标准棋盘格图像,由于镜头畸变的影响,图像边缘附近产生明显的变形。分别使用 SV 算法和 SAS 算法对畸变图像中矩形区域进行特征点的检测。其中,SAS 算法检测成功,结果如图 7 所示,与人眼观察相符, A_1 坐标为 (247,315)。而 SV 算法检测失败,无法找到 8 邻域意义下的局部极大值。表 1 和表 2 分别列出了 A_1 附近 SV 算法和 SAS 算法的响应值。



(a) 畸变图像 (b) SAS 算法检测结果
(a) Distorted image (b) Result of SAS algorithm

图 7 畸变图像和 SAS 算法的检测结果

Fig. 7 Distorted image and the result of SAS algorithm

表 1 A_1 附近 SV 算法响应值

Tab. 1 Response of SV algorithm in the neighborhood of A_1

i	j				
	245	246	247	248	249
313	26.426	25.831	25.36	32.193	39.348
314	25.179	22.108	20.382	24.862	31.78
315	29.294	22.354	24.446	25.327	24.603
316	43.724	32.465	28.996	24.425	22.414
317	54.345	42.161	34.061	26.055	24.383

表 2 A_1 附近 SAS 算法的响应值

Tab. 2 Response of SAS algorithm in neighborhood of A_1

i	j				
	245	246	247	248	249
313	1306	1384	1416	1598	1686
314	1434	1688	1810	1870	1752
315	1490	1814	2276	2260	1822
316	1614	1902	2228	2184	1866
317	1814	1934	1952	1778	1624

4 非线性畸变校正方法

获得畸变棋盘格图像特征点高精度坐标后,即可根据标准棋盘格图像与畸变棋盘格图像特征点的对应关系,解算出变换模型的参数,进而根据这些参数完成实际畸变图像的校正。本文的畸变校正方法在文献[10]提出的基于多项式变换模型和双线性插值的校正方法的基础上,引入了分片校正的思路,进一步提高了校正精度。

4.1 空间变换模型

令点 (x, y) 是校正前图像任一点,则采用多项式变形技术时,点 (x, y) 与校正后图像的对应点 (u, v) 的关系式为:

$$x = \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^{n-i} a_{ij} u^i v^j, y = \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^{n-i} b_{ij} u^i v^j. \quad (4)$$

根据最小二乘法,使拟合误差最小,可得:

$$\sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^{n-i} a_{ij} \left| \sum_{l=0}^L u_i^{i+s} v_l^{j+t} \right| = \sum_{i=1}^L x_l u_i^s v_l^t, \quad (5)$$

$$\sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^{n-i} b_{ij} \left| \sum_{l=0}^L u_i^{i+s} v_l^{j+t} \right| = \sum_{i=1}^L y_l u_i^s v_l^t, \quad (6)$$

式中, L 为特征点个数, $s = 0, 1, 2, \dots, n, t = 0, 1, \dots, n - s, s + t \leq n$ 。令 $M = (n + 1)(n + 2)/2$, 式(5)和式(6)为两组由 M 个方程组成的线性方程组,

分别包含 M 个未知数。将式(5)和式(6)结果代入式(4)中,即可得到畸变图像与原图像的变换关系。

文献[10]利用上述方法对全局图像进行处理。本文在求解参数时,对图像进行了划片,每片图像至少包括 $20(4 \times 5)$ 个特征点。在校正时分别求出每片图像的变换参数,从而进一步提高校正精度。

4.2 变换后图像像素值的确定

对于灰度图像,根据式(4)逐点将畸变图像各个像素影射到校正图像中,像素的灰度值采用双线性插值法来确定。

在校正彩色 RGB 图像时,在 $R、G、B_3$ 个通道分别按照灰度图像进行校正处理,然后再合成为 RGB 图像。

5 在大幅面图像拼接系统中的应用

为完成图纸、地图、艺术书画等大幅面影像载体的采集,本文设计开发了大幅面图像拼接系统,如图 8 所示。该系统将数字相机固定在相机架上,通过相机架手柄可以调整相机的视角,同时相机架在纵、横两条直线导轨上可以在垂直平面内平行移动。在图像采集过程中,首先利用文献[11]提出的基于圆环的方法来调整数字相机的视角,使其焦平面与图纸、书画平行,尽可能消除透视误差,然后平行移动数字相机,在保证一定重叠度的前提下,对大幅面载体进行拍照,得到二维图像系列,最后在计算机中将这此图像序列拼接为整幅图像。其中,相机镜头的畸变校正是保证拼接质量的关键环节。



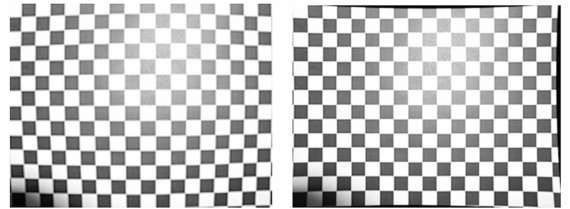
图 8 大幅面图像拼接系统

Fig. 8 Mosaic system of large scale image

5.1 畸变校正精度

实验中使用 Olympus 4040 相机,分辨率为 $2\ 272 \times 1\ 704$,按照上述畸变校正方法得到镜头各区域的多项式系数。为检验校正精度,对 18×14 的棋盘格图像拍照,并对其进行校正处理,如图 9 所示。图 10 为校正前后图像各方格交点与标准棋盘格图像对应交点的纵横两个方向的坐标差绝对值。

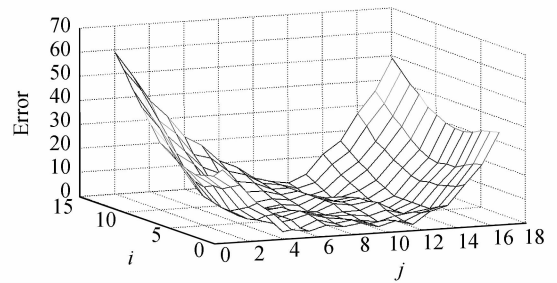
校正前横向坐标误差均值为 12.72 个像素,相对误差为 0.56%;纵向坐标误差均值为 11.08 个像素,相对误差为 0.65%。



(a) 畸变棋盘格图像 (b) 校正后棋盘格图像
(a) Distorted X-corner (b) Corrected image

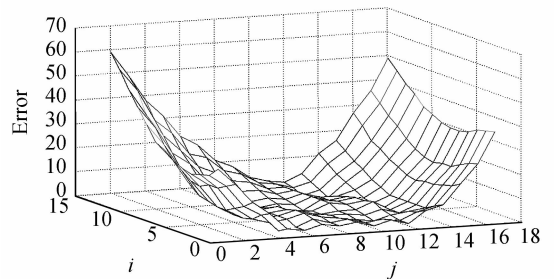
图 9 校正前后的棋盘格图像

Fig. 9 X-corner before and after correction



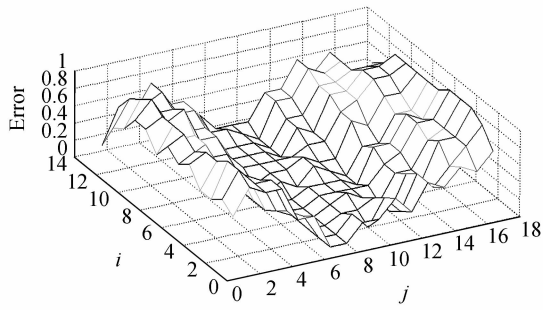
(a) 校正前横向误差

(a) Horizontal error before correction



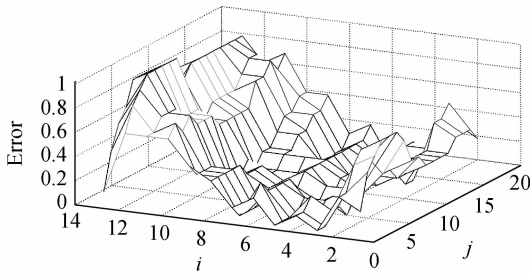
(b) 校正前纵向误差

(b) Vertical error before correction



(c) 校正后横向误差

(c) Horizontal error after correction



(d) 校正后纵向误差

(d) Vertical error after correction

图 10 校正前后误差对比

Fig. 10 Comparison of error before and after correction

校正后横向坐标误差均值仅为 0.43 个像素,相对误差为 0.019%;纵向坐标误差均值仅为 0.36 个像素,相对误差为 0.021%。校正结果令人满意。

5.2 在图像拼接中的应用

图 11 为系统采集到的两幅相邻地图图像。由于图像存在畸变,直接进行配准拼接后,拼合图中的经线和航线无法吻合,如图 12(a)所示。使用本文提出的畸变校正方法进行校正处理后再拼接,则图 12(b)中的经线和航线吻合良好。可见本文方法显著提高了拼接质量。

参考文献:

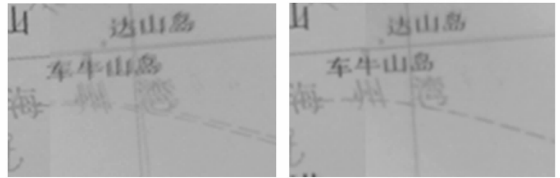
[1] 凌伟,王志乾,高峰端. 光电测量系统畸变的实时数字校正[J]. 光学精密工程,2007,15(2):277-282.
LING W, WANG ZH Q, GAO F D. Real time digital correction for distortion in photoelectronical measuring system [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007,15(2):277-282. (in Chinese).

[2] STURM P F, MAYBANK S J. On plane based



图 11 采集到的地图图像

Fig. 11 Captured map photos



(a) 畸变校正前的拼接结果 (b) 畸变校正后的拼接结果

(a) Mosaic before correction (b) Mosaic after correction

图 12 拼接后的局部图像

Fig. 12 Local areas of mosaic images

6 结 论

本文根据棋盘格图像像素点关于方格交点对称、相对于方格交线黑白反对称这一根本特征,推导出 SAS 检测算法。然后将该算法与多项式变换技术以及双线性插值技术相结合,提出了数字相机图像非线性畸变的精确校正方法。校正后,图像横向坐标误差均值由校正前的 12.72 个像素降为 0.43 个像素,相对误差由校正前的 0.56%降为 0.019%;纵向坐标误差均值由校正前的 11.08 个像素降为 0.36 个像素,相对误差由校正前的 0.65%降为 0.021%。

该算法已经成功应用到大幅面图像拼接系统的畸变图像校正中,显著提高了拼接质量。

camera calibration; a general algorithm, singularities, applications [C]. *Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, Fort Collins, IEEE Press*, 1999:432-437.

[3] 林国余,张为公. 一种大场景下的棋盘靶标自动定位算法[J]. 工业仪表与自动化装置,2008(3):84-88.

LIN G Y, ZHANG W G. A kind of automatic

- chessboard target location algorithm used in a wide background environment [J]. *Instrument Science & Engineering*, 2008(3):84-88. (in Chinese)
- [4] 杨必武, 郭晓松. 摄像机镜头非线性畸变校正方法综述[J]. 中国图象图形学报, 2005, 10(3):269-274. YANG B W, GUO X S. Overview of nonlinear distortion correction of camera lens [J]. *Journal of Image and Graphics*, 2005, 10(3):269-274. (in Chinese)
- [5] 王巍, 唐一平, 任娟莉, 等. 一种改进的 Harris 角点提取算法[J]. 光学精密工程, 2008, 16(10):1995-2001. WANG W, TANG Y P, REN J L, *et al.*. An improved algorithm for Harris corner detection [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(10):1995-2001. (in Chinese)
- [6] 付朝霞, 韩焱, 管波. 基于角点检测的图像镶嵌算法[J]. 光电工程, 2007, 34(5):126-130. FU Z X, HAN Y, ZAN B. Method of image mosaic based on corner detection[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2007, 34(5):126-130. (in Chinese)
- [7] 余家祥, 萧德云, 姜鲁东. 应用 Hough 变换的炮射航空摄像机外参数估计方法[J]. 光学精密工程, 2007, 15(8):1269-1274. YU J X, XIAO D Y, JIANG L D. Exterior parameter estimation for aerial camera based on Hough transform [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 15(8):1269-1274. (in Chinese)
- [8] 刘阳, 王福利, 常玉清, 等. 黑白棋盘格角点检测算法[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2007, 28(8):1090-1093. LIU Y, WANG F L, CHANG Y Q, *et al.*. Black and white X-corner detection algorithm [J]. *Journal of Northeastern University (Natural Science)*, 2007, 28(8):1090-1093. (in Chinese)
- [9] 刘阳成, 朱枫. 一种新的棋盘格图像角点检测算法[J]. 中国图象图形学报, 2006, 11(5):656-660. LIU Y C, ZHU F L. A new algorithm for X-corner detection [J]. *Journal of Image and Graphics*, 2006, 11(5):656-660. (in Chinese)
- [10] 廖士中, 高培焕, 苏艺, 等. 一种光学镜头摄像机图像几何畸变的修正方法[J]. 中国图象图形学报, 2000, 5(7):593-596. LIAO S Z, GAO P H, SU Y, *et al.*. A geometric rectification method for lens camera [J]. *Journal of Image and Graphics*, 2000, 5(7):593-596. (in Chinese)
- [11] 王富治, 杨平, 黄大贵. 基于相机定标与亚像素算法的二维图像测量系统[J]. 计算机测量与控制, 2005, 13(12):1325-1328. WANG F Z, YANG P, HUANG D G. Two-dimensional image measurement system based on camera calibration and sub-pixel algorithm [J]. *Computer Measurement & Control*, 2005, 13(12):1325-1328. (in Chinese)

作者简介:



兰海滨(1975—),男,黑龙江漠河人,博士研究生,高级工程师,1997年、2000年于国防科技大学分别获学士和硕士学位,现为北京理工大学在读博士,主要从事信号与信息处理和图像拼接等方面的研究。E-mail: shore_blue@163.com



王平(1976—),男,湖北荆州人,博士,副教授,1997年、2000年、2003年于国防科技大学分别获学士、硕士和博士学位,主要研究方向为图像处理、目标识别和智能信号处理等方面的研究。E-mail: wangping@nudt.edu.cn



龙腾(1968—),男,博士,教授,博士生导师,1989年于中国科学技术大学获学士学位,1991年、1995年于北京理工大学分别获硕士和博士学位,现为北京理工大学雷达技术研究所所长,主要从事高速实时信号处理、新体制雷达系统与信息处理和航天信息实时处理等方面的研究。E-mail: longteng@bit.edu.cn