

基于无人机影像的畸变校正研究

唐敏 李永树 王生明

(西南交通大学地理信息工程中心, 四川 成都 610031)

摘要 由于无人机体积小、重量轻,其在空中受到风力的影响较大,所拍摄的影像存在的畸变也比较大,因此,在影像匹配处理前进行畸变校正具有实际意义。利用 Canny 算子进行边缘提取,并依据 Hough 变换理论获得大量地物轮廓线;再利用以步长逼近获得像点真实坐标的反解算模型的方法来辅助校正并检测校正结果。同时,针对地物轮廓线之间存在平行、垂直等特点,提出了四边形连接法、平行线约束法等校正方法,并通过实验证明取得的结果令人满意。

关键词 成像系统; 无人机影像; 校正; 轮廓线; 反解算

中图分类号 TP391 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/LOP50.061102

Research of Distortion Correction Based on UAV Images

Tang Min Li Yongshu Wang Shengming

(GIS Engineering Center of Southwest Jiaotong University, Chengdu, Sichuan 610031, China)

Abstract Due to the characteristics of small size and light weight of unmanned aerial vehicles (UAVs), wind has great influence on UAV flight, and images photographed by UAV suffer large distortion. Therefore, it has practical significance to correct the distortions before image matching. We focus on extracting the edge contour based on Canny operator and obtain the large number of surface features contour using Hough transform theory. Then step approximation is used to obtain inverse solution model of the real image pixel coordinates, which is used to correct the results. Meanwhile, on the foundation of parallel and perpendicular terrain contour lines, the correction methods of quadrilateral connection and parallel lines constraint are proposed. It is found through experiments that the achieved results are satisfactory.

Key words imaging systems; unmanned aerial vehicle image; correction; contour; inverse solution

OCIS codes 110.2960; 110.4155; 100.2000

1 引言

目前,无人机作为快速、便捷地获取高分辨率遥感影像的工具,逐渐广泛地应用到多个领域。尤其在我国西部地区受天气影响大,利用卫星和有人飞机为平台的航空航天测量很难拍摄到符合要求的高分辨影像,同时周期长、成本高,无人机逐步成为快速获取影像的重要手段^[1~4]。由于无人机的体积小、重量轻,在空中易受到风力的影响,同时由于每次拍摄都是通过多条航带完成的,相邻航带间受到的侧向风力影响正好相反,这就给后面相邻航带间的影像处理和匹配带来很大困难,有时甚至很难找到匹配点对。因此,在进行影像匹配前对影像进行适当的畸变校正很有必要。

在处理影像畸变方面,很多学者进行了深入研究并取得了一定的成果。唐正宗等^[5~7]在数字图像几何畸变自动校正算法的研究与实现中,利用连接点法进行畸变校正,主要研究对象是梯形畸变。杜召彬等^[8]在基于灭点的透视校正和空间定位的方法研究中,利用灭点理论和双线性插值方法研究了一种图像透视投影的校正方法,研究对象是比较单一的规则图像校正。李立春^[9]在基于无人机序列成像的地形重建及其在导

收稿日期: 2013-02-24; **收到修改稿日期**: 2013-04-04; **网络出版日期**: 2013-05-28

基金项目: “十一五”国家科技支撑计划重大项目(2006BAJ05A13)资助课题。

作者简介: 唐敏(1986—),男,博士研究生,主要从事遥感影像处理和模式识别等方面的研究。

E-mail: tangmin0553@sina.com

导师简介: 李永树(1957—),男,教授,博士生导师,主要从事 3S 集成及遥感影像处理等方面的研究。

E-mail: yshli@home.swjtu.edu.cn

本文电子版彩色效果请详见中国光学期刊网 www.opticsjournal.net

航中的应用研究中,提出了极线局部校正匹配算法,主要针对匹配而非影像校正。本文基于大部分城镇无人机影像分辨率高、影像中存在很多房屋、道路等规则的矩形或部分边缘线平行的特点,利用 Canny 算子对其进行边缘提取,然后依据 Hough 变换理论获得大量地物的轮廓线,利用这些轮廓线存在平行及垂直等特点,采用四边形连接法、平行线约束法对它们进行校正,同时通过反解算模型计算像点的真实坐标进行辅助校正并检测校正结果,最后的实验结果表明在点位误差及肉眼观察方面,校正后的影像比原始影像有很大改善。

2 边缘提取和地物轮廓线提取

2.1 Canny 算子提取边缘

边缘提取算法很多,有微分算子法、尺度不变特征变换(SIFT)算子法、拉普拉斯高斯算子法、Canny 算子法等。它们各有各的优缺点,Canny 算子法能够更好地检测边缘部分的特征,比较符合本文的思路,能较好地提取出房屋道路等建筑物的边缘特征,故采用 Canny 算子法。

Canny 算子检测边缘的方法是寻找图像梯度的局部极大值,梯度是用高斯滤波器的倒数计算的。对于 Canny 边缘检测算子应该满足 3 个判断准则,即信噪比、定位精度准则和单边缘响应准则^[10~12]。

Canny 算子检测边缘的具体步骤如下。

1) 过滤噪声:把原始数据与高斯平滑模板做卷积。如果直接处理原始对象,任何方法效果都不太明显,处理后的结果会不清楚。图像上独立的一个噪声点经过卷积平滑处理后,影响会大大降低。

2) 找出亮度梯度:Canny 算子利用 4 个模板来检测水平、垂直以及对角线方向的边界。因为一个边界可能会指向好几个方向。4 个模板与原始图像做卷积运算后会保留下来,将它们记为每个点上的最大值以及产生的边界方向,这样处理后就得到了各点的亮度梯度分布和亮度梯度方向。

3) 跟踪边缘:高亮度梯度一般情况下是边缘,然而不存在一个用来明确亮度梯度是边缘的标准值,因此 Canny 算子利用滞后阈值的处理方式^[10],完成边缘的跟踪。

4) 定位:根据第 3)步边缘跟踪的结果,精确确定边缘的位置。

具体的流程和提取结果分别如图 1 和图 2(b)所示。

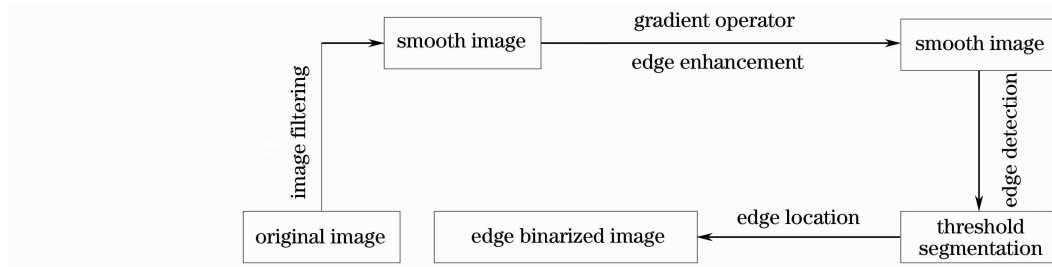


图 1 边缘检测算法的基本步骤

Fig. 1 Basic steps of edge detection algorithm

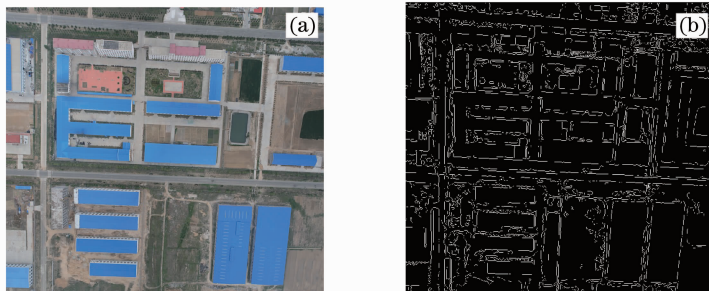


图 2 原始图像与 Canny 算子检测结果。(a) 原始影像;(b) 边缘提取结果

Fig. 2 Original image and the results of Canny operator detection. (a) Original image; (b) edge extraction results

2.2 地物轮廓线提取

如图 3(a)所示,过点 (x_i, y_i) 的线有无数条,这些线可用直线 $y_i = ax_i + b$ 表示,将该公式写为 $b =$

$-x_i a + y_i$ (以便将其变为 ab 参数空间坐标系)。此外,第二个点 (x_j, y_j) 也有这样一条在参数空间上与它相关的直线,这条直线和与 (x_i, y_i) 相关的直线相交于点 (a', b') ,其中 a' 和 b' 分别是 XY 平面上包含点 (x_i, y_i) 和 (x_j, y_j) 的直线的斜率和截距。事实上,图 3(a)中这条直线上的所有点都会在参数空间中相交于点 (a', b') ^[12],如图 3(b)所示。

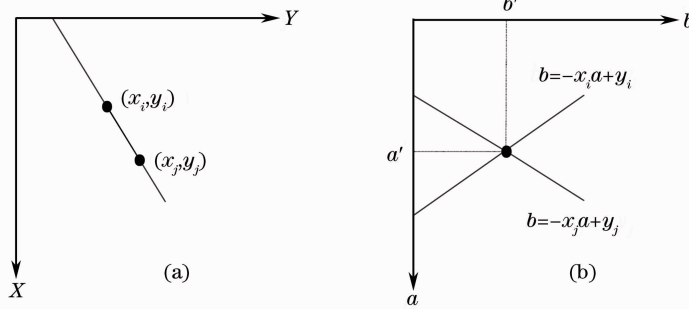


图 3 XY 平面和 ab 参数平面。(a) XY 平面坐标系;(b) ab 参数平面坐标系

Fig. 3 XY plane and ab parameter plane. (a) XY plane coordinate system; (b) ab parameter plane coordinate system

在参数空间直线中,当 a 接近无限大时(直线的斜率接近垂直方向),在参数平面上就会出现无法显示的问题。解决该困难的方法是使用直线的标准表示法:

$$X \cos \theta + Y \sin \theta = \rho. \quad (1)$$

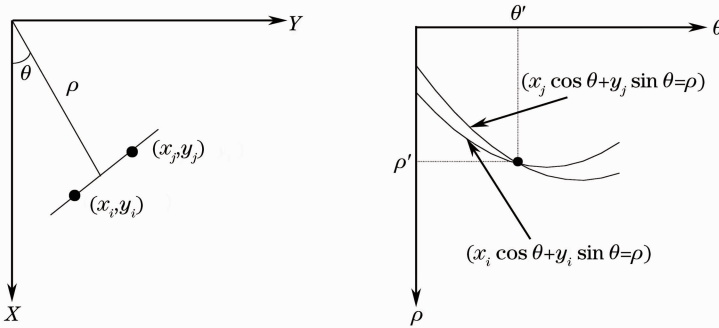


图 4 (a) 直线的 (ρ, θ) 参数化及(b) $\rho\theta$ 平面上的正弦曲线

Fig. 4 (a) Parameterization of line (ρ, θ) and (b) a sine curve on the $\rho\theta$ plane

图 4(a)给出 ρ 和 θ 的几何解释,对于水平线来说 $\theta = 0^\circ$, ρ 为正的 X 截距。同样对于垂直线而言, $\theta = 90^\circ$ 时, ρ 为正的 Y 截距。图 4(b) 中的每一条正弦曲线表示通过特定点 (x_i, y_i) 的一族直线。交点 (ρ', θ') 对应于通过 (x_i, y_i) 和 (x_j, y_j) 的直线,可以通过控制 ρ 和 θ 的值来寻找需要的直线。这样就可以在 Canny 算子检测结果的基础上提取出地物的轮廓线,如图 5 所示。为了能获得较多的轮廓线,本文采用先旋转 33° 的方法解决 a 值过大的问题,从而生成更多的轮廓线,图中的黄色点为轮廓线的起始点,红色点为终止点,可以获得它们的像素坐标,从中选取部分点线为后续校正所用。

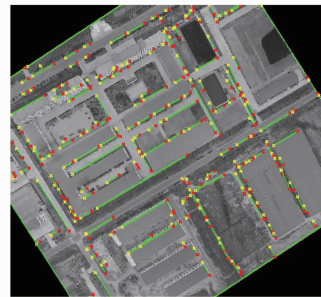


图 5 旋转 33° 提取的影像中地物的轮廓线
Fig. 5 Extracted contour of image feature after rotating 33°

3 影像畸变校正

3.1 反解算模型

为了计算出像点的真实坐标,以完成像点和物点转换,可以通过实测物方坐标做出校正,达到更好的效果。本文利用物方经纬度与像平面坐标映射几何关系的迭代计算,确定反解算模型。如图 6 所示: M 点为

某一已知像点, 设其坐标为 (r, c) 。Q 点为与 M 点对应的待求物方点, P_n 为地面迭代计算点, A_n 为其对应的像方点。Q 点是由某一设定的物方初始起算点 $P_0(x_0, y_0, z_0)$ 以步进迭代方式平移得到的。其中, 经纬方向上的参考步进矢量分别定义为 $\boldsymbol{\varepsilon}$ 和 $\boldsymbol{\eta}$, 其长度分别为 $\alpha = |\boldsymbol{\varepsilon}|$ 和 $\beta = |\boldsymbol{\eta}|$, 称为经纬方向上的参考步进长度。设 A_0 点为与 P_0 点对应的像方点, $\boldsymbol{\mu}$ 和 $\boldsymbol{\nu}$ 分别为与 $\boldsymbol{\varepsilon}$ 和 $\boldsymbol{\eta}$ 对应的像方空间的参考最小平移矢量。通过以上分析可以看出, $A_0(P_0)$ 点可以被看作 $M(Q)$ 点在像方(物方)的初始偏移点。在反解模型中, 从 $A_0(P_0)$ 点到 $M(Q)$ 点的平移是通过迭代逼近过程完成的。在第 n 次迭代过程中, 连接 A_{n-1} 点和 M 点构造 $\mathbf{A}_{n-1}\mathbf{M}$ 向量, 将该向量分别投影在 $\boldsymbol{\mu}$ 和 $\boldsymbol{\nu}$ 轴上, 得到的投影向量分别为 $\mathbf{a}_n(= \mathbf{A}_{n-1}\mathbf{B})$ 和 $\mathbf{b}_n(= \mathbf{A}_{n-1}\mathbf{C})$, 其中 B, C 点为 M 点在 $\boldsymbol{\mu}$ 和 $\boldsymbol{\nu}$ 轴上的投影点。

首先计算像方像对偏移量, 据此利用下式确定物方 $P_{n-1}(X_{n-1}, Y_{n-1}, Z)$ 点平移至 $P_n(X_n, Y_n, Z)$ 点的平移量 (dX_n, dY_n) ,

$$\begin{cases} dX_n = \alpha \times \frac{|\mathbf{a}_n|}{|\boldsymbol{\nu}|} \\ dY_n = \beta \times \frac{|\mathbf{b}_n|}{|\boldsymbol{\mu}|} \end{cases} \quad (2)$$

对 P_n 点求取与 P_n 点对应的像方点 A_n 的坐标 (r_n, c_n) :

$$\begin{cases} r_n = \frac{p_1(X_n, Y_n, Z)}{p_2(X_n, Y_n, Z)} \\ c_n = \frac{p_3(X_n, Y_n, Z)}{p_4(X_n, Y_n, Z)} \end{cases}, \quad (3)$$

式中 (r_n, c_n) 和 (X_n, Y_n, Z) 采用像方和地面坐标, $p_i (i = 1, 2, 3, 4)$ 为有理多项式。然后计算 A_n 点与 M 点的偏差 (d_r, d_c) :

$$\begin{cases} d_r = r - r_n \\ d_c = c - c_n \end{cases} \quad (4)$$

如果 d_r, d_c 小于预先设定的阈值, 则迭代结束, 并设定 P_n 点为欲求的地面点, 否则继续迭代过程直到找到满足条件的地面点 Q。这样就可以找到对应的物方点和像方点, 利用真实的地理坐标来约束像方点进行校正。

3.2 平行线校正

如图 7 所示, 四边形 $OWLH$ 代表原始影像, $A'C'$ 和 $B'D'$ 是应该平行的建筑物轮廓线, 首先根据 3.1 节中像点和物点的反解算模型计算出 A' 点和 B' 点应该的像素坐标。为了便于计算, 首先对影像以像主点为圆心进行一定的旋转变换, 使得边 $A'B'$ 平行于 X 轴, 此时, 边 $A'C'$ 和边 $B'D'$ 则与 X 轴成一定的夹角。旋转校正按照下面的方式进行。

设 $(x_1, y_1), (x_2, y_2)$ 分别为旋转前和旋转后点的坐标, (x_e, y_e) 为像主点坐标, d 为点 (x_1, y_1) 到像主点的距离, θ 是点 (x_1, y_1) 与像主点的连线相对于图像 X 方向的倾斜角度。则得到旋转后的坐标为:

$$\begin{cases} x_2 = x_e + d \cos \theta \\ y_2 = y_e + d \sin \theta \end{cases} \quad (5)$$

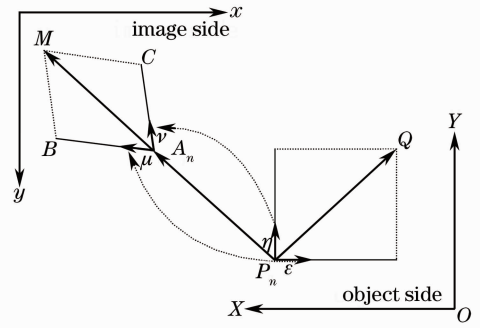


图 6 物方像方坐标转换示意图

Fig. 6 Coordinate transformation diagram between object side and image side

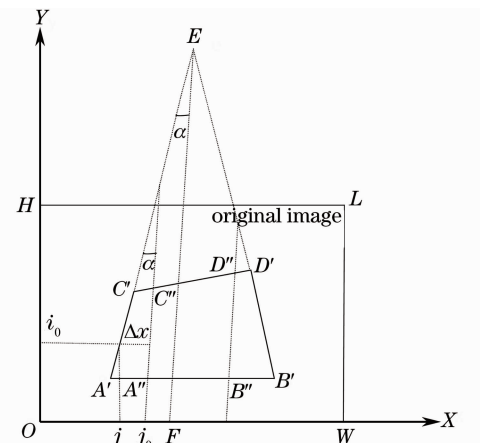


图 7 X 方向校正示意图

Fig. 7 X direction correction diagram

根据 A' 、 B' 、 C' 、 D' 点的图像坐标,可以求出透视投影的灭点 E 的坐标 (m_x, m_y) ,然后根据透视缩小效应,对其进行反运算,从而进行 X 方向的校正。如图 7 所示,在 X 方向的校正中,可以选择图像高度 $(0 \sim H - 1, H$ 为影像高度),任意一条水平线的宽度作为标准宽度 (W) 。如图 6 所示,将边 $A'C'$ 校正为与 X 轴成一定夹角的线 $A''C''$,可以通过求边 $A'C'$ 与过灭点 $E(m_x, m_y)$ 与 X 轴的成同样夹角的边 EF 的夹角 α ,根据三角形相似性,求出边 $A'C'$ 在 i 高度的 X 方向的偏移量 Δx_i ,那么原图像中的点 (j, i) 在校正后的图像坐标为 $(j \pm \Delta x_i, i)$,进行 X 方向校正时在 Y 方向的坐标保持不变。在 X 方向校正的公式为

$$\begin{cases} i_0 = i \\ j_0 = j + [(H - i) \times (m_x - j) / (m_y - i)] \end{cases} \quad (6)$$

式中 (j, i) 是透视投影图像的坐标点, (j_0, i_0) 是校正后图像的坐标点, H 是图像的高度, $e(m_x, m_y)$ 是灭点坐标。同理可以进行 Y 方向的校正。

3.3 四边形连接法校正

此方法的关键在于四边形四个连接点的选择,选择好 4 个合适的输入点,并确定相应的输出点。本文是基于无人机影像的畸变校正,故选择 4 个输入点的依据为:连接点必须在能检测到的畸变轮廓上,最好能均匀分布在图像中,同时连接点坐标应满足提取到的直线方程。

由于无人机影像包含的图像信息较多,提取的轮廓线也很多,很难选择到均匀分布到全图的标准四边形,故可选择影像左上角及右下角两个地方的两个四边形,以解决校正不均的问题。此处只列举一个四边形的校正过程,影像总行数为 (694×753) ,选择影像右下角的房屋四个定点为连接点。为了计算方便,首先对原始影像进行旋转处理,使得四边形的底边与平行于 X 轴,像素坐标(输入点坐标)分别为: $(600, 477)$, $(675, 480)$, $(583, 658)$, $(657, 663)$ 。

根据输出点与输入点的几何位置上的对应关系,如图 8 所示,计算相应的输出点的坐标。首先利用 3.1 节的反解算模型,计算出需要校正的房屋 4 个角点的像方坐标与物方坐标,根据真实的物方坐标旋转影像,使得房屋的边界线垂直或平行于像方的 X 轴,这样就可采用以下方法:输入点的第一点,即左下方输入点固定不动,第二点与第一点距离保持不变,但行坐标保持一致。然后,第三点与第一点的距离保持不变,列坐标改变,与第一点的列坐标一致,使第三点和第一点在同一列;最后,第四点的行坐标与第三点相同,列坐标与第二点相同。计算步骤为:

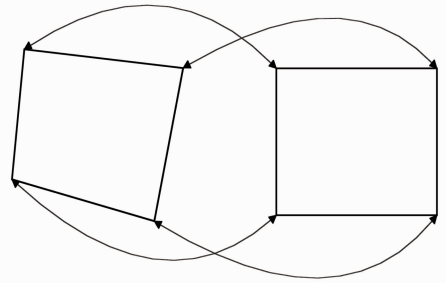


图 8 四边形连接法校正

Fig. 8 Correction by quadrilateral connection method

- 1) 与输入点第一点对应的输出点位置相同,即坐标相同;
- 2) 与输入点第二点对应的输出点,行坐标与输入点第一点行坐标相同,列坐标保持不变;
- 3) 输入点第三点行坐标不变,列坐标与输入点第一点相同;
- 4) 输入点第四点行坐标与输入点第三点相同,列坐标与输入点第二点相同。

最后得到的四个输出点的像素坐标分别为: $(593, 460)$, $(661, 460)$, $(593, 650)$, $(661, 650)$ 。

3.4 灰度插值重采样

利用平行线法和四边形连接法校正好坐标位置,再使用双线性内插的插值方法对原图像进行校正^[13]。采用输入图像中 $2 \text{ pixel} \times 2 \text{ pixel}$ 邻域采样点的平均值,根据某像素周围 4 个像素的灰度值在水平和垂直两个方向上对其插值,最后生成校正影像如图 9(b)所示。

4 结 论

合理利用无人机影像中部分地物轮廓线平行、垂直等特点,以步长逼近法获得像点真实坐标的反解算模型来辅助校正并检测校正结果,同时利用四边形连接法、平行线约束法对它们进行校正,能够获得较好的校正效果。由于本文方法比现行方法增加了对物方的参考,且灵活地应用了平行线约束法和四边形连接法,因



图9 校正前后影像。(a) 原始影像；(b) 校正影像

Fig.9 Images before and after correction. (a) Original image; (b) corrected image

此校正结果更接近于真实的物方,有利于提高后续影像匹配及制作正射影像的精度。

参 考 文 献

- Lu Heng, Li Yongshu, He Jing *et al.*. Capture and processing of low altitude remote sensing images by UAV[J]. *Engineering of Surveying and Mapping*, 2011, **20**(1): 51~54
- 鲁 恒, 李永树, 何 敬 等. 无人机低空遥感影像数据的获取与处理[J]. 测绘工程, 2011, **20**(1): 51~54
- Wang Conghua. Image Data Processing Methods of UAV Low-Altitude Remote Sensing[D]. Qingdao: Shandong University of Science and Technology, 2006
- 王聪华. 无人飞行器低空遥感影像数据处理方法[D]. 青岛: 山东科技大学, 2006
- He Jing, LiYongshu, Lu Heng. *Experimental study on UAV image stitching error*[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2011, **48**(12): 121001
- 何 敬, 李永树, 鲁 恒. 无人机影像拼接误差实验研究[J]. 激光与光电子学进展, 2011, **48**(12): 121001
- Gong Adu, He Xiaoying, Lei Tianjie *et al.*. *Fuse image processing method of UAV without control data*[J]. *J. Geo-Information Science*, 2010, **12**(2): 254~259
- 宫阿都, 何孝莹, 雷添杰 等. 无控制点数据的无人机影像快速处理[J]. 地球信息科学学报, 2010, **12**(2): 254~259
- Tang Zhengzong, Liang Jin, Guo Cheng. Slant-axis digital image correlation method based on photogrammetric correction [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(11): 1112007
- 唐正宗, 梁 晋, 郭 成. 基于摄影测量校正的斜光轴数字图像相关方法[J]. 光学学报, 2011, **31**(11): 1112007
- Zhang Sen. The Study and Implementation of Geometrical Distortion auto Correcting Algorithm of Digital Image[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2007
- 张 森. 数字图像几何畸变自动校正算法的研究与实现[D]. 上海: 上海交通大学, 2007
- Gao Junchai, Lei Zhiyong, Wang Zemin. Image correction of linear array camera[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2010, **47**(9): 091501
- 高俊钊, 雷志勇, 王泽民. 线阵相机的图像校正[J]. 激光与光电子学进展, 2010, **47**(9): 091501
- Du Zhaobin, Zou Xiangdong. Perspective projection rectification and localization based on vanishing point[J]. *J. Sichuan University of Science & Engineering (Natural Science Edition)*, 2011, **24**(1): 105~107
- 杜召彬, 邹向东. 基于灭点的透视校正和空间定位的方法研究[J]. 四川理工学院学报(自然科学版), 2011, **24**(1): 105~107
- Li Lichun. 3D Reconstruction from Image Sequence of UAV and Its Application on Vision-Based Navigation [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2009
- 李立春. 基于无人机序列成像的地形重建及其在导航中的应用研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2009
- J. Canny. A computational approach to edge detection[J]. *IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1986, **8**(6): 679~698
- Paul Bao, Lei Zhang, Xiaolin Wu. Canny edge detection enhancement by scale multiplication[J]. *IEEE Trans. Patter Analysis and Machine Intelligence*, 2005, **27**(9): 1485~1490
- Rafael C. Gonzalez, Richard E. Woods, Steven L. Eddins. *Digital Image Processing Using MATLAB*[M]. New Delhi: Dorling Kindersley, 2004
- Mark R. Banham, Aggelos K. Katasaggelos. Digital image restoration[J]. *IEEE Signal Processing Magazine*, 1997, **14**(2): 24~41