

缺少控制点的无人机遥感影像几何畸变校正算法

李玉霞, 童玲, 刘异, 何磊

(电子科技大学自动化工程学院 成都 611731)

【摘要】针对无人机遥感影像存在多种几何畸变, 设计了缺少地面控制点的无人机遥感影像几何校正算法。在改进角点匹配算法的基础上, 提出以分块的方式提取图像中心区域角点作为基准控制点对另一幅图像进行几何校正的算法。该算法先以两个图像A和B中心点连线的中垂线划分重叠区域为 K_1 和 K_2 两块, 取图像A上靠近中心点的重叠区域块 K_{1A} 为基准, 选取 K_{1A} 内有效角点为基准控制点, 以图像B上对应的角点为待校正控制点; 然后求出基准控制点和待校正控制点间的多项式对应关系式, 校正重叠区域块 K_{1B} 上的每个像素, 以类似的方法校正另一块重叠区域 K_2 。实验结果表明, 通过算法校正后的无人机遥感影像, 几何畸变残差明显减小。

关键词 几何畸变校正; 图像处理; 地面控制点; 无人机遥感

中图分类号 TP391

文献标志码 A

doi:10.3969/j.issn.1001-0548.2013.03.015

Geometric Correction Algorithm for Unmanned Aerial Vehicle Remote Sensing Image without Ground Control Points

LI Yu-xia, TONG Ling, LIU Yi, and HE Lei

(School of Automation Engineering, University of Electronic Science and Technology of China Chengdu 611731)

Abstract Focused on the numerical geometric distortions of the unmanned aerial vehicle (UAV) remote sensing image, the paper presents a design of a geometric correction algorithm without the ground control point (GCP). Based on the improved corner point matching algorithm, we develop an algorithm for extracting some corner points from the overlap area, which is near the center area of the images. The results demonstrate that the geometric root mean square error (RMSE) of the processed image can be reduced significantly by applying the proposed algorithm.

Key words geometric distortion correction; image processing; the ground control points; unmanned aerial vehicle (UAV) remote sensing

无人机低空遥感系统(UAV low altitude remote sensing system, UAVRS)广泛应用于资源勘探、灾害监测等各领域^[1]。但UAVRS影像数据具有幅角小、数量多、倾角大且无规律、畸变不规则等特点^[2]。同时, 在地理环境复杂或数据实时性要求较高的情况下, 不能及时获取实测的野外控制点(ground control points, GCPs), 就无法采用传统的多项式法对图像几何畸变校正^[3-5]。从而, 严重影响无人机遥感影像的信息提取质量, 制约无人机低空遥感信息面向灾害勘查的快速应用。为了无人机低空遥感数据的快速、有效应用, 需要解决缺少地面控制点情况下的无人机遥感影像几何畸变校正问题。

本文针对应急灾害情况下, 无人机能为灾害救援提供宏观、快速的数据支持, 但是无人机获取数据存在多种畸变, 所以, 如何在应急灾害缺少控制

点的情况下, 快速、有效地减少无人机遥感原始图像的畸变成为无人机数据处理的关键技术。根据在5.12汶川地震救灾过程中无人机数据应用经验, 为了在缺少控制点和外方位元素^[6-8]的情况下, 能够有效、实时地实现无人机低空遥感影像的几何畸变校正, 设计了缺少控制点情况下无人机图像的几何畸变校正算法, 并通过实验和应用验证, 该算法有效减少了无人机图像畸变, 提高了应急灾害情况下图像快速拼接的质量和速度。

1 实验对象分析与算法理论基础

本文影像数据在天气晴朗的情况下获取。遥感影像涵盖区域地形相对平坦, 以轮廓特征较明显的农田、道路和居民住房为主, 辐射失真相对较小, 可忽略。

收稿日期: 2011-11-14; 修回日期: 2012-06-18

基金项目: 国家自然科学基金(60841006, 41071222); 四川青年基金(09ZQ026-058); 中央高校基本科研业务费(ZYGX2010J085)

作者简介: 李玉霞(1979-), 女, 博士, 副教授, 主要从事数字图像处理、定量遥感及应用、GIS等方面的研究。

结合两幅图像间几何畸变和位置的特点, 由分析可知, 图像存在着旋转误差和由外方位元素不规则引起的畸变, 并且越靠近中心位置, 几何畸变越小。与此同时, 地面控制点不能用传统的校正方法校正影像, 若直接拼接, 将严重影响拼接质量和信息提取精度。

本文提出以分块方式提取图像中心区域角点作为基准控制点对另一幅图像进行几何畸变校正的算

法, 理论基础是无人机遥感图像的中心投影构像原理^[8]。中心投影的共线方程为无人机遥感影像的几何畸变校正和精度分析提供了理论基础。

2 几何畸变校正算法设计

根据无人机遥感图像成像原理, 在未知外方位元素情况下, 本文设计针对缺少控制点的几何畸变校正算法, 如图1所示, 主要包含消除旋转误差、控制点对有效提取和重叠区域几何校正3个方面。

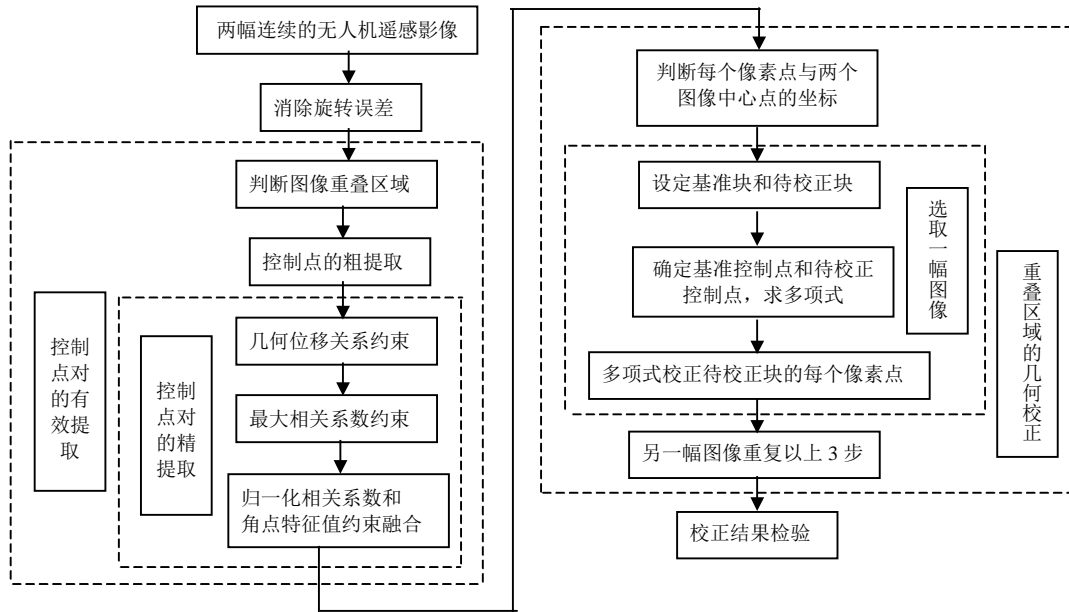


图1 算法流程图

2.1 旋转误差的消除

无人机飞行过程中存在一定的航线漂移, 飞行轨迹不规则, 两幅连续的图像间可能存在一定程度的旋转, 且旋转角度较小, 最大的旋转角度小于15°。针对这种情况, 本文采用相位相关法消除误差, 即采用其中一幅无人机图像作为基准, 以0.1°为步长旋转另外一幅无人机图像, 最大旋转15°。同时计算每旋转一次后两幅遥感图像相位相关的系数, 取该系数为最大时的角度作为旋转角度旋转该图像, 得到消除旋转误差后的两幅影像。

2.2 控制点对的提取

2.2.1 特征点的粗检测

角点具有受噪声和畸变影响相对较小的特性。目前成熟的角点检测算法较多, 其中Harris算法稳定性高, 对噪声不敏感, 且对L形状角点检测性高。改进后的Harris算法检测出的角点数量更多, 利于后续的匹配。本文采用改进的Harris算法^[9], 分别检测出两幅图像角点作为粗提取的控制点。

2.2.2 特征点对的精提取和配对

通过对控制点对的精提取和配对, 得到两幅图像正确匹配的控制点对, 计算出高精度的多项式校正关系, 比较常用的有RANSAC算法等^[10-12]。本文采用的归一化相关系数和角点特征值约束融合算法, 具有简单、准确度高, 适应性强等特点。但若角点数量较多时, 会出现计算量大、速度慢、误匹配增多等问题, 影响校正精度。针对上述问题, 本文在原算法中加入几何位移关系及最大相位相关系数的约束改进该算法, 提高算法的匹配精度。由于几何约束较其他方法简单易实现, 最大相关系数约束参数可以在上一步约束中提取, 减少了一定的计算量, 提高了算法的计算速度。具体步骤如下所述。

1) 特征值约束: 根据图像处理经验, 80%以上匹配角点的特征值之比落在0.1~10之间, 本文将两幅图像所有角点的特征值比较, 筛选出所有比值在0.1~10之间的角点对作为初步结果。特征值为:

$$T = g_x^2 + g_y^2 - 0.04(g_x^2 g_y^2 - g_{xy}^2) \quad (1)$$

式中, g_x^2 是x方向梯度平方与经过高斯滤波后图像

卷积的结果； g_y^2 是y方向梯度平方与经过高斯滤波后图像卷积的结果； g_{xy}^2 是x和y方向梯度乘积平方与经过高斯滤波后图像卷积的结果。

2) 归一化相关系数约束：计算所有角点对间的

$$p = \frac{\sum_{i=-3}^3 \sum_{j=-3}^3 [I(u+i, v+j) - \overline{I(u, v)}] [I(u'+i, v'+j) - \overline{I(u', v')}]}{\sqrt{\sum_{i=-3}^3 \sum_{j=-3}^3 [I(u+i, v+j) - \overline{I(u, v)}]^2 \sum_{i=-3}^3 \sum_{j=-3}^3 [I(u'+i, v'+j) - \overline{I(u', v')}]^2}} \quad (2)$$

式中，运算窗口大小为 7×7 ；相应窗口内灰度的平均值为：

$$\overline{I(u, v)} = \frac{\sum_{i=-3}^3 \sum_{j=-3}^3 I(u+i, v+j)}{7 \times 7} \quad (3)$$

3) 几何位移关系约束：由于图像的旋转误差已消除，几何畸变大小不应大于图像以中心为圆点、扭曲 5° 时的畸变。因此，设图像大小为 $w \times h$ (宽 \times 高)，删除在x和y方向上两点之间位移值超过真实位移值正负 $w \times 5/180$ 和正负 $h \times 5/180$ 的点；基于图像大小，对于同一点的像素坐标，删除x和y方向上畸变位移差值超过10的点。具体约束公式为：

$$\begin{cases} x_0 - \left(h \times \frac{5}{180} \right) \leq |u-x| \leq x_0 + \left(h \times \frac{5}{180} \right) \\ y_0 - \left(w \times \frac{5}{180} \right) \leq |v-y| \leq y_0 + \left(w \times \frac{5}{180} \right) \\ -10 \leq (|v-y| - y_0) - (|u-x| - x_0) \leq 10 \end{cases} \quad (4)$$

式中， x_0 和 y_0 分别是x和y方向上真实位移值； (u, v) 和 (x, y) 分别是一对角点的两个坐标值。

4) 最大相关系数约束：由步骤2)可知，如果角点对匹配正确，那么灰度归一化系数为最大值，并且系数值相同。所以，对图像上的所有角点提取其灰度相关系数为最大值的点对作为控制点对组，然后提取点对组中的共有点对作为最后精匹配的控制点对。

2.2.3 重叠区域的几何畸变校正

由无人机非量测相机的成像机理可知，无人机遥感图像存在因不同因素产生的几何畸变，并且越靠近中心位置，几何畸变越小。针对该特点，本文采用重叠区域分块的方式求取图像上的相应系数，然后进行配准和校正。具体分为6个步骤：

1) 对控制点分组，如图2所示，对两幅无人机图像A和B，图像的中心点分别为 o_A 和 o_B 。 p_1 的坐标为 (x_1, y_1) ， p_2 的坐标为 (x_2, y_2) ，计算两坐标点平均坐

标 p_0 为：归一化相关系数，若匹配正确的角点对，则灰度归一化相关系数为1。本文选取灰度归一化相关系数 p 大于0.8的角点对为被选角点对。两点之间相关性计算为：

$$(x_0, y_0) = \left(\frac{1}{2}(x_1 + x_2), \frac{1}{2}(y_1 + y_2) \right) \quad (5)$$

设 o_A 、 o_B 与 p_0 之间的距离分别为 d_1 、 d_2 ，判断 d_1 、 d_2 的大小，若 d_1 小于 d_2 ，则该像素点属于图像A的数组a，若 d_1 大于 d_2 ，则该像素点属于图像B的数组b。由此可知，数组a中的像素点距图像中心点 o_A 更近，而数组b中的像素点与中心点 o_B 的距离更小。如图2，根据上述判断方法可知， (p_1, p_2) 属于数组a的控制点对。

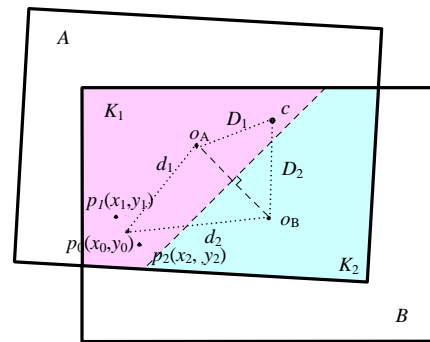


图2 无人机图像重叠区域控制点分布示意图

2) 通过判断 d_1 、 d_2 的大小可知，图像上所有控制点对均由图像A和图像B上的两组角点构成。假设属于A图像的角点作为基准控制点(输出数据)，B图像的角点作为待校正的控制点(输入数据)，求取其对应的多项式系数。如图2所示， p_1 为A图像上数据点， p_2 为B图像的数据点，则 p_1 和 p_2 分别为输出和输入数据点。

3) 重叠区域的分块方法。

① 首先检测图像A和图像B重叠区域的任意像素点与图像中心点 o_A 、 o_B 的距离，分别设为 D_1 、 D_2 。若 D_1 小于 D_2 ，则该像素点属于块 K_1 ，如图2中的c像素点；若 D_1 大于 D_2 则该像素点属于块 K_2 。由几何关系可知，块 K_1 和 K_2 为连续数据集组成的图像块。

② 如图2所示，根据几何原理可知，以两个中心点 o_A 、 o_B 连线的中垂线为边界，划分图像重叠区

域为两块, 则中垂直线以上部分的所有像素点距离中心点 o_A 较近, 垂直线以下图像上的像素点距离 o_B 较近。本文把在垂直线上的像素点划分为垂直线以下的那块图像。

4) 根据上述可知, 将图像A上块 K_{1A} 作为基准块, 图像B上块 K_{1B} 作为待校正块。如图3所示, 根据步骤2)的方法求取多项式系数, 进而校正图像B上块 K_{1B} 的所有像素点, 得到校正后影像 B^* 。

5) 同理, 重复步骤2)~步骤4), 将图2中的图像B的 K_{2B} 为基准块, 对图像A上的 K_{2A} 块进行校正, 得到校正后的影像 A^* 。

6) 采用仿射变换和插值拟合的融合方法将校正后的图像 A^* 和 B^* 融合, 得到最终校正后的图像AB。

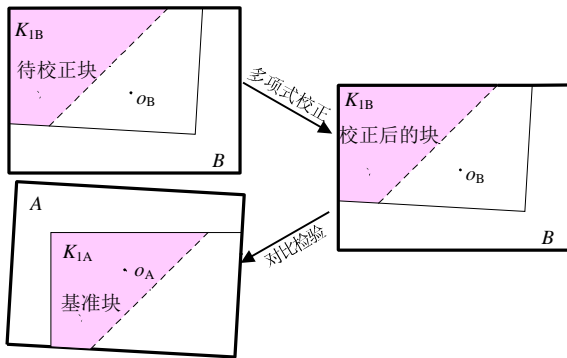


图3 基准图与待校正图分块示意图

3 缺少地面控制点的实验及分析

为了验证本文算法的有效性, 采用由普通非量测型数码相机拍摄的无人机遥感影像作为数据源。数据获取时天气晴朗, 辐射失真较小。实验区地形平坦, 地物特征轮廓明显。基于Matlab7.0对实验区数据进行了基于地面实测控制点的精度分析、拼接重合度检验、随机采样检验, 通过分析上述实验结果, 证明本文算法的有效性。

3.1 基于地面实测控制点的精度分析

为检验缺少控制点算法的校正结果, 首先采用基于野外实测的地面控制点, 利用多项式校正拟合的方法对同一地区影像进行几何校正, 再将二者处理结果加以对比, 对该文算法的精度评价。

实验数据采用邛崃平乐镇的无人机遥感图像和野外实测控制点。首先基于野外实测控制点利用ENVI软件对原始影像进行几何校正; 其次利用校正后影像选取9个分布均匀的明显地物点, 读取其像素坐标值, 作为采样点评定校正的精度; 然后从原始影像和无控制点几何校正后的影像中读取其相应坐

标值, 经过对9个采样点残差计算得到如表1、表2所示的精度检验结果。

表1 平乐镇中心区域几何校正随机取样检验 PIX

采样点	原始影像		实测控制点校正后影像		x 位移	y 位移	RMS
	x 坐标	y 坐标	x 坐标	y 坐标			
1	857	529	907	573	-50	-44	66.6
2	625	972	648	990	-23	-18	29.2
3	468	2043	496	1992	-28	51	58.2
4	2201	551	2178	571	23	-20	30.5
5	2009	1153	1995	1169	14	-16	21.3
6	1553	1635	1537	1613	16	22	27.2
7	3165	743	3093	722	72	21	75.0
8	3041	1263	2977	1194	64	69	94.1
9	3257	1937	3182	1839	75	98	123.4

表2 平乐镇中心区域几何校正随机取样检验 PIX

采样点	无GCP校正影像		实测控制点校正后影像		x 位移	y 位移	RMS
	x 坐标	y 坐标	x 坐标	y 坐标			
1	938	572	907	573	31	-1	31.0
2	664	1000	648	990	16	10	18.9
3	470	1999	496	1992	-26	7	26.9
4	2175	576	2178	571	-3	5	5.8
5	1999	1160	1995	1169	4	-9	9.9
6	1539	1603	1537	1613	2	-10	10.2
7	3061	727	3093	722	-32	5	32.4
8	2965	1191	2977	1194	-12	-3	12.4
9	3189	1846	3182	1839	7	7	9.9

由表1、表2可以看出:

1) 所有采样点经该文算法校正后影像坐标更接近与基于实测控制点校正后影像坐标, 其x、y方向误差及RMS同比更小, 说明经过本文算法校正后有效减少了无人机遥感影像几何畸变。

2) 第4、5、6采样点的误差基本在10个像元以内, 均位于影像的中部, 距像主点 $O(1\ 701.257\ 0, 1\ 142.969\ 9)$ 较近; 其他6个点则分布在影像的两侧, 与像主点的距离较远, 它们的误差普遍较大。

3.2 拼接重合度检验

本文对比分析了图像拼接后地物重合度的情况, 从另外一个方面验证算法的有效性。图4和图5表示将校正前、后的两幅图像手动拼接后的图像, 可直观看出图像连接处的接缝效果。

图6~图8分别为校正前和校正后的拼接影像用方框截取的放大图(图4和图5中的标示数字1、2、3所示), 其中虚线为基准物体的轮廓。在相同分辨率条件下, 通过图斑1、图斑2与基准物体轮廓对比知, 校正后影像边缘和基准轮廓重叠较好, 而校正前则有很大的溢出; 通过图斑3的放大图可知, 校正前物体边缘参差不齐, 有大幅度的错位现象, 校正后物体边缘较平滑, 纹路衔接较好。因此, 其影像间的

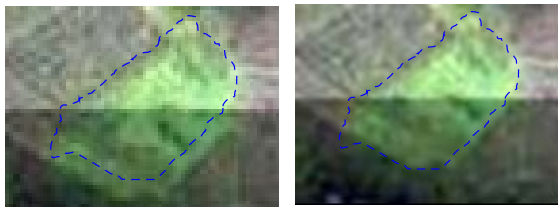
拼接质量总体较好，个别部分仍有不可避免的小幅度错位。但与校正前影像的手动拼接结果相比，已有较明显的提高。



图4 校正前的拼接影像

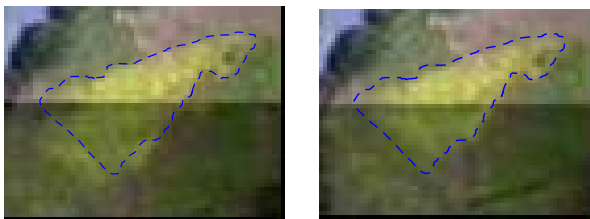


图5 校正后的拼接影像



a. 校正前 b. 校正后

图6 拼接影像放大截图1



a. 校正前 b. 校正后

图7 拼接影像放大截图2



a. 校正前 b. 校正后

图8 拼接影像放大截图3

3.3 随机采样检验

本文首先在基准影像上读取其中随机抽取的可识别坐标点 c_1 、 c_2 、 \dots 、 c_{20} ，读取各坐标值与它们在校正前后影像上的坐标对比，计算出每个坐标点的残差值，以反应该算法对影像的校正精度。分别以中心扫描线为基准，在平行方向和垂直方向分别

验证随机采样检验精度。

由图9和图10可以看出，随机采样点在 x 和 y 方向校正后点的坐标与基准点的坐标较吻合，但采样点校正前的坐标与基准点坐标相差较大。经统计，在平行扫描线的方向上，随机采样点校正前残差为42.2，校正后的残差为2.4；在垂直扫描线方向上，随机采样点校正前的残差为35.7，校正后的残差为13.7。统计结果表明，本文提出的缺少控制点的几何畸变校正算法较好的减少了无人机图像的畸变，提高了校正精度。

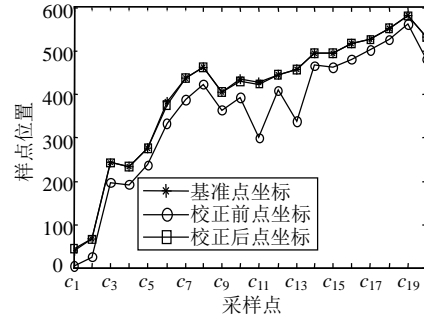


图9 平行方向上采样点坐标

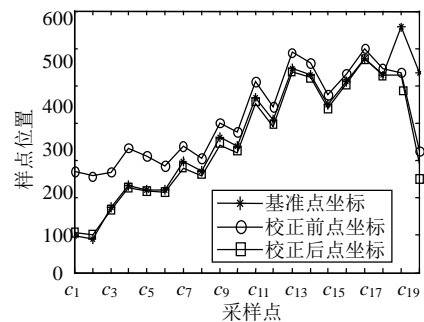


图10 垂直方向上采样点坐标

4 结论

无人机遥感影像在应急灾害中发挥了重要作用，但复杂的应用环境下难以及时获取野外地面实测控制点，导致无人机图像几何畸变校正难以采用传统方法进行。本文针对该问题提出了缺少地面实测控制点的无人机图像几何畸变校正算法，该算法通过消除无人机遥感影像旋转误差、控制点对提取、重叠区域分块变换实现图像校正。通过基于实验区实测地面控制点验证可知，校正后的图像坐标更接近地面实测的真实坐标，并且越靠近图像中心点误差越小；基于拼接重合度实验表明，校正后的图像(图6~图8)拼接质量较高、地物错位较小；通过随机采样实验的验证可知，经算法校正后图像不同方向上误差均有很大程度减少；不同实验综合表明，该算法提高了图像处理和灾害信息定量提取的质量和精度。但本文算法初步采用了地形比较简单的无人

机遥感图像进行实验和结果验证, 针对复杂地形条件下该算法是否适用, 需要进一步通过室内、野外实验进行验证和分析。

参 考 文 献

- [1] XIANG Hai-tao, TIAN Lei. Method for automatic georeferencing aerial remote sensing (RS) images from an unmanned aerial vehicle (UAV) platform[J]. *Biosystems Engineering*, 2011(108): 104-113
- [2] SWAIN K C, THOMSON S J, JAYASURIYA H P W. Adoption of an unmanned helicopter for low-altitude remote sensing to estimate yield and total biomass of a rice crop[J]. *Transactions of the ASAE*, 2010, 53(1): 23-27.
- [3] ASCANI A, FRONTONI E, MANCINI A, et al. Feature group matching for appearance based localization[C]// *IEEE/RSJ 2008 International Conference on Intelligent Robots and Systems*. [S.l.]: IEEE, 2008.
- [4] LI Li-bo, LIU Bo, YOU Hong-jian, et al. Analysis and comparison of geometric correction algorithm on satellite remote sensing image[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2006, 35(7): 354-357.
- [5] SUN Hui, LI Zhi-qiang, SUN Li-na, et al. Sub-pixel registration based on phase correlation and its application to electronic image stabilization[J]. *Chinese Journal of Optics and Applied Optics*, 2010, 3(5): 254-257
- [6] ZARCO-TEJADA P J, GONZALEZ-DUGO V, BERNI J A J. Fluorescence, temperature and narrow-band indices acquired from a UAV platform for water stress detection using a micro-hyperspectral imager and a thermal camera[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2012(117): 322-337.
- [7] GONG Ping, LIU Xiang-bin, ZHOU Peng. An improved Harris corner detection algorithm[J]. *Computer Engineering and Applications*, 2010, 46(11): 1386-1389.
- [8] 李峥. 缺少控制点的无人机遥感影像校正技术研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2010.
LI Zheng. The study of geometric correction algorithm for unmanned aerial vehicle remote sensing image with few ground control points[D]. Chengdu: University of Electronic and Technology of China, 2010.
- [9] CHENG Zhi-gang, YING Fu-chang, SUN Fu. Registration technique for high-resolution remote sensing images based on nonsubsampling contourlet transform[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, 29(10): 658-661.
- [10] 朱松立, 戴礼荣, 宋彦, 等. 基于角点特征值和视差梯度约束的角点匹配[J]. *计算机工程与应用*, 2005, 34(3): 297-301.
ZHU Song-li, DAI Li-rong, SONG Yan, et al. Corner match based on corner feature value and disparity gradient constraint[J]. *Computer Engineering and Applications*, 2005, 34(1): 297-301.
- [11] GAO Peng-qi, YAN Lei, ZHAO Hong-ying. Aerial remote sensing automatic control system for UAV[J]. *Proc of PA*, 2007(1): 89-93.
- [12] BREAKER L C, ARMSTRONG E M, ENDRIS C A. Establishing an objective basis for image compositing in satellite oceanography[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2010, 114(2): 345-362.

编辑 漆 蓉