

文章编号: 1000-2022(2005) 05-0632-08

# 微型无人机遥感影像的纠偏与定位

马瑞升<sup>1,2</sup>, 孙 涵<sup>2</sup>, 林宗桂<sup>2</sup>,  
马轮基<sup>2</sup>, 吴朝晖<sup>2</sup>, 黄 耀<sup>1</sup>

(1 南京农业大学 资源与环境科学学院, 江苏 南京 210095)

(2 中国气象局 国家卫星气象中心 遥感应用试验基地, 广西 南宁 530022)

**摘 要:** 在分析无人机遥感影像几何变形理论基础上, 利用标准图形垂直摄影法标定相机, 建立相机误差纠正模型; 使用大比例尺地形图作为底图, 通过同名点配准纠正航摄影像, 全过程不使用外方位元素。最终影像经实际检验, 单点定位平均误差为 1.0 m 左右。

**关键词:** 航空遥感; 影像处理; 相机标定; 无人机

**中图分类号:** P49      **文献标识码:** A

随着信息社会的到来, 人们对于各种信息、特别是下垫面精细空间信息的需求越来越高, 作为基础空间信息源的遥感影像受到较多关注。在小城镇等空间范围小、分辨率要求高的区域, 气象卫星和资源卫星的影像都难以满足需要。当前获取精细空间信息的主要途径是高分辨率商业成像卫星, 如: IKONOS Quick Bird 等, 以及载人飞机航空摄影两个途径。

广西地处低纬地区, 是我国南方多云省份之一, 晴天甚少。根据广西壮族自治区 30 a 地面气候资料统计, 全区各地年晴天日数不超过 40 d。即使在晴天条件下, 由于小的对流云单体发生较多, 卫星和航空摄影也难以获得多时次、高质量的光学和红外遥感影像。

现今用于对地高分辨率成像的卫星均为极轨卫星, 其信息获取受重访周期的制约, 加之由于无法消除云对卫星光学和红外通道探测的影响, 故在多云地区可用的高分辨率遥感信息很少。载人航空遥感虽然不受重访周期的影响, 但它的投入及对天气、场地和人员等条件的要求相对较高。面对这一现状, 人们提出了多种解决方案, 如以轻型飞机为平台开展小像幅航空遥感<sup>[1-2]</sup>、遥控飞机甚至是风筝为载体获取航空像片<sup>[3-4]</sup>等。近年来随着无人机在不同应用领域里的突出表现<sup>[5-9]</sup>, 国内外都出现了将无人机用于影像获取的趋势<sup>[10-11]</sup>。本文将微型自控无人机技术和数码相机结合构建成微型航空遥感系统, 获取高分辨率地面影像, 以期能低成本快速解决小区域遥感信息源问题。微型航空遥感系统的主要优势在于具有更高的灵活性, 不受重访周期的限制, 可以应任务需要随时起飞, 并可在云下飞行, 实现遥感影像的实时获取; 资料的时效性强, 成本大大低于载人飞机。但由于无人机平台体积小、重量轻, 难以使用专业航

收稿日期: 2004-05-14 改回日期: 2004-07-12

基金项目: 中国气象局新技术应用推广项目 (20010003D001)

作者简介: 马瑞升 (1978-), 男, 山西晋中人, 硕士, 研究方向: 环境遥感。E-mail: cmarti@163.com.

空摄影机和记录仪、稳定平台等辅助设备;且无人机多在中低空飞行、气流复杂,易导致空中姿态剧烈变化,这些因素增加了遥感影像的处理难度。为此,本文就微型无人机遥感影像的几何变形进行了理论分析,提出了一种有效的影像纠正方法,制作了广西武鸣县城区数字影像图,并进行了定位误差分析。

## 1 无人机航空遥感成像原理及影像几何变形分析

### 1.1 成像原理

在微型无人机遥感中大多使用普通相机,随着数字影像处理技术和数码技术的普及,越来越多的数码相机取代普通光学相机担当了航空摄影仪的角色。商业数码相机一般采用面阵 CCD(电子耦合器件)或 CMOS(互补型金属氧化物半导体)作为感光器件,所获影像属于中心投影瞬间一次成像,即一幅影像上的所有像点共用一个影像中心和同一个像片平面,亦即共用一组外方位元素。因此,其成像原理与框幅式航空摄影仪相同,像点  $a$  与物点  $A$  之间的空间坐标关系可表示为中心投影成像的共线方程<sup>[12]</sup>

$$\begin{cases} x - x^* = -f \frac{a_1(X_A - X_S) + b_1(Y_A - Y_S) + c_1(Z_A - Z_S)}{a_3(X_A - X_S) + b_3(Y_A - Y_S) + c_3(Z_A - Z_S)} \\ y - y^* = -f \frac{a_2(X_A - X_S) + b_2(Y_A - Y_S) + c_2(Z_A - Z_S)}{a_3(X_A - X_S) + b_3(Y_A - Y_S) + c_3(Z_A - Z_S)} \end{cases} \quad (1)$$

式中  $x, y$  是以像主点为原点的像点坐标,  $x^*, y^*$  是像点坐标偏离真值的误差;  $f$  为像片主距,  $X_A, Y_A, Z_A$  是相应地面点的坐标,  $a_i, b_i, c_i (i = 1, 2, 3)$  是 3 个外方位角元素  $\varphi, \omega, \kappa$  求得的方向余弦值,  $X_S, Y_S, Z_S$  是摄影中心的坐标值。(1)式不仅表示了无人机遥感影像的构像关系,同时也指明了影像几何变形主要来源于与传感器本身相关的内部变形误差和传感器以外因素引入的外部变形误差,为影像的几何纠正提供了理论依据。

### 1.2 无人机遥感影像几何变形分析

#### 1.2.1 内部变形误差分析

内部变形误差由传感器本身性能、技术指标与标称值的差异引起,对于框幅式摄影机主要有:镜头焦距的改变、像主点的偏移、压片的平整度变化、胶片的变形和镜头光学畸变等。数码相机由于使用 CCD 面阵作为成像平面,不存在压片不平、胶片变形等问题,但传感器本身可能存在阵列误差;在镜头条件确定后,数码相机整个内部变形因素便全部为一定值,从而使所有影像内部变形误差完全一致。

在不考虑外方位元素影响的前提下,取(1)式中 3 个外方位角元素  $\varphi, \omega, \kappa$  的值为 0 摄影中心坐标  $X_S, Y_S, Z_S$  为常数,则经简单变形后得到公式

$$\frac{x - x^*}{X_A - X_S} = \frac{-f}{Z_A - Z_S}, \quad \frac{y - y^*}{Y_A - Y_S} = \frac{-f}{Z_A - Z_S} \quad (2)$$

可见在垂直摄影且地面水平的条件下,理想影像中的比例尺处处相等,都等于  $f/H$ , 其中  $f$  为主距,  $H$  为航高,此时中心投影与正射投影一致。为准确反映数码相机的内部误差,将镜头焦距设定为航摄飞行状态的 18 mm,利用铅垂墙面布设的标准网格进行数码垂直摄影(图 1)。

图 1 中浅黑线是在墙面上布设的标准网格线的成像,网格线的宽度为 1 cm,网格线  $x$  方向间距 10 cm,  $y$  方向间距 20 cm。由于影像中心部位成像质量高,在严格垂直摄影条件下几乎没有几何畸变,故可利用其确定标准网格的理论成像位置。方法如下:

在  $x, y$  方向对影像中心部分的浅黑线间隔进行像元计数得到  $M_a, M_b$ , 然后利用测量得到

实际长度  $L_x, L_y$ , 而后由公式

$$M_x = \frac{M_a}{L_x}, \quad M_y = \frac{M_b}{L_y} \quad (3)$$

计算得到  $x, y$  两个方向上单位长度  $L$  所对应的像元数  $M_x, M_y$ 。在 18 mm 焦距条件下  $M_x$  为 6.91 像元 / cm,  $M_y$  为 6.90 像元 / cm。最后将测量得到的各条网格线到中心的距离值乘以  $M_x$  或  $M_y$  并取整后即可得到其在  $x$  或  $y$  方向的理论成像位置, 在图 1 中以深黑线表示。图 1 表明由于商业数码相机使用了非专业的摄影镜头, 使得图中对应点的偏移量最大达到了 80 个像素, 在影像中引入了巨大的误差, 这一畸变误差是几何纠正的重点。而镜头非线性畸变引起的误差只与光线通过镜头的位置有关, 与成像距离无关, 故当镜头条件确定后, 这一畸变误差为定值, 在无人机遥感中可与数码相机阵列偏差一起作为系统误差加以纠正<sup>[13-14]</sup>。

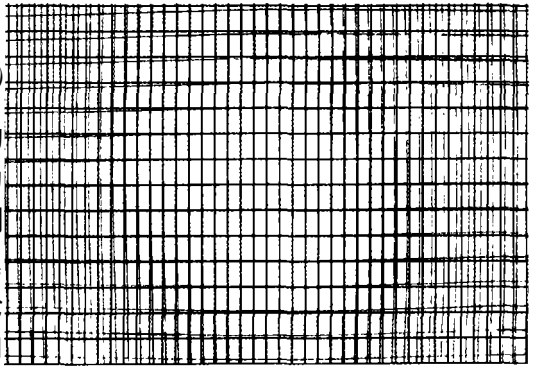


图 1 数码相机垂直摄影图  
Fig 1 Lattice image of digital camera  
being straight to the wall

### 1.2.2 外部变形误差分析

外部变形误差由摄影瞬间传感器位置、姿态的变化和地形、大气等因素引起。这些因素的影响对于框幅式摄影机和数码相机是相同的。影像之间外方位元素各不相同, 不能作为系统误差处理, 必须对每幅影像单独纠正, 而地形的起伏则影响每个像素的定位, 可通过微分原理加以纠正。以外方位元素的影响为例, 在垂直摄影条件下, 影像中坐标  $x, y$  与地面相应坐标成比例关系

$$\frac{x}{X_A - X_S} = \frac{y}{Y_A - Y_S} = \frac{f}{H} \quad (4)$$

式中  $H = Z_A - Z_S$  为航高。如果以相机的姿态角  $\varphi, \omega, \kappa$  为自变量, 对 (1) 式求微分并将 (4) 式代入, 则得到由  $dX_s, dY_s, dZ_s, d\varphi, d\omega, d\kappa$  所引起的像点位移误差公式

$$\begin{cases} dx = (fH) dX_s - (xH) dZ_s - y d\kappa - (xy/f) d\omega - [f(1 + (x^2/f^2))] d\varphi \\ dy = (fH) dY_s - (yH) dZ_s + x d\kappa - (xy/f) d\varphi - [f(1 + (y^2/f^2))] d\omega \end{cases} \quad (5)$$

由 (5) 式可见,  $dX_s, dY_s, dZ_s$  和  $d\kappa$  会引起影像的平移、缩放、旋转等线性变化, 而  $d\omega$  和  $d\varphi$  将会在影像中引入非线性的像点位移 (图 2)。

## 2 遥感飞行实验与影像几何纠正思路

### 2.1 遥感飞行实验

由于无人机飞行器体积小、重量轻, 无法使用专业航空摄影数字相机, 在实验中选用了佳能 EOS 300D 型数码相机。300D 采用面阵 CMOS 传感器, 可一次生成行列数为  $3\,072 \times 2\,048$  的数字影像, RGB 3 通道, 每通道 8 bit 兼容佳能 EF 系列镜头, 能够满足一般遥感应用的需要。由于尚处于探索阶段, 故直接使用了 300D 套机中的 EF-S 18~55 mm 变焦镜头。

试验地点为广西武鸣县城, 在阴天条件下共飞行两架次。航高均为海拔 1 000 m, 镜头均采用广角, 设置为 18 mm, 并手动对焦至无穷远。为保证获取足够的信息, 设计影像航向重叠度  $> 70\%$ , 旁向重叠度  $> 30\%$ , 共获取数字影像 200 余幅。

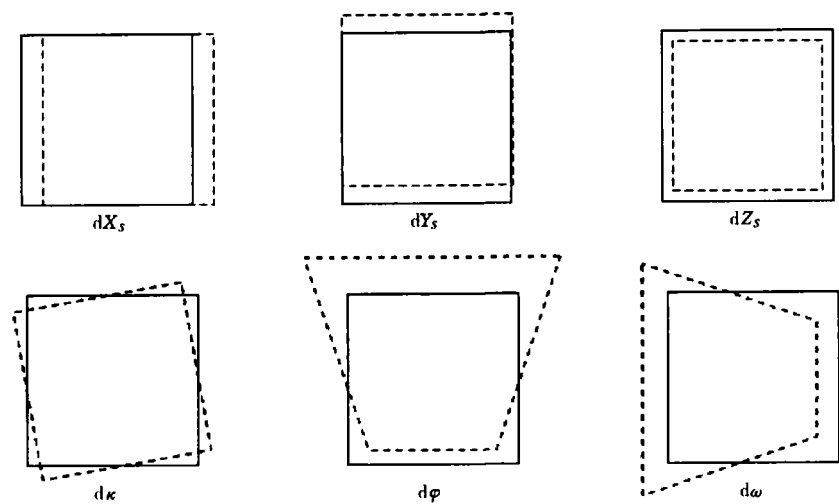


图 2 外方位元素变化引入的影像变形示意图

Fig 2 Sketch map of image's geometrical distortion from extrinsic parameters

2 2 遥感影像纠正思路

根据前述分析,影像的几何纠正主要针对两个方面进行:由传感器本身引起的内部变形和传感器以外因素引起的外部变形。由于篇幅所限,地形起伏、大气折射等因素的影响本文暂不涉及。在镜头条件确定后,对于数码相机而言,其内部变形误差也随之确定,利用对标准图形垂直摄影获得的影像,完成数码相机的标定,建立内部变形数学纠正模型。受微型无人机平台限制,无法获得每幅图像拍摄瞬间的姿态参数,在影像外部误差的纠正上借鉴卫星遥感的处理方法,以现有高分辨率卫星影像图或大比例尺地形图为底图,用多项式法加以拟合纠正,纠正过的数字影像经进一步色彩处理后镶嵌成数字影像图(图 3)。

3 遥感影像的几何纠正

3 1 数码相机标定及数字影像内部误差纠正

利用前述分析得到数码相机垂直摄影图 1,以标准网格交点为控制点(共 492 个),在其理论成像坐标  $(x', y')$  与实际成像坐标  $(x, y)$  之间建立数学纠正模型

$$x' = a(x, y) = \sum_{i=0}^N \sum_{j=0}^N P_{ij} x^j y^i, \quad y' = b(x, y) = \sum_{i=0}^N \sum_{j=0}^N P_{ij} x^j y^i.$$

(6)

式中第 1、2 式的各项系数值  $P_{ij}$  见表 1 表 2。

表 1  $a(x, y)$  的系数值  $P_{ij}$

Table 1 Polynomial coefficients of  $a(x, y)$

|       | $P_{ij}$          |                   |                   |                 |
|-------|-------------------|-------------------|-------------------|-----------------|
|       | 1                 | $x$               | $x^2$             | $x^3$           |
| 1     | 55.773 597 808 2  | - 0.000 483 915 5 | - 0.000 003 405 1 | 0.000 000 004 4 |
| $y$   | 0.916 958 065 4   | - 0.000 075 365 2 | 0.000 000 057 7   | 0               |
| $y^2$ | 0.000 041 966 7   | 0.000 000 076 2   | - 0.000 000 000 1 | 0               |
| $y^3$ | - 0.000 000 009 3 | 0                 | 0                 | 0               |

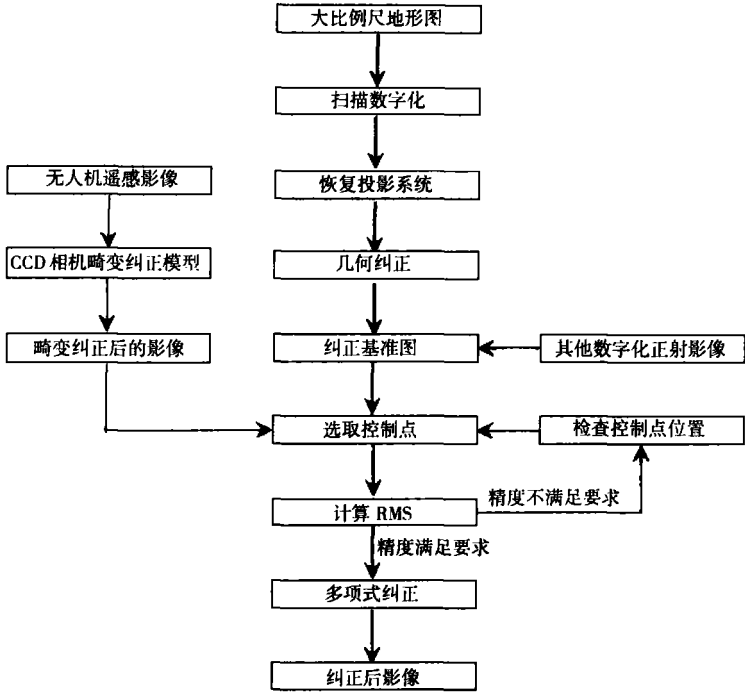


图 3 微型航空遥感系统数字影像几何纠正流程

Fig 3 Block diagram of images geometrical correcting in the miniature aerial RS system

表 2  $b(x,y)$  的系数值  $P_{ij}$

Table 2 Polynomial coefficients of  $b(x,y)$

|       | $P_{ij}$          |                   |                 |                   |
|-------|-------------------|-------------------|-----------------|-------------------|
|       | 1                 | $x$               | $x^2$           | $x^3$             |
| 1     | 63.987 882 716 4  | 0.936 487 557 7   | 0.000 016 671 3 | - 0.000 000 007 1 |
| $y$   | - 0.038 718 375 6 | - 0.000 003 058 4 | 0.000 000 042 0 | 0                 |
| $y^2$ | 0.000 007 832 1   | 0.000 000 001 3   | 0               | 0                 |
| $y^3$ | 0.000 000 000 6   | 0                 | 0               | 0                 |

影像纠正后的 RMS(均方根, root mean square)为 1.01, 由于镜头畸变在光心处为零, 越接近影像边缘畸变越大<sup>[13]</sup>, 所有数字影像经过 (6) 式纠正后截去边缘, 每张影像实际取  $2\,737 \times 1\,741$  像素。

3.2 地形图数字化

由于武鸣地区尚没有可用的高分辨率正射影像, 故在纠正中使用了当地 1: 10 000 地形图, 该套地形图于 1999 年 11 月航摄, 2001 年出版, 为纸质地图。为方便后期处理, 用大幅面扫描仪以 300 DPI 精度对航摄范围涵盖的 4 张地形图进行了扫描, 相当于每个像元的地面分辨率为 0.63 m。之后以每幅地形图的左下角为基准在扫描影像中恢复地形图投影系统, 即恢复每个点的地理坐标 (经纬度值)。为使扫描后影像的每个像元获得正确的地理坐标, 对其分别进行了多项式纠正, 纠正精度在 1 个像元以内。利用其地理信息将纠正后的 4 幅地形图进行拼接, 圈出试验区后, 切除多余部分, 最终形成武鸣县城 1: 10 000 数字化地形图。

3 3 地形图配准与影像拼接

将数字影像整理、排序, 对应到数字化地形图中的相应位置。利用同名点将遥感影像与地形图进行逐一配准, 同时加入地理信息, 完成影像的几何校正和地理定位。由于航高低, 镜头焦距短, 使得影像周边成像质量变差, 有“房屋被推倒”的现象。经过对影像的逐个分析, 再次对其进行裁剪, 尽可能保留影像的中心部分。航摄影像的地面像元分辨率为 0.41 m, 为方便以后与 Quick Bird 卫星图像进行比较, 所有影像纠正后像元分辨率统一调整为 0.61 m。纠正后的影像再经色彩处理与拼接, 最终完成武鸣县城及其周边地区无人机遥感影像图 (图 4)。



图 4 武鸣县数字影像图

Fig 4 Image map of Wuming, Guangxi Province

4 影像质量分析

为检验最终影像图的质量, 进行室内地形图配比检验和实地测量检验, 前者代表全图的平均定位偏差, 后者反映影像图局部变形情况, 两者结合可客观评价影像几何纠正质量的优劣。

4 1 地形图误差比对

将影像图与地形图的公里网进行配准, 总的 RMS 误差为 1.73 个像元, 最大偏差点 RMS 为 3.40 像元, 由成图像元分辨率 0.61 m 可知其对应地面定位偏差分别为 1.06 m 和 2.07 m。

4 2 实地测量误差比对

为最大限度地反应影像中的局部变形, 对图中最大偏差点所在的中部区域进行了实地测量, 测量工具为测绳和钢卷尺, 位置见图 5。获取两个长度线段 1 和线段 2 以大致反映  $x, y$  方

向的长度变形;  $A$  处的圆形花坛尺寸用以反映角度变形情况。

线段 1 的图上长度为 673.7 像元, 相当于 411.0 m, 实地长度 408.4 m, 相差 2.6 m, 相对误差 0.64%。线段 2 的图上长度为 470.8 像元, 相当于 287.2 m, 实地长度 289.4 m, 相差 2.2 m, 相对误差 0.76%。 $A$  处花坛为圆形, 实际直径 30.0 m, 图中影像在米字型检验中直径分别为 50 49.5 50 50.2 个像元, 变形后椭圆长短轴之比为 1.01: 1, 考虑到采样误差和像元大小的影响, 可以认为基本没有角度变形。



图 5 实地测量位置图

Fig 5 Imagemap of the ground test area

## 5 结论与讨论

(1) 数码相机和无人机结合构建微型航空遥感系统获取数字遥感影像资料是可行的, 在一定程度上能够解决多云地区遥感影像获取困难的问题, 是卫星遥感的有益补充, 在环境监测等领域具有良好的应用前景。

(2) 无人机遥感影像由于采用非专业传感器, 在几何纠正时必须解决相机标定和镜头畸变的问题。利用标准网格垂直摄影法, 配合数学模型可以较好地解决这一问题。

(3) 无人机遥感本属于航空摄影范畴, 但由于其自身限制往往无法获得影像的外方位元素, 故难以按照航空摄影的方法进行后续处理工作。本文借鉴卫星影像处理方法提出的几何纠正思路, 不直接使用外方位元素, 是无人机影像处理的有效途径之一。

(4) 按照本文方法纠正后的影像经检验具有较好的精度: 定位平均偏差 1 m, 最大偏差 2 m, 在  $x$ ,  $y$  方向上长度变形均小于 1%, 基本没有角度变形。

(5) 作为基准影像, 大比例尺地形图在自身成图精度和所含特征信息等方面有一定局限性。如果使用高分辨率卫星影像作为底图纠正, 则成图精度会有进一步提高。

(6) 由于武鸣县城周边地势平坦, 故采用本文方法效果较好, 对于地势起伏大的区域, 高程变化引入的误差不能忽略, 具体纠正方法另文介绍。

## 参考文献:

- [ 1 ] Graham R W. Small format aerial surveys from light and micro light aircraft[ J]. Photogrammetric Record, 1988, 12( 71): 561-573
- [ 2 ] 蒋云志. 低空小像幅航空摄影及其推广运用[ J]. 测绘技术, 1993( 1): 21-24
- [ 3 ] 钱育华, 吕振洲. 遥控飞机在航空遥感实践中的应用及评价[ J]. 影像材料, 2001( 5): 25-27
- [ 4 ] Aber J S, Aber S W, Pavri E. Unmanned small-format aerial photography from kites for acquiring large-scale high-resolution, multi-view-angle imagery[ R]. Denver Co USA: ISPRS Commission I Model-Tem Symposium in conjunction with Pecora 15 /Land Satellite Information IV Conference, 2002
- [ 5 ] Holland G J. Autonomous aerosondes for economical atmospheric soundings anywhere on the globe[ J]. Bull Amer Meteor Soc, 1992, 73( 12): 1 987-1 998.
- [ 6 ] Hewitz S R, Johnson L F, Arvesen J C, et al. Precision agriculture as a commercial application for solar-powered unmanned aerial vehicles[ R]. Portsmouth VA: 1st AIAA UAV Conference, 2002: 2 002-3 404
- [ 7 ] John D, Cindy P. Developmental system for maritime rapid environmental assessment using UAVs[ R]. Brighton UK: Oceanology International 2000 Conference in Brighton, 2000
- [ 8 ] 刘青, 徐裕平. 微型飞机航空遥感图像传感传输系统研究[ J]. 南昌大学学报(工科版), 1998, 20( 4): 40-42
- [ 9 ] 马舒庆, 汪改, 潘毅, 等. 微型无人驾驶飞机气象探空系统[ J]. 南京气象学院学报, 1998, 21( 4): 715-721
- [ 10 ] Hewitz S R. Remote command-and-control of imaging payloads using commercial off-the-shelf technology[ R]. Toronto Canada: IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2002
- [ 11 ] 陈洪滨, 马舒庆, 汪改, 等. 基于微型自动驾驶飞机的航拍航摄遥感系统[ J]. 遥感技术与应用, 2001, 16( 3): 144-147
- [ 12 ] 李德仁, 周月琴, 金为铨. 摄影测量与遥感概论[ M]. 北京: 测绘出版社, 2001: 27-29.
- [ 13 ] 姜大志, 孙俊兰, 郁倩, 等. 标准图形法求解相机镜头非线性畸变的研究[ J]. 东南大学学报(自然科学版), 2001, 31( 4): 111-116.
- [ 14 ] 姜大志, 孙闵, 刘森, 等. 数码相机标定方法研究[ J]. 南京航空航天大学学报, 2001, 33( 1): 55-59.

## Geometric Correction and Registration of Optical Remote Sensing Image from Miniature Unmanned Aerial Vehicle

MA Rui-sheng<sup>1, 2</sup>, SUN Han<sup>2</sup>, LIN Zong-gu<sup>2</sup>,  
MA Lun-ji<sup>2</sup>, WU Zhao-hui<sup>2</sup>, HUANG Yao<sup>1</sup>

( 1 College of Resource and Environmental Sciences, NAU, Nanjing 210095, China;

2 Remote Sensing Application and Validation Base of National Satellite Meteorology Center, CMA, Nanning 530022, China)

**Abstract** The miniature aerial optical remote sensing system, which consists of a digital camera, a miniature robot plane (UAV, unmanned aerial vehicle), and a ground-based subsystem, is a new technology in remote sensing field. Images from this remote sensing system can not be corrected easily. This status quo blocks the application of the UAV remote sensing technology in various research fields. This paper presents a geometric correction method in terms of the analysis of the UAV remote sensing images. Digital camera calibration and its distortion model are finished by a standard graphic method, and the images registration is completed by large-scale topographical maps. The extrinsic camera parameters are not used in this method. The single point mean error of the corrected image map is about 1.0 meters.

**Key words** aerial remote sensing; image processing; digital camera calibration; unmanned aerial vehicle