

文章编号: 1007-4619(2005)04-0393-05

# 随动系统自动几何精纠正模型与算法实现

张维胜<sup>1,2</sup>, 王超<sup>1,3</sup>, 王永明<sup>2</sup>, 张红<sup>4</sup>, 张波<sup>1</sup>, 吴樊<sup>1</sup>

(1. 中国科学院 遥感应用研究所国家遥感重点实验室, 北京 100101; 2 北京高科技研究所, 北京 100085;

3 中国科学院 中国遥感卫星地面站, 北京 100086; 4 北京师范大学 地理学与遥感科学学院, 北京 100875)

**摘 要:** 分析了某航空摄影测量设备中相机的类型及其随动系统工作的原理与特点, 对拍摄得到的图像几何变形类型和规律做了分析与总结, 并提出了该系统几何精纠正和参数矩阵求解模型。在此基础上, 为满足系统实时性要求, 利用随动系统的特点对所提出的参数矩阵作了进一步简化处理, 建立了随动系统参数求解简化模型。根据该航空摄影测量设备应用环境, 分析了其他因素对拍摄图像几何变形的影响。所提出的算法解决了航空摄影测量面阵 CCD 相机随动系统自动几何纠正的原理和方法, 提出的求解模型在飞行实验中得到了很好的验证。

**关键词:** 随动系统; 面阵 CCD 相机; 自动几何校正

**中图分类号:** TP751.1/TP73.21 **文献标识码:** A

## 1 引 言

对无人重点危险地区(如煤层自燃地区等)的定时监控, 需定时拍摄该地区高分辨率图像, 分析其变化规律, 找出相应的对策, 为人工决策、干预提供必要的支持和保障。航空拍照是快速、高效监测该地区变化的主要手段之一, 但采用人工拍摄获取该地区变化信息危险性高。而采用无人飞行器进行航空拍摄可克服人工拍摄的危险性, 但需要相应的导航设备, 以保证飞行器按预先设计好的航线飞行。本文采用的系统是建立在利用图像匹配技术获取航线上地理坐标校正惯性导航设备(INS)位置偏差。在处理中利用卫星获取低分辨率正射图像和飞行系统拍摄的实时图像进行配准计算, 校正飞行误差, 确保飞行器沿正确的航迹飞行。

在图像匹配前, 由于飞行器姿态不稳, 造成拍摄的图像存在几何畸变, 就必须实时对航片进行自动几何校正, 以保证配准精度。其实质就是将影像映射到标准地图投影面上, 并将像点位移限制在规定的限差范围内并降分到卫星获取正射图像分辨率<sup>[1]</sup>, 以提高飞行器拍摄的实时图与卫星获取正射图像的配准精度和配准率, 从而校正飞行器飞行

误差, 保证飞行器按设计航线飞行。尤其在飞行环境复杂, 气象条件恶劣, 造成拍摄的图像变形较大情况下, 不采用图像几何纠正, 图像配准率较低, 造成飞行器偏离轨道几率较大。

航拍相片纠正通常对静态框幅式相机、全景摄像机、多光谱摄影机、红外扫描仪等摄影设备<sup>[2]</sup>拍摄的图像, 利用系统获取机下点坐标、内外方位元素(俯仰角、滚动角及航向角等)及从比例尺适当的地形图、或摄影测量内业成果、差分 GPS 的地形测量和控制测量获取的控制点信息, 代入到共线方程中, 求得共线方程中系数和误差, 并利用该共线方程完成航拍相片的几何精纠正<sup>[3]</sup>。另一方面, 在自动几何纠正系统中, 现今主要采用 GPS/INS 为主的线阵 CCD 系统<sup>[4]</sup>, 利用获得的机下点位置及内外方位元素完成对每行像素的纠正。而本文的无人飞行器, 要完成自动几何纠正, 必须结合该系统相机类型和系统的特点建立几何纠正和参数矩阵求解模型, 并按照系统实时性要求对模型进行简化, 从而达到系统的研制要求。本文提出并解决了该飞行器面阵 CCD 相机随动系统几何纠正和参数求解模型, 并在实际的测区进行了飞行实验。结果表明, 该方案获得了较好的结果。

收稿日期: 2002-08-13; 修订日期: 2004-11-04

基金项目: 国家重点基础研究发展规划项目(2001GB309400)

作者简介: 张维胜(1975—), 男, 江苏人, 助理研究员, 现为中国科学院遥感应用研究所在职博士, 主要研究方向为摄影测量、雷达测量与模式识别, 已发表论文 10 余篇。

## 2 随动系统单张航片几何校正原理和数学模型

图像校正包括辐射校正和几何校正。对于大气等因素造成的图像辐射校正,在此文不涉及。本文要求的几何校正是自动处理,因此必须较为精确的获取几何校正所需的内外方位元素和航高信息。由于采用的相机为窄瞬时视场角低空飞行器,拍摄地面区域小,因此该航片不受地球曲率、地形起伏、地球旋转等影响,系统利用激光高度计获取航高信息,其获取数据的精度可达厘米级,严格满足系统对航高的要求。由于航片拍摄面积较小,可近似为整个航片的高度信息。在系统设计中,对相机进行了严格的校正,误差测试有精确的数值。另一方面,系统测得飞行过程中角度精度很高,满足了系统自动几何校正的要求。

由于飞行器在飞行中姿态变化较大,因此造成俯仰角、滚动角变化较大,随动系统图像出现了梯形几何畸变<sup>[5]</sup>对图像匹配运算定位精度影响严重。如飞行器飞行高度为 150m,俯仰角 8°,滚动角为 10°情况下,其变形情况经仿真程序计算如图 1。如直接进行图像匹配,若配准,输出的位置信息是实时图中中心像素位置,采用未纠正图像其匹配误差情况如表 1。可见,在实际飞行实验中,若没有采用几何纠正,获得的位置误差仍然很大,飞行器偏离航线较大,经长时间飞行,积累的飞行误差仍然可能使飞行器偏离航线,对系统定位影响较大,因此必须加以考虑。由于该飞行器的相机为面阵 CCD 相机,其光学几何关系符合共线方程。但在通常处理中,已知图像内外方位信息,利用控制点信息对由外方位元素获得的共线方程系数进行校正或在无外方位信息情况下,由控

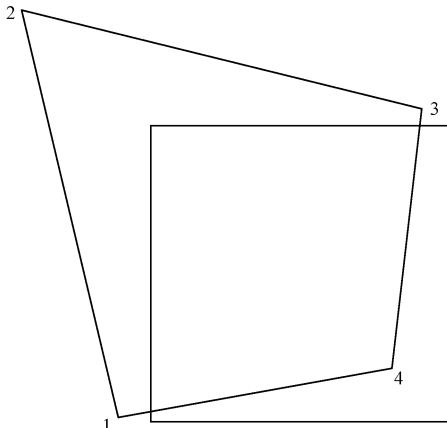


图 1 图像变形情况(规则多边形为未经过纠正图像)

Fig 1 Image distortion (rectangle is non-rectificated image)

表 1 图像中心偏移

Table 1 The offset of the image's center pixel

航高 /m	航向角 / (°)	俯仰角 / (°)	滚动角 / (°)	分辨率 /m	像素位移
150	0	10	8	5	(4.3, 5.3)
200	0	10	8	5	(5.8, 7.0)
250	0	10	8	5	(7.2, 8.8)
300	0	10	8	5	(8.6, 10.5)

制点外推外方位元素信息,获得较为精确的共线方程系数。在该处理系统中,考虑到为自动纠正系统,结合面阵 CCD 相机特点和获得的精确俯仰、滚动角等外方位参数,可直接求解共线方程系数。

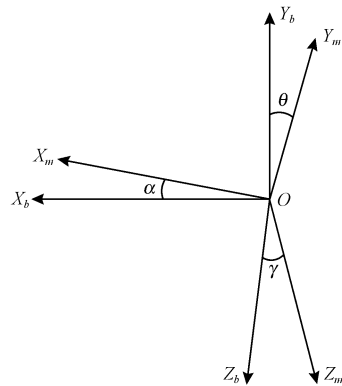


图 2 几何校正坐标系

Fig 2 The coordination of the geometric rectification

由于系统是单轴随动系统,采用面阵 CCD 相机完成几何纠正。因此为求解畸变像点与对应未畸变像点之间的数学关系式,就需进行一系列的坐标变换。必然涉及到各种坐标系统的建立和相应参数的确立。主要有摄影测量坐标系  $(X_b, Y_b, Z_b)$  和像平面坐标系  $(X_m, Y_m, Z_m)$ 。摄影测量坐标系  $X_b$  轴指向正北,  $Y_b$  指向天空,  $Z_b$  指向正东,满足右手定则;像平面坐标系  $X_m$  轴指向飞行器飞行方向,  $Y_m$  指向天空,  $Z_m$  符合右手准则判断方向。定义像平面坐标系和摄影测量坐标系角度变化关系用航向角  $(\varphi)$ 、俯仰角  $(\theta)$ 、滚动角  $(\gamma)$  表示,如图 2 所示。由于该飞行系统是随动系统,只能随  $Y_m$  转动,转动后使得  $X_m$  转入  $X_b, Y_b$  平面,因此还要引入随动角  $(\beta)$ 。其具体思路:当  $X_m, Y_m, Z_m$  和  $X_b, Y_b, Z_b$  重合,绕  $Y_m$  轴转动  $\varphi$ 、绕  $Z_m$  轴转动  $\theta$ 、绕  $X_m$  转动  $\gamma$ 、绕  $Y_m$  轴转动  $\beta$  角,就可以将图像从未畸变像点变换到畸变像点。公式如下:

$$\begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\beta & 0 & -\sin\beta \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin\beta & 0 & \cos\beta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\theta & \sin\theta \\ 0 & -\sin\theta & \cos\theta \end{bmatrix}$$

$$\times \begin{bmatrix} \cos\theta & \sin\theta & 0 \\ -\sin\theta & \cos\theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos\varphi & 0 & \sin\varphi \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin\varphi & 0 & \cos\varphi \end{bmatrix} \quad (1)$$

由于摄影系统为面阵 CCD 相机的像素,其面阵为  $M \times M$ ,因此转化到像平面坐标为

$$\begin{aligned} z &= m \frac{f \tan(V_H / 2)}{M / 2} \\ x &= n \frac{f \tan(V_V / 2)}{M / 2} \end{aligned} \quad (2)$$

几何校正公式经推导可得

$$\begin{cases} m' = \frac{m a_{33} + n \frac{\tan(V_V / 2)}{\tan(V_H / 2)} a_{31} - \frac{M / 2}{\tan(V_H / 2)} a_{32}}{m \frac{\tan(V_H / 2)}{M / 2} a_{23} + n \frac{\tan(V_V / 2)}{M / 2} a_{21} - a_{22}} + m_0 \\ n' = \frac{m \frac{\tan(V_H / 2)}{\tan(V_V / 2)} a_{13} + n a_{11} - \frac{M / 2}{\tan(V_V / 2)} a_{12}}{m \frac{\tan(V_H / 2)}{M / 2} a_{23} + n \frac{\tan(V_V / 2)}{M / 2} a_{21} - a_{22}} + n_0 \end{cases} \quad (3)$$

公式中  $m, n$  是未畸变图像的横向与纵向像素坐标,  $V_H, V_V$  是摄像机的横向和纵向瞬时视场角,  $m', n'$  是畸变图像的横向和纵向像素坐标,  $m_0, n_0$  为相机光轴的偏量。

在图像几何校正的过程中还要考虑参加匹配的图像分辨率一致,因此必须进行降分辨率处理,以满足图像匹配分辨率一致要求。可按公式 (3) 计算图像降分辨率处理后的图像尺寸。

$$\begin{cases} W = 2 * \text{Height} * \tan(V_V / 2) / R \\ H = 2 * \text{Height} * \tan(V_H / 2) / R \end{cases} \quad (4)$$

式中  $W$  是图像经降分辨率后宽度,  $H$  是图像经降分辨率后高度,  $\text{Height}$  是飞行器的飞行高度,  $R$  是图像降分辨率后的分辨率。

### 3 随动系统几何纠正算法简化

为了得到与基准图像分辨率一致的图像,采用上述算法对图像进行降分、几何校正和插值处理后,可得到符合匹配要求的实时图,但由于采用的参数大都是浮点型且运算量大,为了达到较好的精度采用 TM SC6701 浮点编译器对算法进行验证。另一方面,对于运算中参数矩阵可根据其系统特点进行简化。

由于系统为随动系统,参数纠正可分解为沿某一方向的等效俯仰和滚动矩阵,

$$\begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\gamma_1 & \sin\gamma_1 \\ 0 & -\sin\gamma_1 & \cos\gamma_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos\theta_1 & \sin\theta_1 & 0 \\ -\sin\theta_1 & \cos\theta_1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

同时根据畸变图像到未畸变图像使用参数矩阵正交,可得参数与反变换参数关系

$$b_{i,j} = a_{j,i} \quad (6)$$

式中  $[a]$  是未畸变图像到畸变图像变换矩阵,  $[b]$  是畸变图像到未畸变图像变换矩阵。可减少在反变换过程中对反变换参数的求解。在计算中将子函数做成内联函数,可使子函数和主控程序联合编译,减少了程序所占的内存空间。对于公式中常用的系数以定义的方式给出同时考虑到横向和纵向瞬时视场角相同,几何校正公式可简化为

$$\begin{cases} m' = \frac{m a_{33} + n a_{31} - \frac{M / 2}{\tan(V / 2)} a_{32}}{m \frac{\tan(V / 2)}{M / 2} a_{23} + n \frac{\tan(V / 2)}{M / 2} a_{21} - a_{22}} + m_0 \\ n' = \frac{m a_{11} - \frac{M / 2}{\tan(V / 2)} a_{12}}{m \frac{\tan(V / 2)}{M / 2} a_{23} + n \frac{\tan(V / 2)}{M / 2} a_{21} - a_{22}} + n_0 \end{cases} \quad (7)$$

### 4 实验分析

程序采用 TI 公司 Code Composer Studio 的 C 语言编译器进行编写,在分析中主要采用了 Visual Link recipe 分配和检查程序内存,采用时钟检查运算中 CPU 时钟周期<sup>[6]</sup>,图像测试结果如图 3,时间和内存分配如表 2。在实现中将本文提出的自动几何纠正模型与基于控制点的一阶多项式几何纠正方法、基于控制点的共线方程方法进行了比较。

表 2 算法内存和计算时间

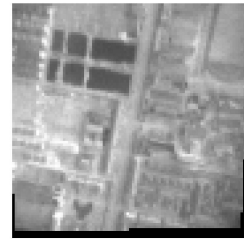
Table 2 The memory and the time of geometric rectification

	时间 /ms	内存 /KB	误差 /m
自动几何纠正模型	38	25	2.7
多项式几何纠正模型	34	32	7.5
共线方程的几何纠正模型	51	34	2.4

从实验结果看,采用一阶多项式模型对低空航拍高分辨率图像进行几何纠正误差较大。而采用地面控制点修正航拍高分辨率影像的外方位元素误差并利用共线方程进行几何纠正,误差有了一定程度的减少,但考虑该航空器拍摄的环境基本属于少控



(a) 航高 191m, 拍摄的实时图 (缩小 60%)



(b) 采用本文方法自动几何纠正处理地面分辨率为 5m 图像



(c) 采用一阶多项式几何纠正处理地面分辨率为 5m 图像



(d) 采用基于控制点几何纠正处理地面分辨率为 5m 图像

图 3 图像几何纠正结果

Fig 3 The output of the image geometric rectification

制点或无控制点环境下进行纠正且需考虑到实时计算机内存与计算时间的因素,因此本文提出的几何纠正模型有较高的实用价值。

另一方面,该方法对某测区(图 4)中所拍摄的 300 多张实时图与基准正射图像进行匹配仿真试验。对经过几何纠正和未纠正数据进行统计,结果如表 3。

表 3 配准概率统计

Table 3 The statistics of matching output

航高范围 /m	未经过几何纠正配准 平均误差 /pixel	经过几何纠正配准 平均误差 /pixel
100—150	3.7	1.3

从实验结果看,采用几何纠正后进行匹配计算,能够显著改善图像的配准误差。可见,该几何纠正模型具有较好的实用性。

## 5 结 论

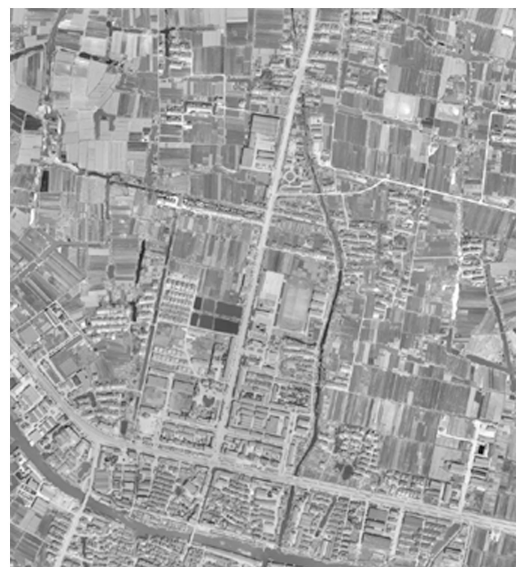


图 4 算法测试地区

Fig 4 Algorithmic testing area

依应用环境要求,建立了随动系统面阵 CCD 相

(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. <http://www.cnki.net>  
机自动几何精纠正数学模型和参数求解方法。为满足实时性要求,文中对几何精纠正模型进行了简化。

经实际飞行证明,增加几何纠正后配准率比未经几何纠正提高了3%,且误差缩小到1~2个像元内,尤其是在飞行姿态不稳,图像畸变较大的情况下,图像配准率得到了显著提高。采用该方法实现了图像的自动几何纠正,摆脱了人工作业必需在不同图像之间来回选择大量控制点且必需选择准确<sup>[6]</sup>,时效性差的特点,能够广泛应用在无人飞行系统中。而采用配准寻找待正纠图像控制点<sup>[7,8]</sup>不适用于系统应用环境。

## 参考文献 (References)

- [1] Zhang J X, Zhang Y H, Lin Z J. Research on Pixel Displacement of SPOT Image [J]. Science of Surveying and Mapping, 2000, 25(1): 19-22 [张继贤,张永红,林宗坚. SPOT影像像点位移的研究[J]. 测绘科学, 2000, 25(1): 19-22]
- [2] Hao G R, Ding L. Method and Future of Surveying and Mapping Large-scale Applied Map by Remote Sensing Technique [J]. Journal of Shandong Architectural and Civil Engineering Institute 1996, 12: 50-52 [郝光荣,丁宁. 应用遥感技术测绘大比例尺专题图的方法及前景[J]. 山东建筑工程学院学报, 1996, 12: 50-52]
- [3] Jing W X. Photogrammetry [M]. Wuhan Technology University Press of Surveying and Mapping 1998 [金为铣. 摄影测量学[M]. 武汉测绘科技大学出版社, 1998]
- [4] You H J, Shao Y, Li S K. Fast Rectifying Airborne Infrared Scanning Image Based on GPS and INS [J]. Future Generation Computer Systems 2004, 32(10): 1209-1214.
- [5] Jiang Y C. Analytical Photogrammetry [M]. Zhenzhou Institute Press of Surveying and Mapping [J]. 1991 [江延川. 解析摄影测量学[M]. 郑州测绘学院出版社, 1991]
- [6] TI Company. TMS320C6701 Floating-Point Digital Signal Process [M], 1998
- [7] Wang X R, Wu X C. The Automatic Registration Method of Remote Sensing Multi-Image [J]. Journal of Image and Graphics 1997, 10: 735-760 [王小睿,吴信才. 遥感多图像的自动配准方法[J]. 中国图像图形学报, 1997, 10: 735-760]
- [8] Tian Y F. Research on the Technology of Auto matching Using in the Image of Remote Sensor [D]. Beijing Normal University Master Dissertation. 2002 [田云峰. 遥感图像自动匹配技术研究[D]. 北京师范大学硕士论文, 2002]

## Automatic Geometric Rectification Model of Follow-up System

ZHANG Wei-sheng<sup>1,2</sup>, WANG Chao<sup>1,3</sup>, WANG Yong-ming<sup>2</sup>, ZHANG Hong<sup>4</sup>, ZHANG Bo<sup>1</sup>, WU Fan<sup>1</sup>

(1. State Key Laboratory of Remote Sensing, Institute of Remote Sensing Applications, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China;

2. Beijing High-tech Institute, Beijing 100085, China;

3. China Remote Sensing Satellite Ground Station, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100086, China;

4. College of Geography and Remote Sensing, Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

**Abstract** Based on the type of the aerial camera and the principles and the features of its follow-up system, this paper analyses geometric distortion type and its features. Geometric rectification model of the system and its coefficient matrix are built. But the way of getting coefficient matrix for geometric rectification model is simplified ulterior by analyzing the principles of its follow-up system because of the requirement of the real time system. At the same time, other factors are considered based on the application environment of the system. The algorithm in the paper resolves auto geometric rectification of area CCD camera with follow-up system. The output of the flight test proves the usefulness and availability of the algorithm.

**Key words** follow-up system; area CCD camera; automatic geometric rectification model