

基于 DLT 算法的微型无人机(MUAV) 视频影像的几何纠正方法

李朝奎^{1 2}, 周国清²

(1. 湖南科技大学地球空间信息科学研究所,湘潭 411201 ;2. Department of Engineering and Technology ,Old Dominion University ,Norfolk Virginia 23529 ,USA)

摘要 :高精度真正射影像在灾害监测、紧急救援与反恐决策等应用领域有着广泛的应用前景。利用微型低空无人飞机获取高精度的视频影像流 ,对影像流进行重采样 ,借助直接线性变换(DLT)方法 ,以 GPS、INS 集成系统获取的摄像机外方位元素为初始值进行内方位元素解算 ,以此进行视频影像分割后单幅影像的几何纠正 ,给出了纠正影像的拼接结果。研究表明 ,在 DEM/DSM、DOQQ 的精度与视频影像精度匹配条件下 ,可获得高精度(亚米级)的真正射影像。

关键词 :MUAV ;视频影像流 ;几何纠正 ;DLT 算法

中图分类号 :TP 751 :P 208 文献标识码 :A 文章编号 :1001 - 070X(2006)04 - 0023 - 06

0 引言

近年来 ,无人驾驶飞机 UAVs(Unmanned Aerial Vehicles)已受到众多应用领域的高度关注。以无人驾驶飞机为平台的航空遥感传感器由以往的可量测型像机逐渐被非量测型摄像机所替代 ,其优点是像机价格低廉 ,可以获取连续的影像数据流。和卫星遥感影像、传统航空遥感影像相比 ,低空无人机遥感影像的特点是^[1] :图像精度高 ,影像清晰 ,地面特征丰富 ,但影像的稳定性受飞行器的姿态变化影响较大。对这种影像进行几何纠正后 ,可以获得高精度的正射影像 ,该影像在灾害监测、资源勘察、紧急救援、国土安全评估及空间决策支持等应用领域具有广阔的应用前景^[2~5]。例如 ,美国 Katrina 飓风

后借助 UVAs 正射影像对 New Orleans 市进行灾后救援与重建评估。但 UAVs 影像的重叠度大 ,不具有传统航空像片的可量测性 ,因此 ,对该影像进行几何纠正处理是其首要问题。本文针对微型无人机影像数据流进行研究处理 ,探讨非量测摄影相机所获取的航空影像的几何纠正方法——直接线性变换纠正法。

1 影像的纠正原理与方法

1.1 影像纠正原理

基于共线方程建立地面特征点的影像坐标与地面坐标的联系方程 ,在最小二乘法则的支持下迭代求解内外方位元素 ,以此为定向参数 ,对影像进行几何纠正 ,生成正射影像。设有共线方程^[6]

$$x_G^c - x_o^c = -f \frac{r_{11}(X_G^M - X_E^M) + r_{12}(Y_G^M - Y_E^M) + r_{13}(Z_G^M - Z_E^M)}{r_{31}(X_G^M - X_E^M) + r_{32}(Y_G^M - Y_E^M) + r_{33}(Z_G^M - Z_E^M)} \tag{1}$$

$$y_G^c - y_o^c = -f \frac{r_{21}(X_G^M - X_E^M) + r_{22}(Y_G^M - Y_E^M) + r_{23}(Z_G^M - Z_E^M)}{r_{31}(X_G^M - X_E^M) + r_{32}(Y_G^M - Y_E^M) + r_{33}(Z_G^M - Z_E^M)} \tag{2}$$

式中 r_{ij} ($i=1\ 2\ 3 ; j=1\ 2\ 3$) 是未知系数 ,待定 ; ($X_G^M\ Y_G^M\ Z_G^M$) 是地面 G 点的已知大地坐标 ; f 是摄影焦距 ,待定 ; ($X_E^M\ Y_E^M\ Z_E^M$) 是摄影中心点的大地坐标 ,未知 ,待定 ; ($x_G^c\ y_G^c$) 是相应于特征点 G 的已

知影像坐标 ; ($x_o^c\ y_o^c$) 是像主点偏离影像传感器中心的坐标 ,未知。现略去上下脚标 ,对式 (1)、(2)进行变换 ,得到某点影像坐标 ($x\ y$) 与对应地面坐标 ($X\ Y\ Z$) 的关系方程 ,即

$$x - \frac{l_1 X + l_2 Y + l_3 Z + l_4}{l_9 X + l_{10} Y + l_{11} Z + 1} = 0 \quad (3)$$

$$y - \frac{l_5 X + l_6 Y + l_7 Z + l_8}{l_9 X + l_{10} Y + l_{11} Z + 1} = 0 \quad (4)$$

式中 $l_1 \sim l_{11}$ 是未知参数, 式(1)、(2)中的未知参数均包含在其中, 具体的表达式请参考文献[7~8]。显然, 要求解参数 $l_1 \sim l_{11}$, 至少需要 11 个方程, 即 6 个特征点。如果量测的特征点多于 6 个, 且像点坐标与地面点坐标的测量均包含误差, 这是比较

$$v_x = \frac{X}{A} l_1 + \frac{Y}{A} l_2 + \frac{Z}{A} l_3 + \frac{1}{A} l_4 - \frac{xX}{A} l_9 - \frac{xY}{A} l_{10} - \frac{xZ}{A} l_{11} - \frac{x}{A} \quad (7)$$

$$v_y = \frac{X}{A} l_5 + \frac{Y}{A} l_6 + \frac{Z}{A} l_7 + \frac{1}{A} l_8 - \frac{yX}{A} l_9 - \frac{yY}{A} l_{10} - \frac{yZ}{A} l_{11} - \frac{y}{A} \quad (8)$$

将式(7)、(8)进行扩展, 按矩阵形式表达为

$$GV + BL + W = 0 \quad (9)$$

式中 G 是误差系数矩阵; V 是误差矩阵; B 是未知参数矩阵; L 是未知数矩阵; W 是常数矩阵。对式(9)取等权(理由是数据采集精度相同), 按间接平差原理推导得

$$L = [B^T(GG^T)^{-1}B]^{-1}[B^T(GG^T)^{-1}W] \quad (10)$$

对式(10)的求解必须采用迭代法, 因为 B 中含有 L 中的未知参数。

1.2 影像纠正方法

影像纠正方法很多, 这里仅介绍两种。一是模型纠正法, 该法对上述方法获取的参数进一步分解, 得到内外方位元素, 然后将该方位参数作为已知参数, 利用相关软件(如 Erdas Image)对该影像进行校正; 二是数字微分纠正法^[9], 即把求得的 $l_1 \sim l_{11}$ 参数作为已知数, 以参考影像上的微分点坐标为已知坐标, 利用上节中介绍的方程求得像片上相应微分点的像坐标, 逐点进行纠正。

本实验数据是来自美国密西西比 Picayune 地区的无人机影像。该地区地势平坦, 直接利用线性变换法求解内外方位元素效果较差。因此, 首先利用 GPS 数据作为外方位约束数据, 求解内方位数据, 包括相机焦距、像主点坐标; 再以内方位元素和惯导数据作为已知数据, 采用“相机模型”进行几何校正。图 1 是影像纠正工作流程图。

模型法在实践中会遇到几个难点问题: ①坐标系统的统一; ②控制点的分布与可靠性; ③改正模型选择与参数设置。下面的讨论将主要针对这 3 个问题, 研究影像的几何纠正问题。

万方数据

复杂的情形。一般而言, 地面控制点或特征点的误差较小而被视为真值(对于在参考影像上量测的 GCP, 只要所采用的影像分辨率在 1 m 范围内, 可以采用上述假定), 这样像坐标可以表示为

$$x + v_x = 0 \quad (5)$$

$$y + v_y = 0 \quad (6)$$

将式(5)、(6)分别代入式(3)、(4), 同时令分母为 A , 则有

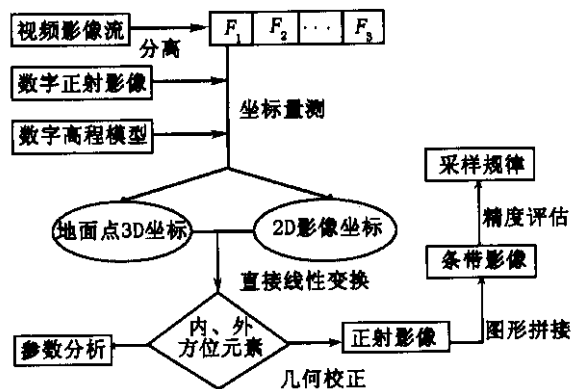


图1 影像纠正工作流程

2 MUAV 影像纠正实验

2.1 UAV 影像数据获取

随着数据获取方法的改进, 传统的可量测框幅式影像的获取方法向低成本、连续的非量测影像流的获取方法转变。一种以小型无人机为搭载平台, 以普通摄像机为传感器的高精度影像数据流的快速获取方法在世界各国开始应用。飞机上一般装有 GPS、INS、Camcorder 及其它遥控设备, 获取的 UAV 影像数据一般是 30 幅/s 图像的连续数据流, 格式为 avi 或 mpeg, 可以采用两种方法将其分离成单幅影像, 一是利用 Premiere Pro 软件直接分割, 二是利用 Direct X 控件中的 DirectShow 函数编程实现影像分割。

一般情况下, 数字高程模型(DEM)和数字正射影像(DOQQ)既可从相关网站下载(如美国的 USGS 网站), 也可从相关的公司购买, 但两种渠道获取的数据精度不同。图 2 为实验区域的 DEM 影像。实验区域的 DOQQ 影像和 UAV 影像流分割后的单幅遥感影像如插页彩片 5、6 所示。

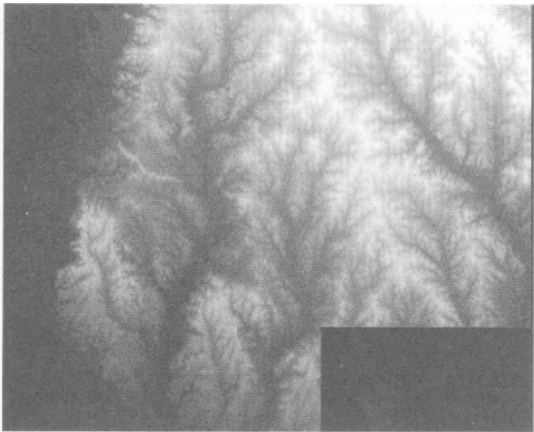


图 2 实验区域 DEM

2.2 地面控制点与像片坐标获取

地面控制点(GCP)与像片控制点(ICP)是同名特征点,坐标的量测同时完成,但二者的坐标系差异很大,前者属于平面大地坐标系,坐标单位是 m ;后者属于屏幕坐标系,坐标单位是像素。实验表明, Erdas Image 软件建立以像片左上角为原点的 Y 轴

正向向上, X 轴正向向右的屏幕坐标系,简单变换后获得常规屏幕坐标系(Y 轴正向向下)下的坐标。

将 DEM 与 DOQQ 叠加,可获取 GCP 的三维大地坐标。由于 DEM 和 DOQQ 的获得渠道可能不同,首先要保持两者的投影参数一致,然后用 LINK 功能检查。坐标获取过程中有 3 个应当注意的方面:①控制点应当尽量分布均匀,且覆盖整幅影像,GCP 数量不少于 6 个;②受影像、DEM 和 DOQQ 精度不一致的影响,应以精度最低者为限;③DLT 算法受点位高差影响大,对于地形起伏不大的地区,最好用 DSM 代替 DEM。

按照设想,从每 30 幅影像中取出 6 帧,沿飞行航线连续取出 400 帧,对每一帧进行几何校正,最后选择符合要求的影像进行拼接。

2.3 内外方位元素获取与分析

飞机上传感器获取的参数包括投影点的三维坐标和飞行姿态角(包括摆动角、滚动角、俯仰角)。数据采样间隔为 2 s,如表 1 所示。

表 1 部分飞行外方位元素

时间/s	X_s 坐标/m	Y_s 坐标/m	Z_s 坐标/m	摆动角/(°)	俯仰角/(°)	滚动角/(°)
222	504627.5485	1081532.069	250.6	164.5	1.3	1.8
220	504601.9627	1081527.255	249.6	85.3	-4.3	6.8
218	504577.178	1081519.116	246.6	82.1	-0.4	6.5
216	504552.553	1081511.346	244.6	79.9	1.4	0
214	504525.3684	1081505.423	244.6	79.9	-0.7	0.4
212	504499.4623	1081501.718	246.6	86.5	1	2.5
210	504474.6767	1081495.242	248.6	42.2	8.1	2.1
208	504456.1322	1081478.977	248.6	350.6	7.2	4.3
206	504444.6275	1081455.141	248.6	36.6	0.1	3.2
...	...	...	...	...	...	...

记录数据经过粗差检测后用于描述飞行轨迹。图 3 与图 4 分别是三维和二维空间飞行路径。

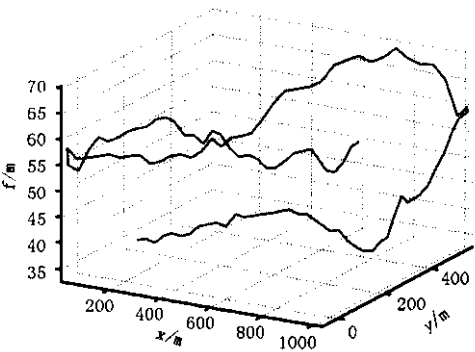


图 3 空间三维飞行路径

由于所选择的区域地势平坦(控制点间高差仅 1 ~ 2 m),因此直接采用 DLT 算法计算得到的内外

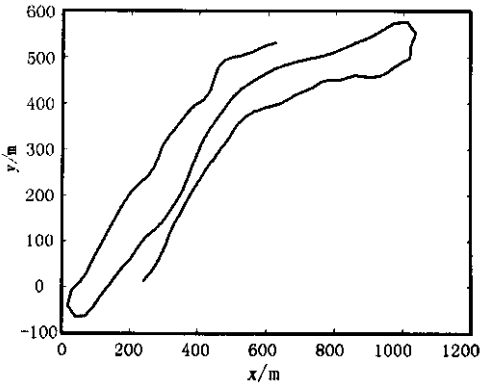


图 4 二维飞行路径

方位元素极其不稳定。为了约束共线方程的求解,将 GPS 数据作为已知量,运用 1.1 中介绍的原理,求解内方位元素,包括像片坐标 x_0 、 y_0 和相机焦距 f 。部分内方位元素值如表 2 所示。

表 2 部分内方位元素数据

序号	时间/s	投影点像片坐标/像素		
		x_0	y_0	f
1	24.00	640.254	-50.514	6.838
2	24.16	820.720	1107.53	18.38
3	24.32	186.945	-95.798	4.613
4	24.48	224.101	-61.554	1.233
5	24.64	173.676	-136.69	0.269
6	24.80	439.388	-90.408	0.417
7	24.100	357.662	-339.60	0.587
8	24.116	349.276	-75.553	0.627
...	...	...	...	...

表 2 是对应于表 1 的内定向元素 ,但发现其中的数据不稳定 ,例如相机的焦距。因此 ,以同一幅影像上的控制点坐标及其相应的像坐标为已知数据 ,以 GPS 外方位元素为初始值进行迭代求解 ,得到 $f=340.9$, $x_0=359.0$, $y_0=240.5$,单位均为像素。以此内定向参数作为固定值进行影像的几何校正。

2.4 影像的几何校正与影像拼接

首先 ,将量测的 ICP 和 GCP 坐标分别以不同的文件名存储 ,通过简单的转换后保存为 DLT 直接接收的文件 ,然后进行几何校正。Camera 模型精度较高 ,Polynomial 模型较方便 ,故选择前者进行校正 ,后者进行检验。非量测影像不需要进行内定向 ,但需要在 Fiducial 对话框内输入内定向参数。

表 3 是处理过程中输入的参数。参数的确定是依据影像的实际尺寸(裁剪后影像的实际尺寸可能略有变化) ,将屏幕坐标转化为像片坐标 ,该坐标系原点在影像实际尺寸的中央 ,以此确定 4 个角点的像片坐标再行输入。

表 3 影像内定向输入参数

序号	屏幕坐标 X	屏幕坐标 Y	像片坐标 x	像片坐标 y
1	8.0	0.00	-354.5	236.5
2	717.0	0.00	354.5	236.5
3	717.0	-473.0	354.5	-236.5
4	8.0	-473.0	-354.5	-236.5

图 5 给出了屏幕坐标到像片坐标的转化模型。表 4 给出了校正时 Orientation 对话框输入的方位元素参数。先前在获取 GCPs 和 ICPs 坐标时保存的坐标数据文件仍然可用。参数校正时必须知道 :内方位元素的单位均为像素 ,直接输入即可 ,不必化为 mm 单位。因为式 (1) 、(2) 不受内方位元素的影响。

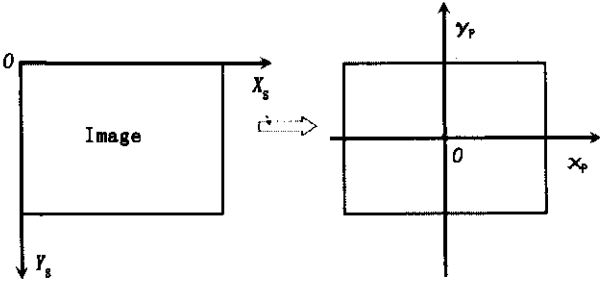


图 5 屏幕坐标与像片坐标转化模型

表 4 影像外方位元素输入参数

旋转角/(°)			投影中心坐标		
滚动角	俯仰角	摆动角	X	Y	Z
-0.128	0.386	-1.128	504368.05	1081381.77	248.6

插页彩片 7、8 分别是单幅影像的校正结果和多幅校正影像拼接图。如彩片 8 所示 ,图中地物清晰 ,个别边沿连接不光滑主要是因为 DOQQ(从网上下载)的精度低于影像精度 ,导致控制点匹配误差。另外 ,受相机镜头畸变的影响 ,离镜头中心越远 ,变形越大。因此可以给定变形阈值 ,对超出阈值的区域进行裁剪 ,对符合要求的部分作拼接处理。

3 精度评估

正射影像的精度一直是备受关注的问题^[11]。一般说来 ,有两种基本的评估方法 ,一是在影像采集之前在实验区域内布设一些地面控制点 ,用 GPS 采集控制点的大地坐标 ,然后比较地面与影像上同名点的坐标差 ,应用中误差公式进行统计 ;另一种方法是直接比较正射影像和参考影像上的同名点坐标。本文采用后一种方法。

在实验区域选择 4 种不同类型的地物或地形 :森林、城市、山区和平地。图 6 和图 7 表示应用方法二评估拼接图像精度的基本思想。

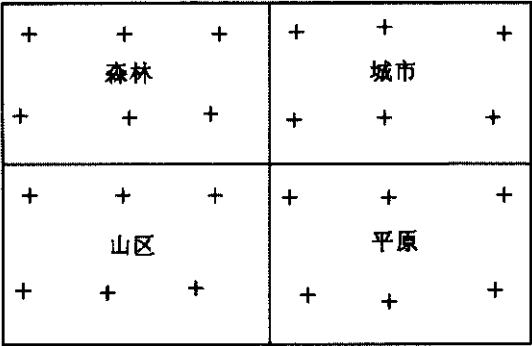


图 6 正射影像特征点分布

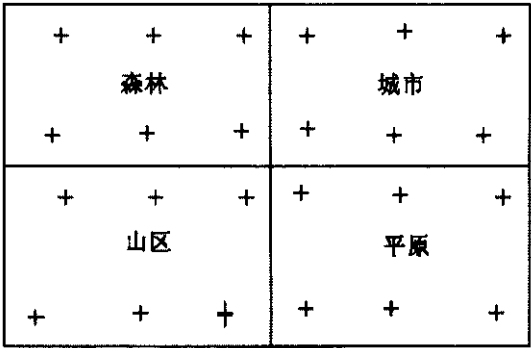


图 7 参考影像特征点分布

图 6、7 上的“ + ”表示地面特征点/控制点。本研究随机选择 43 个点 ,其中有 14 个点位于森林区域 ,15 个点位于城市区域 ,14 个点位于平原区域。通过测量、对比与数据处理 ,得到均方误差 $E = \pm 1.5\text{ m}$ 。为了准确评估拼接精度 ,先对数据进行预处理 ,以 2 倍中误差为限剔除粗差。这里 $\delta = \sqrt{[vv]/n} = \pm 2.3\text{ m}$ 。剔除粗差后 ,重新统计坐标差的最后中误差 ,见表 5。

表 5 精度评估

地形	点数	数据集	粗差	百分比/%	中误差
森林	14	28	5	19	$[vv] = 178.15$
城市	15	30	2	6	$n = 76$
平原	14	28	2	7	$E = \pm 1.5\text{ m}$

从表 5 可以看出 ,DOQQ 的精度对拼接影像精度有较大影响。精度评估的最佳方法是以地面控制点作为参考点进行坐标差统计分析。

4 结论

本文阐述了 MUAV 高精度影像流的获取、分割及基于 DLT 算法的低空遥感影像的几何纠正方法——正射影像的生成方法与基本思路。研究结果表明：

- (1)将近景摄影测量方法移植到低空遥感影像数据处理中可行；
- (2)MUAV 获取的稳定的高清晰度影像是生成高精度正射影像的关键；
- (3)MUAV 影像、DEM 和 DOQQ 精度的不匹配会影响最终的纠正与拼接结果；

(4)对于地面特征点不明显的草原、森林等地区 ,GCPs 和 ICPs 难以确定 ,可以借助插值法与邻域相关法实现连接 ,这将在后续的研究成果中报道。

参考文献

[1] Wegener S , Ambrosia V , Stoneburner J , et al. Demonstration of Real - time Fire Monitoring Using UAV[A]. Proceeding of the American Institute of Aeronautics and Astronautics (AIAA) Conference[C]. Portsmouth , VA ,2002.

[2] Rakesh Kumar , Harpreet Sawhney ,Supun Samarasekera , et al. Aerial Video Surveillance and Exploitation[J]. Proceedings of The IEEE ,2001 ,89(10) :1180 - 1296.

[3] Henri Eisenbeiss. A Mini - Unmanned Aerial Vehicle (UAV) : System Overview and Image Acquisition[A]. International Workshop on “ Processing and Visualization Using High - Resolution Imagery ” [C]. Pitsanulok , Thailand ,2004.

[4] Zhou G , Qin Z , Benjamin S. Technical Problems of Deploying National Urban Large - scale True Orthoimage Generation[A]. The 2nd Digital Government Conference[C]. Boston ,2003.

[5] Li Chaokui , Wu Jun. Spatial Decision Support Proofs : Obtaining and Applying[J]. GIM : International Magazine for Geomatics. , 2006 ,(1) :43 -45.

[6] Zhou Guoqing , Li Chaokui. Unmanned Aerial Vehicle(UAV) Real - time Video Registration for Forest Fire Monitoring[A]. IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium[C]. Seoul Korea ,2005.

[7] 王之卓. 摄影测量原理[M]. 北京 :测绘出版社 ,1979.

[8] 冯文灏. 近景摄影测量[M]. 武汉 :武汉大学出版社 ,2002.

[9] 张祖勋 ,张剑清. 数字摄影测量学[M]. 武汉 :武汉测绘科技大学出版社 ,1996.

[10] [http ://www . dfrc . nasa . gov/Gallery/Photo](http://www.dfrc.nasa.gov/Gallery/Photo).

[11] Wang H , Ellis E C. Spatial Accuracy of Ortho - rectified IKONOS Imagery and Historical Aerial Photographs Across Five Sites in China[J]. International Journal of Remote Sensing , 2005 ,26(9) : 1893 - 1911.

GEOMATRIC RECTIFICATION FOR VIDEO
IMAGE FROM MUAV BASED ON DLT

LI Chao - kui^{1 2} , ZHOU Guo - qing²

(1. *Research Institute of Geospatial Information Science ,Hunan University of Science and Technology ,Xiangtan 411201 ,
China ;2. Department of Engineering and Technology ,Old Dominion University ,Norfolk VA 23529 , USA*)

Abstract : In recent years ,the Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) have aroused increasing interests among experts for such civilian applications as disaster monitoring ,surveillance and spatial decision - making support. The high - resolution orthoimage generated from the UAVs video image stream can be used as a basic map for planners and decision - makers to make decisions by obtaining high precision geospatial data through registering ,compiling ,measuring and analyzing the orthoimage. This paper presents the methods for producing the true orthoimage from UAVs streams. The IOPs are calculated by using iteration algorithm having the EOPs obtained from GPS and INS system as initial values ,and these parameters are used for rectification of UAVs image. Experimental results show that all the orthoimages are of high accuracy under the condition that DEM/DSM ,DOQQ and UAVs video image have the same resolution.

Key words : MUAV ;Video image stream ;Geomatic rectification ;DLT algorithm

第一作者简介 :李朝奎(1967 -) ,男 ,教授 ,博士 ,主要从事三维城市模型的应用分析及无人机遥感影像处理研究。

(责任编辑 :刁淑娟)

=====

(上接第 18 页)

THE APPLICATION OF SCS + C METHODS FOR
TOPOGRAPHIC RADIATION CORRECTION

ZHONG Yao - wu^{1 2} , LIU Liang - yun¹ , WANG Ji - hua¹ , YAN Guang - jian²

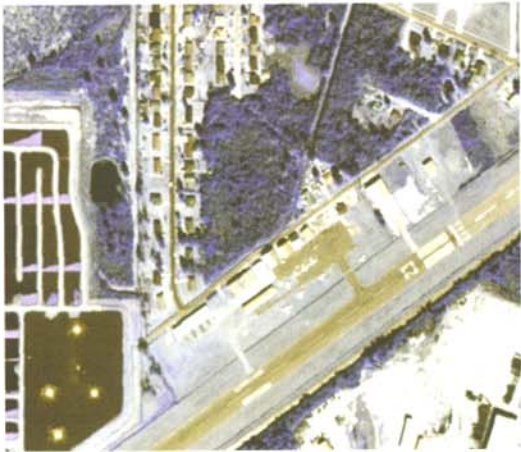
(1. *National Engineering Research Center for Information Technology in Agriculture ,Beijing 100089 ,China ;2. State Key Laboratory of Remote Sensing Science ,College of Geography and Remote Sensing ,Beijing Normal University ,Beijing 100875 ,
China*)

Abstract : As irradiance depends on slope and aspect ,the remote sensing image in rugged areas is severely affected by the topographic effects. Topographic correction based on sun - canopy - sensor (SCS) geometry is more appropriate than terrain - based corrections in forest areas because SCS preserves the geotropic nature of trees (vertical growth) regardless of terrain ,view ,and illumination angles. However ,in some terrain orientations ,SCS might encounter the overcorrection problem similar to other simple photometric functions. To solve this problem ,Scott proposes a new SCS + C correction that accounts for diffused atmospheric irradiance based on the C - correction. The SCS + C method was tested by a Landsat 5 image in a rugged area of Beijing. The results show that SCS + C can provide improved corrections compared with the SCS and three other photometric approaches (cosine ,C ,SCS) ,remove topographic effects successfully and restore the land - surface information in shadow areas effectively.

Key words : Remote sensing image ;Topographic correction ;Sun - canopy - sensor (SCS) ;SCS with C - correction (SCS + C)

第一作者简介 :钟耀武(1981 -) ,男 ,硕士 ,主要从事遥感图像处理与遥感应用研究。

(责任编辑 :刁淑娟)



彩片5 实验区域的DOQQ



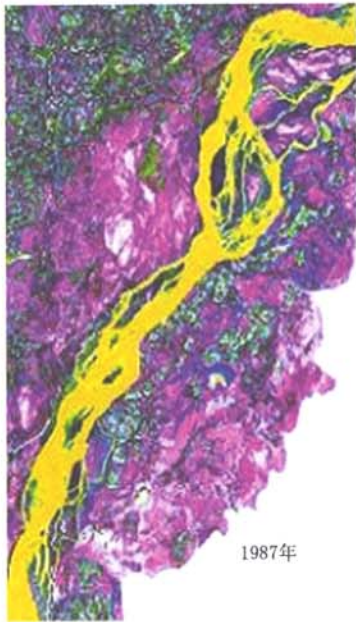
彩片6 实验区域单幅影像



彩片7 单幅实验校正影像



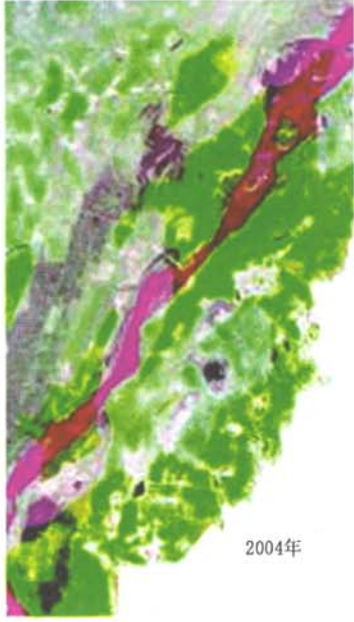
彩片8 五幅校正影像拼接图



1987年



1997年



2004年

彩片9 彩色增强后的黄河银川平原段遥感影像
(彩片9见吴加敏一文)