

# 无人机影像拼接误差实验研究

何敬 李永树 鲁恒

(西南交通大学地理信息工程中心, 四川 成都 610031)

**摘要** 由于无人机影像具有数据量大、分辨率高等特点,在进行影像拼接处理时会涉及多张影像,因此其拼接误差不能忽略,且随着拼接影像数量的增多误差会不断积累。在分析了无人机影像拼接主要误差来源之后,较深入地研究了影像重叠度及误差累积问题。确定了无人机影像拼接的最佳重叠度,并依据最佳重叠度对原始影像进行“抽稀”处理,最后提出了一种适用于无人机影像的分块拼接方法。研究表明,根据最佳重叠度对原始影像进行“抽稀”能减少参与拼接的影像数量,对“抽稀”后的影像采用分块拼接方法能够有效地减小拼接误差、改善影像拼接视觉效果,同时在一定程度上提高了影像处理效率。

**关键词** 图像处理;影像拼接;无人机;误差累积;误差分析;最佳重叠度

**中图分类号** TP391 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/LOP48.121001

## Experimental Study on UAV Image Stitching Error

He Jing Li Yongshu Lu Heng

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

**Abstract** As the unmanned aerial vehicle (UAV) image has large data amounts and high resolution, the stitching error cannot be ignored during the image mosaic process which involves multiple images. Furthermore, with the number of mosaic images increasing the errors will continue to accumulate. The main error sources of UAV image mosaics are analyzed. A deep study is made on the image overlap and the error accumulation problem. The optimal overlap of UAV image mosaic is determined, and the original image is sparsed according to the optimal overlap. Aiming at the error accumulation problem during splicing process, the block splicing method is proposed. The experimental results show that the number of images can be reduced according to the optimal overlap, and the stitching error can be reduced effectively as the block splicing method is adopted to splice sparsed image. The vision effect of image splicing can be improved, with the efficiency of image processing enhanced in a certain extent.

**Key words** image processing; image stitch; unmanned aerial vehicle; error accumulation; error analysis; optimal overlap

**OCIS codes** 100.2000; 110.3000; 110.4155

## 1 引言

影像拼接就是把同一场景的相互有部分重叠的一系列图片合成为一张大的宽视角影像。影像拼接技术在空间探测、海底勘测、医学、气象、地质勘测、军事、视频压缩和传输等领域都有广泛的应用。近年来,研究人员在影像拼接方面做了大量的研究工作。赵向阳等<sup>[1]</sup>采用 Harris 角检测算子进行特征点提取,提取的精度能够达到亚像素级。Lowe<sup>[2]</sup>提出了尺度不变特性变换的特征点提取方法,该算法对影像缩放、旋转有很强的适应性。吴宪祥等<sup>[3]</sup>提出了一种基于相位相关的图像拼接算法。郝志成等<sup>[4]</sup>通过局部信息熵、相似性测度和距离比例不变作为约束条件,对影像进行匹配。何建伟等<sup>[5]</sup>利用系统论中的方法对 SIFT 算法进行

**收稿日期**: 2011-07-14; **收到修改稿日期**: 2011-08-19; **网络出版日期**: 2011-10-13

**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**: 何敬(1983—),男,博士研究生,主要从事遥感、全球定位系统和地理信息系统的技术与系统集成等方面的研究。E-mail: xiao00yao@163.com

**导师简介**: 李永树(1957—),男,教授,博士生导师,主要从事地理信息系统理论及应用、遥感数据处理等方面的研究。E-mail: yshli@home.swjtu.edu.cn

了改进。现有的各种影像融合方法、影像拼接的基本类型、近年来影像拼接的研究状况及研究方法都得到了很好的总结<sup>[6,7]</sup>。

文献[1~7]研究工作多集中在特征点提取、剔除误匹配及影像融合等方面,但是对拼接过程中的误差较少涉及。对于无人机(UAV)影像来说,通常一个测区的影像少则上百张,多则上万张,面对这么庞大的数据量,其影像拼接误差的累积是不能忽略的。针对该问题,本文分析了无人机影像拼接误差的来源,讨论了一些减小影像拼接误差的技术措施。

## 2 影像拼接主要误差分析

### 2.1 模型变换误差

无人机在空中作业时,将受到风速、气流和发动机振动等多因素的影响。同时由于无人机的载重量有限,通常不能安装大型稳定平台,这就导致安装在无人机上的数码相机经常在不稳定环境下拍摄影像<sup>[8]</sup>。虽然无人机上的测微装置可以记录下无人机在空中的姿态参数,但是其记录的参数与影像之间存在一定的延迟,且目前无人机上的测微装置精度较低,所以要恢复影像拍摄时的真实姿态比较困难。

在影像拼接时,通常选用仿射变换模型,因为该模型的直线性较好,符合人们的实际视觉特性<sup>[9]</sup>。但是由于仿射变换是线性变换,只能对相机在空中的水平位移、旋转及高度变化进行模拟,无法对相机的俯仰角、翻滚角等其他因素造成的相机运动情况进行模拟。而这些未被模拟的因素同样会造成影像的畸变,如俯仰角、翻滚角会造成影像内比例尺线性变化。因此,在采用仿射变换模型将不同影像投影到同一平面时,各张影像内部的畸变实际上未被完全消除,残余的误差随着原影像被带到合成的新影像中。

### 2.2 影像配准误差

目前,影像配准的算法很多,根据确定配准控制点的方法和配准中利用的影像信息区别可将影像配准方法分为三类<sup>[10]</sup>:灰度信息法、变换域法和特征法。尽管这些配准方法对相邻影像的精度很高,但是它们并不能描述实际成像过程中所有因素的影响,因此这些方法或多或少都存在配准误差。

### 2.3 影像融合误差

无人机数字影像都是由一个个离散的像素坐标构成,且像素坐标都是整数,在经过仿射变换之后,势必会出现小数的像素坐标,这时就需要利用插值技术进行处理,在转换后未获得像素值的整数坐标内插出其像素值,误差也由此产生。另一方面,在影像的接边处,会出现多张影像同时存在相同区域的现象,在这种重叠区域需要进行颜色融合,如果融合处理不好就会出现“鬼影”现象。

## 3 最佳重叠度分析

影像重叠度与拼接误差之间有着密切的关系,唐璜等<sup>[11]</sup>对最佳重叠比例进行了详细的论述。图1中的曲线1是重叠度与拼接误差之间的变化关系,曲线2是重叠度与影像配准之间的耗时关系,图中假设拼接误差和最大耗时均为100单位。从曲线1可以看出当重叠度达到一定值时,再增加重叠度进行拼接其误差降低已不十分明显,而提取特征点的耗时却在不断上升。综合考虑拼接误差与耗时的关系,确定最佳重叠度位置为图中A点(此处的最佳重叠度并不是指能够获得最高的配准精度,而是指配准精度和耗时关系达到最优)。文献[11]由两种拼接误差模型所计算出的最佳重叠度分别为0.250和0.375,结合无人机影像的特点,可以将0.250~0.375确定为最佳重叠度范围。

实验中获取无人机影像的航向重叠度约为70%,旁向重叠度约为45%。按照最佳重叠度要求,将影像做“抽稀”处理,即对同一航带上的影像隔一张取一张。对于相同测区面积来说,拼接的影像数量将减少一

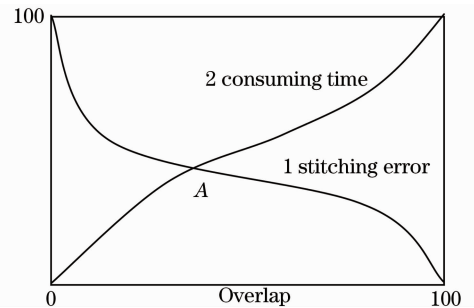


图1 重叠度、耗时、拼接误差曲线示意图  
Fig. 1 Relation among overlap, consuming time and stitching error

半,拼接处理的时间也减少了一半,而整个影像的拼接精度却有所提高。

## 4 影像分块方法

### 4.1 选择影像

选择不同航带的影像进行分块和选择同一航带的影像进行分块,产生的误差不一样。为了便于分析,现假设有4张影像需要拼接,如图2所示。

A,B为同一航带的相邻两张影像,C,D为另一航带的两张影像。假设这4张影像以A为基准,按照图中箭头所示方向进行拼接,那么这4张影像通过配准之后求出相应的 $dx,dy$ ,理论上 $dx,dy$ 的代数和应该为0,即

$$\sum dx_i = 0, \sum dy_i = 0. \quad (1)$$

由于配准时存在误差,所以求取的转换参数也存在误差,最终导致 $dx,dy$ 产生闭合差 $fx, fy$ ,其计算公式为

$$\begin{cases} fx = \sum dx_a - \sum dx_t \\ fy = \sum dy_a - \sum dy_t \\ f = \sqrt{fx^2 + fy^2} \end{cases} \quad (2)$$

式中 $f$ 为闭合差的长度,其值与拼接影像的多少相关,即拼接的影像越多则闭合差越大。如果不及时对误差进行处理,那么上一张的拼接误差将传递到下一张待拼接的影像上。如此传递下去,后面拼接的影像终因误差过大而和前面影像发生明显的错位现象,严重者甚至无法拼接。为了改善整体的拼接效果,可以将 $f$ 分配到各个拼接影像上,每张拼接影像具体的改正量为

$$\begin{cases} \delta x = -\frac{fx}{\sum D} D_i \\ \delta y = -\frac{fy}{\sum D} D_i \\ \sum D = \sum \sqrt{dx_k^2 + dy_k^2} \quad (k = 0, 1, \dots, n) \end{cases} \quad (3)$$

式中 $D$ 为影像配准后的偏移量。各个影像的偏移量为

$$\begin{cases} dx_{ij} = dx_{ij} + \delta x_{ij} \\ dy_{ij} = dy_{ij} + \delta y_{ij} \end{cases} \quad (4)$$

同样,对于转换参数中的旋转角度,由于是采用同一种配准算法求取的,所以解算出每个旋转角度的精度相同,故按照“反其符号,平均分配”的原则,对每两张影像之间的旋转角度进行改正。

通过上述改正,将总体的平移误差和角度误差都分配到了各个拼接的影像对中,总体的闭合差将为零。处理后的拼接效果局部细节可能不如从前,但总体效果相对于处理前是有改善的。

如果选择的4张影像为同一航带,其位置如图3所示。由于图中A,B,C,D这4张影像为同一个航带的影像,没有闭合条件则无法计算其拼接过程中的闭合差,所以4张影像的拼接误差无法控制。随着误差的累积传递,4张影像可能会按照图中弧线所示的方向,而不是直线的方向进行拼接。

### 4.2 确定分块方法

下面以8张影像为例说明具体的分块主要步骤:

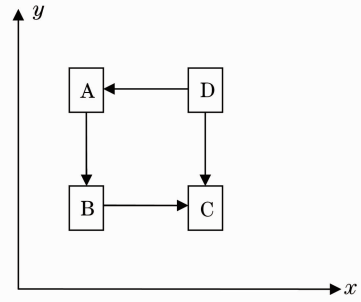


图2 影像位置示意图

Fig. 2 Schematic diagram of image position

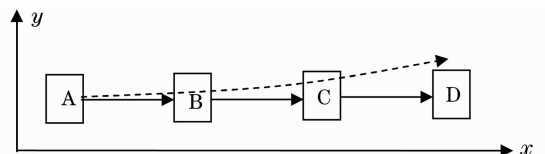


图3 同一航带上影像位置示意图

Fig. 3 Schematic diagram of the same line of image position

1) 确定影像位置关系。根据无人机飞行数据确定 8 张影像的相对位置关系,将无人机原始飞行记录数据(如表 1 所示, $\omega$  代表旋转角, $\phi$  代表俯仰角, $\kappa$  代表翻滚角)导入到相关软件中,如 Matlab,Excel,Cass 等软件,本文采用 Cass 软件绘制出飞行航带图,见图 4 所示。通过航带图可初步确定影像的大致位置关系,如影像“477”与“476”为同航带的相邻影像,而与“430”为不同航带的相邻影像。



图 4 航带图(局部)

Fig. 4 Chart of the flight trace (Part)

2) 确定分块影像及分块大小。根据前面的分析可知,选取的影像应该分布在两个相邻航带。如果将分块的影像看成一个控制网,从网形结构和稳定性考虑,正方形的网形结构要比长方形的网形结构更优。因此在确定分块时,应该首选正方形的分块方法。将图 4 中的影像按  $2 \times 2$  进行分块,即在影像“477”和“430”代表的航带中各选择 2 张相邻影像,方框所圈的影像即为一个影像块。

表 1 无人机原始飞行记录数据

Table 1 UAV flight log data

Image ID	Date	Time	Longitude / (°)	Latitude / (°)	Altitude / m	$\omega$ / (°)	$\phi$ / (°)	$\kappa$ / (°)
430	Sunday	10:03:32	103.9375113	31.13481	1450.162	-2.8	2.3	359.7
431	Sunday	10:03:36	103.9375119	31.13594	1450.732	-2.1	1.9	359.7
432	Sunday	10:03:41	103.9375121	31.13707	1449.926	-1.9	4.1	0.1
433	Sunday	10:03:45	103.9375191	31.13815	1450.645	-3.1	0.5	359.3
474	Sunday	10:06:45	103.9404501	31.13841	1451.325	-3.6	2.5	179.7
475	Sunday	10:06:49	103.9404485	31.13731	1450.208	-3.4	-0.3	180.1
476	Sunday	10:06:54	103.9404518	31.13622	1452.573	-4.5	0.5	179.9
477	Sunday	10:06:58	103.9404492	31.13509	1451.154	-3.8	1.6	179.5

## 5 实验分析

为了验证本文提出方法的有效性,利用某镇的部分无人机影像进行实验分析,其结果如图 5 所示。



图 5 抽稀与分块拼接效果对比

Fig. 5 Compared with sparse and block

从图 5 所示的各种拼接效果来看,未对影像进行任何处理直接进行拼接,其效果最差,图中存在 3 处明显的错位现象;而采用分块未“抽稀”进行拼接时,图中只有 1 处明显的错位现象;在对影像进行了“抽稀”而未分块进行拼接时,图中存在 2 处错位现象;对影像进行“抽稀”再进行分块拼接,图中已经没有明显的错位现象。因此,在进行多张无人机影像拼接时,应该首先考虑采用分块的方式进行拼接;如果影像间的重叠度过大,超过了最佳重叠度的范围,应先进行“抽稀”处理,再采用分块的方式进行拼接。

## 6 结论

针对大量无人机影像进行拼接时会产生误差累积的现象,提出先采用“抽稀”方法降低影像的重叠度,然

后再利用分块的方法进行拼接,并使用无人机影像数据对其进行了实验分析。对几种不同的拼接方法进行了实验对比,结果表明使用本文方法可以减弱影像拼接误差累积的影响,提高影像拼接精度。

### 参 考 文 献

- 1 Zhao Xiangyang, Du Limin. An automatic and robust image mosaic algorithm [J]. *J. Image and Graphics*, 2004, **9**(4): 417~422  
赵向阳, 杜利民. 一种全自动稳健的图像拼接融合算法[J]. 中国图象图形学报, 2004, **9**(4): 417~422
- 2 David G. Lowe. Distinctive image features from scale-invariant keypoints[J]. *International Journal of Computer Vision*, 2004, **60**(2): 91~110
- 3 Wu Xianxiang, Guo Baolong, Wang Juan. Cylindrical panoramic image automatic mosaic algorithm based on phase correlation[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(7): 1824~1829  
吴宪祥, 郭宝龙, 王娟. 基于相位相关的柱面全景图像自动拼接算法[J]. 光学学报, 2009, **29**(7): 1824~1829
- 4 Hao Zhicheng, Zhu Ming. Serial image registration based on multiple restriction matching algorithm[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(3): 702~707  
郝志成, 朱明. 基于多约束准则匹配算法的序列图像配准[J]. 光学学报, 2010, **30**(3): 702~707
- 5 He Jianwei, Yang Jianfeng, Xue Bin *et al.*. Research on the automatic stitching of panorama camera image based on system similarity matching principle[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(4): 989~993  
何建伟, 杨建峰, 薛彬等. 基于系统论匹配准则的尺度不变特征变换的图像自动拼接研究[J]. 光学学报, 2010, **30**(4): 989~993
- 6 Xie Kai, Guo Hengye, Zhang Tianwen. A survey of image mosaics technology [J]. *Acta Electronica Sinica*, 2004, **32**(4): 630~634  
解凯, 郭恒业, 张田文. 图像 Mosaics 技术综述[J]. 电子学报, 2004, **32**(4): 630~634
- 7 Yu Hongsheng, Jin Weiqi. Evolvement of research on digital image mosaics methods[J]. *Infrared Technology*, 2009, **31**(6): 348~353  
余宏生, 金伟其. 数字图像拼接方法研究进展[J]. 红外技术, 2009, **31**(6): 348~353
- 8 Li Congli, Xue Mogen, Leng Xiaoyan *et al.*. Analysis and elimination on aerial recon sequential image stitching accumulative error[J]. *J. Image and Graphics*, 2008, **13**(4): 814~819  
李从利, 薛模根, 冷晓艳等. 空中侦察序列图像连续拼接的误差的累积误差分析与消除[J]. 中国图象图形学报, 2008, **13**(4): 814~819
- 9 Lu Peizhong, Wu Lide. Algebraic analyses of the camera motion models in video[J]. *J. Fudan University (Natural Science)*, 1999, **38**(4): 460~464  
陆佩忠, 吴立德. 视频流中的摄像机运动参数模型的代数分析[J]. 复旦学报(自然科学版), 1999, **38**(4): 460~464
- 10 Sun Shuyi, Wu Yong, Wu Jianmin. Image registration method based on edge features[J]. *Computer Engineering and Applications*, 2008, **44**(7): 94~96  
孙淑一, 吴勇, 吴建民. 一种基于边缘特征的图像配准方法[J]. 计算机工程与应用, 2008, **44**(7): 94~96
- 11 Tang Jin, Gu Shiwen, Cai Zixing. Theoretical analysis on image stitching error[J]. *Mini-Micro Systems*, 2003, **24**(12): 2185~2189  
唐璜, 谷士文, 蔡自兴. 图像拼接误差的理论分析[J]. 小型微型计算机系统, 2003, **24**(12): 2185~2189