

基于航向约束的无人机图像匹配算法

陈坚¹, 仲思东^{1,2}, 徐安丽¹

(1. 武汉大学电子信息学院, 武汉 430072; 2. 测绘遥感信息工程国家重点实验室, 武汉 430079)

摘要: 针对无人机航拍影像的高分辨率特点, 用简化的尺度不变特征变换(SIFT)算法提取待匹配图像中的特征点并粗匹配。根据航拍图像的特殊获取方式, 提出一种基于航向约束的特征点提纯算法, 并用实验进行验证。结果表明, 此算法能有效提纯匹配点, 提纯率达到25%, 与随机抽样一致(RANSAC)算法比较, 在保持提纯率的前提下, 效率提高了将近一倍。

关键词: 无人机图像; 特征匹配; SIFT; 航向约束

中图分类号: TP391.41 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-637X(2016)05-0026-04

Course Constraint Based Feature Matching Algorithm for UAV Aerial Images

CHEN Jian¹, ZHONG Si-dong^{1,2}, XU An-li¹

(1. School of Electronic Information, Wuhan University, Wuhan 430072, China;

2. National key Laboratory of Surveying and Mapping of Remote Sensing Information Engineering, Wuhan 430079, China)

Abstract: According to the high resolution of UAV aerial images, the simplified Scale Invariant Feature Transform (SIFT) algorithm is used to extract the feature points and complete coarse matching. Considering the special access of aerial images, a new method for feature point purification is proposed based on course constraint. Experimental results show that this method can purify the matching points effectively, and the purification rate runs up to 25%. Compared with Random Sample Consensus (RANSAC) algorithm, the efficiency is nearly doubled while maintaining the purification rate.

Key words: UAV image; feature matching; SIFT; course constraint

0 引言

随着民用商用无人机的普及, 通过无人机进行航拍获取的影像开始用于包括检测预警、目标跟踪、交警执法、数字地图生成、体育赛事直播等在内的各个领域^[1]。然而, 由于受所搭载的相机视场所限, 所拍摄的单幅图像所覆盖的范围太小而满足不了使用的需求, 于是需要借助图像拼接技术。传统的图像拼接技术通常是将几幅低分辨率窄视场的图像拼接为高分辨率大视场图像^[2], 或是对遥感影像的拼接^[3]。而无人机在(30~300 m)超低空领域获取的图像, 与一般图像相比有相幅较大、畸变较大、航向窄、纹理丰富但分布极

不均匀等几个特点, 且有较大的畸变。针对这样的图像, 首先须对无人机图像进行几何校正^[4]。图像匹配是图像拼接环节最重要的一步, 尺寸不变特征变换(SIFT)算法对于旋转和尺度具有不变性, 并且对噪声、视角变化和光照变化具有良好的鲁棒性^[5-6], 相对于基于灰度信息和基于变换域, 其基于尺度不变性的特点要更适用于对无人机图像的匹配。然而, SIFT算法在处理高分辨率图像时, 需要耗费很长的时间, 并且会产生大量的特征点, 使整个匹配工作效率降低。文献[7]提取尺度不变的 Harris 角点, 用 Forsnter 算子对角点精定位改进了 SIFT 算法中的特征点检测方法, 减少了特征点数量, 在基本保持配准精度的同时, 大大减少了标准 SIFT 算法所需的配准时间; 文献[8]利用粗匹配加分块匹配的匹配策略, 在提高效率的同时, 保持了精度不变; 文献[9]在分析 SIFT 特征向量生成过程的基础上, 以准欧式距离代替欧氏距离作为特征描述符之间的相似性度量来提高 SIFT 特征匹配效率。而本

收稿日期: 2015-09-02

修回日期: 2016-01-15

基金项目: 国家“七九三”计划项目(2012CB725301); 测绘地理信息公益性行业科研专项项目(201412015)

作者简介: 陈坚(1991—), 男, 浙江衢州人, 硕士, 研究方向为计算机视觉与图像处理。

文针对航拍图像的特点,先利用 SIFT 算法检测特征点,针对特征点过多,造成提纯和计算变换矩阵效率过低的问题,考虑到航拍图像的获取通常由无人机在固定航向上直线飞行,因此,航向的固定会对相邻两幅待匹配图像中的特征点产生一定的几何约束,利用这一约束,去除误匹配,提高匹配精度和效率,最后才可将对准的图像进行融合^[10]。

1 SIFT 特征匹配

SIFT 算法是一种基于尺度空间的,且对图像缩放、旋转、仿射变换保持不变性的特征匹配算法。待匹配图像在经过畸变矫正和预处理的过程后,用 SIFT 算法对其进行配准。配准过程包括特征点提取和特征点匹配^[11]两步。

1.1 特征点提取

将高斯核与图像进行卷积,得到多尺度图像,其中高斯核为

$$G(x, y, \sigma) = \frac{1}{2\pi\sigma} e^{-(x^2+y^2)/2\sigma^2} \quad (1)$$

而高斯核与图像的卷积可表示为

$$L(x, y, \sigma) = G(x, y, \sigma) \otimes I(x, y) \quad (2)$$

式中: \otimes 表示在 x, y 方向上的卷积; L 表示图像尺度空间下的某尺度; (x, y) 代表 I 上的点; σ 是尺度因子,其值的大小直接影响高斯核对图像的平滑程度,值越小,平滑的越少。设定某 k 值,使下一阶的尺度因子为前一阶的 k 倍,如此连续的平滑处理后可得到高斯金字塔,将得到的每一阶相邻尺度的高斯图像相减,得到高斯差分尺度空间表示,即 DOG 图像,图 1 所示为高斯金字塔与高斯差分金字塔。

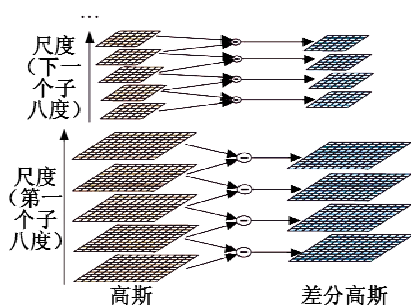


图 1 高斯金字塔与高斯差分金字塔

Fig. 1 Gaussian pyramid and Gaussian difference pyramid

在 DOG 尺度空间中,除去最底层和最顶层之外的每层的每个图像需要跟其同尺度的周围相邻 8 个像素以及其上下两相邻尺度的 9×2 个相邻像素共 26 个像素进行比较,以确保在图像空间和尺度空间都能检测到局部极值点。在去除边缘效应后,根据检测到的关键点局部图像结构为特征点方向赋值,计算特征点的主方向,即

$$m(x, y) = ((L(x+1, y) - L(x-1, y))^2 + (L(x, y+1) - L(x, y-1))^2)^{1/2} \quad (3)$$

$$\theta(x, y) = \arctan\left(\frac{L(x, y+1) - L(x, y-1)}{L(x+1, y) - L(x-1, y)}\right) \quad (4)$$

式中: $m(x, y)$ 为点 (x, y) 处的梯度值; $\theta(x, y)$ 为点 (x, y) 处的方向值。在完成关键点邻域内高斯图像梯度计算后,使用直方图统计邻域内像素对应的梯度方向和幅值。SIFT 算法将直方图峰值定义为关键点处邻域内图像梯度的主方向,当存在相当于主峰值 80% 能量的峰值时,定其为辅方向。为提高效率,本文采取简化的主方向定义方法,即只取主方向而忽略辅方向。

1.2 特征点匹配

在完成特征点提取后,提取的特征点将具备位置、尺度和方向 3 个信息,采用 SIFT 描述子对其进行描述。将坐标轴按特征点的主方向旋转一定角度,以特征点为中心取 16×16 像素窗口, 4×4 区域为一个种子点,每个种子点以式(3)、式(4)计算梯度,然后将每个种子点的 8 个方向梯度按规律排序,构成 128 维向量,至此 SIFT 描述子生成。两幅待匹配的图像分别得到特征向量后,以欧氏距离作为判定标准,欧氏距离为

$$D = \sqrt{\sum_{i=0}^k (Des_p(i) - Des_q(i))^2} \quad (5)$$

为解决高维度搜索问题,SIFT 算法采用最优节点优先(Best Bin First, BBF)算法对传统的 K-D 树算法做逼近,考虑那些在最近点距离 0.8 倍以内的最邻近点,实现目标特征向量的快速粗匹配^[12]。

1.3 匹配点筛选

粗匹配完成后,相邻两幅航拍待拼接图像间会有大量的匹配点,其中包含了许多的无匹配点,SIFT 算法通常采用随机抽样一致(RANSAC)算法消除无匹配并计算变换矩阵^[13-14]。RANSAC 算法的原理是利用 4 组匹配对作为样本估计变换矩阵模型,再对总体进行检验,获得能得到最多内点数的模型,然后通过该模型阈值内的内点计算出最后的模型。但由于处理对象是高分辨率航拍图像,因此产生的匹配点数量大,且存在许多误匹配,这样便会对 RANSAC 算法的效率造成极大的影响,尤其是估计模型部分。为此,本文利用航拍图像的获取特点,提出一种基于航向约束的匹配点精选算法。

在特征点提取和匹配阶段,SIFT 算法以图像的尺度和梯度作为基本的描述特征,而处于同一航向的待匹配航拍图像不仅是经上述尺度和梯度描述可产生匹配点这样简单的关系,紧密联系它们的还有两幅图像的几何关系,除了一些抖动和微小的偏转,还有相邻图像中的不重叠部分,可以认为其余的部分在相邻两图像中存在一个近似的平移关系,而这个平移关系即无

人机在航向上的运动。这样,在待匹配的航拍图像的所有特征点都应该受到这个几何关系的约束,只要解算出这个关系,便可以去除一部分误匹配点,而这个关系的解算也可以具象为对无人机航向的解算。本文利用这个约束筛选匹配点,并设定一定的阈值防止将正确的匹配点误除。

图像 A 和图像 B 为待匹配航拍图像,用 SIFT 特征提取与匹配算法获取图像 A 和图像 B 中的粗匹配点,分别为 $M = \{m_1, m_2, \dots, m_n\}$ 和 $N = \{n_1, n_2, \dots, n_n\}$,其中, m_i 和 n_i 为第 i 组匹配点。定义 h_i 为匹配点间的几何关系, $h_i = (d_i, \theta_i)$, 其中, d_i, θ_i 分别为距离关系和角度关系。

$$L = \sum_{i=1}^n |d_i| / n \quad (6)$$

$$\Theta = \sum_{i=1}^n |\theta_i| / n \quad (7)$$

求得约束关系 $H = (L, \Theta)$, 其中, L 为距离约束, Θ 为角度约束。然后设定阈值,将匹配点对逐一与约束值对比,去除在阈值外的匹配点对,最后留下 k 组匹配点对 $P = \{p_1, p_2, \dots, p_k\}$ 和 $Q = \{q_1, q_2, \dots, q_k\}$, 算法流程如图 2 所示。

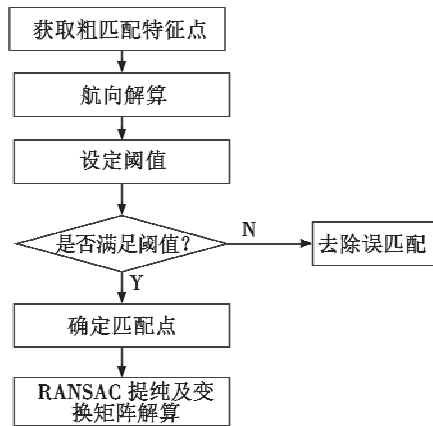


图 2 算法流程图

Fig. 2 Algorithm flow chart

在得到精选后的匹配点后求解变换矩阵,最后利用加权平均算法处理拼接线将两幅图像融合。

2 实验结果与分析

为验证所述算法在针对航拍图像匹配过程中去除误匹配和提高匹配效率上的效果,本文实验所用数据均为真实项目数据,采用某无人机,图像采集设备 FC200,计算机硬件环境为: Inter (R) Core (TM) i3-2100 CPU @ 3.10 GHz, 8.00 GB RAM, 64 位操作系统,所用编程环境为 VS2010,基于 OpenCV 2.4.4。图像采集设备的内部参数已提前解算,并以该参数为获取的实验图像做去除畸变处理,实验图像为 4386×2466 的

真实航拍图像,如图 3 所示。



图 3 待匹配图像

Fig. 3 Image to be matched

首先用 SIFT 算法对两幅图像进行特征提取,并采取初步的粗匹配,考虑到航拍图像的高分辨率,本文采取简化的 SIFT 算法,即在首次与高斯核卷积前不再将图像放大为原图像的两倍,并且如上文提到在选取特征点邻域内图像梯度的主方向时,只取主方向而不再考虑辅方向。得到粗匹配结果如图 4 所示。



图 4 粗匹配结果

Fig. 4 Results of coarse matching

共得到 864 组匹配点对,为方便观察效果,将图 3a、图 3b 上下放置,并用粉色虚线连接匹配的点对,即图 4。可以很明显发现,由于航拍图像的特点,用简化之后的 SIFT 算法匹配图像,依然产生了大量的匹配点,其中不乏相当多的误匹配。

在粗匹配结果下,采用本文所述航向约束的特征点筛选方法进行提纯,得到图 5 所示的本文算法的提纯结果。将提纯后的点对用黄色虚线连接。



图 5 本文算法提纯结果

Fig. 5 Purification results of the proposed method

而针对非航拍的一般图像,在用 SIFT 算法获取匹配点后,通常采用 RANSAC 算法对所获匹配点提纯。因此,本文也利用 RANSAC 算法对所得粗匹配特征点进行提纯,以与本文算法做对比,所得提纯结果如图 6 所示,将提纯后的点对用红色虚线连接。

将本文算法与 RANSAC 算法针对同航带的航拍图像特征匹配点提纯效果与效率做比较,对比结果如表 1 所示。



图6 RANSAC 算法提纯结果

Fig. 6 Purification results of RANSAC algorithm

表1 本文算法与 RANSAC 算法提纯效果对比

Table 1 Contrast between our method and RANSAC algorithm

提纯算法	粗匹配点/对	提纯后匹配点/对	提纯率/%	提纯耗时/s
本文算法	864	216	25.0	5.9
RANSAC 算法	864	187	21.6	10.3

由表中数据对比可以发现,RANSAC 算法虽然在提纯率上略优于本文算法,但其所耗费时间将近为本文算法的两倍,在无人机航拍应用领域,获取的数据量巨大,效率显得尤为重要,因此,在效率上的优势表明在具有航向约束的高分辨率航拍图像处理上,本文算法相对于 RANSAC 算法更具实用性。

得到提纯后的匹配点对之后,计算变换矩阵,并用加权平均算法将图像融合。融合后的图像如图 7 所示。

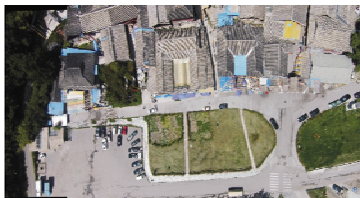


图7 融合后的图像

Fig. 7 Fused image

3 结语

本文针对无人机航拍图像受航向约束的特点,提出了一种基于简化的 SIFT 算法所获取匹配点对的匹配提纯算法。该算法适用于某航带上的相邻航拍图像,由无人机的航向估算匹配点的空间位置关系,并由此设定约束条件、筛选匹配点,将实验结果与 RANSAC 算法相比较,得出结论,在受航向约束的无人机图像匹配点提纯上,本文算法在提纯率保持相近的前提下提纯效率得到很大的提升。

参考文献

[1] ZITOVA B, FLUSSER J. Image registration methods: a survey[J]. Image & Vision Computing, 2003, 21(11): 977-1000.

- [2] 蔡丽欢,廖英豪,郭东辉. 图像拼接方法及其关键技术研究[J]. 计算机技术与发展,2008,18(3):1-4. (CAI L H, LIAO Y H, GUO D H. Study on image stitching methods and its key technologies[J]. Computer Technology & Development, 2008, 18(3):1-4.)
- [3] 刘庆元,刘有,邹磊,等. 无人机遥感影像拼接方法探讨[J]. 测绘通报,2012(5):53-55. (LIU Q Y, LIU Y, ZOU L, et al. Research on UAV remote sensing image mosaic method[J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2012(5):53-55.)
- [4] YANG G, ZHANG H, YANG Y L. Study of image mosaic based on the method of finite difference[C]//Congress on Image and Signal Processing IEEE Computer Society, 2008:436-440.
- [5] MIKOLAJCZYK B K, SCHMIND C. A performance evaluation of local descriptors[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis & Machine Intelligence, 2005, 27(10): 1615-1630.
- [6] LOWE D G. Distinctive image features from scale-invariant keypoints[J]. International Journal of Computer Vision, 2004, 60(2):91-110.
- [7] 许佳佳,张叶,张赫. 基于改进 Harris-SIFT 算子的快速图像配准算法[J]. 电子测量与仪器学报, 2015, 29(1):48-54. (XU J J, ZHANG Y, ZHANG H. Fast image registration algorithm based on improved Harris-SIFT descriptor[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2015, 29(1):48-54.)
- [8] 何孝莹,岳建伟,张翔然. 基于 SIFT 算法的无人机影像快速匹配[J]. 计算机工程,2011,37(7):216-218. (HE X Y, YUE J W, ZHANG X R. Quick match of unmanned aerial vehicles image based on SIFT algorithm[J]. Computer Engineering, 2011, 37(7):216-218.)
- [9] 程德志,李言俊,余瑞星. 基于改进 SIFT 算法的图像匹配方法[J]. 计算机仿真,2011,28(7):285-289. (CHENG D Z, LI Y J, YU R X. Image matching method based on improved SIFT algorithm[J]. Computer Simulation, 2011, 28(7):285-289.)
- [10] 狄颖辰,陈云坪,陈莹莹,等. 无人机图像拼接算法综述[J]. 计算机应用, 2011, 31(1):170-174. (DI Y C, CHEN Y P, CHEN Y Y, et al. Survey on image mosaic algorithm of unmanned aerial vehicle[J]. Journal of Computer Applications, 2011, 31(1):170-174.)
- [11] 陈本清,杨燕明,郑凌虹,等. 基于 SIFT 和 TPS 算法的四旋翼无人机图像自动配准[J]. 遥感技术与应用, 2013, 28(4):604-609. (CHEN B Q, YANG Y M, ZHENG L H, et al. Automatic registration of quad-rotor UAV imagery based on SIFT and TPS algorithm[J]. Remote Sensing (下转第 54 页)

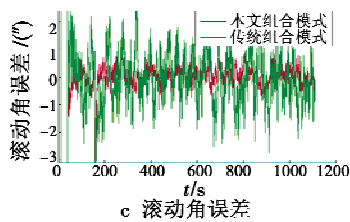


图 5 仿真结果

Fig. 5 Simulation result

由图 5 可以看出,采用了定姿精度 $1''$ 的高精度星敏感器后,组合导航达到了很好的效果,并且本文组合导航模式相较于传统组合模式有一定程度提高。本文组合模式定姿精度约在 $1''$ 左右,传统组合模式定姿精度约在 $2''$ 上下。总体来看,40 s 时滤波开始后定姿误差开始稳定下来,在 160 s 发动机关闭时出现了瞬间的发散,之后立刻再次稳定下来。而 $10''$ 以内的定姿精度,能够较好满足导弹武器的精度要求。

3 结束语

本文研究了一种适用于弹载平台的捷联惯性/天文姿态组合导航算法。在建立数学模型过程中,以数学平台误差角与陀螺常值漂移为状态量构建了状态方程,以姿态误差角为卡尔曼滤波器直接观测量构建了量测方程。仿真结果表明,该姿态组合导航方法能够有效克服陀螺漂移带来的姿态导航误差,相较于传统组合模式定姿精度有一定提高。为了进一步扩展该组合导航方案的功能,可以考虑增加状态量,将速度、位置和加速度计误差加进来,从而提高导弹位置、速度参数的测量精度。

参考文献

[1] 房建成,宁晓琳.天文导航原理及应用[M].北京:北京航空航天大学出版社,2006.(FANG J C, NING X L. Principles and applications of celestial navigation [M]. Beijing: Beijing University of Aeronautics and Astronau-

tics Press, 2006.)

- [2] 秦洪卫.捷联惯导/星光组合导航技术研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2013.(QIN H W. Research on SINS/STAR integrated navigation technology [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2013.)
- [3] 马清华,王明海.弹道导弹常用坐标系及其转换[J].火力与指挥控制,2004(s):89-91.(MA Q H, WANG M H. Common coordinate and conversion of ballistic missile [J]. Fire Control & Command Control, 2004(s):89-91.)
- [4] 丁涛,赵忠.捷联惯导系统的误差角关系与推导[J].兵工自动化,2007,26(12):66-67.(DING T, ZHAO Z. Angles error relationship and deduction of SINS [J]. Ordnance Industry Automation, 2007, 26(12):66-67.)
- [5] 司胜营.星光/惯性组合导航系统分析与研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2010.(SI S Y. Research on STAR/SINS integrated navigation system [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2010.)
- [6] 敖宏奎,王宏力,侯青剑,等.弹道导弹轨迹发生器的设计[J].兵工自动化,2007,26(8):66-68.(AO H K, WANG H L, HOU Q J, et al. Design of ballistic missile trajectory generator [J]. Ordnance Industry Automation, 2007, 26(8):66-68.)
- [7] 翟昆朋,何文涛,徐建华,等.捷联式惯性导航系统轨迹发生器设计与仿真[J].计算机仿真,2013,30(11):58-61.(ZHAI K P, HE W T, XU J H, et al. Design and simulation of SINS trajectory generator [J]. Computer Simulation, 2013, 30(11):58-61.)
- [8] 秦永元.惯性导航[M].北京:科学出版社,2006.(QIN Y Y. Inertial navigation [M]. Beijing: Science Press, 2006.)
- [9] 王永胜,王宏力,刘洁梁,等.星敏感器误差模型及参数分析[J].电光与控制,2014,21(2):85-89.(WANG Y S, WANG H L, LIU J L, et al. Error model and parametric analysis of star sensor [J]. Electronics Optics & Control, 2014, 21(2):85-89.)

(上接第 29 页)

ing Technology & Application, 2013, 28(4):604-609.)

[12] XU X, XU S, JIN L, et al. Characteristic analysis of Otsu threshold and its applications [J]. Pattern Recognition Letters, 2011, 32(7):956-961.

[13] FISCHLER M A, BOLLES R C. Random sample consensus: a paradigm for model fitting with applications to ima-

ge analysis and automated cartography [J]. Communications of the Acm, 1981, 24(6):381-395.

- [14] 陈付幸,王润生.基于预检验的快速随机抽样一致性算法[J].软件学报,2005,16(8):1431-1437.(CHEN F X, WANG R S. Fast RANSAC with preview model parameters evaluation [J]. Journal of Software, 2005, 16(8):1431-1437.)