

文章编号:1007-2780(2017)02-0144-09

一种改进的 SURF 彩色遥感图像配准算法

张二磊¹, 马 骏², 王晓田^{3*}

(1. 中国空空导弹研究院 第六研究所, 河南 洛阳 471009;

2. 中国兵器工业 第二〇三研究所, 陕西 西安 710065;

3. 西北工业大学 航天学院, 陕西 西安 710072)

摘要: 为了进一步提高彩色遥感图像的配准精度, 针对遥感图像配准过程中色彩信息利用率低的问题, 提出一种改进的 SURF(Speeded Up Robust Feature)彩色遥感图像配准算法。该算法首先在对彩色遥感图像进行特征点检测基础上, 对特征点描述算子进行改进, 以使颜色空间变换后得到的特征点色彩信息添加到原描述算子中; 其次, 对特征点描述算子进行归一化处理, 以增加算子的独特性和对旋转、尺度、光照的鲁棒性; 最后, 利用 Hessian 矩阵的迹提高精度以及欧氏距离比率完成特征点匹配, 得到正确匹配点对, 再通过变换矩阵参数估计和插值处理得到配准图像。实验结果表明, 在保证实时性的条件下, 该算法相比经典 SIFT 算法和 SURF 算法, 准确性和稳定性都有一定提高, 具有一定的理论和应用价值。

关键词: 彩色遥感图像; SIFT; SURF; 改进描述符; 迹

中图分类号: TP751.1 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/YJYXS20173202.0144

Improved SURF algorithm for color remote sensing image registration

ZHANG Er-lei¹, MA Jun², WANG Xiao-tian^{3*}

(1. No. 6 Research Institute, China Air-borne Missile Academy, Luoyang 471009, China;

2. No. 203 Research Institute, China Ordnance Industries, Xi'an 710072, China;

3. College of Astronautics, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract: To further improve the registration precision of color remote sensing image, an improved SURF registration algorithm is put forward aiming at solving the problem of low utilization rate of color information. Firstly, based on the detection of feature points, a modified descriptor was constructed adding in color information got with color space transformation; then the normalized processing for the modified descriptor was done to increase its uniqueness and robustness to rotation, scale and illumination; finally, by trace of Hessian matrix to improve precision, the correct matching points could be acquired through the Euclidean distance ratio. And the registered image was obtained based on parameter estimation and interpolation processing. Experimental results show, compared

收稿日期: 2016-08-24; **修订日期:** 2016-10-21.

基金项目: 航天科技创新基金(No.CASC201105)

Supported by Aerospace Science and Technology Innovation Fund (No.CASC201105)

* 通信联系人, E-mail: 18710993786@163.com

with the original SURF algorithm, that the improved algorithm has certain improvement in terms of accuracy and stability while guaranteeing the real time. It has certain values in both theory and practice.

Key words: color remote sensing image; SIFT; SURF; modified descriptor; trace

1 引言

现代社会中,遥感技术已成为人类获取地理环境及其变化信息必备的高科技手段,随着对遥感数据需求的急剧增加,与之密切相关的遥感图像配准技术也逐渐成为研究的热点,并已被广泛应用于国土监测、资源勘探、灾害勘察、城市规划、农林气象、军事国防、环境评测等诸多学科和领域^[1]。

目前,图像配准算法分为两类:基于区域灰度的配准方法和基于特征的配准方法^[2]。基于区域灰度的配准方法计算复杂,对图像平移、旋转、仿射变换都比较敏感,而基于特征的配准方法有效克服了以上缺点,尤其点特征在配准实时性和精确性方面具有明显优势,成为研究的热点。近几十年来,研究者在基于特征点图像配准研究中取得了巨大突破,相继提出了 Moravec 算法^[3]、Harris 算法^[4]、SUSAN 算法^[5]和 SIFT(Scale Invariant Feature Transform)算法^[6-7]。SIFT 算法不仅对于旋转、平移、缩放等变换具有不变性,对于仿射变换模型也具有很强的鲁棒性,而且可以在多尺度空间进行特征点检测,可以消除尺度变化对配准的影响,同时光照对其影响也较小,在配准实时性和精确性方面明显优于其他算法^[7]。2006 年,在 SIFT 算法研究的基础上,Bay^[8]等人引入了积分图像^[9](Integral Image)和盒子滤波^[10](Box Filters)的概念,提出了 SURF(Speed Up Robust Features)算法,该算法的主要优点是保持了 SIFT 高鲁棒性的同时,使得配准时间在很大程度上得到优化,它实际上是 SIFT 的加速版。然而,基于特征点的配准算法对于彩色图像的配准大部分是将彩色图像变换成灰度图像,仅利用图像的亮度信息进行配准,没有充分利用图像的色彩信息。文献[11]提出了将 RGB 分量的强度归一化后再用 SURF 算法来处理彩色图像,此算法具有部分几何不变性,但描述色彩不变特征时仍有局限性。文献[12]提出了一种基于颜色

不变量的 SURF 配准算法,此算法充分利用了图像的颜色信息,但算法耗时较长,实时性差,没有考虑特征点自身的色彩信息。

本文通过对特征点描述算子的改进,以颜色空间变换为基础,将特征点自身的色彩信息添加到原始描述算子中,并进行归一化处理,增加描述算子的独特性和鲁棒性,同时结合 SURF 的优势进行遥感图像配准。仿真结果表明,本文提出的改进 SURF 算法克服了原 SURF 算法特征点少和没有充分利用色彩信息的问题,在保证实时性的条件下,准确性和稳定性得到了一定的提高。

2 基本原理

2.1 SIFT 算法与 SURF 算法

SIFT、SURF 算法在基于特征点图像配准算法中性能最好、应用最为广泛,主要包括特征点检测和特征点描述两个部分。

2.1.1 SIFT 算法

SIFT 算法是在尺度空间的基础上,计算 DOG(Different of Gaussians)函数,通过对响应值进行三维非最大值抑制搜索和插值,在位置和尺度空间定位极值点并进行描述的过程^[13]。具体步骤如下:

(1)特征点检测——构建尺度空间

$$L(X, \sigma) = G(X, \sigma) \otimes I(x, y), \quad (1)$$

式中: $\otimes$ 代表了二维卷积运算。

(2)特征点检测——求 DOG 函数

$$D(x, y, \sigma) = L(x, y, k\sigma) - L(x, y, \sigma). \quad (2)$$

(3)特征点检测——三维非最大值抑制搜索

为确保在尺度空间和二维图像位置空间都检测到极值点,中间的特征点和它同尺度的八个相邻点和上下相邻尺度对应的 $9 \times 2 = 18$ 个点共计 26 个点进行比较寻找极值点。

(4)特征点检测——插值精确定位特征点

$$D(X) = D + \frac{\partial D}{\partial X} X + \frac{1}{2} X^T \frac{\partial^2 D}{\partial X^2} X, \quad (3)$$

求得:

$$\begin{cases} \hat{X} = \frac{\partial D^T}{\partial X} \left(\frac{\partial^2 D}{\partial X^2} \right)^{-1} \\ D(\hat{X}) = D + \frac{1}{2} \frac{\partial D^T}{\partial X} X \end{cases}, \quad (4)$$

(5) 特征点检测——主曲率剔除边缘特征点
主曲率可以用 Hessian 矩阵求出:

$$H = \begin{bmatrix} D_{xx} & D_{xy} \\ D_{xy} & D_{yy} \end{bmatrix}, \quad (5)$$

式中: D 值可以通过求取邻近像素的差分得到。由于 H 的特征值和 D 的主曲率为正比关系, 因

此我们只关心特征值比例。若 α 为最大特征值, 最小的特征值为 β , 那么 $\alpha = r\beta$, 则

$$\frac{\text{Tr}(H)^2}{\text{Det}(H)} < \frac{(r+1)^2}{r}. \quad (6)$$

Lowe 在论文中给出 $r=10$ 。即主曲率比值大于 10 的极值点将被剔除。符合公式(6)被保留。

(6) 特征点描述——主方向确定

$$\text{grad}I(x, y) = \left(\frac{\partial I}{\partial x}, \frac{\partial I}{\partial y} \right), \quad (7)$$

$$m(x, y) = \sqrt{(L(x+1, y) - L(x-1, y))^2 + (L(x, y+1) - L(x, y-1))^2}, \quad (8)$$

$$\theta(x, y) = \arctan \left[\frac{L(x, y+1) - L(x, y-1)}{L(x+1, y) - L(x-1, y)} \right]. \quad (9)$$

确定关键点方向采用梯度直方图统计法, 梯度方向直方图的横轴、纵轴分别表示梯度方向和对应的梯度幅值累加值。直方图共 36 个柱, 以每 10° 方向为一个柱, 柱所代表的方向和柱的长短为像素点梯度方向和梯度幅值, 根据 Lowe 的建议, 直方图统计半径采用 $3 \times 1.5 \times \sigma$, 求得的主峰值作为特征点主方向。

(6) 特征点描述——向量表示

将坐标轴旋转到主方向, 以特征点为中心取窗口并分块。随后对每小块计算 8 个方向的梯度方向直方图, 绘制每个梯度累加值, 可以形成一个种子点, 每个种子点有 8 个方向向量信息, 构成 128 维向量。图 1 为 SIFT 描述符构造过程。

SIFT 算法在配准过程中计算复杂、耗时长, 但是配准精度较高。

2.1.2 SURF 算法

SURF 算法是在尺度空间金子塔的基础上, 对 DoH(Determinant of Hessian)进行简化和近似来提取图像中的特征点并描述的过程。具体步骤如下:

(1) 特征点检测——DoH

$$H = \begin{bmatrix} L_{xx}(X, \sigma) & L_{xy}(X, \sigma) \\ L_{xy}(X, \sigma) & L_{yy}(X, \sigma) \end{bmatrix}, \quad (10)$$

$$L_{xx}(X, \sigma) = \frac{\partial^2}{\partial x^2} g(\sigma) \otimes I(x, y), \quad (11)$$

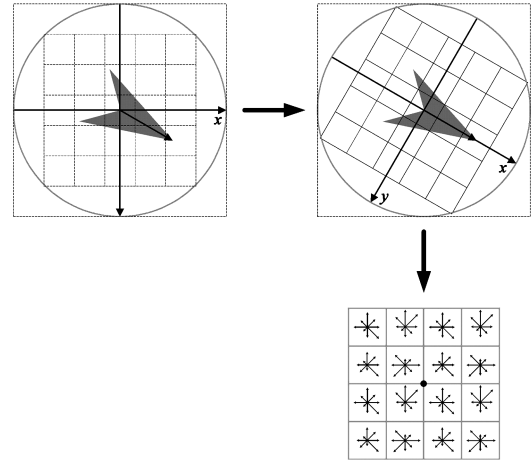


图 1 为 SIFT 描述符构造过程

Fig.1 Flowchart of SIFT descriptor

其中: $g(\sigma)$ 代表二维高斯函数, $\otimes$ 代表了二维卷积运算。 $L_{xy}(X, \sigma)$ 和 $L_{yy}(X, \sigma)$ 同理可得。

为了降低特征点提取过程的复杂度, 提高实时性, 这里采用了盒子滤波和积分图像的概念, 对 $L_{xx}(X, \sigma)$ 、 $L_{xy}(X, \sigma)$ 和 $L_{yy}(X, \sigma)$ 进行简化和加速。它使用盒子滤波的方法来近似地代替高斯二阶微分, 用 $D_{xx}(X, \sigma)$ 、 $D_{yy}(X, \sigma)$ 、 $D_{xy}(X, \sigma)$ 简化模板分别代替 x 方向、 y 方向和 xy 方向的高斯二阶微分滤波结果, 如图 2 所示。

Hessian 矩阵的行列式:

$$\text{Det}(H) = D_{xx}(X, \sigma)D_{yy}(X, \sigma) - 0.81D_{xy}^2(X, \sigma). \quad (12)$$

(2) 特征点检测——三维非最大值抑制搜索

在图像的尺度空间和位置空间搜索 DoH 的

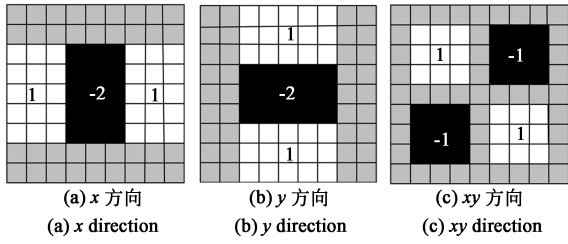


图 2 盒子滤波简化高斯二阶微分滤波的模板

Fig.2 Second order differential template of Gaussian filter

局部极值,利用中间的特征点和它同尺度的 8 个相邻点和上下相邻尺度对应的 $9 \times 2 = 18$ 个点共计 26 个点进行比较寻找极值点。

(3) 特征点描述——主方向确定

以特征点为中心,以 6σ 为半径的圆形区域内,对积分图像进行 Haar 小波响应计算,在张角为 60° 的扇形滑动窗口,对 dx, dy 响应值进行累加,得到一个矢量 (m_w, θ_w) :

$$m_w = \sum_w dx + \sum_w dy, \quad (13)$$

$$\theta_w = \arctan(\sum_w dx / \sum_w dy), \quad (14)$$

主方向为最大矢量所对应的方向,即

$$\theta = \theta_w | \max\{m_w\}, \quad (15)$$

(4) 特征点描述——向量表示

选定特征点主方向后,以特征点为中心将坐标轴旋转到主方向,沿主方向选取 $20\sigma \times 20\sigma$ 的矩形区域划分成 $4 \times 4 = 16$ 个子块,利用尺寸为 $2\sigma \times 2\sigma$ 的 Haar 模板进行响应值计算,共进行 25 次采样,分别得到沿主方向的 dy 和垂直于主方向的 dx ,对每个子块的响应值进行统计,得到对每个子块的矢量:

$$V_{\text{sub}} = (\sum dx, \sum |dx|, \sum dy, \sum |dy|). \quad (16)$$

描述符向量由特征点周围所有子块的向量构成,特征描述符向量长度便为 $4 \times 4 \times 4 = 64$ 维。图 3 为 SURF 描述符构造过程。

SURF 算法在配准过程中计算速度快,实时性好,配准精度相对于 SIFT 较差。

2.2 特征点匹配

在参考图像中得到的特征点描述向量为目标集,待配准图像中得到的特征点描述子集即为基准集。特征点匹配的过程相当于是在两个特征点集中按照某种相似性度量准则搜索相互距离最近

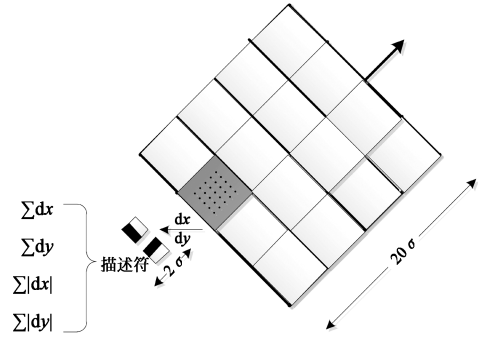


图 3 特征描述符的构造

Fig.3 Flowchart of SURF descriptor

的特征点的过程。本文所使用的相似性度量准则为最近欧氏距离与次近欧氏距离比值的度量准则。

对于目标集中每一个特征点,在基准集中查询得到它的最近邻 dis_{nt} 和次近邻 dis_{snt} ,若满足:

$$\frac{dis_{nt}}{dis_{snt}} \leq T, \quad (17)$$

则保留这个特征点与其最近邻构成的匹配,否则剔除这个匹配对。公式中的 T 是判断阈值,一般在 $0.4 \sim 0.8$ 之间取值。

2.3 变换矩阵实现配准

通过得到的匹配点对,需要求取变换矩阵,映射实现最终配准。由于参考图像和待配准图像特征点之间满足单应矩阵约束,即对于图像上两点 m' 和 m ,那么根据透视变换矩阵就有: $m' \sim Hm$,其中 $\sim$ 表示成比例相等。设 m 和 m' 的坐标分别为 (x_1, y_1) 和 (x_2, y_2) ,把它们写成其次坐标形式为: (x_1, y_1, z_1) 和 (x_2', y_2', z_2') ,其中 $x_2'/z_2 = x_2, y_2'/z_2 = y_2$,那么则有公式

$$\begin{bmatrix} x_2' \\ y_2' \\ z_2' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H_{11} & H_{12} & H_{13} \\ H_{21} & H_{22} & H_{23} \\ H_{31} & H_{32} & H_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ y_1 \\ z_1 \end{bmatrix}, \quad (18)$$

令 $z_1 = 1$,可得:

$$x_1 H_{11} + y_1 H_{12} + H_{13} - x_1 x_2 H_{31} - y_1 x_2 H_{32} - x_2 H_{33} = 0, \quad (19)$$

$$x_1 H_{21} + y_1 H_{22} + H_{23} - x_1 y_2 H_{31} - y_1 y_2 H_{32} - y_2 H_{33} = 0. \quad (20)$$

利用 RANSAC 算法提纯匹配点对,求取满足最小二乘意义下误差最小的变换矩阵参数估计,并利用双线性插值方法将待配准图像映射到参考图像坐标系中,实现最终配准。

3 改进 SURF 彩色遥感图像配准算法

3.1 SURF 算法的改进

SIFT 算法、SURF 算法在对特征点进行描述时,仅利用特征点周围邻域的灰度信息进行描述,忽略了特征点自身色彩信息,为提高配准精度,需将色彩信息加入描述向量,以此提高特征点差异性。SURF 算法实时性好,提高配准精度更有利于其在工程应用的价值。

彩色遥感图像一般被分成 R、G、B 的成分并加以保存的。然而,在自然环境下获取的一些彩色遥感图像容易受自然光照、叶片遮挡和阴影等情况的影响,即对亮度比较敏感。即 RGB 颜色空间的分量与亮度密切相关,即只要亮度改变,3 个分量都会随之相应地改变。所以,RGB 颜色空间适合于显示系统,却并不适合于图像处理。如果用它来表述特征点色彩信息,亮度差异造成配准误差较大。HSV 颜色空间可以适应光照强度不断变化的场合,因此能够有效地用于彩色图像处理。

RGB 颜色空间转换到 HSV 颜色空间的变换为:

$$\begin{cases} H = \arccos \left[\frac{\frac{1}{2} [(R-G) + (R-B)]}{\sqrt{(R-G)^2 + (R-G)(G-B)}} \right] \\ S = 1 - \frac{3\min(R,G,B)}{R+G+B} \\ V = \frac{1}{3}(R+G+B) \end{cases} \quad (21)$$

下面对特征点描述向量改进具体过程进行介绍,坐标为 (x, y) 特征点,其在 RGB 颜色空间表示为 $R_{(x,y)}$ 、 $G_{(x,y)}$ 、 $B_{(x,y)}$,将其进行颜色空间转换,转换到 HSV 颜色空间为 $H_{(x,y)}$ 、 $S_{(x,y)}$ 、 $V_{(x,y)}$ 。

将其增加到原始算法描述符中,得到新的彩色描述符如下:

$$V_{\text{color}} = (V_1, V_2, V_3, V_4, \dots, V_{16}, H_{(x,y)}, S_{(x,y)}, V_{(x,y)}). \quad (22)$$

为了使得表述更加清晰,将式(16)进行简单变换

$$V = (i_1, i_2, i_3, i_4), \quad (23)$$

随后对公式(22)式进行重新定义如下:

$$V_{\text{color}} = (i_1, i_2, i_3, i_4, \dots, i_{64}, H_{(x,y)}, S_{(x,y)}, V_{(x,y)}). \quad (24)$$

从公式(24)中可以看到,特征点自身的彩色信息被加载进来,构成了 67 维的描述向量,和原来的算法相比,时间上没有太大变化,但性能上因为考虑色彩信息,差异性增加,使得精度会进一步提升。

3.2 特征点描述向量归一化

为了对旋转、尺度、光照有更好的鲁棒性。这里需要对得到的改进描述向量进行归一化处理:

$$\bar{V}_{\text{color}} = \left(\frac{i_1}{|V_{\text{color}}|}, \frac{i_2}{|V_{\text{color}}|}, \frac{i_3}{|V_{\text{color}}|}, \frac{i_4}{|V_{\text{color}}|}, \dots, \frac{i_{64}}{|V_{\text{color}}|}, \frac{H_{(x,y)}}{|V_{\text{color}}|}, \frac{S_{(x,y)}}{|V_{\text{color}}|}, \frac{V_{(x,y)}}{|V_{\text{color}}|} \right), \quad (25)$$

式中, $|V_{\text{color}}|$ 是式(24)的求模式,为:

$$|V_{\text{color}}| = \sqrt{\sum_{k=1}^{64} i_k^2 + H_{(x,y)}^2 + S_{(x,y)}^2 + V_{(x,y)}^2}. \quad (26)$$

3.3 Hessian 矩阵的迹提高精度

考虑到 Hessian 矩阵的迹的正负性与特征点的亮度关系密切,可通过对矩阵迹正负性来提高匹配精度。将检测到的特征点进行分类:第一类是周边区域相对于特征点邻域更亮;第二类是周边区域相对于特征点邻域更暗。对于第一类特征点,它们的 Hessian 矩阵的迹是正值,反之即为负值。因此, SURF 算法进行 Hessian 矩阵求解过程中,不仅找到了特征点,还提供了亮度对比标识符,利用该亮度对比标识符提高配准的精度,避免标识符不同造成的误匹配。

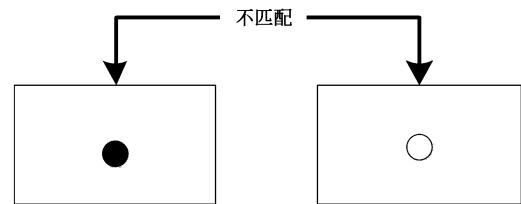


图 4 不同类型的特征点

Fig.4 Different kind of feature point

3.4 改进 SURF 算法的彩色遥感图像配准

改进算法流程图如图 5 所示。

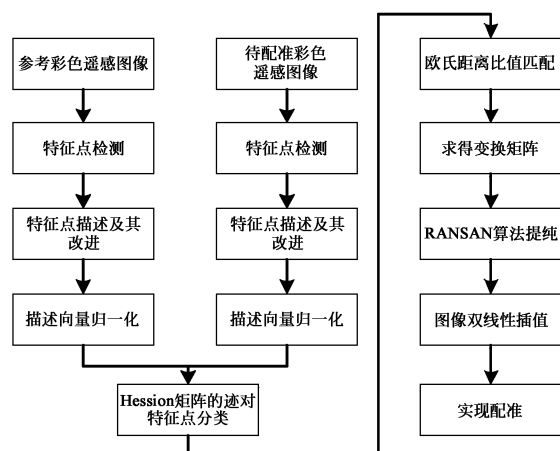


图 5 改进 SURF 算法流程图

Fig.5 Improved SURF algorithm process

实现步骤如下：

(1) 利用 Hessian 矩阵的行列式对参考图像和待配准图像进行特征点检测,同时对于所找到的特征点进行描述,形成 64 维描述向量;

(2) 特征点自身色彩信息加入描述向量中,利用颜色空间变换将特征点 R、G、B 分量值转换成 H、S、V 分量,构成 67 维包含色彩信息的描述向量,增加差异性;

(3) 对特征点描述向量归一化,增加鲁棒性;

(4) 利用 Hessian 矩阵的迹将两幅图像中特征点进行分类,结合最近欧氏距离与次近欧氏距离比值的度量准则进行特征点匹配;

(5) RANSAC 算法提纯匹配点对,求取满足最小二乘意义下误差最小的变换矩阵参数估计,并利用双线性插值方法将待配准图像映射到参考图像坐标系中,实现最终配准。

4 实验与分析

4.1 实验及结果

为了证明算法的可行性及其性能,本文用彩色遥感图像对其进行仿真验证。试验中仿真平台的硬件环境为: AMD A8-4500M APU with Radeon(tm) HD Graphics, 2.00GHz, 4.0GB 内存的 PC 机;软件开发工具为: Windows7 操作系统, MATLAB2013a。实验选取两幅低空遥感图像如

图 6(a)、(b)所示, image1 和 image2 分别被称为待配准图像和参考图像。

实验参数特征点检测阶段尺度空间构建为 5 组, 高斯模板为 0.33, 特征点匹配阶段判断阈值 T 取 0.5。如图 7 所示, 显示了用 SIFT 算法、

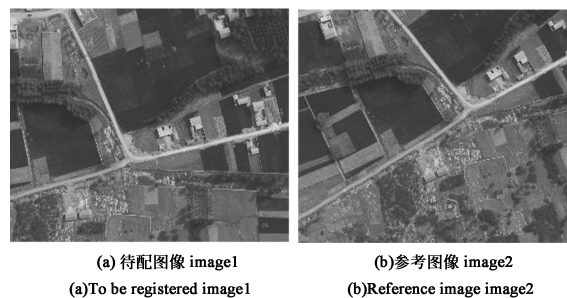


图 6 遥感图像

Fig.6 Remoting sensing image



(a) SIFT 算法匹配结果

(a) Matching result of SIFT algorithm



(b) SURF 算法匹配结果

(b) Matching result of SURF algorithm



(c) 改进 SURF 匹配结果

(c) Matching result of improved SURF algorithm

图 7 不同算法匹配结果

Fig.7 Matching result of different algorithms

SURF 算法和改进 SURF 算法的匹配效果,分别得到 175 对、25 对和 38 对正确匹配点对。

表 1 特征点对比分析表

Tab.1 Comparative analysis of feature points

方法	特征点个数		匹配点对	正确率%
	待配准图像	参考图像		
SIFT 算法	634	525	175	98
SURF 算法	317	271	25	96
改进算法	383	307	38	100

表 2 时间评价表

Tab.2 Time evaluation table

方法	阶段	时间/ms	合计/ms
SIFT 算法	特征点检测	5 820	7 717
	与描述		
SURF 算法	特征点匹配	1 897	1 836
	特征点检测	987	
	与描述		849
	特征点匹配	849	
改进算法	特征点检测	1 096	1 838
	与描述		
	特征点匹配	742	

表 3 仿射变换矩阵参数

Tab.3 Matrix parameters of affine transformation

	m_1	m_2	m_3	m_4	m_5	m_6
真实数据	0.922 5	0.262 6	-27.000 0	-0.262 6	0.922 5	6.000 0
SIFT 算法	0.920 1	0.261 2	-27.183	-0.262 9	0.911 4	6.143 0
SURF 算法	0.896 7	0.221 0	-27.138 3	-0.252 9	0.874 1	5.567 0
改进算法	0.912 4	0.254 3	-27.124 0	-0.260 5	0.921 3	6.120 4

从以上数据可以看出,按照 SIFT、SURF 算法对彩色遥感图像配准求取出的仿射变换矩阵,六个参数与真实数据都有一定的偏差,偏差较大,最大偏差分别为 0.143 和 0.433 0。本文改进 SURF 图像配准方法求取出的仿射变换矩阵,六个参数与真实数据都非常接近,最大的偏差只有 0.120 4,精度明显高于 SIFT、SURF 算法。不失一般性,随后选取八对无人机遥感图像分别进行试验,得出相同的结果,SIFT、SURF 算法其最大

客观上用提取特征点数量,正确匹配点对与正确率,以及时间 3 个指标进行评价。如表 1、表 2 所示分别给出了特征点对比分析表以及时间评价表,可以看出本文改进方法在待配准和参考图像提取特征点数量分别为 383 个和 307 个,匹配点对 38 对,正确率高达 100%,明显优于 SIFT 和 SURF 算法;在时间上利用亮度标识符可以加快匹配速度,相对于 SURF 算法,合计时间增加幅度很小,保证实时性。所以综合上述两个方面进行评价分析可知,本文改进算法整体上提高了配准图像质量^[14-15]。

4.2 仿射变换验证精度

遥感图像 image1 和 image2 之间几何变换关系固定,可以很容易的得到理论值 H_{ture} 。利用改进 SURF 遥感图像配准算法与 SIFT、SURF 算法,按照默认参数进行配准,求取待配准图像相对于参考图像的仿射变换矩阵 $H_{improve}$ 和 H_{sift} 、 H_{surf} ,并与实际真实值进行对比,与真实值越接近,仿射矩阵求取精度越高,仿射变换中参数 m_7 、 m_8 和 m_9 默认为 0、0 和 1。由于该算法当中涉及随机数选取过程,只用一次仿真结果无法准确反映实验结果,这里对这两幅无人机遥感图像进行十次仿真实现,取各参数平真实验参数取平均值后具体数据如表 3 所示。

偏差平均值为 0.152 和 0.218,高于改进的最大偏差平均值 0.134,六参数接近程度改进算法明显优于 SIFT、SURF 算法。可见对于彩色遥感图像进行配准,改进算法很大程度上使得配准精度得到提升。

5 结 论

本文提出了一种鲁棒的 SURF 彩色遥感图

像配准算法,在特征点描述阶段通过彩色空间变换充分利用彩色遥感图像的色彩信息,增加特征点描述符的独特性和对旋转、尺度、光照鲁棒性;在特征点匹配阶段,利用 Hessian 矩阵迹的正负与特征点亮度之间的关系,提高匹配精度。实验结果表明,该算法在保证算法实时性基础上,彩色

遥感图像配准准确性和稳定性都有一定提高,正确率可以达到 100%,仿射变换矩阵参数最大偏差平均值 0.134 明显小于 SIFT、SURF 算法其最大偏差平均值为 0.152 和 0.218。对于多源遥感图像配准问题和红外制导导弹末制导配准问题是下一步研究的方向。

参 考 文 献:

- [1] 温红艳.遥感图像拼接算法研究[D].武汉:华中科技大学,2009:17-35.
WEN H Y. Research on algorithm of remote sensing image mosaics [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2009: 17-35. (in Chinese)
- [2] 余先川,吕中华,胡丹.遥感图像配准技术综述[J].光学精密工程,2013,21(11):2960-2972.
YU X C, LÜ Z H, HU D. Review of remote sensing image registration techniques [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2013, 21(11): 2960-2972. (in Chinese)
- [3] THANGAVEL P, KOKILA R. An extension of FFT based image registration [M]//MEGHANATHAN M, NAGAMALAI D, CHAKI N. *Advances in Computing and Information Technology*. Berlin, Heidelberg: Springer, 2013, 177: 729-737.
- [4] HARRIS C, STEPHENS M. A combined corner and edge detector [C]//*Proceedings of the 4th Alvey Vision Conference*. Manchester: University of Manchester, 1988: 147-152.
- [5] SMITH S M, BRADY J M. SUSAN—a new approach to low level image processing [J]. *International Journal of Computer Vision*, 1997, 23(1): 45-78.
- [6] LINDBERG T. Feature detection with automatic scale selection [J]. *International Journal of Computer Vision*, 1998, 30(2): 79-116.
- [7] LOWE D G. Object recognition from local scale-invariant features [C]//*Proceedings of the 7th IEEE International Conference on Computer Vision*. Kerkyra: IEEE, 1999, 2: 1150-1157.
- [8] BAY H, ESSA A, TUYTELAARS T, et al. Speeded-up robust features (SURF) [J]. *Computer Vision and Image Understanding*, 2008, 110(3): 346-359.
- [9] SIMARD P Y, BOTTOU L, HAFFNER P, et al. Boxlets: a fast convolution algorithm for signal processing and neural networks [C]//*Proceedings of the 1998 Conference on Advances in Neural Information Processing Systems II*. Cambridge, MA, USA: MIT Press, 1999: 571-577.
- [10] VIOLA P, JONES M. Rapid object detection using a boosted cascade of simple features [C]//*Proceedings of the 2001 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, Kauai, HI, USA: IEEE, 2001, 1: I-511-I-518.
- [11] LOWE D G. Distinctive image features from scale-invariant keypoints [J]. *International Journal of Computer Vision*, 2004, 60(2): 91-110.
- [12] Fan P, Men A D, CHEN M Y, et al. Color-surf: a surf descriptor with local kernel color histograms [C]//*Proceedings of IEEE International Conference on Network Infrastructure and Digital Content*, Beijing, China: 2009: 726-730.
- [13] 林晓帆,林立文,邓涛.基于 SURF 描述子的遥感影像配准[J].计算机工程,2010,36(12):216-218.
LIN X F, LIN L W, DENG T. Remote sensing image registration based on SURF descriptor [J]. *Computer Engineering*, 2010, 36(12): 216-218. (in Chinese)
- [14] 程国华,王阿川,陈舒畅,等.多源遥感影像高精度自动配准方法研究[J].液晶与显示,2016,31(6):604-612.
CHENG G H, WANG A C, CHEN S C, et al. High accuracy-automatic registration method research on multi-source remote sensing image [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2016, 31(6): 604-612. (in Chinese)

- [15] 许佳佳.结合 Harris 与 SIFT 算子的图像快速配准算法[J].中国光学,2015,8(4):574-581.

XU J J. Fast image registration method based on Harris and SIFT algorithm [J]. *Chinese Optics*, 2015, 8(4): 574-581. (in Chinese)

作者简介:张二磊(1981—),男,河南西平人,助理工程师,2009 年于西安电子科技大学获得硕士学位,主要从事红外场景仿真方面的研究。E-mail: zwjllhtt@scut.edu.cn

王晓田(1989—),男,河北石家庄人,博士研究生,2013 年于西北工业大学电子信息学院获得硕士学位,2016 年就读于西北工业大学航天学院,主要红外遥感算法研究。E-mail: 18710993786@163.com