

Journal of Image
and Graphics

中国图象图形学报



ISSN1006-8961
CN11-3758/TB

2013 5
Vol.18 No.

中国科学院遥感应用研究所
中国图象图形学学会主办
北京应用物理与计算数学研究所

中国图象图形学报

Zhongguo Tuxiang Tuxing Xuebao

2013 年 5 月 第 18 卷 第 5 期(总第 205 期)

目 次

综述

- 中国图像工程:2012 章毓晋(483)
动态场景下的交通标识检测与识别研究进展 刘华平, 李建民, 胡晓林, 孙富春(493)

图像处理与编码

- 基于 PCA 硬阈值收缩的平滑投影 Landweber 图像压缩感知重构 李然, 干宗良, 朱秀昌(504)

图像分析和识别

- 利用视觉显著性和粒子滤波的运动目标跟踪 张巧荣, 冯新扬(515)
融合边缘测度的自然场景彩色图像区域分割 代沁伶, 王雷光, 洪亮(523)
场景语义树图像标注方法 刘咏梅, 杨帆, 于林森(529)
基于视锥细胞色适应生理机制的颜色恒常性计算 袁兴生, 王正志, 项凤涛(537)

医学图像处理

- 改进 FCM 和 LFP 相结合的白细胞图像分类 庞春颖, 刘记奎, 韩立喜(545)
局部高斯分布拟合的脑 MR 图像分割及有偏场校正 崔文超, 王毅, 樊养余, 冯燕, 郝重阳(552)

遥感图像处理

- 局部投影可分离的高光谱图像异常检测 刘明, 杜小平, 夏鲁瑞(558)
基于结构特征的遥感影像匹配 寇媛, 徐景中(565)

“第 9 届中国计算机图形学大会”专栏

- 结合浅景深与构图的图像质量评价 顾婷婷, 郭延文, 殷昆燕(574)
结合精确大气散射图计算的图像快速去雾 甘佳佳, 肖春霞(583)
多特征综合的视频拷贝检测 林莹, 杨扬, 凌康, 肖金伟, 武港山(591)
真实感雨线绘制 江隆盛, 吴恩华(600)
误差云映射的深度融合 3 维重建 陈亚当, 蔡仲谋, 吴恩华(607)

- “第八届中国系统建模与仿真技术高层论坛”征文通知 封 3

Journal of Image and Graphics

(Monthly, Started in 1996)

Vol. 18 No. 5 May 2013

Contents

Review

- Image engineering in China: 2012 Zhang Yujin(483)
- Recent progress in detection and recognition of the traffic signs in dynamic scenes
..... Liu Huaping, Li Jianmin, Hu Xiaolin, Sun Fuchun(493)

Image Processing and Coding

- Smoothed projected Landweber image compressed sensing reconstruction using hard thresholding based on principal components analysis
..... Li Ran, Gan Zongliang, Zhu Xiuchang(504)

Image Analysis and Recognition

- Object tracking based on visual saliency and particle filter Zhang Qiaorong, Feng Xinyang(515)
- Regional segmentation of natural scene color images by integrating edge cues Dai Qinling, Wang Leiguang, Hong Liang(523)
- Automatic image annotation based on scene semantic trees Liu Yongmei, Yang Fan, Yu Linsen(529)
- Color constancy algorithm based on biological mechanism; color adaptation of cone cells
..... Yuan Xingsheng, Wang Zhengzhi, Xiang Fengtao(537)

Medical Image Processing

- White blood cells image classification based on improving the connection of FCM and LFP
..... Pang Chunying, Liu Jikui, Han Lixi(545)
- Multiphase level set method for segmentation and bias correction of brain MR images
..... Cui Wenchao, Wang Yi, Fan Yangyu, Feng Yan, Hao Chongyang(552)

Remote Sensing Image Processing

- Anomaly detection method based on separable local projection in hyperspectral imagery ... Liu Ming, Du Xiaoping, Xia Lurui(558)
- Algorithm for remote sensing images matching based on the structure characteristics Kou Yuan, Xu Jingzhong(565)

Issum of the Chinagraph '2012

- Image quality assessment combining low DoF and composition Gu Tingting, Guo Yanwen, Yin Kunyan(574)
- Fast image dehazing based on accurate scattering map Gan Jiajia, Xiao Chunxia(583)
- Video copy detection based on multiple visual features synthesizing
..... Lin Ying, Yang Yang, Ling Kang, Xiao Jinwei, Wu Gangshan(591)
- Photorealistic rendering of rain streaks Jiang Longsheng, Wu Enhua(600)
- Three dimensional reconstructions based on error clouds mapping Chen Yadang, Cai Zhongmou, Wu Enhua(607)

中图分类号: TP751.1 文献标识码: A 文章编号: 1006-8961(2013)05-0565-09

论文引用格式: 寇媛, 徐景中. 基于结构特征的遥感影像匹配[J]. 中国图象图形学报, 2013, 18(5): 565-573.

基于结构特征的遥感影像匹配

寇媛, 徐景中

武汉大学遥感信息工程学院, 武汉 430079

摘要: 影像数据的获取受到传感器、大气、光照等多种因素影响, 影像数据本身即存在成像的不确定性, 且用于匹配的影像数据间常存在较大的尺度、旋转差异, 因此利用传统的基于区域灰度的匹配方法很难实现遥感影像的自动匹配。针对遥感影像数据的复杂性, 结合不变矩的优良性质, 提出一种基于地物结构特征的影像自动匹配方法。首先基于 RANSAC(random sample consensus)算法提取影像直线特征, 并进一步根据地物构造特征, 在直线特征的基础上, 设计并实现结构特征提取方法; 然后利用结构特征的不变矩及空间相似性测度自动检测最优匹配特征对, 实现影像的初始匹配; 最后采用松弛匹配等方法, 并对松弛匹配结果进行优化, 实现影像全局匹配。为了验证算法性能, 采用仿真数据和实地遥感影像进行测试, 实验结果表明, 本文方法不受旋转、缩放等因素影响, 能实现遥感影像的自动快速匹配。

关键词: 影像匹配; RANSAC; 结构特征; 不变矩; 松弛匹配

Algorithm for remote sensing images matching based on the structure characteristics

Kou Yuan, Xu Jingzhong

School of Remote Sensing and Information Engineering, Wuhan University, Wuhan 430079, China

Abstract: Because of the uncertainty of imaging, large scales, and rotation difference between the match data, the traditional intensity-based matching methods are not meeting our demands. For the complexity of the remote sensing data, we developed an image matching method based on the features of the structure characteristics, combined with the excellent properties of invariant moments. At first, we are extracting image linear characteristics based on RANSAC (random sample consensus) and further extracting the structure feature. Next, we are getting the optimal matching by the invariant moment and space correlation, realizing the initial image matching. Finally, using relaxation matching method, we realize the global image matching. Experimental results show that this method is not affected by rotation, and zooming factors and it can realize an automatic and quick remote sensing image matching.

Key words: image matching; RANSAC; structural features; moment invariants; relaxation method

0 引言

影像匹配是数字图像处理领域的一个重要

研究方向, 是变化检测、图像拼接、图像融合、天气预测、图像更新等诸多领域的关键技术^[1]。数字摄影测量中, 利用影像匹配代替传统的人工观测以达到自动确定同名像点的目的。一般来说,

收稿日期: 2012-08-10; 修回日期: 2012-11-04

基金项目: 国家科技支撑计划项目(2011BAH12B04, 2012BAH34B02)

第一作者简介: 寇媛(1991—), 女, 武汉大学遥感信息工程学院在读硕士研究生, 主要研究方向为摄影测量与遥感。E-mail: kouyuan@whu.edu.cn

通讯作者: 徐景中, E-mail: jz_xu@whu.edu.cn

匹配方法按匹配基元可分为 3 类:基于区域灰度的匹配、基于特征的匹配、基于解释的匹配。基于区域灰度的匹配直接利用影像的灰度分布特征,不适合信噪比小、辐射失真较大和多源图像间的匹配。基于解释的匹配方法利用图像的结构特征或关系特征,借助语义网络、框架理论和图论方法寻求匹配问题的解决,具有极高的可靠性和精度,是一种理想的算法^[2]。

相较于基于区域灰度与基于解释的匹配方法,基于特征的匹配方法在图像灰度属性关联性小时存在较高的优势,适用范围广,已经成为影像匹配研究的重点和热点。常用的特征匹配基元包括点特征、线特征、区域特征等。目前基于线特征的匹配方法主要分为 3 类:利用空间关系^[3-4]、利用特征相似性^[5-6]以及二者的简单组合^[7-8]。基于空间关系的方法由于其可靠性而备受关注。这类方法一般都能获得较好的匹配结果,但算法计算复杂,且随着正确匹配特征数量的减少,算法的复杂度将会显著增加,成功率大为下降。利用特征相似性的方法计算简单,但当影像中存在多个形状相同或相近的特征时,仅利用特征之间的相似性进行匹配容易导致算法失败。第 3 类方法将两种匹配准则进行简单的结合,既保证了算法的可靠性,又降低了算法的复杂度。一般的处理思路是,首先利用特征相似性剔除一些不太可能匹配的特征组合以减少基于空间关系方法的搜索空间,然后利用空间关系得到最终的匹配结果。这种序贯组合方式虽然不能完全克服上述两种方法中的一些固有缺陷,但在匹配精度和匹配速度的兼顾性上要优于前两类方法。

为此,在结合空间关系与特征相似性的基础上,提出一种基于结构特征的遥感影像匹配方法。该方法具有以下 4 个优点:1) 结构特征的不变矩具有旋转、缩放不变性,使算法具有广泛的适用性;2) 利用结构特征的不变矩特征的相似性及空间关系得到最佳匹配特征,在保证算法可靠性的前提下,降低了算法的复杂度,提高了算法的自动化程度;3) 对于建筑物目标,相比于 Harris 角点提取算子等,使用的结构特征可以更有效地提取建筑物角点;4) 在初始匹配结果的基础上,基于结构顶点的松弛匹配方法有效实现了全局性匹配。

1 算法描述

1.1 特征提取

特征提取是基于特征的影像匹配方法中的一个关键步骤,它的结果直接影响特征匹配的结果。针对城区影像特征以及结构特征丰富的属性信息,选择采用结构特征作为影像匹配的匹配基元,首先采用基于 Canny 算子的自适应边缘检测方法^[9]进行边缘检测,然后利用 RANSAC (random sample consensus) 算法^[10]建立直线模型,得到精度较高的直线特征,最后在直线特征的基础上,提出一种亲密度驱动的结构特征构建方法。

1.1.1 基于 RANSAC 算法的直线提取方法

RANSAC 算法是根据一组包含异常数据的样本数据集,计算出数据的数学模型参数,得到有效样本数据的算法。不同于一般模型参数估计方法(如经典的最小二乘法),RANSAC 算法可以检测并排除异常数据,是最有效的 Robust 估计算法之一。

将 RANSAC 算法应用于直线稳定提取中。相较于其他直线提取方法,如 Hough 变换抗噪性能较好,可以连接共线短直线,但参数难于选择且计算复杂、提取直线的分辨率较低且缺乏局部特性,而采用的基于 RANSAC 算法的直线提取方法参数易于选择且计算简单。该方法仅涉及一个距离阈值 d ,以像素为单位。 d 的选择与影像细节含量及用户的需要相关。如影像细节丰富、用户需要提取较高精度的特征时,一般选择较小的距离阈值。其基本思想是:随机选择两点,两点定义一条直线,该线的一致集大小由在一定距离 d 内的点数来度量,依次随机选择两点,获得对应一致集,重复多次,具有最大一致集的那组点及其一致集就认为是直线上有效样本数据,最后对其采用最小二乘方法拟合直线模型参数。

1.1.2 结构特征构建方法

文中结构特征是指影像中目标的几何特征,主要包含边缘、轮廓等线特征。相对于灰度特征、点特征等,结构特征有信息量丰富、数据量少等优点。结构特征构建的基本思想是:在提取的直线特征基础上,利用边缘亲密度^[11]对直线边缘进行选择性地合并,形成由多个顶点构成的结构特征。特征参数主要包括:顶点坐标、内外灰度值、结构特征主方向、长度、不变矩特征等。

亲密度定义为

$$P_A = P_R \times P_\theta \times P_G \quad (1)$$

式中, P_A 表示两条边缘的综合亲近值, P_R 、 P_θ 、 P_G 分别表示两条边缘端点之间的亲近值、角度之间的亲近值、灰度特征的亲近值。

$$P_R = \exp\left(-\frac{R^2}{2\sigma_R^2}\right) \quad (2)$$

$$R = r/R_{\text{thresh}}$$

式中, r 为边缘间相邻最近端点距离, R 为边缘间相邻最近端点距离与距离阈值 R_{thresh} 的比值, 当其大于 1 时, 表示两条边缘不亲近, 直接返回 0; 如果小于 1, 利用 *Flag* 标记相邻端点类型, 如两边缘起点相近, 记为起点-起点。

计算边缘角度、灰度亲近度时, 需要根据相应的 *Flag* 标记类型进行区别计算, 以起点-起点为例, 即

$$P_\theta = \exp\left(-\frac{d\theta^2}{2\sigma_\theta^2}\right), \quad d\theta \leq 1$$

$$P_G = \exp\left(-\frac{dg^2}{2\sigma_g^2}\right), \quad dg \leq 1$$

$$d\theta = \min\left(\begin{array}{l} |\theta_1 - \theta_2 - 90^\circ|, \\ |\theta_1 - \theta_2 - 270^\circ|, \\ |\theta_1 - \theta_2 - 180^\circ| \end{array}\right) / \theta_{\text{thresh}} \quad (3)$$

$$dg = \min\left(\begin{array}{l} |g_L^1 - g_R^2|, \\ |g_L^2 - g_R^1| \end{array}\right) / g_{\text{thresh}}$$

端点处直线段应该满足方向一致性, 研究对象主要为城区影像, 因此对端点处直线段的夹角进行约束, 由于直线的方向范围为 $[0^\circ, 360^\circ)$, 即边缘端点直线段的方向范围为 $[0^\circ, 360^\circ)$, 对于起点-起点类型的相邻边缘线, 角点处夹角应与 90° 或 270° 接近; 非角点处夹角应与 180° 接近。同 R , 当 $d\theta$ 与 dg 大于 1 时, 表示两边缘不亲近。

以上各式中 σ_θ 、 σ_R 、 σ_g 为系统参数, 其大小决定距离、角度、灰度三者在综合亲近值中的比重。

1.2 特征匹配

1.2.1 基于结构特征的初始匹配方法

结构特征提取完成后, 应建立相应的特征匹配策略来获得结构特征的对应关系。对于大部分的结构特征, 由于其具有一定的长度以及转折顶点, 因此单条边缘已经具有形状信息, 可以直接利用结构特征的不变矩^[6]以及空间关系约束寻找最优匹配组, 自动实现两张影像的初始匹配, 避免了人工匹配初始点对, 减少匹配算法的计算量与复杂度, 提高了算法的自动化程度和匹配速度。

但是由于获得的最优匹配特征组不具有很好的

全局性, 需要进一步得到结构特征间的对应关系。而且由于结构特征提取存在不确定性, 如断裂、丢失等, 直接采用结构特征进行进一步匹配存在困难, 因此, 在结构特征顶点的基础上, 采用松弛匹配等方法来建立其对应关系, 实现全局匹配。

1.2.2 基于结构特征顶点的松弛匹配方法

相对于 Harris 算子提取的角点特征, 采用的结构特征顶点具有以下两个方面的优势: 1) 受阈值影响小, 提取自动化程度高; 2) 基于直线特征提取, 可以有效降低噪声的影响, 且受影像自身灰度特征的影响较小, 可以提取大部分的角点特征, 特别是有利于提取灰度对比度较低的角点特征。因此, 在获得初始匹配特征对后, 利用结构特征顶点作为进一步匹配的匹配基元。由于结构特征提取过程中可能存在计算等误差, 点的定位精度可能低于 Harris 角点。因此, 在松弛匹配完成后, 需要进一步对匹配进行优化, 具体方法在 1.3 节步骤 7) 中将给出介绍。

在桑农松弛匹配算法及文献[12]提出的松弛匹配方法的基础上, 提出一种基于结构特征顶点的松弛匹配方法, 其基本思想是: 利用初始结构特征匹配对中任一特征点四元组 (p_i, q_i, p_h, q_h) 作为初始种子点对, 其中 p_i 与 q_i 配对且 p_h 与 q_h 配对, 根据四元组, 可初步计算影像间的尺度、旋转关系, 则对于某张影像上某点 p_u , 可利用尺度、旋转关系得到在另一影像对应匹配范围及点集 $\{q_{ui}\}$, 对于该范围内的任一点 q_{ui} , 令 $\varphi(u, ui)$ 为 (p_u, q_{ui}) 对 (p_i, q_i, p_h, q_h) 的支持度函数, 当 $\{q_{ui}\}$ 中最大支持度大于某一阈值 p_{match} , 则判断最大支持度对应点对 (p_u, q_u) 为正确匹配, 并将其加入特征点四元组, 得到新的特征点四元组 (p_h, q_h, p_u, q_u) , 重复迭代直到遍历所有点。特别地, 当 (p_u, q'_u) 对应的次大支持度也大于 p_{match} 时, 表示可能存在模糊, 为了避免错误匹配, 可以选择不将其加入特征点四元组, 或者将 q_u 与 q'_u 坐标平均作为 p_u 的匹配点, 实验证明, 两种方法均可行。

$$\varphi(u, u) = \varphi_\theta \times \varphi_L \times \varphi_{XZ} \quad (4)$$

式中, $\varphi(u, u)$ 描述了 (p_u, q_u) 对特征点四元组的总支持度, φ_θ 、 φ_L 、 φ_{XZ} 分别描述了角度支持度、尺度支持度、形状支持度。

$$\varphi_\theta = \exp\left(-\frac{\theta^2}{2\sigma_\theta^2}\right)$$

$$\theta = d\theta / \theta_{\text{thresh}} \quad (5)$$

$$d\theta = d\theta_{h,u} - d\theta_{i,h}$$

$$d\theta_{i,j} = (\theta_{p_i, p_j} - \theta_{q_i, q_j})$$

式中, θ_{p_i, p_j} 表示 p_i 到 p_j 的有向线段的角度, 范围为 $[0^\circ, 360^\circ)$ 。 $d\theta_{i,j}$ 即表示两张影像上 i, j 点对表示的有向线段间的旋转角度, θ_{thresh} 表示旋转角度偏差阈值, 当 (p_u, q_u) 为 (p_i, q_i, p_h, q_h) 条件下的正确匹配对时, $d\theta$ 应为 0, 即 φ_θ 为 1, 表示 (p_u, q_u) 满足 (p_i, q_i, p_h, q_h) 的旋转角度。

$$\varphi_L = \exp\left(-\frac{L^2}{2\sigma_L^2}\right) \quad (6)$$

$$L = dL/L_{\text{thresh}}$$

$$dL = dL_{h,u} - dL_{i,h}$$

$$dL_{i,j} = L_{p_i, p_j} / L_{q_i, q_j}$$

式中, L_{p_i, p_j} 表示有向线段同侧某范围内的灰度均值。 $dL_{i,j}$ 表示对应灰度特征相近度, 如果等于 1, 表示待匹配影像与基准影像整体灰度差异较小。 dL 表示灰度差异的值是否一致, L_{thresh} 表示灰度差异变化偏差阈值。

φ_{XZ} 计算公式为

$$\varphi_{XZ} = \exp\left(-\frac{X^2}{2\sigma_{XZ}^2}\right) \quad (7)$$

$$X = dX/X_{\text{thresh}}$$

dX 表示 (p_i, p_h, p_u) 与 (q_i, q_h, q_u) 组成的两个三角形的相似性^[13], 具体计算方法为

$$dX = \sqrt{(a_{ih} - \bar{a})^2 + (a_{hu} - \bar{a})^2 + (a_{iu} - \bar{a})^2} \quad (8)$$

$$\bar{a} = (a_{ih} + a_{hu} + a_{iu})/3$$

$$a_{ih} = \frac{|\Delta p_{ih}|}{|\Delta q_{ih}|}, a_{hu} = \frac{|\Delta p_{hu}|}{|\Delta q_{hu}|}, a_{iu} = \frac{|\Delta p_{iu}|}{|\Delta q_{iu}|}$$

式中, Δp_{ij} 为 p_i 和 p_j 间距离, Δq_{ij} 为 q_i 和 q_j 间距离。若 dX 为 0, 则表示两个形状完全相似, 此时 φ_{XZ} 为 1, 即 (p_u, q_u) 对 (p_i, q_i, p_h, q_h) 形状支持度为 1。

以上各式中 $\sigma_\theta, \sigma_L, \sigma_{XZ}$ 为系统参数, 其大小决定角度、尺度、形状三者在总支持度中的比重, 数组越大则所占比重越大; $\theta_{\text{thresh}}, L_{\text{thresh}}, X_{\text{thresh}}$ 为角度、尺度、形状变化偏差容忍值, 取值可相对宽松, 对计算结果不产生直接影响。

对于旋转、缩放等非线性变形较大但线性变形较小时, 角度与尺度稳定性较低, 形状稳定性相对较高, 此时可以适当使 σ_θ 与 σ_L 取较小值。对于各种变形均存在时, 该方法的稳定性还需要进一步验证。

由于此匹配方法基于爬山法进行, 新匹配对的正确性依赖于已有特征点四元组, 而采用松弛匹配方法, 可能使四元组中的匹配点对存在误差甚至错误, 因此为了尽量保证新匹配对的正确性, 利用搜索

空间和匹配条件的双重约束。搜索空间方面, 利用特征点四元组, 可以得到两幅影像局部尺度、旋转关系, 由此可以初步确定影像上某点在另一影像上对应同名点的大致范围, 缩小搜索空间; 匹配条件方面, 除定义总的支持度阈值 thresh , 还增加一个分阈值 thresh_f , 用来约束 $\varphi_\theta, \varphi_L, \varphi_{XZ}$, 进一步降低出现错误匹配的可能性。除此之外, 为了尽量减小错误的同名匹配特征对检测后续匹配点的影响, 还在匹配策略方面做了相应设计, 具体方法设计在 1.3 节步骤 5) 中将给出介绍。

1.3 匹配算法

本文匹配算法的具体步骤如下:

1) 结构特征提取。

2) 计算结构特征不变矩。采用文献[6]的不变矩 $\Phi_2, \Phi_{\max}, \Phi_{\min}$ 作为结构特征的相似性参数, 其中多边形重心计算方法采用文献[14]的计算方法。

3) 匹配矩阵 M 及初始匹配特征对数组 m 。将特征的矢量空间距离存入匹配矩阵 M , 在文献[6]采用的距离函数的基础上, 选用下列矢量空间距离, 并以这些矢量空间距离的总和小于规定的阈值作为度量准则。

$$D_1(i, j) = \frac{|\Phi_2^b(i) - \Phi_2^r(j)|}{|\Phi_2^b(i) + \Phi_2^r(j)|/2}$$

$$D_2(i, j) = \frac{|\Phi_{\max}^b(i) - \Phi_{\max}^r(j)|}{|\Phi_{\max}^b(i) + \Phi_{\max}^r(j)|/2} \quad (9)$$

$$D_3(i, j) = \frac{|\Phi_{\min}^b(i) - \Phi_{\min}^r(j)|}{|\Phi_{\min}^b(i) + \Phi_{\min}^r(j)|/2}$$

$$\sum_{k=1}^n D_k(i, j) < T, n = 3 \quad (10)$$

式中, b, r 分别表示基准影像与待匹配影像; i, j 分别表示基准影像的第 i 条边缘和待匹配影像的第 j 条边缘, T 为阈值。显然, 当匹配正确时, D_k 应为零, 因此空间距离总和小于某一阈值, 可作为确定边缘匹配的后选准则。

M 计算完成后, 将 M 元素值大于某阈值 T 且顶点数大于 2 的特征对存入初始匹配特征对数组 m , m 内元素包含左右特征编号、 D_k 总和。

类似 SIFT 算子^[15]计算关键点主方向的统计方法, 分区间统计 m 内匹配特征对间的旋转角度, 得到影像间的旋转角度。根据概率统计理论, 两张影像的角度关系一定出现在旋转角度最集中的区间附近。据此, 对 m 内匹配特征对进一步进行角度约束,

得到新的 n 组匹配特征对 $\{(l_0, r_0), \dots, (l_i, r_i), \dots, (l_n, r_n)\}$ 。

4) 获得最优匹配特征对。即利用 (l_i, r_i) 计算影像间仿射变换参数 $\{a_0, a_1, a_2, b_0, b_1, b_2\}$, 然后利用仿射变换参数将右片结构特征顶点集合转换到左片坐标系下, 比较左片坐标系下的两组点, 如果两点距离小于某一阈值 T_r 则认为两点匹配, 最后将匹配点对集合大小作为 (l_i, r_i) 的空间关系支持度。需要注意的是, 在利用距离判断点是否匹配时, 虽然以结构特征顶点作为点集合, 点仍然存在少量扎堆现象, 因此可能存在一对多的情况, 这种情况可能是正确的, 但为保证此支持度的准确性, 此时选择严格不考虑一对多情况。比较所有 (l_i, r_i) 的支持度, 最大的那组特征即为最优匹配特征对, 对于特征对记为 $seed_l, seed_r$ 。

5) 松弛匹配。首先, 将这两个结构特征 $seed_l, seed_r$ 的某组对应顶点作为种子点 $seed_{pl}, seed_{pr}$, 并将其旋转角、尺度比值作为旋转、尺度变化初始值, 开始松弛匹配。定义标记数组 $sign_l, sign_r$, 初始化为 $false$ 。具体步骤如下:

(1) 爬山法得到新的种子点。以右片作为遍历基准, 当右片点均被标记则松弛匹配结束。在右片依次选择最近且未被标记的点 p_r , 如果不存在则匹配结束; 如果距离种子点 $seed_{pr}$ 大于某阈值 T_1 , 则执行步骤(2); 否则将其标记。如果点 p_r 在影像边缘附近或者距离种子点 $seed_{pr}$ 过近, 小于某阈值 T_2 , 则返回步骤(1); 否则利用尺度关系, 在左片上距离 $seed_{pl}$ 相应距离范围内的点集内, 利用 1.2.3 节松弛匹配方法, 寻找 p_r 的最佳匹配点 p_l , 将其标记并存入匹配点集 P_{ll}, P_{rl} , 如果不存在则返回步骤(1), 如果点集大小为 10 的整数倍则执行步骤(2)。

(2) 重新寻找种子点。依次遍历 P_{rl} 元素 P_{rli} , 如果右片上存在距离 P_{rli} 小于阈值 T_1 的点, 则选择 P_{lli}, P_{rli} 作为新的种子点; 如果不存在 P_{rli} , 则匹配结束; 否则执行步骤(1)。

6) 计算影像间仿射变换参数 $\{a_0, a_1, a_2, b_0, b_1, b_2\}$ 。变换模型为

$$\begin{aligned} x' &= a_0 + a_1x + a_2y \\ y' &= b_0 + b_1x + b_2y \end{aligned} \quad (11)$$

式中, $\{a_0, a_1, a_2, b_0, b_1, b_2\}$ 为仿射变换系数, (x', y') 、 (x, y) 分别为基准影像与待匹配影像对应匹配点。

对于匹配点集合 P_{ll}, P_{rl} , 按式(8), 利用最小二乘方法拟合仿射变换参数, 完成匹配。

7) 松弛匹配优化。由于结构特征提取过程中不可避免存在计算等误差, 使结构特征顶点不同程度地偏离建筑物等角点真实位置, 因此, 有必要进一步对匹配结果进行优化。对于右片上的每一个直线端点 P_r , 在以它为中心的一定范围内利用 Harris 算子计算范围内每点兴趣值, 则兴趣值最大的点即为 P_r 的改正点, 并对 P_r 进行改正。然后利用仿射变换参数计算其匹配点, 并在左片直线端点搜索离其最近的点 P_l , 如果距离小于某阈值, 则 P_l 为 P_r 匹配点; 否则 P_r 不存在匹配点。最后继续在以 P_l 为中心的一定范围内利用 Harris 算子计算范围内每点兴趣值, 利用兴趣值最大的点对 P_l 进行改正, 依次得到所有匹配点对。

2 实验与分析

为了验证算法的可行性, 分别采用两组数据进行算法性能测试, 数据集 1 为仿真图像, 数据集 2 为遥感影像。

2.1 数据集 1

特征提取: 图像是利用 Visio 工具人工合成的图像, 图中建筑物类型包括常见的 3 种建筑物: 矩形建筑物、L 形建筑物、T 形建筑物, 如图 1(a) 所示。图 1(b) 为基于 RANSAC 算子提取直线结果, 图 1(c) 为结构特征提取结果, 数字为结构特征编号。

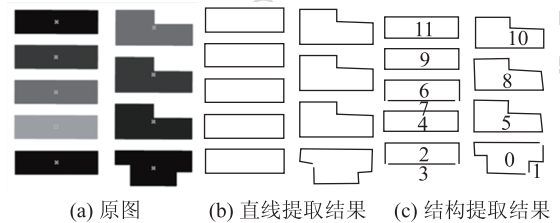


图 1 仿真数据特征提取

Fig. 1 Feature extraction of simulation data

由图 1(b) 可以看出直线提取正确, 不存在过提取且直线提取较完整、精度较高; 由图 1(c) 可看出对于矩形房屋结构提取效果较好, 对于其他建筑物, 除少量特征提取不完整, 其他均较完整, 除此之外, 图 1 中结构特征 4 对应目标的灰度与背景差别较小, 边缘特征仍能较好地提取, 说明本文边缘检测方法对于灰度对比度较低的边缘仍能检测。

特征匹配: 参考图像与待匹配图像是人工合成的图像, 两幅图像间存在缩放、旋转关系, 建筑物有一定的变化, 如图 2 中(a)(b)所示。

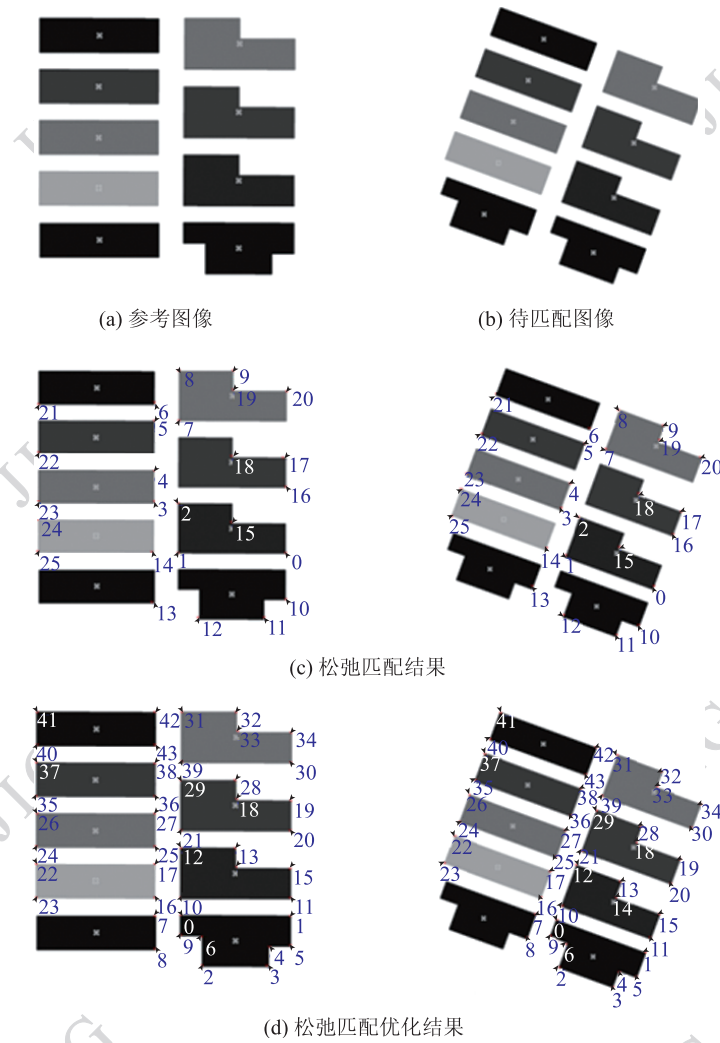


图 2 仿真数据特征匹配

Fig. 2 Features matching of simulation data

由图 2(c) 可看出, 松弛匹配结果中没有出现错误匹配情况, 说明利用角度、尺度以及形状约束的有效性, 但是点的定位精度不高; 对比图 2(c) 与 (d), 可以看出角点定位精度有很大提高。

图 3 为两幅图像配准效果图, 可以看出两幅图

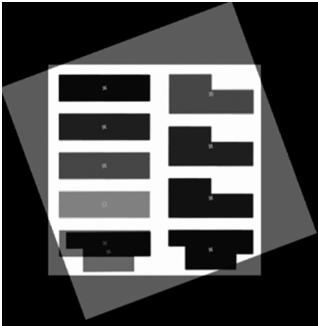


图 3 配准效果图

Fig. 3 Performance of image registration

像叠合效果好, 边缘清晰, 可以有效地检测图像中变换的区域。

2.2 数据集 2

特征提取: 影像为某一地区的实际影像, 图中建筑物分布密集, 且形状大小各异, 如图 4(a) 所示。

由图 4(b) 可看出, 除极少地方出现过提取, 整体来看, 提取直线准确, 主线段断裂情况少; 从叠加显示效果还可看出基于 Canny 算子的边缘检测方法提取的边缘点及本文方法提取的直线特征定位精度均较高。由图 4(c) 中的结构提取叠加效果可看出, 由于结构提取是在直线特征的基础上, 通过计算得到, 相比直线特征, 结构特征顶点定位精度较低, 因此在基于结构匹配完成后, 还需要进一步对角点进行定位。

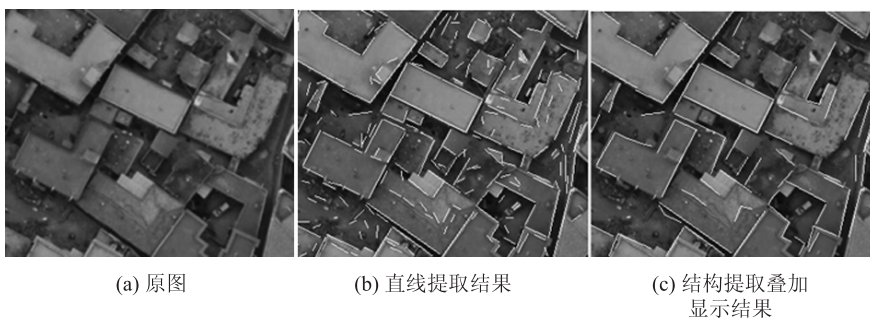


图4 实际影像特征提取

Fig. 4 Feature extraction of actual image

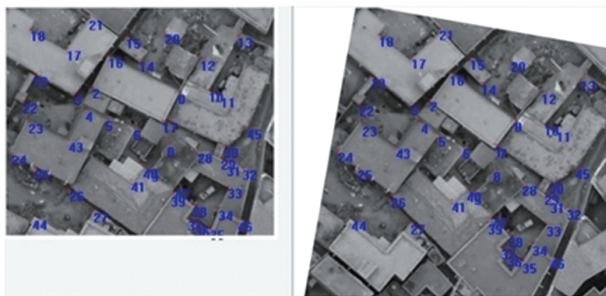
特征匹配:参考影像为某一地区的实际影像,待匹配影像为对其进行旋转、缩放等处理后影像。如图5(a)所示。

图5(b)为利用结构特征的矩特征得到最优匹配特征对,并结合爬山法与松弛法匹配方法,得到的松

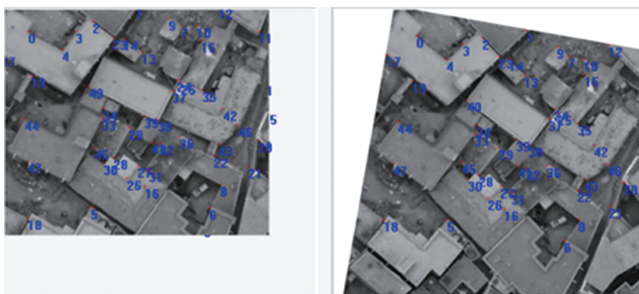
弛匹配结果,可以看出基于结构顶点的松弛匹配的有效性,但点的定位精度不高。图5(c)为松弛匹配优化结果,相对于图5(b),可以看出角点定位更加准确,且角点检测结果受灰度变化影响小,建筑物角点检测率在90%以上,提高了匹配结果的有效性。



(a) 原始影像与参考影像



(b) 松弛匹配结果



(c) 松弛匹配优化结果

图5 实际数据特征匹配

Fig. 5 Features matching of actual data

匹配完成后,为了更直观表现匹配的准确性,将两张影像进行配准,配准效果如图 6 所示。

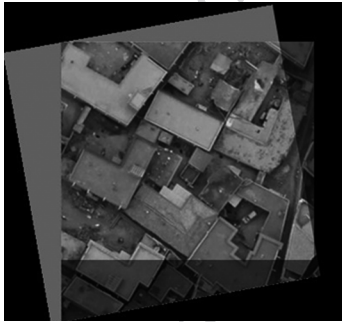


图 6 配准效果图

Fig. 6 Performance of image registration

2.3 算法时间分析

本文方法主要分为两个部分:特征提取、特

征匹配。其中特征提取阶段,包括 Canny 自适应边缘提取、直线特征提取、结构特征提取;特征匹配包括局部的初始匹配、全局性的松弛匹配及优化。

数据集 1 参考数据大小为 300×297 ,待匹配数据为 300×318 ;数据集 2 参考数据大小为 296×254 ,待匹配数据为 349×321 。对于两组数据,直线特征提取、结构特征提取、特征匹配的时间分别为:1.063、0.016、0.218 和 2.188、0.140、0.531,单位为 s。可以看出,结构特征提取时间短,引入结构特征对算法的速度影响较小,且匹配时间远小于特征提取时间,实现了影像的快速匹配。

2.4 平差与精度分析

针对松弛匹配结果与松弛匹配优化结果,利用最小二乘平差方法计算匹配误差。表 1 展示了对于

表 1 变换模型参数与平差精度

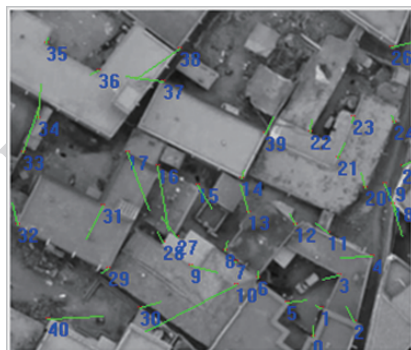
Table 1 Parameters of transformation models and calculation residuals

	松弛匹配结果	松弛匹配优化结果
a_0, a_1, a_2	11.373 8, 0.985 7, -0.174 3	11.281 5, 0.985 6, -0.170 5
b_0, b_1, b_2	-68.007 5, 0.172 5, 0.984 2	-69.141 0, 0.175 0, 0.987 4
$v_{ave}, v_{max}, v_{min}$	1.241 5, -6.687 8, 0.014 9	0.343 1, 0.947 3, -0.011 3
m_0	1.824 3	0.437 8

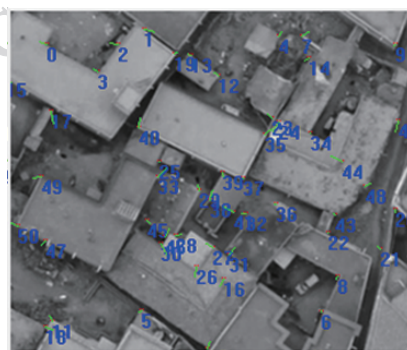
数据集 2,分别利用松弛匹配结果、松弛匹配优化结果解算的仿射变换模型参数、残差 V 分布($v_{ave}, v_{max}, v_{min}$)、单位权中误差(m_0)等,精度指标均以影像像素尺度为单位。

由表 1 残差分布($v_{ave}, v_{max}, v_{min}$)可以看出,松弛匹配与松弛匹配优化结果解算的点残差均值 v_{ave} 均较小,分别为 1.241 5、0.343 1,单位为像素,说明匹配结果均不存在较大错误;但两种方法的单位权中

误差 m_0 分别为 1.824 3、0.437 8,说明松弛匹配优化结果解算点精度要优于松弛匹配。残差分布如图 7 所示,图 7 中将残差放大 10 倍,以特征点出发的有向线段描述残差方向和大小。从图 7 中可以看出,残差均较小且分布不具有规律性,表明不存在系统误差;利用 Harris 兴趣值对松弛匹配结果进行优化后,点的定位精度得到提高,点残差有明显的降低,匹配精度得到明显改善。



(a) 松弛匹配结果



(b) 松弛匹配优化结果

图 7 残差分布

Fig. 7 Distributions of residuals

3 结 论

在介绍遥感影像匹配方法研究现状的基础上,提出了一种基于结构特征的遥感影像匹配方法。首先利用现有的相关算法提取稳定的直线特征,并进一步利用直线特征构建结构特征。然后利用不变矩特征作为结构特征的相似性参数,实现无人工干预的初始匹配特征的快速获取。最后基于结构特征顶点,引入松弛匹配算法,完成影像的全局匹配,并进一步利用 Harris 兴趣值角点定位方法优化匹配结果,提高匹配精度。当然,本文方法仍然存在一些局限性,主要表现在当同一地区不同数据的结构特征提取结果的一致性较差时,最优匹配特征对的获取会受到一定影响,下一步将努力发现新方法,进一步研究并克服存在的问题。

参考文献 (References)

- [1] Wang J, Zhang M Z. Progress on image matching algorithm [J]. Journal of Atmospheric and Environmental Optics, 2007, 2(1): 11-15. [王军, 张明柱. 图像匹配算法的研究进展[J]. 大气与环境光学学报, 2007, 2(1): 11-15.]
- [2] Ke T, Zhang Y J. The application of sift features in the automatic matching for low altitude aerial images [J]. Science of Surveying and Mapping, 2009, 34(4): 23-26. [柯涛, 张永军. SIFT 特征算子在低空遥感影像全自动匹配中的应用[J]. 测绘科学, 2009, 34(4): 23-26.]
- [3] Lv J J, Wen G J. A new method based on spatial relations for feature matching [J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2008, 37(3): 367-379. [吕金建, 文贡坚. 一种新的基于空间关系的特征匹配方法[J]. 测绘学报, 2008, 37(3): 367-379.]
- [4] Stockman G, Kopstein S, Benett S. Matching images to models for registration and object detection via clustering [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1982, 4(3): 229-241.
- [5] Lv J J, Wen G J. An improved automated image registration method based on invariant descriptors [J]. Signal Procession, 2009, 25(2): 216-222. [吕金建, 文贡坚. 一种改进的基于不变描述子的图像自动配准方法[J]. 信号处理, 2009, 25(2): 216-222.]
- [6] Chen Y, Li T J, Xiong X H. A feature-based and least square image matching with constraints [J]. Journal of Image and Graphics, 1998, 3(4): 299-302. [陈鹰, 李铁军, 熊兴华. 带约束条件的特征与最小二乘影像匹配[J]. 中国图象图形学报, 1998, 3(4): 299-302.]
- [7] Radu H, Thomas S. Stereo correspondence through feature grouping and aximal cliques [J]. IEEE Trans. on Pattern Anal. Machine Intell., 1989, 11(11): 1168-1180.
- [8] Wen G J, Lv J J, Wang J Y. An automated method for feature-based image registration with high-accuracy [J]. Journal of Software, 2008, 19(9): 2293-2300. [文贡坚, 吕金建, 王继阳. 基于特征的高精度自动图像配准方法[J]. 软件学报, 2008, 19(9): 2293-2300.]
- [9] Wang Z, He S X. An adaptive edge detection method based on canny algorithm [J]. Journal of Image and Graphics, 2004, 9(8): 958-962. [王植, 贺赛先. 一种基于 Canny 理论的自适应边缘检测方法[J]. 中国图象图形学报, 2004, 9(8): 958-962.]
- [10] Fishchler M A, Bolles R C. Random sample consensus, a paradigm for model fitting with application to image analysis and automated cartography [J]. Communication Association Machine, 1981, 24(6): 381-395.
- [11] Zhu X W. Research on registration of multi-sensor images based on structure support [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2009. [朱宪伟. 基于结构特征的异源图像配准技术研究[D]. 长沙: 国防科技大学, 2009.]
- [12] Wang H, Hou X S, Cong J T, et al. Four-element relaxation matching algorithm of images based on known initial matching pairs [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2010, 36(7): 785-788. [王华, 侯相深, 丛建亭, 等. 已知初始匹配对的图像四元松弛匹配算法[J]. 北京航空航天大学学报, 2010, 36(7): 785-788.]
- [13] Zhong C, Li F, Huang X F. Automatic registration of lidar data and aerial image based on a 6-tuples relaxation [J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2009, 34(12): 1426-1430. [钟成, 李卉, 黄先锋. 利用 6 元组松弛法自动配准 LiDAR 数据与航空影像[J]. 武汉大学学报: 信息科学版, 2009, 34(12): 1426-1430.]
- [14] Li Y B, Hao Y J. The calculation method of polygon' gravity center [J]. Computer Applications, 2005, 25: 391-393. [李玉冰, 郝永杰. 多边形重心的计算方法[J]. 计算机应用, 2005, 25: 391-393.]
- [15] Lowe D G. Distinctive image features from scale-invariant keypoints [J]. International Journal of Computer Vision, 2004, 60(2): 91-110.