

地球同步气象卫星图像三维球面拼接*

房睿 曾丹 张之江

(上海大学通信与信息工程学院 上海 200072)

摘要: 传统图像拼接的目标是实现图像间无明显接缝的效果。而地球同步气象卫星遥感图像三维拼接的目标则是获得像素与经纬度的对应关系。提出了一种地球同步气象卫星图像三维球面拼接的方法:首先基于拓扑位置关系的轮廓配准方法,以 GSHHG 数据库为载体,得到初始的配准结果。然后利用基于几何拓扑一致性的特征提纯来去除误匹配。接着通过匹配点集来拟合多项式映射模型得到图像间的映射关系。在建立最佳缝合线搜索准则之后使用动态规划算法来搜索最佳缝合线,最后加权融合完成三维球面拼接。

关键词: 遥感图像;配准;特征提纯;三维拼接

中图分类号: TP751 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.4050

Three-dimensional spherical stitching of GSMS images

Fang Rui Zeng Dan Zhang Zhijiang

(School of Communication and Information Engineering, Shanghai University, Shanghai 200072, China)

Abstract: The goal of traditional image stitching is to achieve seamless stitching. While the goal of the three-dimensional spherical stitching of GSMS remote sensing images is to determine the correspondence between each pixel and latitude and longitude. In this paper, a three-dimensional spherical stitching of GSMS images is proposed. First of all, initial image registration can be obtained by contour matching based on the topological position relation with the help of the GSHHG database. Next, the mismatched pairs are removed by feature refinement based on the geometric topological consistency. Then, the mapping relations between the images are obtained through the fitted polynomial mapping models. After constructing the optimal seam-line searching rule, we search an optimal seam-line with dynamic programming and realize the three-dimensional spherical stitching with the weighted fusion algorithm.

Keywords: remote sensing image; registration; feature refinement; three-dimensional spherical stitching

0 引言

近年来,卫星技术发展迅速,无论是气象方面还是军事方面的卫星,所获取到的信息大多都是以遥感图像的形式^[1-4]呈现的。对于某一个特征的目标常常需要重点关注,此时从目标各个方位拍摄的图像拼接出的图像将更好的帮助了解目标信息。对于地球同步气象卫星,将不同气象卫星拍摄的云图拼接后来预测天气的变化情况,可以提供更准确的天气预报。

然而,由于各个卫星所搭载的成像设备的工作机理和拍摄条件不一致,难以保证每个卫星拍摄到的遥感图像在同一地标点有着相同的内容信息。在这种情况下,图像匹配难以实现,也给后续的拼接工作带来了困难。

早期的遥感图像匹配是利用地面控制点(GCP)作为参考进行配准,使用归一化互相关或者最小距离准则等来衡

量匹配结果,但是这些算法有时对光照旋转等因素敏感^[5-6]。现在大部分的配准方法是基于特征描述符^[7]的。近年来,SIFT 算法及其改进算法被广泛应用于遥感图像^[8-11]的匹配中。由于地球同步气象卫星(GSMS)图像中所呈现出的纹理较少,这对于 SIFT 特征以及其变式来说,准确提取特征并保证特征的唯一性与不变性是困难的。目前图像拼接方法多对图像内容或拍摄条件进行了限定,如要求场景近似位于同一平面或要求密集采样或两图像间视角相差足够小或基线距离较小等。采样条件和场景的约束直接导致了当前的图像拼接技术难以满足 GSMS 图像拼接的应用需要。

由于海岸线在不同星下点的地球同步气象卫星所拍摄到的图像上呈现的拓扑结构不一致,直接对两幅或多幅 GSMS 图像进行特征匹配会导致误匹配。为了解决上述问题,本文引入标准地标库(GSHHG)这一中间媒介,待拼接

收稿日期:2017-03

* 基金项目:国家自然科学基金(61572307)资助项目

的 GSMS 图像分别与各自相对应的标准地标图进行特征匹配。由于待拼接的 GSMS 图像的标准地标图间有明确的对应关系,意味着可以实现两幅 GSMS 图像的特征匹配。本文建立了新的最佳缝合线搜索准则并使用动态规划算法来搜索最佳缝合线,对缝合线的周围进行加权融合,完成地球同步气象卫星图像三维球面拼接。

1 基于拓扑位置关系的图像配准

1.1 基于轮廓信息的初始配准

标准地标图是由 GSHHG 中的地标信息通过球面成像模型和球面到平面的映射得来的,成像为大陆、海岛等的边缘^[12]。理想情况下,GSMS 图像的边缘和标准地标图之间的海岸线轮廓的拓扑位置关系是一致的。因此,分别对 GSMS 图像的边缘与标准地标图的轮廓进行特征编码,然后再对编码的特征进行匹配。

在标准地标图上,以海岸线上的某个点为中心,选取大小为 $(2K+1) \times (2K+1)$ 的矩阵作为该像素点的模板图特征,记作矩阵 \mathbf{W} 。本文使用结构树森林算法^[13]进行快速边缘检测。提取边缘后,可得到一张表示每个像素是边缘概率的图像。以该图像上的一个像素点为中心,选取大小为 $(2K+1) \times (2K+1)$ 的矩阵作为 GSMS 图像的概率图特征,记为矩阵 \mathbf{P} 。为了降低概率图特征 \mathbf{P} 的噪声干扰,通过设置一个阈值 \mathbf{P}_0 将概率图特征转换为二值图特征,转换后的矩阵记为 \mathbf{P}' 。针对这两幅待匹配图像,可通过比较它们特征之间的几何相似性和梯度相似性来进行特征匹配^[14]。

1.2 基于几何拓扑一致性的匹配提纯

因为云层的边缘也会被提取并且卫星图中存在大量相似性内容,这使得初匹配结果中会存在着较多的误差点。为解决此问题,采用标准地标图与 GSMS 遥感图像上对应特征点之间的几何位置关系的拓扑结构差异^[15]进行去除误匹配。

对特征初匹配得到的特征点进行几何拓扑编码,然后用编码后码字的异同来表示特征点对在两图之间几何拓扑结构的异同,最后从几何拓扑结构差异较大的特征点对中通过阈值策略去除特征误匹配,达到特征匹配提纯的目的。

2 基于多项式拟合的地标补全和球面拼接

2.1 多项式拟合的地标补全

由球面透视成像模型知,图像径向将产生分辨率差异。使用单一的投影变换映射模型,将导致严重配准误差。传统图像拼接的目标是实现无明显接缝的图像效果,关键则是使重叠区两图之间的差异最小化。而 GSMS 图像三维拼接的目标则是确定经纬度对应像素值,关键是像素三维信息(经纬度)获取。

GSMS 图像的海岸线和标准地标图的地标点是一一对应且平滑的。利用这一特性,可以统计提纯后的匹配点对间的 x 方向的偏差趋势和 y 方向偏差趋势。匹配提纯得到

的点对形如 $((x_i^G, y_i^G), (x_i^S, y_i^S))$,其中 G 表示标准地标图, S 表示 GSMS 图像,点对间 x 方向和 y 方向偏差为:

$$D_{x_i} = x_i^G - x_i^S \quad (1)$$

$$D_{y_i} = y_i^G - y_i^S \quad (2)$$

数据集 (x_i^G, y_i^G, D_{x_i}) 用来拟合标准地标图的地标点与其在 GSMS 图像中的对应点的 x 方向偏差的趋势;数据集 (x_i^G, y_i^G, D_{y_i}) 用来拟合标准地标图的地标点与其在 GSMS 图像中的对应点的 y 方向偏差的趋势。本文使用多项式函数^[16-17]来进行描述 GSHHG 中的地标点与其匹配点间的偏差趋势:

$$D_x(x, y) = \sum_{i=0}^m a_i x^i y^{m-i} + b_0 \quad (3)$$

$$D_y(x, y) = \sum_{i=0}^m c_i x^i y^{m-i} + d_0 \quad (4)$$

式中: $a_0 \sim a_m, c_0 \sim c_m, b_0$ 和 d_0 是相互独立的系数, (x, y) 是匹配提纯后的标准地标图中的点的坐标。使用列文伯格算法(LM 算法)和通用全局优化算法进行迭代,最后选择拟合结果与实际匹配结果相关性最大,均方根误差最小的多项式函数作为映射模型。

对于标准地标图的每个地标点,经过这个映射模型处理后,就可以得到每个地标点和其对应的匹配点之间的偏移,也就得到了每个地标点在 GSMS 图像中的匹配点。以一个很小的步长遍历全球所有的经纬度,对经纬度进行球面成像模型和三维到二维的投影转换处理。其中经纬度在 GSHHG 中的是海岸线信息,其他的为非海岸线信息。由于图像间的拓扑结构,非海岸线也可以通过已得到的拟合函数来进行映射得到对应的匹配点。这样可以得到 GSMS 图像中的每个点对应的经纬度信息。

2.2 三维球面拼接

在图像拼接的结果中,有时候会存在着某些物体不完全重合的问题,这种图像拼接中的重影称为鬼影现象。最佳缝合线将两幅图像的重叠区域分成两个部分,理论上的最佳缝合线应该位于待拼接图像最为相似的地方,可以减少拼接后存在的错位现象,缝合线两边来自不同的图像,可以在一定程度上避开场景中的运动物体,减少融合鬼影出现的概率。

GSMS 图像三维拼接的缝合线应该尽量在重叠区域中心线(经度为 $\bar{\beta}$)附近,这样才能够更好地利用到每个遥感图像的信息进行拼接。最佳缝合线的求解准则可以用代价函数 $E(\alpha, \beta)$ 来表示:

$$E(\alpha, \beta) = \lambda(aE_{\text{gray}}(\alpha, \beta) + bE_{\text{gra}}(\alpha, \beta) + cE_{\text{str}}(\alpha, \beta)) \quad (5)$$

式中: (α, β) 表示重叠区域内点的经纬度信息; λ 为高斯权重,经度 β 与 $\bar{\beta}$ 相差越大,权重值 λ 越大; E_{gray} 表示重叠区域的像素的灰度差值; E_{gra} 表示梯度差值; E_{str} 表示结构差值。 a, b, c 为灰度差值,梯度差值和几何结构差值的权重值。待配准图像灰度值整体相差很大时,图像的梯度差异和几何

结构差异可靠性更高,因此权重 b 和 c 被赋予更大的值。

求解灰度差值 $E_{\text{gray}}(\alpha, \beta)$ 是对待拼接图像在重叠区域的像素的灰度值相减。

梯度差值 $E_{\text{gra}}(\alpha, \beta)$ 是基于 Sobel 算子实现的。以重叠点 (α, β) 为中心,选取邻近的 8 个点作为其邻域信息。由于这 9 个点位置很相近,可以近似地认为它们在一个平面上。通过 Sobel 算子来计算这个点在待配准图像上对应的梯度值,相减得到梯度差值。

几何结构差值可以衡量缝合线两边结构是否保持相似。差值越小,结构越相似。该方法主要是利用 GSMS 图像的二值图特征信息,对重叠区域的点的邻域结构特征信息进行异或运算并求和。

根据上述缝合线的准则,可以采用动态规划的思想去寻找一条最佳缝合线。动态规划把多阶问题转化为一系列的一阶问题,利用各个阶段的关系来逐个求解。在问题中可能存在多个解,最佳缝合线就是要找出一条最优的缝合线。具体步骤如下:

1) 初始化。计算重叠区域的差值图像。将差值图像中北纬值最大,经度值为 $\bar{\beta}$ 的点作为缝合线的始点;

2) 扩展。从北纬值最大的点开始递减纬度,一直到最大的南纬度值结束。具体方法是,首先分别计算其下一邻接纬度的 3 个像素的代价函数,从计算结果中选择值最小的像素所在的经纬度作为扩展方向,并将取得最小强度值的下一邻接纬度的像素点更新为当前点;

3) 重复步骤 2),直到遍历完重叠区的所有纬度,最后得到最佳缝合线。

在得到最佳缝合线后,为了使得图像拼接过渡更加自然流畅,本文在缝合线周围使用加权平均融合,这样既避免了鬼影的产生,也实现了拼接线的平滑过渡。

通过球面成像模型,可以把 GSMS 图像以三维的形式在世界坐标中显示。由于图像中每个点的经纬度都知晓,而它们又在同一个世界坐标系,同样的经纬度的点就是重合点,得到最佳缝合线之后,对缝合线周围进行加权平均融合,实现两幅图像的平滑过渡。

3 实验结果与分析

本文实验使用的地球同步气象卫星图像是由我国的风云 II D 和风云 II E 气象卫星提供。风云 II D 与风云 II E 气象卫星为地球同步卫星。卫星图片经过尺度归一化后大小为 $10\ 000 \times 10\ 000$ 像素。风云 II D 的卫星星下点为 $(86^\circ\text{E}, 0^\circ\text{N})$ 。在 GSHHG 数据库中使用的地标点范围经度 $26^\circ\text{E} \sim 146^\circ\text{E}$,纬度从 $60^\circ\text{N} \sim 60^\circ\text{S}$ 。风云 II E 的卫星星下点为 $(104^\circ\text{E}, 0^\circ\text{N})$ 。在 GSHHG 中使用的地标点范围经度 $24^\circ\text{E} \sim 164^\circ\text{E}$,纬度从 $60^\circ\text{N} \sim 60^\circ\text{S}$ 。使用 GSHHG 制作标准地标图时,卫星所在的高度为 $42\ 162.722\ 656\ \text{km}$ 。

在将卫星边缘概率图转换为二值图,设置的阈值大小为 30。本文实验用图为卫星可见光图像,进行初匹配时,

模板大小选取 61×61 像素。图 1 所示为子区域块进行配准得到初匹配结果与匹配提纯后结果的连线图。图 1(a) 为子区域的初匹配结果细节图,图 1(b) 为匹配提纯后的结果细节图。其中画圈的部分表示匹配错误,可以看出误匹配现象被很好的消除。

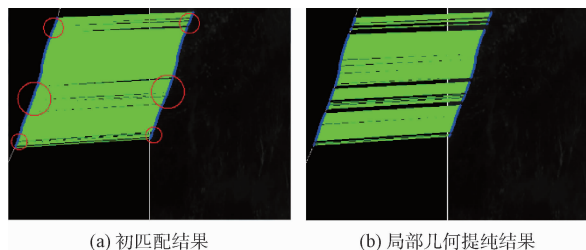


图 1 初匹配与匹配提纯后结果连线

地标补全实验利用配准得到的结果计算最优的多项式拟合函数,并通过得到的拟合函数映射模型获取完整的匹配图像。如图 2 所示为埃塞俄比亚东部区域利用多项式拟合函数映射模型对卫星图进行补全的结果示例。图 2(a) 为对应区域的地标图像,图 2(b) 为对应区域卫星图像并在图像上标记出配准得到的配准点,图 2(c) 为使用拟合函数映射模型对图像进行补全后地标图像映射到卫星图像得到的结果。从图片对比中可以看出,使用多项式拟合映射模型对地标图进行补全的方法能准确地标识出卫星图片中的海岸轮廓。进行地标补全后,匹配点对的精度为 93.0% ,召回率为 91.2% 。

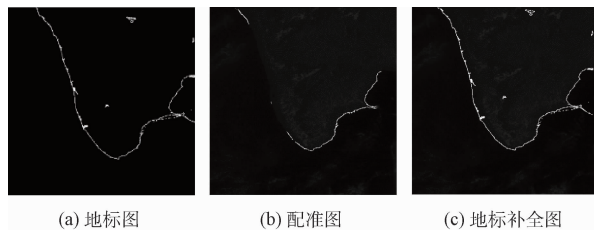


图 2 子区域补全图

图 3 所示为两幅待拼接的三维遥感卫星图像。图 4 所示为实验得到的三维球面拼接,由于地球是个非标准球,所以拼接得到的结果并不是一个标准球型。因为原始数据不包含椭球外的信息,这里用灰色填充以示区别。

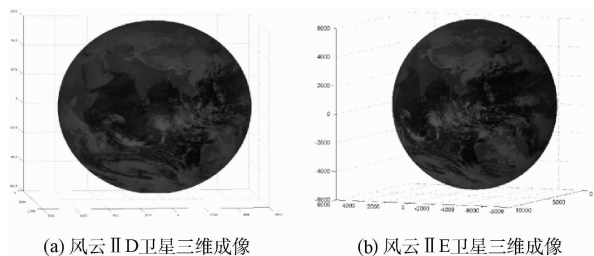


图 3 待匹配卫星三维成像

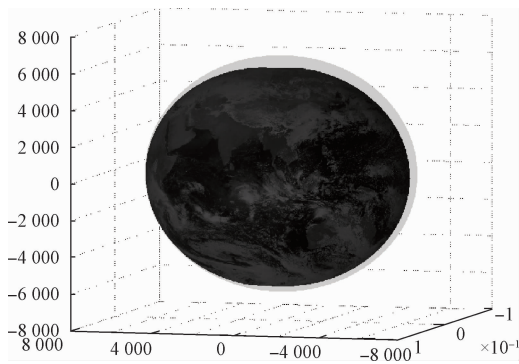


图4 卫星图三维球面拼接

4 结 论

本文首先提出了一种有效的基于 GSHHG 的轮廓配准方法,然后在初匹配的基础上使用了基于几何拓扑一致性匹配提纯的方法以去除误匹配点对,之后使用得到的精确配准点用来拟合多项式映射模型。最后在世界坐标系中,对两幅卫星图像进行三维球面拼接。通过实验结果可以看出两幅遥感图像可以很好地在三维球面进行拼接。在之后的实验中将着重对算法进行优化以减少配准和拼接所需的时间,以及提高准确率。

参考文献

- [1] 刘健,李云. 风云二号静止气象卫星的云相态识别算法[J]. 红外与毫米波学报, 2011, 30(4): 322-327.
- [2] 王亮,刘蓉,张丽,等. 基于 Fourier-Mellin 变换的气象卫星光谱图像配准[J]. 光谱学与光谱分析, 2013(3): 855-858.
- [3] SEDAGHAT A, MOKHTARZADE M, EBADI H. Uniform robust scale-invariant feature matching for optical remote sensing images[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2011, 49(11): 4516-4527.
- [4] 曲景影,孙显,高鑫. 基于 CNN 模型的高分辨率遥感图像目标识别[J]. 国外电子测量技术, 2016, 35(8): 45-50.
- [5] CHEN X, PEI H Q. Intensity-based image registration by nonparametric local smoothing [J]. Pattern Analysis and Machine Intelligence, IEEE, 2011, 33(10): 2081-2092.
- [6] KYBIC J, VNU-KO I. Approximate all nearestneighbor search for high dimensional entropy estimation for image registration [J]. Signal Processing, 2012, 92(5): 1302-1316.
- [7] 毋立芳,侯亚希,许晓,等. 基于紧致全姿态二值 SIFT 的人脸识别[J]. 仪器仪表学报, 2015, 36(4): 736-742.
- [8] 阳吉斌,胡访宇,朱高. 基于改进 SURF 算法的遥感

图像配准[J]. 电子测量技术, 2012, 35(3): 69-72.

- [9] CAI G R, LI S Z, WU Y D, et al. Automatic registration of remotesensing images based on sift and fuzzy block matching for change detection [J]. International Journal of Computational Intelligence Systems, 2011, 4(5): 874-885.
- [10] WANG G H, ZHANG S B, WANG H B, et al. An algorithm of parameters adaptive scale-invariant feature for high precision matching of multi-source remote sensing image [C]. Urban Remote Sensing Event, IEEE, 2009: 1-7.
- [11] FAN B, HUO C L, PAN C H, et al. Registration of optical and sar satellite images by exploring the spatial relationship of the improved sift [J]. Geoscience and Remote Sensing Letters, IEEE, 2013, 10(4): 657-661.
- [12] JUNG J S, SONG J H, KWAG Y K. High precision automatic geocoding method of SAR image using GSHHS [C]. (AP SAR), 3rd International Asia-Pacific Conference on Synthetic Aperture Radar, IEEE, 2011: 1-4.
- [13] DOLLÁR P, ZITNICK C L. Structured forests for fast edge detection [C]. Proceedings of the IEEE International Conference on Computer Vision, 2013: 1841-1848.
- [14] 刘武,曾丹,张之江. 地球同步卫星图像轮廓配准[J]. 电子测量技术, 2016, 39(7): 87-91.
- [15] ZENG D, ZHANG T, FANG R, et al. Neighborhood geometry based feature matching for geostationary satellite remote sensing image [J]. Neurocomputing, 2017, 236: 65-72.
- [16] GU Y, REN K, WANG P, et al. Polynomial fitting-based shape matching algorithm for multi-sensors remote sensing images [J]. Infrared Physics & Technology, 2016(76): 386-392.
- [17] ZHAO L, PENG Q, HUANG B. Shape matching algorithm based on shape contexts [J]. IET Computer Vision, 2015, 9(5): 681-690.

作者简介

房睿(通讯作者)1992年出生,硕士研究生,主要研究方向卫星图像处理、计算机视觉。

E-mail: fangrui4117@163.com

曾丹,1982年出生,副教授,主要研究方向为计算机视觉、数字全息等。

E-mail: dzeng@shu.edu.cn

张之江,1968年出生,教授,主要研究方向为计算机视觉、数字全息等。

E-mail: zjzhang@shu.edu.cn