

一种用于敏捷卫星自主任务规划的云顶高探测方法

孔祥海 陈跃庭* 李 奇 冯华君 徐之海

浙江大学现代光学仪器国家重点实验室, 浙江 杭州 310027

摘要 高分辨率光学对地观测敏捷卫星自主任务规划需要对成像目标区域上空云层进行在轨提前探测,以修正成像时间窗,提高卫星使用效能。其中云高度是必不可少的信息,提出了一种用于敏捷卫星自主任务规划的云顶高探测方法。根据不同角度的遥感图像对之间云层以及地面匹配关系的差异,以地面为基准,求出图像间云层对地面的投影偏差,再利用几何关系,计算云层云顶高度。仿真模拟实验的结果表明本文算法探测云顶高与实际云顶高差距小于1 pixel,并且在图像间发生旋转、仿射等变换的情况下依然有稳健的表现。误差分析给出了算法相对误差随成像角度的变化趋势。多角度成像分光辐射度计图像处理结果表明该算法在实际应用中性能良好。

关键词 遥感; 云顶高度; 立体观测; 特征匹配; 尺度不变特征转换

中图分类号 TP753

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201535.0728004

A Cloud-Top Height Detection Method for Autonomous Planning of Satellites

Kong Xianghai Chen Yueting Li Qi Feng Huajun Xu Zhihai

State Key Laboratory of Modern Optical Instrumentation, Zhejiang University, Hangzhou, Zhejiang 310027, China

Abstract Autonomous planning of high-resolution optical earth-observing agile satellites requires on-orbit clouds detection over observation zones ahead, in order to reschedule the time window to enhance the operational effectiveness of satellites. Cloud heights are essential information, a cloud heights detection method for autonomous planning of satellites is proposed. On the basis of the difference in matching relationship between cloud and ground with different points remote sensing images, projecting deviation of cloud to ground is computed on the reference of ground and then cloud-top height is calculated by geometric relation. The simulation experimental result demonstrates that the disparity of cloud-top heights between detected and actual is less than 1 pixel and the method performs stably even rotation and affine transformation among images. Error analysis shows the trend of relative error along with different imaging angles. The experimental results of multi-angle imaging spectroradiometer images suggest that the proposed method has convincing performance over the real application.

Key words remote sensing; cloud-top height; stereoscopy; feature matching; scale invariant feature transform

OCIS codes 280.4788;100.2960;150.1135

1 引言

云作为遮挡物,常常妨碍对地观测卫星对地面目标的观测,从而降低卫星资源的利用效率。尤其是对特殊用途的卫星,云的遮挡可能会使卫星错失对目标观测的最佳时机。所以,在卫星对地面目标观测前,人们尝试利用卫星的辅助光学系统或其他卫星对目标上空的云进行拍摄,根据所得图像推算云顶高和云位置等信息,从而确定卫星对地面目标拍摄的最佳时机。例如,Beaumont等^[1]给出了敏捷卫星在具有实时云层

收稿日期: 2015-02-06; 收到修改稿日期: 2015-03-17

基金项目: 国家自然科学基金(61275021)

作者简介: 孔祥海(1990—),男,硕士研究生,主要从事光学遥感图像处理方面的研究。E-mail: kongxh_1990@sina.com

导师简介: 徐之海(1964—),男,博士,教授,主要从事光学遥感、图像处理等方面的研究。E-mail: xuzh@zju.edu.cn

*通信联系人。E-mail: chenyt@zju.edu.cn

探测光学系统的情况下,如何规避云层的自主规划调度策略。

目前,利用卫星拍摄图像解算云顶高主要采用立体观测的方法,即卫星从多个角度进行拍摄,将不同图像中的同名点进行匹配,利用匹配关系求解云高。卫星立体观测包括三种方法:单星观测、双星联合观测和单星多角度观测^[2]。单星观测是指利用同一颗卫星在不同时间对目标从不同角度多次进行观测。早期的气象卫星图像的云顶高解算即采用此方法,国内外的研究人员都进行了相关研究^[3-4],证明了立体观测法获得云顶高的可行性。双星联合观测是指利用两个卫星上的光学系统从不同方向同时对同一目标进行观测。Hasler^[5]论述了利用静止卫星资料进行云立体观测的思路及关键问题,指出立体观测是大气科学研究的重要新方法。Fujita^[6]则利用 GOES 和 GMS-1 两颗卫星联合进行观测,给出了利用两颗静止气象卫星立体观测资料的视角偏差计算云顶高度的近似方法。单星多角度观测是指利用单个卫星搭载多个角度的光学系统,从多个角度对目标进行观测,该方法为云高观测提供了新的途径,并成为遥感研究的一个新趋势^[7]。欧盟 ERS-2 卫星上的 ATSR 以及美国 TERRA 卫星上的多角度成像分光辐射度计(MISR)系统均采用此方法。该方法精度高,如 MISR 系统的云高度误差约为 562 m^[8]。

对于卫星进行任务规划以规避云层的问题,云顶高信息必不可少。针对利用高分辨率对地遥感卫星多角度图像探测目标上空云顶高的应用情况,由于在非极端天气情况下每一朵云各点的云顶高度差距不大,因此无需知道每一个云点的高度分布,只需探测出云层的平均云顶高。这样就会提高云顶高探测速度,实现地面目标上空云顶高度的在轨提前探测。

本文基于立体观测的思想,提出了一种适用于高分辨率光学对地观测敏捷卫星自主任务规划的云顶高探测方法。该方法通过预处理、区域分割、特征匹配、匹配关系提取和云顶高解算等步骤,将同一目标区域含有云遮挡的不同角度高分辨率卫星对地遥感图像进行匹配,剔除误匹配点,分别求解云和地面的匹配关系,利用两者的差异解算云顶高度。该方法速度较快,不需要人为干预,具有自适应性。利用该方法实际解算了 MISR 图像的云顶高度,与 MISR 云顶高数据的比较,证明了其应用可行性;并进行了理论误差分析,为实际应用提供了理论指导。

2 云顶高解算模型

卫星在两个不同成像位置时卫星与云和地面之间存在相对位置的变化,图像中云对地面的投影位置产生相应的变化。立体观测法就是利用这个投影位置的变化推算出云高度。高分辨率遥感卫星视角角很小,所以其物方光线可以近似为平行光;同时由于其视场较小,一幅图像中地面范围较小,因此可以忽略地面曲率的影响,从而可将图像中的地面视为平面。

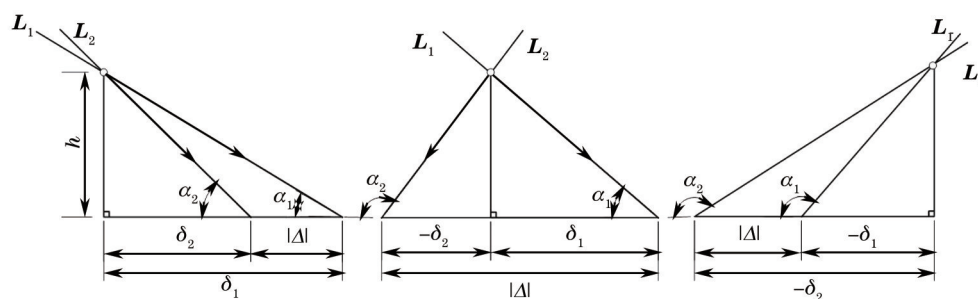


图 1 两次成像光轴与地面关系示意图

Fig.1 Sketch map of relation between optical axis and ground of two imagings

图 1 为云上一点沿两次成像光轴对地面的投影示意图,图中空心圆圈代表云点,水平线为地面, L_1 、 L_2 为两幅图像成像时的光轴方向。设云点对地面的垂直投影点为坐标原点,向右为正方向,光轴与地面夹角定义为与负方向夹角;其中 h 为云高, α_1 、 α_2 为光轴与地面夹角, δ_1 、 δ_2 为云对地面投影点与原点的偏差(向右为正、向左为负), $|\Delta|$ 为两次成像的投影偏差大小。如图 1 所示,可以将两次成像分为三种情况:光轴与地面夹角均为锐角、光轴与地面夹角分别为锐角和钝角以及光轴与地面夹角均为钝角。三种情况的立体观测图像可以通过同星探测,即在卫星飞临目标前对目标上空进行多角度的拍摄,提前探测云顶高度;也可利用两

颗卫星编队探测,即前星可在飞临目标前、目标上空以及飞过目标后进行拍摄,与后星飞临目标前的图像进行优化组合,为后星提前探测云顶高度。三种情况下的投影偏差大小 $|\Delta|$ 均可表示为

$$|\Delta| = |\delta_1 - \delta_2| = \left| \frac{h}{\tan \alpha_1} - \frac{h}{\tan \alpha_2} \right|, \quad (1)$$

则云高

$$h = \left| \frac{\tan \alpha_1 \tan \alpha_2}{\tan \alpha_2 - \tan \alpha_1} \Delta \right|, \quad (2)$$

特别地,当 $\alpha_1 = 90^\circ$ 时, $h = |\tan \alpha_2 \cdot \Delta|$,当 $\alpha_2 = 90^\circ$ 时, $h = |\tan \alpha_1 \cdot \Delta|$ 。由于 α_1 和 α_2 可以通过成像时的卫星姿态得出,因此只需求出投影偏差 Δ 即可得到云的实际高度。

对于两幅含有重叠视场的图像,它们的变换关系可用投影变换矩阵 $H_{3 \times 3}$ 表述

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_1 & h_2 & h_3 \\ h_4 & h_5 & h_6 \\ h_7 & h_8 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (3)$$

式中 h_3 和 h_6 代表水平和竖直方向上的位移, h_1 、 h_2 、 h_4 和 h_5 代表尺度和旋转变换, h_7 和 h_8 代表水平和竖直方向上的变形量, (x',y') 和 (x,y) 代表两幅图像中的点在各参考系中的坐标。理论上只需找出四对匹配点,利用它们的横纵坐标构成八个方程,即可解出矩阵 $H_{3 \times 3}$ 。分别对云和地面进行匹配,利用云和地面的投影变换矩阵的不同,以地面为参考平面反演云点的匹配关系,快速求出云投影偏差 Δ ,从而得到云顶高度。

3 云顶高探测方法

3.1 云顶高探测方法基本流程

本文算法包括预处理、区域分割、特征匹配、提取精确匹配点和云顶高解算等步骤,利用两幅已知成像角度的图像对,根据云与地面匹配关系的差异,解算图像中云层高度。算法流程如图2所示。

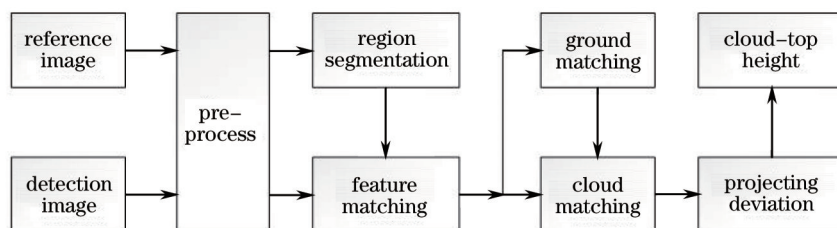


图2 云顶高探测算法流程示意图

Fig.2 Flow chart of cloud-top height detection algorithm

1) 输入两幅不同角度下的卫星遥感图像,并进行预处理;将其中一幅作为参考图像,记下成像角度 α_1 ,另一幅作为检测图像,记下成像角度 α_2 。

由于卫星遥感图像尺寸一般较大,为提高云顶高探测算法速度,需要进行预处理。预处理的方法为均匀抽取图像中适量的行和列,记下原图尺寸与抽取图像尺寸的比值 r 。这里抽取行和列,而不是取平均,所以图像地面分辨率不变,检测精度不会受到影响。

1) 将参考图像分为地面、云以及云与地面过渡三个区域。

由于很难既快速又精确地将地面与云区分开,所以后续剔除错误点的步骤必不可少。因此,将参考图像分为三个区域能够减小地面以及云的误判断概率,为后续处理提供方便条件。采用图像灰度K均值聚类的方法。为保证算法的自适应性和聚类速度,利用经典的直方图最大方差法自动选取聚类中心。将背景和目标区域灰度方差最大的分割灰度 t 作为云与地面过渡类的初始聚类中心; $t/2$ 作为地面的初始聚类中心; $t+(G_{\max} - t)/2$ 作为云的初始聚类中心,其中 G_{\max} 为最大灰度。

3) 提取图像的特征并进行特征点匹配。

4) 剔除地面特征误匹配点,并以地面为基准计算出两幅图的空间坐标变换关系。

根据2)中区域分割的结果,提取出地面的特征匹配点。利用随机抽样一致性(RANSAC)算法,提取出精

确匹配点,并计算出检测图像与参考图像的坐标变换关系

$$\begin{pmatrix} x_{2g} \\ y_{2g} \\ 1 \end{pmatrix} = \mathbf{H}_{3 \times 3} \cdot \begin{pmatrix} x_{1g} \\ y_{1g} \\ 1 \end{pmatrix}, \quad (4)$$

式中 (x_{1g}, y_{1g}) 和 (x_{2g}, y_{2g}) 分别为参考图像和检测图像的地面特征点在各自图像坐标系下的坐标,即行列数。

5) 提取云特征正确匹配点,计算出两幅图中云对地面的投影偏差。

根据2)中区域分割的结果,提取出云的特征匹配点,这些特征点中包括实际云点和将地面高灰度点误判断为云的点(伪云)。因此,云特征点存在以下两类误匹配情况:①伪云之间特征匹配正确的点,虽然它们匹配正确,但由于它们是地面点,所以匹配关系与4)中地面特征点匹配关系相同,而与实际的云不同,因此会影响对云特征点匹配关系的判断;②云与云、伪云与伪云以及云与伪云之间特征匹配错误的特征点。为得到云的正确匹配结果,需要将这两种误匹配点剔除,云投影匹配关系的精提取流程见3.2节。

6) 根据云对地面投影偏差,计算云顶高度。

根据(2)式,求出云高。式中 $|\Delta| = \delta_{\text{GSD}} \cdot r \cdot \bar{\Delta}_{\text{pixel}}$, δ_{GSD} 为图像的地面分辨率大小, $\bar{\Delta}_{\text{pixel}}$ 为两幅图之间云对地面投影偏差的像素数。

3.2 云投影匹配关系精提取

由于云与地面存在高度差,导致两幅图像成像时云对地面的投影产生偏差,即两幅图像中云相对地面的位置存在差异,所以地面之间以及云之间的特征匹配关系是不同的。很显然,地面的匹配关系已经由3.1节中4)得出,再利用RANSAC算法提取云特征匹配关系将会造成算法效率的降低,同时由于含有较多的误匹配点,可能加大误差。因此,为提高算法的速度和精度,基于地面匹配关系的先验知识,以地面为基准,将检测图像变换至参考图像坐标系下,利用云特征点之间匹配关系与地面特征点匹配关系之间的差异剔除误匹配云点,得到正确的云特征点匹配关系。对于同一云顶高度的正确匹配云点,它们匹配关系相同,所以其对地面的投影偏差应集中分布在一个特定的点周围,且这个点较远离0;对于误匹配情况1的云点,它们服从地面特征点匹配关系,所以它们对地面的投影偏差为0;对于误匹配情况2的云点,它们的匹配关系各不相同,所以其投影偏差呈随机分布。云投影匹配关系精提取的流程如下:

1) 将检测图像中的云特征点利用地面特征匹配关系进行坐标变换,将其变换至参考图像坐标系下

$$\begin{pmatrix} x'_{1c} \\ y'_{1c} \\ 1 \end{pmatrix} = \mathbf{H}_{3 \times 3}^{-1} \cdot \begin{pmatrix} x_{2c} \\ y_{2c} \\ 1 \end{pmatrix}, \quad (5)$$

式中 (x_{2c}, y_{2c}) 和 (x'_{1c}, y'_{1c}) 分别为检测图像的云特征点在检测图像和参考图像坐标系下的坐标, $\mathbf{H}_{3 \times 3}^{-1}$ 为地面匹配关系矩阵的逆矩阵。图像水平和竖直方向上云对地面的投影偏差像素数 $\delta_{\text{pixel}} = (x'_{1c}, y'_{1c}) - (x_{1c}, y_{1c})$, 其中 (x_{1c}, y_{1c}) 为与检测图像云特征点相匹配的参考图像特征点的坐标。

2) 设定一个阈值 t_1 (与匹配误差相当的数值), 如果 $|\delta_{\text{pixel}}| \leq t_1$, 则认为该特征点为误匹配情况1的点, 将其剔除; 保留 $|\delta_{\text{pixel}}| > t_1$ 的点。

3) 对所有保留下的点, 求出它们投影偏差像素数的均值 $\bar{\delta}_{\text{pixel}}$ 和两个方向上的标准差 σ_x 、 σ_y 。可以认为凡是在 $\bar{\delta}_{\text{pixel},x} \pm \sigma_x$, $\bar{\delta}_{\text{pixel},y} \pm \sigma_y$ 这个矩形范围外的点即为误匹配情况2的点, 将其剔除; 保留矩形范围内的点。

4) 重复3), 直至两次循环均值的差值的两个分量均小于一个阈值 t_2 。对于阈值 t_2 的选择, 计算匹配误差 $E_{\text{err}} = \text{mean} \left[\sqrt{(x'_{1g} - x_{1g})^2 + (y'_{1g} - y_{1g})^2} \right]$, 式中 mean 代表均值运算, (x'_{1g}, y'_{1g}) 为检测图像中地面点在参考图像坐标系下的坐标。如果匹配误差较小, 如小于1 pixel, 则设置其等于1; 如果匹配误差较大, 则设置其等于匹配误差。

5) 求得 $\bar{\Delta}_{\text{pixel}} = \sqrt{\bar{\delta}_{\text{pixel},x}^2 + \bar{\delta}_{\text{pixel},y}^2}$, 即可表征两次成像云对地面投影偏差。

特征匹配算法是本文方法中的关键步骤之一, 性能良好的特征匹配算法能够更快、更精确地得到特征匹配结果, 为后续匹配关系的精提取以及云顶高解算提供基础。因此, 在实验中采用经典的尺度不变特征转换(SIFT)特征匹配算法, 其具有精度高、速度快的特点。SIFT特征是由Lowe^[9]提出的一种描述图像关键点

特征的算法,其被广泛应用于图像匹配^[10]、图像配准^[11]和目标识别^[12]等领域。SITF特征对旋转、尺度缩放、亮度变化保持不变,对视角变化、仿射变换、噪声也具有一定的稳定性^[13]。

4 仿真模拟实验结果与模型误差分析

4.1 仿真模拟实验结果

为证明本文算法的理论精度,需进行仿真模拟实验,称为模拟实验1。地面为自谷歌地图下载的杭州地区卫星遥感图像,尺寸为3072 pixel×2304 pixel,地面分辨率大小约为3 m/pixel。云提取自实际遥感图像。假设云顶高度为4 km,两幅图像成像时只有水平方向上的角度变化且成像角度分别为25°和30°,则两幅图像中云相对其正投影点分别向右偏移了2859和2309 pixel,即图像中两者的投影偏差为550 pixel。

实验中设定预处理倍率 $r = 4$,即每4行和4列抽取1行和1列。图3为3.1节2)中参考图像区域分割的结果,其中黑色为地面,白色为云层,灰色为地面与云的过渡区域。匹配结果如图4所示,其中图4(a)为地面特征总体匹配结果,图4(b)为利用RANSAC剔除地面误匹配点后地面特征匹配结果,图4(c)为云特征总体匹配结果,图4(d)为利用算法剔除云误匹配点后云特征匹配的结果,图4(c)和图4(d)中红点标记处为剔除的伪云及误匹配点。从结果中可以看出,图中的地面高亮点被误判断为云点,这些点属于误匹配情况1的点,算法成功将其剔除。另外,误匹配情况2的点也被成功剔除。云特征点匹配总数为62对,正确匹配的云点为49对。图5为剔除云误匹配点的过程图(已去除误匹配情况1的点),其中由于匹配误差很小,所以阈值 $t_2 = 1$,图中矩形中心表征每次循环云投影偏差的均值,半边长分别为水平和垂直方向上投影偏差的标准差,最小的矩形表征了最终所取云匹配点的投影偏差特性。最终检测出云对地面的投影偏差大小水平方向为137.559 pixel,垂直方向为0.016 pixel,乘以预处理倍率4,得水平方向投影偏差为550.236 pixel,垂直方向0.064 pixel。利用公式 $h = \left| \frac{\tan \alpha_1 \tan \alpha_2}{\tan \alpha_2 - \tan \alpha_1} \right| \cdot \delta_{\text{GSD}} \cdot r \cdot |\bar{\Delta}_{\text{pixel}}|$ 计算云顶高,式中 $\alpha_1 = 25^\circ$ 、 $\alpha_2 = 30^\circ$ 、地面分辨率 $\delta_{\text{GSD}} = 3$ m/pixel、预处理倍率 $r = 4$ 、 $\bar{\Delta}_{\text{pixel}} = 137.559$,解得云顶高度 $h = 4002.1$ m,其与设定云高的差距小于1 pixel分辨率。实验结果表明本文算法可以精确稳健地获得图像中云顶高度。

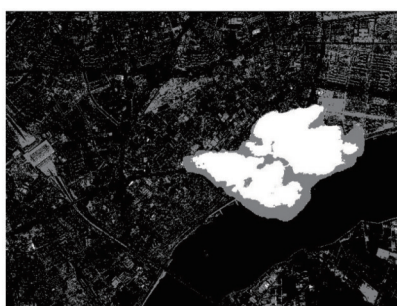


图3 参考图像区域分割结果

Fig.3 Segmentation result of reference image

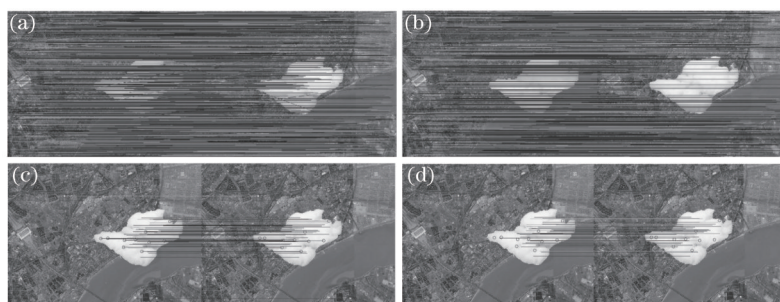


图4 模拟实验1结果图。(a)地面特征总体匹配结果;(b)地面特征正确匹配结果;(c)云特征总体匹配结果;(d)云特征正确匹配结果

Fig.4 Results of simulation experiment 1. (a) Result of all ground features matching; (b) result of correct ground features matching; (c) result of all cloud features matching; (d) result of correct cloud features matching

为验证本文算法对成像系统投影变换的适应能力,分别对图像加入旋转和仿射变换进行云顶高探测模拟实验,称为模拟实验2。结果如图6所示,其中图6(a)、图6(b)分别为90°旋转变换的地面和云特征匹配的结果,图6(c)、图6(d)分别为仿射变换的地面和云特征匹配的结果。加入旋转和仿射变换的云顶高探测结果分别为3999.4 m和3994.5 m。实验结果表明本文算法在成像视场发生旋转、仿射等变换的情况下依然具有良好的表现。

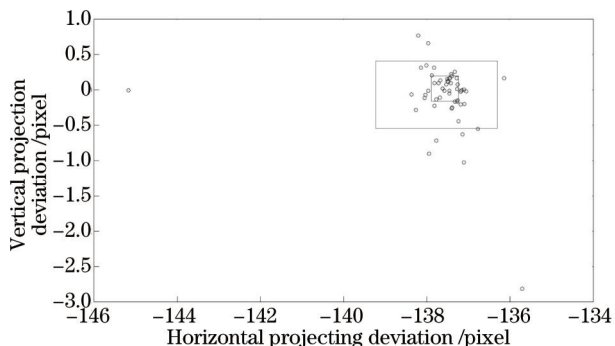


图5 模拟实验1中剔除云误匹配点流程示意图

Fig.5 Illustration of wrong cloud matching features eliminated in simulation experiment 1

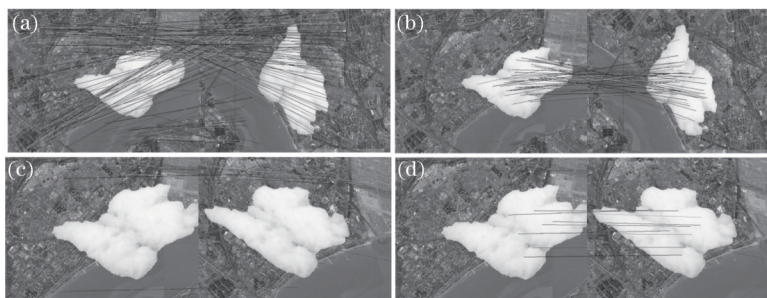


图6 模拟实验2结果图。(a) 旋转变换地面特征正确匹配结果; (b) 旋转变换云特征正确匹配结果; (c) 仿射变换地面特征正确匹配结果; (d) 仿射变换云特征正确匹配结果

Fig.6 Results of simulation experiment 2. (a) Result of correct ground features matching with rotation; (b) result of correct cloud features matching with rotation; (c) result of correct ground features matching with affine; (d) result of correct cloud features matching with affine

4.2 模型误差分析

很显然,当两幅输入图像的成像角度非常接近时,云对地面的投影偏差将会减小,在同样的绝对匹配精度下,相对匹配精度就会减小。为验证本文算法的理论误差精度,进行了理论误差分析。

根据(2)式,对变量 h 和 Δ 两边进行微分,得云顶高解算相对误差

$$w = \frac{dh}{d\Delta} = \left| \frac{\tan \alpha_1 \tan \alpha_2}{\tan \alpha_2 - \tan \alpha_1} \right|. \quad (6)$$

其表征每米云对地面投影的匹配误差将会造成 w 的云顶高度误差。 w 的大小只与两幅图像的成像角度有关。当 α_1 和 α_2 相等时,云对地面的投影偏差为0,无法检测云高,相对误差为正无穷;当 α_1 和 α_2 差距变大时,相对误差迅速减小。图7为当固定 $\alpha_2 = 30^\circ$ 时,利用(6)式得到的 α_1 由 0° 变化至 180° 的相对误差理论曲线,可以很好地看出相对误差的变化趋势。云顶高度的测量误差与卫星观测时的基高成反比^[14]。卫星观测时轨道高度不变,因此两次成像的成像角度相差越大,基线长度越长,基高比越大,则云顶高度的测量误差越小,所以本文算法的相对误差变化趋势与文献[14]中所证明的云顶高测量误差趋势相符。

图8为利用模拟实验1得出的实验相对误差曲线。所有参数如模拟实验1所述,固定 $\alpha_2 = 30^\circ$, α_1 以 0.5° 为间隔,由 20° 变化至 40° ($\alpha_1 = 30^\circ$ 处不计算),分别探测云顶高度并计算相对误差。实验中相对误差计算公式为 $w = h - \bar{h} / \Delta - \bar{\Delta}$, 式中 h 和 Δ 分别为设定的云顶高度和理论投影偏差, \bar{h} 和 $\bar{\Delta}$ 分别为检测出的云顶高度和投影偏差。从曲线中可以看出,实验中获得相对误差曲线与理论误差曲线很好地吻合。当两幅图

像成像时间差较大、风速较高时,云的形态特征会发生较大变化,导致较大的匹配误差,从而使云顶高测量误差增大^[4]。因此,在实际应用中,需综合考虑成像角度差、时间差等因素来选择成像角度。

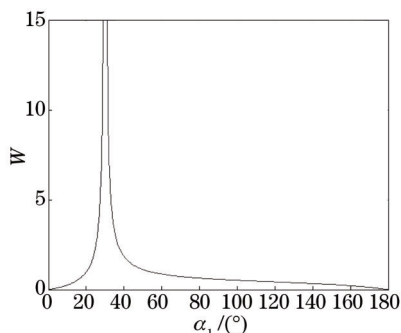


图 7 $\alpha_2 = 30^\circ$ 时,相对误差理论曲线

Fig.7 Theoretical relative error curve at $\alpha_2 = 30^\circ$

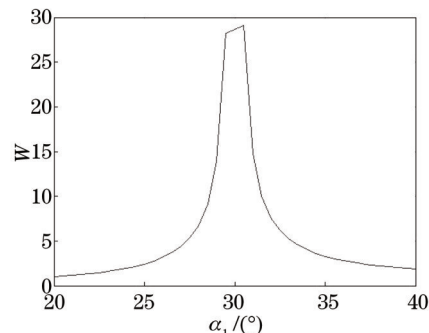


图 8 $\alpha_2 = 30^\circ$ 时,相对误差实验曲线

Fig.8 Experimental relative error curve at $\alpha_2 = 30^\circ$

5 MISR 图像处理结果

MISR 系统为搭载在美国 TERRA 卫星上的多角度成像设备,具有沿轨道方向 9 个不同角度的成像光学系统,沿轨道方向将会产生视差,地面分辨率为 275 m/pixel,具体参数可参见文献[15]以及其官方网站。MISR 数据面向全世界开放,用户可利用官方网站内的数据预约系统预约并下载所需数据。

利用 MISR 系统图像验证本文算法在实际应用中的表现,并与官方数据进行比较。图像通过预约系统下载(产品代码 MISBR),为 2000 年 3 月 6 日美国佛罗里达地区图像(轨道编号 1155)。图像经过 SOM 校正^[15],地面为平面,左为北方向。相对原始图像,提供用户下载的图像地面分辨率有所下降,为 2.2 km/pixel,并经过 JPG 压缩。图像对选取 bf 和 cf 相机图像,其与星下点角度分别为 45.6°和 60°,则对应本文算法中与地面的角度为 44.4°和 30°。地面和云的正确匹配结果分别如图 9(a)、(b)所示,输入图像中卫星轨道与水平方向约为 6.65°。卫星成像系统只在沿轨道方向有角度差,根据成像角度计算云顶高必须求解轨道方向的云投影偏差,利用三角关系分别求得水平和垂直方向的投影偏差在轨道方向的分量并求和,得到沿轨道方向的云投影偏差为 3.703 pixel。利用公式 $h = \left| \frac{\tan \alpha_1 \tan \alpha_2}{\tan \alpha_2 - \tan \alpha_1} \right| \cdot \delta_{\text{GSD}} \cdot r \cdot \bar{\Delta}_{\text{pixel}}$ 计算云顶高,式中 $\alpha_1 = 44.4^\circ$ 、 $\alpha_2 = 30^\circ$ 、地面分辨率 $\delta_{\text{GSD}} = 2.2 \text{ km/pixel}$ 、预处理倍率 $r = 1$ 、 $\bar{\Delta}_{\text{pixel}} = 3.703$,解得图中未考虑风速的云顶高度为 11.46 km。图 10 为利用 MISR 系统云顶高原始数据(产品代码 MIL2TCCL)得出的未校正风速的云顶高度分布图,图中高亮度

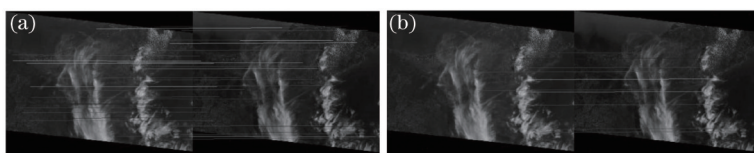


图 9 MISR 图像匹配结果图。(a) 地面特征正确匹配结果;(b)云特征正确匹配结果

Fig.9 Results of feature matching of MISR images. (a) Result of correct ground features matching; (b) result of correct cloud features matching



图 10 MISR 未校正风速云顶高分布图

Fig.10 Cloud-top height distribution without wind-correction of MISR

色的高层云对应图9中的云层,高层云平均云顶高度为12.95 km。本文算法检测出的云顶高度与MISR系统的云顶高度相差1.49 km,小于1 pixel分辨率。实验结果证明本文算法在实际应用中具有良好的表现,可以利用两幅不同角度的高分辨率卫星遥感图像准确地获得云顶高度。

6 结 论

敏捷卫星自主规划对特定地面目标成像前有时需要判断是否有云遮挡,这就必须探测目标上空云层的云顶高度。针对此种情况,在非极端天气下高分辨率遥感卫星视场内各云点之间云顶高度差距不大,地面和云层均可视为平面,提出了一种适用于高分辨率光学对地观测敏捷卫星自主任务规划的云顶高探测方法。在本文方法框架下,无论采取何种匹配算法均可以快速得出云顶高度;而实验中采用的SIFT特征匹配算法能够较好地克服图像间的旋转和仿射变换带来的匹配精度下降的问题。

仿真模拟实验结果表明本文算法可以进行高精度的云顶高探测,误差小于1 pixel分辨率。同时,在图像间发生旋转和仿射变换的情况下依然具有良好的表现。误差分析的结果表明在两幅图像成像角度不接近的情况下,算法理论误差并不大,而且误差曲线也为实际拍摄时成像角度的选择提供了理论参考。MISR图像的处理结果与MISR产品的结果相吻合,差距小于1 pixel分辨率,这也表明本文算法能够满足实际应用的需求。

本文算法没有考虑风速的影响,这会引起云顶高度探测的误差,以后的工作中会加入风速的探测。另外,如果将视场内云层设为多个高度层次分类进行处理,也会提高云顶高探测的精度,同时也将扩大本文算法的应用范围,这也是本文算法进一步改进的方向

参 考 文 献

- 1 Beaumet G, Verfaillie G, Charneau M C. Autonomous planning for an agile earth-observing satellite[C]. Proceedings of Isairas. 2008: 1-6.
- 2 Li Yanbing, Huang Sixun, Zhai Jingqiu. A review of stereographic cloud observation[J]. Journal of Tropical Meteorology, 2008, 24(6): 743-747.
李艳兵,黄思训,翟景秋.云的立体观测研究进展[J].热带气象学报,2008,24(6):743-747.
- 3 Shenk W E, Holub R. An example of detailed cloud contouring from apollo 6 photography[J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 1971, 52(4): 238-238.
- 4 Hu Chongjin. Cloud height and relief amplitude computed by remote sensing data[J]. Remote Sensing Information, 1988, (3):7-10.
胡崇金.用遥感资料求云层高度及地形起伏[J].遥感信息,1988,(3):7-10.
- 5 Hasler A F. Stereographic observations from geosynchronous satellites: An important new tool for the atmospheric sciences[J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 1981, 62(2): 194-212.
- 6 Fujita T T. Principle of stereoscopic height computations and their applications to stratospheric cirrus over severe thunderstorms[J]. Meteor Soc Jpn.1982, 60: 355-368.
- 7 Seiz G, Poli D, Gruen A. Stereo cloud-top heights from MISR and AATSR for validation of eumetsat cloud-top height products[C]. Prague: Eumetsat Users' Conference. 2004.
- 8 Moroney C, Davies R, Muller J P. Operational retrieval of cloud-top heights using MISR data[J]. Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on, 2002, 40(7): 1532-1540.
- 9 Lowe D G. Distinctive image features from scale-invariant keypoints[J]. International Journal of Computer Vision, 2004, 60(2): 91-110.
- 10 Zhang Qiang, Hao Kai, Li Haibin. Research on scale invariant feature transform feature matching based on underwater curve constraint[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(2): 0215003.
张强,郝凯,李海滨.水下环境中基于曲线约束的SIFT特征匹配算法研究[J].光学学报,2014,34(2):0215003.
- 11 Yang Sa, Yang Chunling. Image registration algorithm based on sparse random projection and scale-invariant feature transform[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(11): 1110001.
杨飒,杨春玲.基于压缩感知与尺度不变特征变换的图像配准算法[J].光学学报,2014,34(11):1110001.
- 12 Tian Ying, Yuan Weiqi. Ear recognition based on fusion of scale invariant feature transform and geometric feature[J]. Acta Optica Sinica, 2008, 28(8): 1485-1491.
田莹,苑玮琦.尺度不变特征与几何特征融合的人耳识别方法[J].光学学报,2008,28(8):1485-1491.

- 13 Wang Guomei, Chen Xiaowei. Study on a new algorithm of feature matching-SIFT[J]. Journal of Yancheng Institute of Technology: Natural Science Edition, 2007, 20(2): 1-5.
王国美, 陈孝威. SIFT 特征匹配算法研究[J]. 盐城工学院学报: 自然科学版, 2007, 20(2): 1-5.
- 14 Huang Yunxian, Ma Shuo, Bai Heng. Errors in detection of cloud-top height by stereoscopic observation[J]. Journal of Infrared and Millimeter Waves, 2012, 31(4): 314-318.
黄云仙, 马 烁, 白 衡. 立体观测法探测云顶高度的误差分析[J]. 红外与毫米波学报, 2012, 31(4): 314-318.
- 15 Zong J, Davies R, Muller J P, *et al.*. Photogrammetric retrieval of cloud advection and top height from the multi-angle imaging spectroradiometer (MISR)[J]. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 2002, 68(8): 821-830.

栏目编辑: 苏 岑