



JOURNAL OF IMAGE AND GRAPHICS

主办: 中国科学院遥感与数字地球研究所
中国图象图形学学会
北京应用物理与计算数学研究所

中国图象图形学报

2014

05

VOL.19

ISSN1006-8961
CN11-3758/TB

流体模拟 P781





第19卷第5期（总第217期）

2014年5月16日

中国精品科技期刊
中国国际影响力优秀学术期刊
中国科技核心期刊

版权声明

凡向《中国图象图形学报》投稿，均视为同意在本刊网站及CNKI等全文数据库出版，所刊载论文已获得著作权人的授权。本刊所有图片均为非商业目的使用，所有内容，未经许可，不得转载或以其他方式使用。

Copyright

All rights reserved by Journal of Image and Graphics, Institute of Remote Sensing and Digital Earth, CAS. The content (including but not limited text, photo, etc) published in this journal is for non-commercial use.

主管单位 中国科学院

主办单位 中国科学院遥感与数字地球研究所
中国图象图形学学会
北京应用物理与计算数学研究所

主 编 李小文

编辑出版《中国图象图形学报》编辑出版委员会

邮政信箱 北京9718信箱

邮 编 100101

电子信箱 jig@irsa.ac.cn

电 话 010-64807995

网 址 www.cjig.cn

广告经营许可证 京朝工商广字第0361号

总 发 行 北京报刊发行局

订 购 全国各地邮局

海外发行 中国国际图书贸易集团有限公司
(邮政信箱：北京399信箱 邮编：100048)

印刷装订 北京科信印刷有限公司

Journal of Image and Graphics

Title inscription: Song Jian

Monthly, Started in 1996

Superintended by Chinese Academy of Sciences

Sponsored by Institute of Remote Sensing and Digital Earth, CAS
China Society of Image and Graphics

Institute of Applied Physics and Computational Mathematics

Editor-in-Chief LI Xiaowen

Editor, Publisher Editorial and Publishing Board of Journal of
Image and Graphics

P.O.Box 9718, Beijing, P.R.China

Zip code 100101

E-mail jig@irsa.ac.cn

Telephone 010-64807995

Website www.cjig.cn

Distributed by Beijing Bureau for Distribution of Newspapers and Journals

Domestic All Local Post Offices in China

Overseas China International Book Trading Corporation
(P.O.Box 399, Beijing 100048, P.R.China))

Printed by Beijing Kexin Printing Co., Ltd.

CN 11-3758/TB

ISSN 1006-8961

CODEN ZTTXFZ

国外发行代号 M1406

国内邮发代号 82-831

国内定价 50.00元

综述

中国图像工程: 2013

章毓晋 0649

图像处理和编码

SAR复图像数据的CCSDS-IDC编码性能分析与二叉树编码

侯兴松, 韩敏, 龚晨 0659

记忆梯度追踪压缩感知图像重构

郭强, 吴成东 0670

处理异常值的相机抖动模糊图像复原

阮光诗, 孙俊喜, 孙阳, 刘红喜, 赵立荣, 刘广文 0677

Logistic视频字幕增强模型

李钦瑞, 吕学强, 李卓, 刘坤 0683

图像分析和识别

结合LPG&PCA的中智学图像分割

张桂梅, 王大雷 0693

融合多特征的运动一致性图像分割

魏国剑, 侯志强, 李武, 余旺盛 0701

壁画图像分类中的分组多实例学习方法

唐大伟, 鲁东明, 许端清, 杨冰 0708

采用加性核SVM的二尖瓣瓣根识别

徐伟, 姚丽萍, 宋薇, 杨新, 孙锟 0716

迭代的图变换匹配算法

李婷婷, 汤进, 江波, 罗斌, 徐立祥 0723

融合残差Unscented粒子滤波和区别性稀疏表示的鲁棒目标跟踪

杨彪, 林国余, 张为公, 路小波, 张宇歆 0730

图像理解和计算机视觉

梯度约束SFS的月面地形重构

徐辛超, 刘少创, 徐爱功 0739

单幅自然场景深度恢复

曹风云, 方帅, 胡玉娟, 王浩, 杨雪洁 0746

区域语义多样性密度的图像标注

王方方, 蒋建国, 郭丹 0755

计算机图形学

鲁棒的网格实时几何编辑算法

汪悦, 邓元凯, 钱归平 0764

从表面重构的体数据实现3维网格剖分

刘君, 陈伟强, 熊邦书 0771

交错网格结构的涡粒子烟模拟

杨阳, 杨旭波 0781

遥感图像处理

应用区域统计特征的PolSAR影像分割

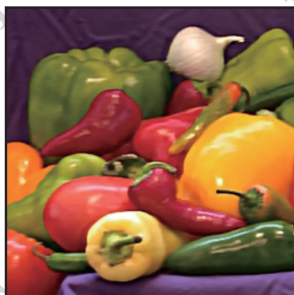
刘振宇, 余洁, 谢东海, 刘利敏 0789

采用分裂Bregman的遥感影像亮度不均变分校正方法

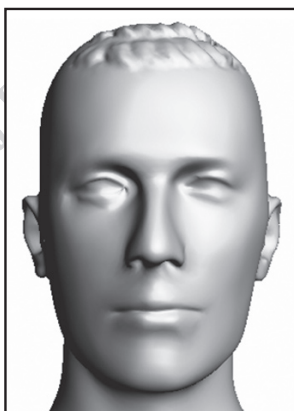
王晓静, 李慧芳, 袁强强, 沈焕锋, 张良培 0798

基于Wallis与距离权重增强的无人机影像拼接缝消除

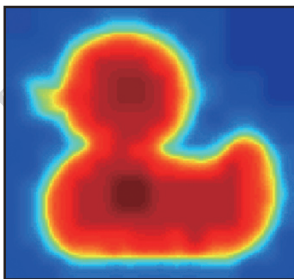
田金炎, 段福洲, 王乐, 李小娟, 屈新原 0806



处理异常值的相机抖动模糊图像复原(第677页)



鲁棒的网格实时几何编辑算法(第764页)



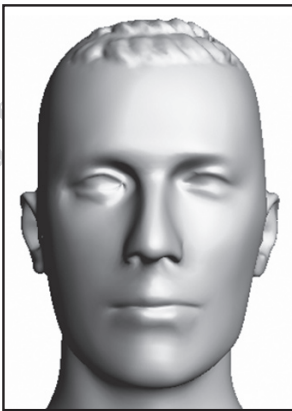
从表面重构的体数据实现3维网格剖分(第771页)

CONTENTS

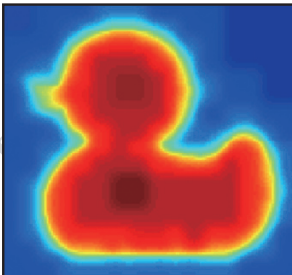
JOURNAL OF IMAGE AND GRAPHICS



Disposing of outliers in camera-shake blurred images restoration(P677)



Robust algorithm for real-time mesh geometric editing(P764)



Three-de mesh generation through volume data reconstructed from surface(P771)

Review

Image engineering in China: 2013 Zhang Yujin	0649
---	------

Image Processing and Coding

Performance analysis of CCSDS-IDC for SAR complex image data and quadtree-based SAR complex image data coding Hou Xingsong, Han Min, Gong Chen	0659
Image reconstruction of compressed sensing based on memory gradient pursuit Guo Qiang, Wu Chengdong	0670
Disposing of outliers in camera-shake blurred images restoration Nguyen Quangthi, Sun Junxi, Sun Yang, Liu Hongxi, Zhao Lirong, Liu Guangwen	0677
Logistic model for video caption enhancement Li Qinrui, Lyu Xueqiang, Li Zhuo, Liu Kun	0683

Image Analysis and Recognition

Neutrosophic image segmentation approach integrated LPG&PCA Zhang Guimei, Wang Dalei	0693
Motion coherence image segmentation fused with multi-feature Wei Guojian, Hou Zhiqiang, Li Wu, Yu Wangsheng	0701
Clustered multiple instance learning for mural image classification Tang Dawei, Lu Dongming, Xu Duanqing, Yang Bing	0708
Recognition of mitral annulus hinge point using additive SVM classifier Xu Wei, Yao Liping, Song Wei, Yang Xin, Sun Kun	0716
Iterative graph transformation matching algorithm Li Tingting, Tang Jin, Jiang Bo, Luo Bin, Xu Lixiang	0723
Robust object tracking incorporating residual unscented particle filter and discriminative sparse representation Yang Biao, Lin Guoyu, Zhang Weigong, Lu Xiaobo, Zhang Yuxin	0730

Image Understanding and Computer Vision

Lunar terrain reconstruction with SFS under gradient constraint Xu Xinchao, Liu Shaochuang, Xu Aigong	0739
Recovering depth from a single natural defocused image Cao Fengyun, Fang Shuai, Hu Yujuan, Wang Hao, Yang Xuejie	0746
Image annotation based on region-semantic diverse density Wang Fangfang, Jiang Jianguo, Guo Dan	0755

Computer Graphics

Robust algorithm for real-time mesh geometric editing Wang Yue, Deng Yuankai, Qian Guiping	0764
Three-de mesh generation through volume data reconstructed from surface Liu Jun, Chen Weiqiang, Xiong Bangshu	0771
Staggered grid structure for smoke simulation Yang Yang, Yang Xubo	0781

Medical Image Processing

Application region statistical characteristic for PolSAR imagery segmentation Liu Zhenyu, Yu Jie, Xie Donghai, Liu Limin	0789
Uneven intensity correction using split Bregman for remote sensing images Wang Xiaojing, Li Huifang, Yuan Qiangqiang, Shen Huanfeng, Zhang Liangpei	0798
UAV image seam elimination method based on Wallis and distance weight enhancement Tian Jinyan, Duan Fuzhou, Wang Le, Li Xiaojuan, Qu Xinyuan	0806

中图法分类号: TP79 文献标识码: A 文章编号: 1006-8961(2014)05-0739-07

论文引用格式: Xu X C, Liu S C, Xu A G. Lunar terrain reconstruction with SFS under gradient constraint[J]. Journal of Image and Graphics, 2014, 19(5): 739-745. [徐辛超, 刘少创, 徐爱功. 梯度约束 SFS 的月面地形重构[J]. 中国图象图形学报, 2014, 19(5): 739-745.][DOI: 10. 11834/jig. 20140512]

梯度约束 SFS 的月面地形重构

徐辛超^{1,2}, 刘少创², 徐爱功¹

1. 辽宁工程技术大学测绘与地理科学学院, 阜新 123009;

2. 中国科学院遥感与数字地球研究所, 北京 100101

摘要: **目的** 解决月面着陆器在下降过程中可能得不到足够的匹配点进行着陆区地形恢复的问题。**方法** 基于特征边缘线梯度比例约束的明暗恢复形状(shape from shading)算法。首先以 Lommel-Seeliger 模型模拟月表反射情况, 建立辐照度方程; 然后以地形特征边缘提取结果为基础, 经过最小二乘拟合与表面光滑模型约束后, 演化得到剩余影像点的梯度比例因子, 实现对辐照度方程的正则化约束。**结果** 经过测试得到模拟影像的平均相对恢复精度可以达到 -0.199, 真实影像月面可以达到 0.051 和 0.022。**结论** 本文算法能够有效地进行 3 维地形恢复, 且恢复精度优于经典 SFS 算法中对实际地形恢复效果最好的 Tsai 算法。

关键词: 地形重构; 月面地形; 明暗恢复形状; 反射模型; 辐照度方程; 梯度约束

Lunar terrain reconstruction with SFS under gradient constraint

Xu Xinchao^{1,2}, Liu Shaochuang², Xu Aigong¹

1. School of Geomatics, Liaoning Technical University, Fuxin 123009, China;

2. Institute of Remote Sensing and Digital Earth, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China

Abstract: **Objective** Solving the problem of a lack of matching points to complete the terrain reconstruction for the landing area during the Lunar Lander landing process. **Method** An SFS (shape from shading) algorithm for 3D terrain recovery based on gradient constraints of the feature edges. The irradiance equation is established on the Lommel-Seeliger model to simulate the Lunar surface reflection. Based on the extract results of the terrain feature edge, gradient ratio of the rest part can be solved after least square fitting and surface smoothness constraint. The SFS problem becomes regularized after the quantitative constraints of irradiance equation. **Result** The average relative recovery accuracy can reach -0.199 for synthetic images, and also can reach 0.051 and 0.022 for real image after testing. **Conclusion** The proposed algorithm can work effectively for 3D terrain reconstruction, and the recovery accuracy is superior to the existing SFS algorithm.

Key words: terrain reconstruction; lunar terrain; shape from shading; reflection model; irradiance equation; gradient constraint

收稿日期: 2013-08-12; 修回日期: 2013-11-21

基金项目: 国家自然科学基金项目(41071298); 国家测绘地理信息局测绘基础研究基金项目(项目 12-01-05)

第一作者简介: 徐辛超(1984—), 男, 讲师, 现为辽宁工程技术大学与中国科学院遥感与数字地球所联合培养博士研究生, 主要从事空间大地测量数据处理及图像处理方面的研究, 已发表论文 5 篇。E-mail: xuxinchao84@163.com

0 引言

我国的探月工程是《国家中长期科学和技术发展规划纲要(2006—2020年)》中的16个重大专项之一,也是中华民族历史上重大的科技工程之一。2013年发射的嫦娥三号卫星(将携带月面着陆探测器和月面巡视探测器)的主要目标就是实现月球软着陆和巡视探测任务^[1]。巡视探测任务的开展必须以地形信息为基础,确定巡视器的行走路径,完成巡视器的路径规划^[2]。月面3维地形可以为巡视探测器的移动提供基础凭据,确保巡视器不会因地形判断错误陷入撞击坑或者发生侧翻事故,保障巡视器的安全。

目前国内外进行地形恢复的手段主要有摄影测量方法中的匹配恢复算法或者立体视觉中的多目算法。由于月表材质较为均匀,纹理信息缺乏,因此,在一些情况下,通过匹配方法往往得不到足够多的匹配点来进行地形恢复或者最终恢复结果过于粗糙,不能作为巡视器路径规划的依据。在我国探月二期任务中,由于各方面技术的限制,月面着陆器只能携带一台着陆相机,不能通过多目立体视觉进行着陆区中撞击坑地形的获取。部分学者尝试通过明暗恢复形状(SFS)进行恢复,但对于起算数据要求比较高,在缺乏相应起算数据的条件下,很难取得理想的恢复效果^[3-5]。因此,克服这些技术的限制,研究一种新的3维地形恢复方法,为探月工程提供一定的技术储备具有非常重要的意义。

1 SFS技术

SFS算法在进行3维恢复时,首先需要进行如下假设^[6-7]:

- 1) 光源为无穷远处的点光源,并且光照方向已知;
- 2) 物体表面各点的光照反射特性一致,且物体表面的光照反射系数已知;
- 3) 被拍摄物体表面与拍摄相机相距较远,可近似认为是正交投影。

由于假设条件中需要物体表面的反射特性一致,因此,SFS技术的应用领域受到很大限制。月壤组成成分比较均匀,造成拍摄的影像中纹理信息较为匮乏,只能提取出有限的匹配点,不能进行地形恢

复,但正是这一特性为SFS技术应用提供了基础。SFS技术首先需要确定物体表面光照反射模型,即进行物体表面反射特性的模拟,根据反射模型、光源位置和被拍摄物体表面点的法向量可以建立每个点的辐照度方程,最终求解得到物体的3维形状。

假设物体表面点法向量为 $N(n_x, n_y, n_z)$,为减少辐照度方程中的未知数个数,通常将法向量转换为梯度形式,即 $N(p, q, -1)$ 。假设地形曲面为 $z = f(x, y)$,可求得 p, q 分别为

$$\begin{cases} p = -n_x/n_z = \partial f(x, y)/\partial x \\ q = -n_y/n_z = \partial f(x, y)/\partial y \end{cases} \quad (1)$$

采用应用广泛的Lommel-Seeliger反射模型模拟月表反射情况^[8]。图1为Lommel-Seeliger反射模型示意图,其中, e 为摄像机所在方向与物体表面点法向量的夹角, i 为光照入射角, L 为光源方向, E 为观察方向, N 为物体表面法向量。

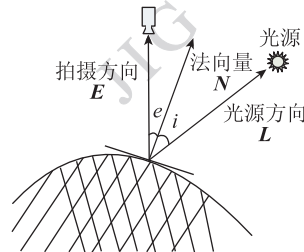


图1 Lommel-Seeliger反射模型

Fig. 1 Lommel-Seeliger reflection model

假设光源方向向量为 $N(p_s, q_s, -1)$,月面探测卫星所携带的CCD相机的方向向量为 $N(p_e, q_e, -1)$,月面地形函数为 $z = f(x, y)$ 。根据反射模型建立辐照度方程

$$I(x, y) = \frac{\omega}{4} \cdot \frac{\cos i}{\cos i + \cos e} \quad (2)$$

式中, (x, y) 为像素所在的行和列, $I(x, y)$ 为像素 (x, y) 的灰度值, ω 为月球表面反射率。

对于影像中的任意像素可以得到一个辐照度方程。但每个辐照度方程中,物体表面点法向量中的 (p, q) 两个变量是未知的,因此,辐照度方程求解是一个不适定问题,需要增加一定的约束条件才能使其正则化。

2 特征边缘梯度约束

边缘信息是影像中最基本的一个重要特征,在影像分析中起着重要的作用。特征边缘是指影像中

局部特征突变的部分^[9]。在地形影像中,特征边缘是在一定光照条件下,由于地形变化引起影像灰度明显变化的特征区域,在一定程度上可以反映出地形的特点。沿着特征边缘线方向的像素,灰度变化比较平滑,而垂直于特征边缘方向上的像素灰度变化最为剧烈,应用边缘的该特征可以作为对 SFS 问题的约束条件。

2.1 特征边缘两侧地形分析

不同的特征边缘两侧可能出现不同的地形情况。特征边缘两侧可能出现的地形为曲面、斜坡面和平面 3 种。图 2 为边缘两侧的地形分布图。

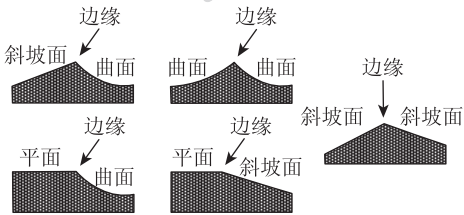


图 2 边缘两侧地形分布图

Fig. 2 Topographic on both sides of the edge

当特征边缘一侧为平面时,地形表面点的法向量中 p 、 q 为零,不需要进行梯度约束即可实现地形恢复。当特征边缘一侧为曲面和斜坡面时法向量中 p 、 q 不为零,需要通过增加约束条件才可以进行 3 维恢复。

假设地形表面法向量为 $N(p, q, -1)$,在此定义梯度比例因子

$$k = q/p \quad (3)$$

本文算法主要是通过特征边缘线点的法向量与特征边缘线两侧地形点的法向量在平面内的投影方向一致原理,运用梯度比例因子 k 作为特征边缘附近地形点的梯度比例约束。

2.2 边缘梯度比例约束

实际地形大都属于不规则形状。为方便问题描述,可以将地形分为垂直于其地形特征线的宽度为 ds 的微小面块(本文中的 ds 取影像的最小取值可能,即一个像素的宽度),整体地形可以看做是由这些的微小面块共同组成。如图 3 所示,建立 O -XYZ 坐标系,假设某边缘点处为原点 O ,沿着特征边缘线方向为 Y 轴方向, Z 轴指向天顶方向, X 轴和 Y 轴、 Z 轴构成右手空间直角坐标系。

如图 3 所示,特征边缘相邻的微小区域内,地形可近似看作是斜坡面,以下称为倾斜平面。假设该

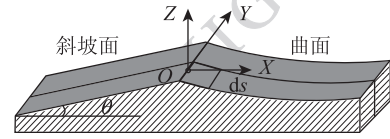


图 3 O -XYZ 坐标系

Fig. 3 O -XYZ coordinate system

地形与 XY 平面夹角为 θ ,其中 $0 < \theta < 90^\circ$,则在此坐标系下,微小面块 ds 平面的法线式平面方程可以描述为

$$-x \sin \theta + z \cos \theta = 0 \quad (4)$$

该区域内任意点 (x, y, z) 处的法向量为

$$\begin{cases} n_x = \partial z / \partial x = -\sin \theta \\ n_y = \partial z / \partial y = 0 \\ n_z = \partial z / \partial z = \cos \theta \end{cases} \quad (5)$$

将法向量写为梯度形式 $(\sin \theta / \cos \theta, 0, -1)$,其在 XY 平面内的投影为 $(\sin \theta / \cos \theta, 0)$ 。由此可得该区域内任意地形点的梯度比例因子 k_1 在 XY 平面内的投影为

$$k_1 = q/p = 0 / (-\sin \theta / \cos \theta) = 0 \quad (6)$$

在 O -XYZ 坐标下建立对应特征边缘线的直线方程,该直线方程与 Y 轴重合。特征边缘上的任意点法向量在 XY 平面内的投影垂直于 Y 轴。因此,可以得到特征边缘上任意点梯度形式下的法向量为 $\pm N(p, 0)$,求得其梯度比例因子 k_2 为

$$k_2 = q/p = 0 \quad (7)$$

宽度为 ds 的区域内,梯度比例因子 $k_1 = k_2$,因此,该长度为 ds 的特征边缘线上任意点的法向量与其附近地形点的法向量在 XY 平面内的投影方向相同。根据边缘提取结果得到特征边缘线方程,由此可以得到特征边缘线上任意点在 XY 平面内的法向量,进一步求得其梯度比例因子。因此,可以演化得到边缘附近地形点的梯度比例因子。

假设 Ω 为影像 (x, y) 的覆盖范围,连续地形表面模型可以表示为

$$\Delta = \iint_{\Omega} (p_x^2 + p_y^2 + q_x^2 + q_y^2) dx dy \quad (8)$$

式中, p_x 、 p_y 和 q_x 、 q_y 分别为 p 和 q 关于 x 、 y 方向的偏导数。

式(8)也可称为连续性约束条件,该条件下地形表面相邻各点的表面法向量是相似的^[10]。因此,相邻各点的梯度比例也是相似的。整体地形表面点

的梯度比例可以根据特征边缘附近点按照连续性约束条件演化得到。

2.3 地形点梯度比例演化求取

根据边缘提取结果,经过拟合后,可得到特征边缘上点的法向量。由于法向量具有方向性,因此,特征边缘点 (x,y) 处的法向量为 $\pm N(x,y)$,分别指向边缘的两侧。为确保对地形点梯度约束的正确性,需要注意梯度比例的取值符号。假设光源方向为 $N(p_s, q_s, -1)$,影像中待求地形点灰度梯度为 (p_A, q_A) ,可得地形点梯度比例 k 的符号取值

$$\begin{cases} p_s p_A > 0 & k \text{ 与 } p_s \text{ 符号相同} \\ p_s p_A < 0 & k \text{ 与 } p_s \text{ 符号相反} \end{cases} \quad (9)$$

为使得最终求解得到的地形更加符合连续性约束条件,本文算法在计算当前点的梯度比例 $k_{i,j}$ 时以周围8邻域像素以及与此8像素相邻的16邻域像素的梯度比例为基础进行求解。为了增加求解精度,对周围像素的梯度比例进行反向距离加权处理,即

$$k_{i,j} = \sum_{u=i-2}^{i+2} \sum_{v=j-2}^{j+2} \frac{k_{u,v}}{D_{u,v}} \quad (10)$$

式中, (i,j) 为待求像素的行列坐标, (u,v) 为周围邻域像素的行列坐标; $k_{u,v}$ 为周围像素的梯度比例, $D_{u,v}$ 为周围像素至待求像素点的欧氏距离。

整幅影像地形点的梯度比例采用循环迭代形式进行求解。图4为循环求解流程。

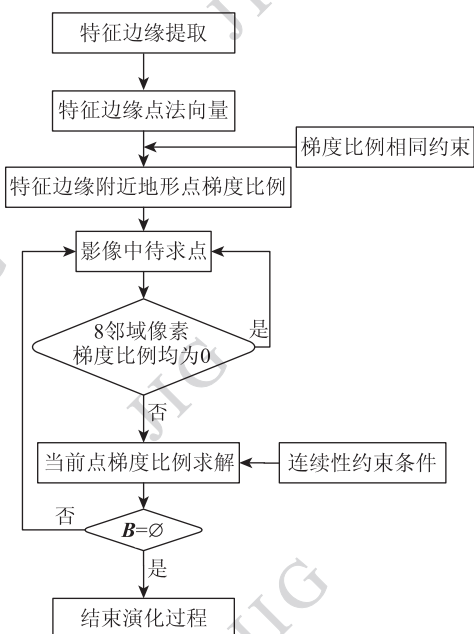


图4 梯度比例循环求解流程

Fig. 4 The process of gradient ratio solving

首先根据特征边缘点的梯度比例得到边缘附近像素的梯度比例,并确定其取值符号。在此基础上开始循环求解过程。将所有像素点分为已求点集 A 和待求点集 B ,判断待求点周围8邻域像素梯度比例,当其存在不为0的梯度比例时,将其归为集合 A ,并按照式(10)求取梯度比例;当其均为0时,将其归为集合 B ,并在下一轮迭代过程中再次判断是否满足求解条件。循环此过程,直到 $B = \emptyset$ 时,完成求解过程。

得到每个像素的梯度比例因子后,根据反射模型建立辐照度方程,并将其代入其中,得到正则化的辐照度方程,实现地形点3维法向量的正确求解,从而实现月面3维地形恢复。

3 3维地形恢复实验分析

3.1 算法流程

本文算法以Lommel-Seeliger反射模型为基础,建立辐照度方程,通过第2节中得到的边缘梯度比例消除辐照度方程的不适定性,从而得到每个点的法向量,最终通过迭代求解得到3维恢复结果,本文算法的总体流程如图5所示。

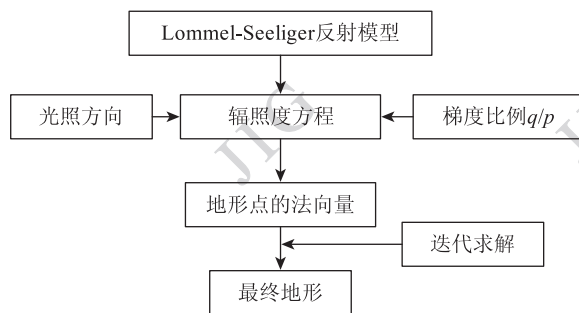


图5 本文算法流程

Fig. 5 The flow chart for our algorithm

3.2 实验分析

为验证本文基于特征边缘约束SFS算法的有效性,采用MATLAB模拟影像和真实月面影像对本文算法与SFS算法中无初值条件下恢复效果较好的Tsai方法进行了测试^[11]。对最终3维恢复结果进行了对比分析。以文献[12]算法提取的特征边缘线为本文算法的起算数据。光照方向根据文献[13]中的方法进行估计,图6(a)为模拟影像,光照方向估计结果为 $(-1.05, 0, -0.98)$,图6(b)为模拟影像真实高度。

由图 7、图 8 中模拟影像恢复结果及误差可以有效验证本文算法的可行性。表 1 为算法的恢复误差(SFS 算法恢复结果为相对值,因此误差只有统一尺度下的相对数值,无具体单位)。

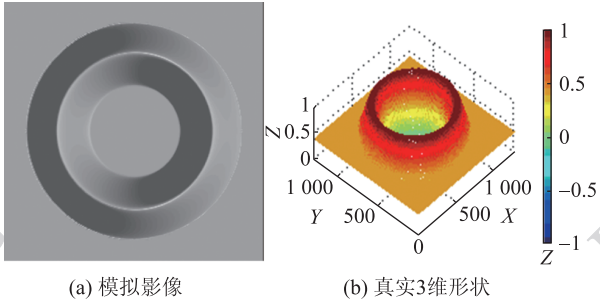


图 6 实验影像与真实高度值
Fig. 6 Experimental image and its true height

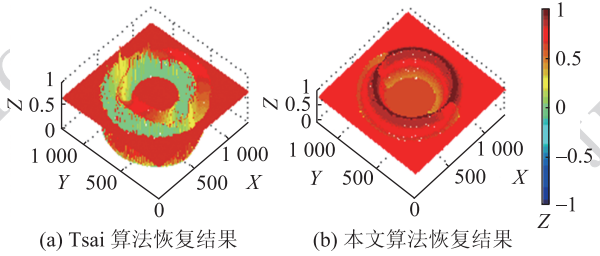


图 7 实验影像恢复结果
Fig. 7 The recovery results of experimental image

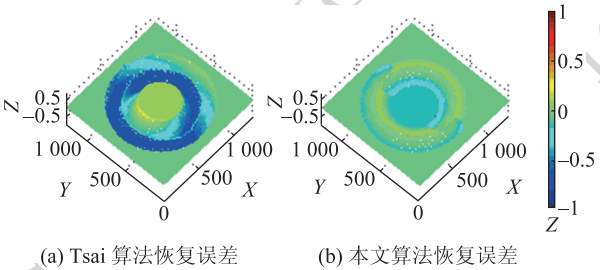


图 8 实验影像恢复结果误差
Fig. 8 The recovery error of experimental image

表 1 不同算法的恢复误差统计

算法	最小误差	最大误差	平均误差	方差
Tsai	-0.790	0.241	-0.485	0.173
本文	-0.511	0.089	-0.199	0.126

首先,两者的恢复结果中对于阴影区域的恢复效果都很差,主要是由于两种算法情况下的阴影区域的地形点像素灰度不符合反射模型的反射特性,

而 SFS 恢复结果以影像灰度为基础,因此,SFS 算法在阴影处无法恢复。

Tsai 方法的恢复结果体现为:影像像素灰度值较大的区域高度值较大,阴影区域高度值较小,最终恢复结果与实际高度相差较大,造成这种情况的主要原因是 Tsai 算法在将辐照度方程进行线性化求解过程中,舍去了一次项以上的部分,而在模拟影像中,辐照度方程的二次项及其以上部分也占有较大比重,因此,导致其最终求解结果存在较大的误差。

本文算法在阴影以外的区域恢复效果较为理想,主要是由于在模拟影像条件下,边缘提取能够取得非常理想的效果,在此基础上演化得到的梯度比例也比较符合模拟影像的实际情况,因此,恢复效果与实际高度更加接近。在根据地形的点法向量求解最终地形过程中,不可避免地存在一定的迭代误差,因此,阴影以外的区域还存在较小的偏差。

为验证算法对真实月面影像的恢复效果,采用图 9 中的阿波罗登月影像对本文算法和 Tsai 算法进行了恢复效果测试。图 9 中(a)(b)月面影像的光照方向估计结果分别为 $(-0.82, -0.19, -1)$ 和 $(-1.32, 0.15, -1)$,图 9(c)(d)为对应影像的真实高度。图 10 为不同算法的恢复结果,其中图 9(a)(c)为图 9 中月面影像 1 的恢复结果,图 9(b)(d)为图 9 中月面影像 2 的恢复结果。

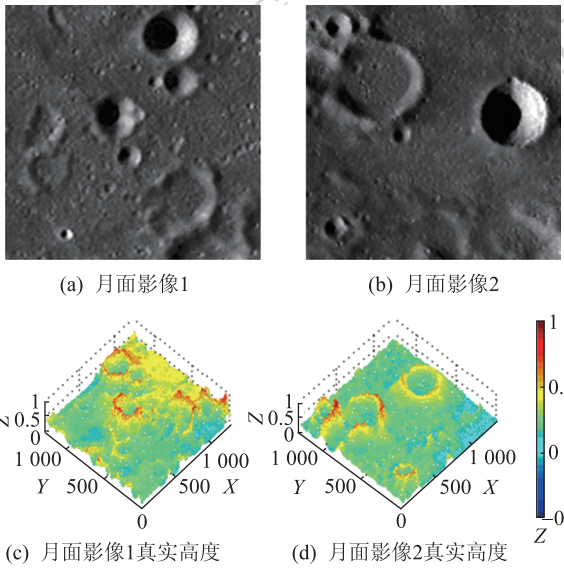


图 9 月面影像和真实高度
Fig. 9 Lunar images and its true depths

根据图 10 中本文算法和 Tsai 算法对真实月面影像的恢复结果,图 11 中不同算法的恢复误差以

及表 2 中的误差统计结果可以得到:

1) 相对于经典的 Tsai 算法, 本文算法能够更加有效地进行 3 维地形恢复, 恢复结果与真实的月面地形更加接近。

2) 由图 11 可知, 较大误差主要出现在地形特征边缘线附近, 因此, 特征边缘线的定位精度也是影响恢复结果的重要原因。由于光照、材质等原因造成特征边缘的提取结果与其实际位置存在一定的偏差, 表现为边缘位置附近存在较大的恢复误差。

3) 边缘位置的提取误差造成了本文算法中梯度比例演化求取过程中存在一定的误差, 即点的法

向量在朝向上出现误差, 造成最终恢复结果与实际地形间的差异, 见图 10 中不同撞击坑地形的恢复结果。

4) 由于影像中的阴影部分像素的灰度不符合本文的反射模型, 因此, 影像 1 和影像 2 中对应阴影区域的恢复误差也较大。

5) 本文采用了表面连续模型约束, 算法最终恢复结果显得较为平滑。

表 2 影像 1 影像 2 中不同算法的恢复误差统计

Table 2 Statistics of recovery error for different algorithms in image1 and image2

影像	算法	最大误差	最小误差	平均误差	方差
1	Tsai	0.475	-0.402	-0.097	0.162
	本文	0.359	-0.208	0.051	0.108
2	Tsai	0.415	-0.249	0.081	0.131
	本文	0.309	-0.125	0.022	0.083

影响本文算法恢复结果的主要因素包括特征边缘提取、光照方向估计、光照反射模型和梯度比例演化过程。

特征边缘提取误差主要由于算法中的梯度比例约束因子是由特征边缘线开始起算得到, Canny 算法依靠像素灰度梯度进行边缘提取, 边缘最终位置与月面影像中的边缘真实位置必然存在一定的误差, 使得真实边缘上点的法向量求取存在较大差异, 导致最终求解时这些点的高度求取存在较大误差, 从而影响恢复结果的整体精度; 边缘提取误差越大, 则造成越多的点的梯度比例求取错误, 整体恢复精度会更差。

建立辐照度方程前必须得到影像的光照方向, 而本文实际影像中的光照方向未知, 必须通过一定算法进行估算。不同的光照方向会使得建立辐照度方程后, 点的法向量的求解存在偏差, 从而影响最终恢复结果, 因此, 光照方向估计算法的精度必然影响本文算法的恢复结果。光照方向估计误差越大则根据其求解得到的法向量的误差越大。

尽管在建立辐照度方程时, 尽量采用与真实反射情况接近的光照反射模型, 但是考虑到算法的可行性和执行效率, 不可能采用非常庞大复杂的反射模型, 只能采用尽量与真实反射情况接近的反射模型, 导致不可避免地存在一定的偏差。因此, 不同的光照反射模型中, 每个点处的法向量在辐照度方程

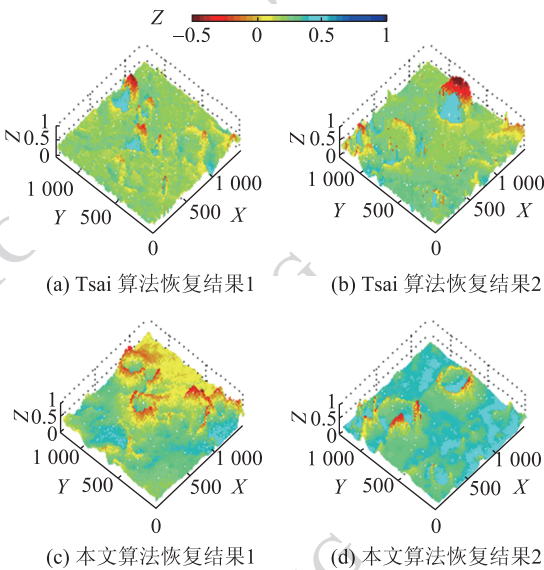


图 10 月面影像恢复结果
Fig. 10 Recovery results of lunar images

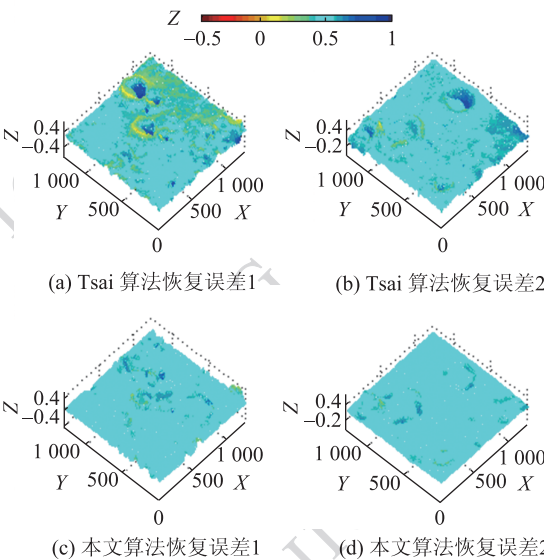


图 11 月面影像恢复误差
Fig. 11 The error of lunar images recovery

中的用法会有所不同,即相同点在不同反射模型下会表现为不同的灰度,而在根据灰度反求点的法向量的过程中,必然会造成法向量求取的误差,从而影响最终的恢复精度。算法所采用的反射模型与实际反射模型差异越大,求解得到的法向量与其实际指向间的偏差就会越大,最终的恢复误差也越大。反射模型是造成最终求解误差的最主要的因素,在以后的工作中将进一步研究更加接近真实情况的反射模型,以减小算法的恢复误差。

梯度比例的演化过程采用特征边缘梯度比例约束和光滑约束条件限制,以及特征边缘的提取偏差会导致演化得到的梯度比例可能与真实地形点的梯度比例存在一定的差异,即同一地形点演化得到的梯度比例与其实际法向量求解得到的梯度比例不同,在此条件下求得的地形会与真实地形有所偏差。当梯度比例演化过程的误差较大时,必然会增大这种偏差。

4 结 论

相对于其他不需要初始值的 SFS 方法,本文将特征边缘线梯度比例约束引入 SFS 算法,对辐照度方程进行了量化约束,并通过地形连续表面模型限制求解梯度比例因子,改进了辐照度方程约束条件,使得 SFS 问题正则化。实验结果表明,本文基于特征边缘梯度比例约束的 SFS 算法对于模拟影像的平均恢复误差较小,精度显著优于 Tsai 算法;对真实月面影像,本文算法能够更加有效地进行 3 维地形恢复,且具有较高的恢复精度。相对于其他地形恢复算法,本文算法只需要通过单幅影像即可进行恢复,一定程度上为探月工程提供了技术储备。算法所使用的反射模型与实际反射情况的差异,恢复结果与实际地形仍存在一定误差,在后续工作中可通过优化反射模型来提高恢复精度。

参考文献 (References)

- [1] Ouyang Z Y. Overview of the Moon[M]. Beijing: Astronautics Press, 2005:304-306. [欧阳自远. 月球科学概论[M]. 北京: 中国宇航出版社,2005:304-307]
- [2] Jia Y, Chen J X, Zhang H G. Key technology analysis of lunar rover[J]. Spacecraft Engineering, 2006,15(3):54-58. [贾阳, 陈建新, 张火高. 月面巡视探测器关键技术分析[J], 航天器工程, 2006,15(3): 54-58.]
- [3] Mai B A, Abas M S. 3D reconstruction using interactive shape from shading [J]. International Journal of Computer Applications, 2011, 28(1): 20-24. [DOI:10.5120/3353-4623]
- [4] Wu C Y, Narasimhan S G, Jaramaz B. A multi-image shape-from-shading framework for near-lighting perspective endoscopes [J]. International Journal of Computer Vision, 2010, 86: 211-228. [DOI: 10.1007/s11263-009-0207-3.]
- [5] Mohamed E, Fouda Y M, Elhadi G F. Fast trigonometric polynomial approach for computing the shape from shading[J]. GVIP Journal, 2005, 5(9):21-26.
- [6] Liao Y, Zhao R C. Analysis and evaluation of several typical SFS algorithms[J]. Journal of Image and Graphics, 2001, 6(10): 953-961. [廖熠, 赵荣椿. 从明暗恢复形状(SFS)的几类典型算法分析与评价[J]. 中国图象图形学报, 2001, 6(10): 953-961.]
- [7] Ratika P, Ghose M K, Jeyaram A. Extraction of DEM from high resolution satellite imagery using shape from shading approach [J]. International Journal of Computer Applications, 2010, 7(12):40-46. [DOI: 10.5120/1296-1786.]
- [8] Kreslavsky M A, Shkuratov Y G, Velikodsky Y I, et al. Photometric properties of the lunar surface derived from clementine observations [J]. Journal of Geophysical Research, 2000, 105(8):281-295. [DOI: 10.1029/1999JE001150.]
- [9] Wen T, Zhou J L, He K. Edge detection based on image feature [J]. Computer Engineering and Applications, 2011, 47(12): 189-191. [文婷, 周激流, 何坤. 基于图像特征的边缘检测[J]. 计算机工程与应用, 2011, 47(12): 189-191. [DOI:10.3778/j. issn. 1002-8331. 2011. 12. 053]
- [10] Xu M, Liao Y, Zhang Y N, et al. Analyzing the minimization methods of shape from shading [J]. Computer Engineering and Applications, 2004, 40(2): 20-22. [须明, 廖熠, 张艳宁, 等. Shape from shading 最小化方法分析[J]. 计算机工程与应用, 2004, 40(2): 20-22. [DOI: 10.3321/j. issn: 1002-8331. 2004. 02. 007]
- [11] Tsai P S, Shah M. A fast linear shape from shading [C]//Proceedings of IEEE Computer Society Conference on CVPR. Urbana Champaign: IEEE, 1992, 734-736.
- [12] Lv Z, Wang F L, Chang Y Q. An improved canny algorithm for edge detection[J]. Journal of Northeastern University: Natural Science, 2007, 28(12):1681-1684. [吕哲, 王福利, 常玉清. 一种改进的 Canny 边缘检测算法[J]. 东北大学学报: 自然科学版, 2007, 28(12): 1681-1684. [DOI:10.3321/j. issn: 1005-3026. 2007. 12. 003]
- [13] Samaras D, Metaxas D. Incorporating illumination constraints in deformable models for shape from shading and light direction estimation[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2003, 25(2): 247-264. [DOI: 10.1109/TPAMI. 2003. 1177155.]