

月球 CCD 影像的快速匹配算法

王君铎^{1,2} 汪日伟^{1,2} 温显斌^{1,2} 邹永廖³ 郑永春³ 王玲^{1,2}

¹ 天津理工大学天津市智能计算及软件新技术重点实验室, 天津 300384
² 天津理工大学计算机视觉与系统教育部重点实验室, 天津 300384
³ 中国科学院国家天文台, 北京 100012

摘要 影像匹配是基于 CCD 数据获得月球高程数据的基础和关键。研究了月球 CCD 影像的小波金字塔分层匹配算法。利用小波分析的多分辨率特性,对 CCD 影像进行小波分解,构造了金字塔顶层影像误匹配剔除策略及金字塔底层影像匹配点的快速搜索策略,实现了自粗尺度到细尺度的匹配算法。该算法通过减少非同名像点的匹配时间和搜索时间,大大降低了运算量,从而提高了匹配效率和配准精度。实验结果表明,该算法在匹配正确率和匹配效率方面都获得了很好的效果。

关键词 成像系统;影像匹配;特征点提取;误匹配剔除;小波金字塔

中图分类号 TP751 文献标识码 A doi: 10.3788/LOP49.011102

Fast Matching Algorithm of Lunar CCD Image

Wang Junduo^{1,2} Wang Riwei^{1,2} Wen Xianbin^{1,2} Zou Yongliao³
 Zheng Yongchun³ Wang Ling^{1,2}

¹ Tianjin Key Laboratory of Intelligence Computing and Novel Software Technology,
 Tianjin University of Technology, Tianjin 300384, China
² Key Laboratory of Computer Vision and System, Ministry of Education,
 Tianjin University of Technology, Tianjin 300384, China
³ National Astronomical Observatories, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100012, China

Abstract Image matching is the foundation and key for obtaining lunar elevation information based on CCD data. We study the wavelet pyramid layered matching algorithms of lunar CCD image. CCD image is decomposed by wavelet according to the wavelet multiresolution analysis. Mismatch elimination strategy is constructed on the top of the pyramid level, and rapid searching strategy for matching points is constructed on the bottom of the pyramid level. Image matching is completed from low resolution to high resolution. Matching time and searching time for non-corresponding image points are reduced in this algorithm, accordingly, the calculation complexity is reduced greatly. So the searching efficiency and the registration precision are improved. The experimental results show that this algorithm has high precision and matching efficiency.

Key words imaging systems; image matching; feature extraction; mismatch elimination; wavelet pyramid

OCIS codes 110.2970; 100.2960; 100.2000; 100.3008

1 引言

影像匹配是指从不同位置或不同时刻,或由不同传感器上所获取的数字影像中自动识别相应影像或相应像点的一些算法,是计算机视觉及数字摄影测量的核心问题。在图像处理、机器视觉、地理信息系统、医学成像、虚拟现实和月球高程数据自动生成^[1]等领域都有着广泛的用途。影像匹配通常分为两类,一类是基于灰度相关的匹配算法^[2],另一类是基于特征相关的匹配算法^[3,4]。基于灰度的匹配方法是直接对当前图像数据进行操作,主要包括归一化互相关匹配^[5]、模板匹配^[6]、快速傅里叶算法^[7]、投影匹配^[8]、序贯相似性检测

收稿日期: 2011-08-16; 收到修改稿日期: 2011-09-23; 网络出版日期: 2011-10-24

基金项目: 国家 863 计划重点项目(2010AA122201)和国家自然科学基金(60872064)资助课题。

作者简介: 王君铎(1983—),女,硕士研究生,主要从事图像处理和模式识别等方面的研究。E-mail: wjduo66@163.com

导师简介: 温显斌(1964—),男,博士,教授,主要从事图像处理、模式识别和计算机视觉等方面的研究。

E-mail: wenxianbin@163.com

匹配^[9]、概率松弛匹配^[10]和放射变换图像配准^[11]等;基于特征匹配的方法首先在原始图像中提取特征,然后再建立两幅影像之间特征的匹配对应关系,常用的特征匹配基元包括点、线、区域等显著特征^[12]。前者算法简单、匹配位置准确,但计算量大,效率较低;后者具有较好的抗几何失真和灰度失真的能力,但结构复杂,不利于硬件实现,并且匹配效果在很大程度上依赖于特征提取的质量。

本文针对我国探月一期工程的月球三线阵 CCD 影像^[13],选用基于灰度和基于特征相结合的小波金字塔^[14]分层影像匹配算法,并改进了分层搜索算法^[15],即在金字塔顶层采用误匹配剔除策略,在金字塔底层采用高效的搜索窗口确定算法,实现由粗尺度到细尺度的分层匹配。该算法在保证高正确率的前提下,有效提高了影像匹配的效率。

2 金字塔影像生成

小波分析是一种时间-尺度(时间-频率)信号分析方法,在时域和频域都具有表征信号局部特征的能力,具有多分辨率分析的特点^[16],可以获得目标影像不同层次的轮廓信息和细节信息。金字塔是一种减少匹配搜索时间的有效方法,通过从低分辨率影像开始匹配,得到低分辨率影像下的匹配点,逐步找到原始影像的精确匹配点。

设 c^{j+1} 代表原始影像, $c^j, d^{j1}, d^{j2}, d^{j3}$ 是原始影像经过小波变换得到的 4 幅子图像,由 c^{j+1} 分解形成 $c^j, d^{j1}, d^{j2}, d^{j3}$ 的分解公式为

$$\begin{cases} c_{m,n}^j = \frac{1}{2} \sum_{k,l \in Z} c_{k,l}^{j+1} h_{k-2m} h_{l-2n} \\ d_{m,n}^{j1} = \frac{1}{2} \sum_{k,l \in Z} c_{k,l}^{j+1} h_{k-2m} g_{l-2n} \\ d_{m,n}^{j2} = \frac{1}{2} \sum_{k,l \in Z} c_{k,l}^{j+1} g_{k-2m} h_{l-2n} \\ d_{m,n}^{j3} = \frac{1}{2} \sum_{k,l \in Z} c_{k,l}^{j+1} g_{k-2m} g_{l-2n} \end{cases}, \quad (1)$$

式中 m, n 分别代表二维离散图像的行数和列数, $\{h_n\}, \{g_n\}$ 为滤波算子。影像 c^{j+1} 分解后各分量的含义为: c^j 集中了原始影像 c^{j+1} 中的主要低频成分; d^{j1} 对应 c^{j+1} 中垂直方向的高频边缘信息; d^{j2} 对应 c^{j+1} 中水平方向的高频边缘信息; d^{j3} 对应 c^{j+1} 中 45° 方向的高频边缘信息。图 1 为分解的示意图。

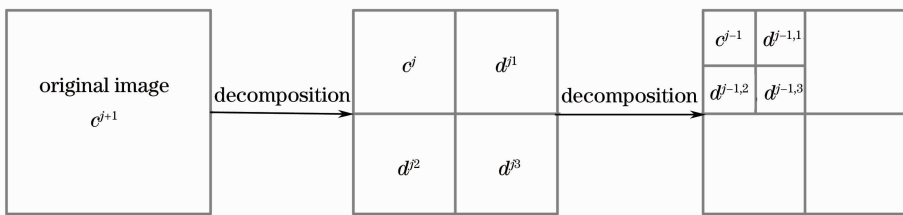


图 1 图像分解的示意图

Fig. 1 Schematic of image decomposition

由 $c^j, d^{j1}, d^{j2}, d^{j3}$ 也可以重构 c^{j+1} , 重建公式为

$$c_{m,n}^{j+1} = \frac{1}{2} \left(\sum_{k,l \in Z} c_{k,l}^j \tilde{h}_{2k-m} \tilde{h}_{2l-n} - \sum_{k,l \in Z} d_{k,l}^{j1} \tilde{h}_{2k-m} \tilde{g}_{2l-n} - \sum_{k,l \in Z} d_{k,l}^{j2} \tilde{g}_{2k-m} \tilde{h}_{2l-n} - \sum_{k,l \in Z} c_{k,l}^{j3} \tilde{g}_{2k-m} \tilde{g}_{2l-n} \right), \quad (2)$$

式中 $\tilde{h}_n = h_{-n}, \tilde{g}_n = g_{-n}$ (当信号的样本数为有限时, $\tilde{h}_n = h_{1-n}, \tilde{g}_n = g_{1-n}$)。利用小波分解(1)式生成的二级影像金字塔的过程如图 1 所示,则影像序列 $\{c^{j+1}, c^j, c^{j-1}\}$ 构成了原始影像的三级影像金字塔。

3 误匹配点的剔除

在金字塔影像匹配过程中,基于相似度函数进行的灰度影像匹配不可避免地会产生特征点与同名像点之间的一对多关系。通常的做法是保存每一对匹配结果,到下层进行剔除,以此类推,直到底层影像实现特

征点与同名影像之间的一一对应。这样做能够提高匹配的可靠性,但由于进行了大量的非同名像点的搜索匹配,导致运算量增大,运行速度降低。本文在金字塔顶层匹配结束后采用一种误匹配剔除策略,实现特征点与同名像点之间的一一对应关系,在保证匹配可靠性的同时提高了匹配的速度。

本文数字影像选自经过校正的嫦娥一号 CCD 影像航带,设 $A(x_1, y_1), A'(x_1, y_1)$ 分别为待匹配影像上特征点和模板影像上所对应的同名像点,为了考察 $A(x_1, y_1), A'(x_1, y_1)$ 两点之间是否出现误匹配,在待匹配影像上任意取 n 个特征点 $X_i(x_{i,2}, y_{i,2}) (i = 1, \dots, n), X'_i(x_{i,2}, y_{i,2}) (i = 1, \dots, n)$ 为模板影像上对应的同名像点,如果 $A(x_1, y_1), A'(x_1, y_1)$ 两点正确匹配,则矢量线段 $\overrightarrow{AX_i}$ 和 $\overrightarrow{A'X'_i}$ 具有相似性,为此,定义函数:

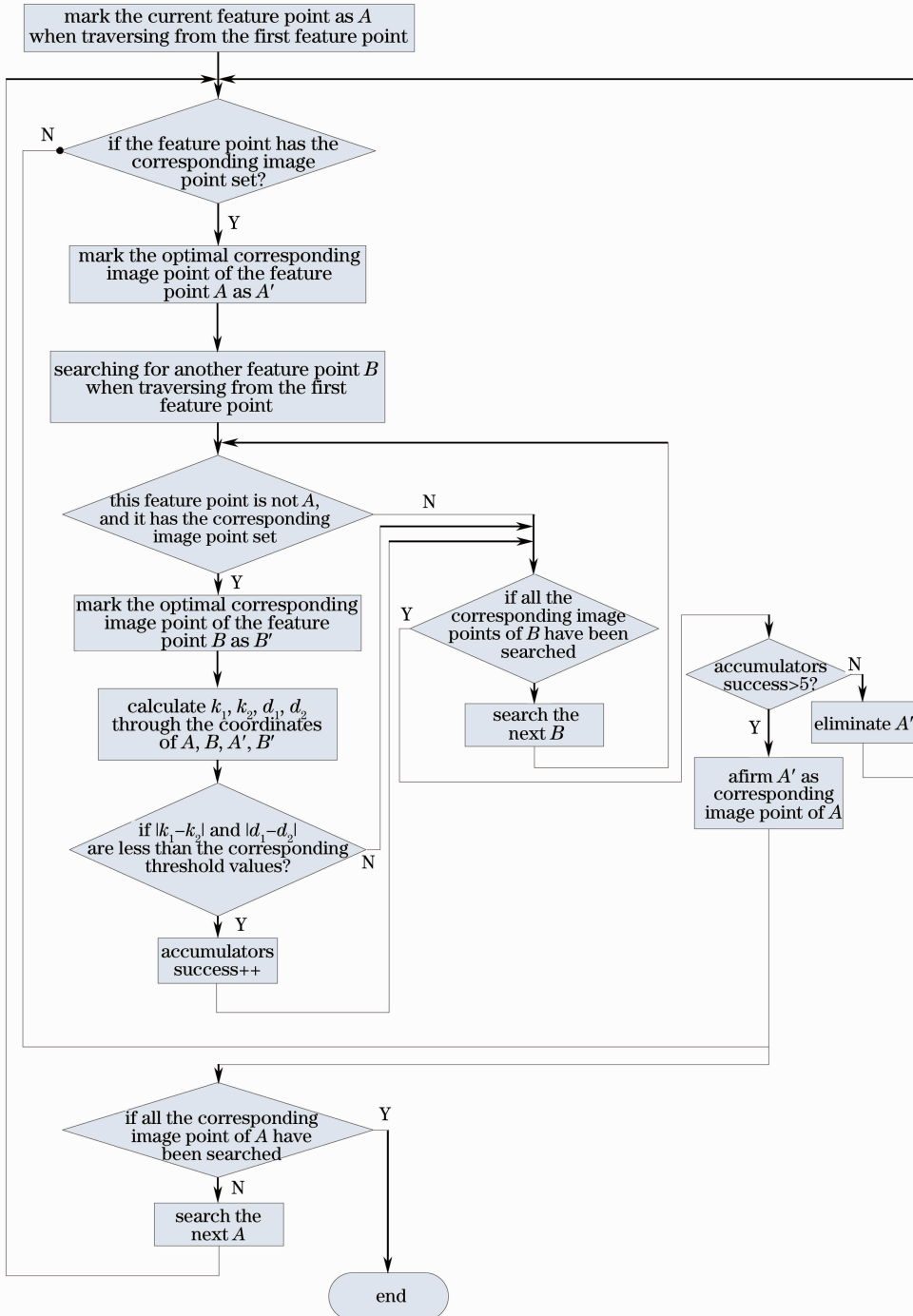


图 2 误匹配剔除算法流程图

Fig. 2 Flow chart of mismatch elimination algorithm

$$f(A, X_i) = \begin{cases} 0, & A = X_i \\ 0, & f_1(A, X_i) > \epsilon_1 \\ 0, & f_2(A, X_i) > \epsilon_2 \\ 1, & \text{others} \end{cases}, \quad (3)$$

式中 $f_1(A, X_i) = |k_{i,1} - k_{i,2}|$, $f_2(A, X_i) = |d_{i,1} - d_{i,2}|$, $k_{i,1}, k_{i,2}$ 分别为 $\overrightarrow{AX_i}$ 和 $\overrightarrow{A'X_i}$ 的斜率, $d_{i,1}, d_{i,2}$ 分别为 $\overrightarrow{AX_i}$ 和 $\overrightarrow{A'X_i}$ 的模; ϵ_1, ϵ_2 为较小的阈值。由(3)式可构造误匹配点判断规则为:若

$$\sum_{i=1}^n f(A, X_i) \geq 95\%n, \quad (4)$$

则 $A'(x_1, y_1)$ 是特征点 $A(x_1, y_1)$ 的同名像点, 否则为误匹配点, 需剔除。算法详细流程图如图 2 所示。

4 影像匹配搜索窗口的确定

影像匹配算法的性能主要体现在速度、精度和可靠性三个方面。为了加快影像匹配的速度, 通过缩小匹配搜索窗口来提高搜索效率, 减少非匹配点上的相关计算, 从而减少了运算时间, 提高了匹配效率。匹配搜索窗口的确定算法如下。

1) 分别计算作为框架点的特征点与其同名像点之间的水平偏移量 Δx_i 和垂直偏移量 Δy_i , 并取其平均值 $\overline{\Delta x}, \overline{\Delta y}$, 作为水平方向和垂直方向的参考偏移量;

2) 在搜索影像上, 以与待匹配影像上待匹配特征点 $A(x, y)$ 同坐标的点 $A_1(x, y)$ 为基准, 分别做水平偏移和垂直偏移, 得到偏移后的点 $A'[(x + \overline{\Delta x}), (y + \overline{\Delta y})]$;

3) 以 A' 为中心做一个边长预设的正方形, 如图 3 所示, 即为特征点 $A(x, y)$ 的同名像点的搜索窗口。

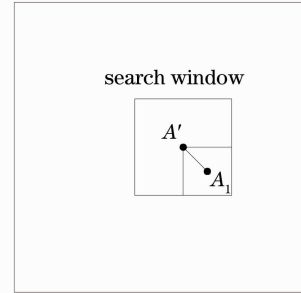


图 3 搜索窗口的确定

Fig. 3 Determination of search window

5 CCD 影像匹配步骤

本文采用的基于小波金字塔的分层影像匹配算法, 具体算法步骤如下。

1) 在待匹配影像上提取边缘特征点。本文选用 Sobel 算子提取边缘特征点作为待匹配点^[17]。Sobel 算子是一种一阶微分算子, 它利用像素邻近区域的梯度值来计算该像素的梯度, 然后根据一定的阈值来取舍, 公式为

$$S = (dx + dy)^{1/2}. \quad (5)$$

Sobel 算子是 3×3 算子模板。图 4 所示的 2 个卷子和 dx, dy 形成 Sobel 算子。一个核对垂直边缘响应最大, 而另一个核对水平边缘响应最大。2 个卷子最大值即为该点的输出值。运算结果是一幅边缘幅度图像, 从而得到边缘特征点。

-1	0	1	1	2	1
-2	0	2	0	0	0
-1	0	1	-1	-	-1

图 4 Sobel 算子

Fig. 4 Sobel operator

2) 分别对两幅数字影像建立 L 层小波金字塔结构。

3) 选择一定数量均匀分布的特征点逐级映射到顶层金字塔影像。

4) 在金字塔顶层, 将特征点作为模板的中心, 利用相似度测量函数在另一幅数字影像全图范围内寻找同名像点, 并将匹配成功的点对作为框架点。本文采用相关系数 $r(x, y)$ 作为对应关系是否成立的度量

$$r(x, y) = \frac{\sum_{i=1}^N (X_i - \bar{X}) \times (Y_i - \bar{Y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (X_i - \bar{X})^2} \times \sqrt{\sum_{i=1}^N (Y_i - \bar{Y})^2}}, \quad (6)$$

式中 N 为匹配窗口大小, X 为待匹配影像的特征点 (x, y) 处像素灰度, Y 为另一幅数字影像的 (x', y') 处像

素灰度, \bar{X}, \bar{Y} 为模板窗口内像素灰度均值。相关系数小于一定的阈值时即认为是同名像点。

5) 金字塔顶层采用误匹配点的剔除算法, 实现特征点与同名像点之间的一一对应关系。

6) 匹配点对向下映射。每一层形成的点与点之间的匹配关系需要通过向下映射计算^[18]才能逐级反映到金字塔底层影像(原图)上。首先在搜索影像金字塔分层的最高层找到特征点对应的同名像点的大致位置 (r, c) , 据此推算出下一层搜索影像上同名像点的位置 $(2r, 2c)$, 然后在以 $(2r, 2c)$ 为中心的一个邻域内搜索相似度最大的位置。此邻域的大小应该取决于上一层的匹配精度。依此类推, 在后续的各层中找到相关值最大的位置, 直到最底层(原始影像)。

7) 在金字塔底层影像上, 对全部未匹配的特征点按照改进的搜索窗口的确定方法进行匹配。

6 仿真实验结果分析

实验环境为 CPU Intel[®] Core(TM) 1.73 GHz, 内存 795 MHz 1.99 GB, Microsoft Windows XP 操作系统, 在 VC++6.0 下编译通过。影像为嫦娥一号三线阵 CCD 影像。分别选用三组 256 pixel \times 256 pixel 大小的实验影像, 第一组对正视影像和后视影像进行匹配, 第二组对后视影像和前视影像进行匹配, 第三组对前视影像和正视影像进行匹配。

选用 Haar 小波函数对影像进行分解, 分解层数 L 取 3, 生成三层金字塔影像。在金字塔影像匹配过程中, 匹配窗口大小为 13。在顶层影像和中间层影像上匹配时搜索窗口选为 9, 在底层影像(原始影像)上匹配时搜索窗口选为 11(过小降低匹配成功率, 过大降低匹配效率)。

实验结果数据统计如表 1 所示, 三组影像实验结果分别如图 5~7 所示, 影像匹配结果直观图(b)~(e) 分别是采用分层搜索算法、基于归一化互相关(NCC)的匹配算法、基于灰度的匹配算法和本文的改进匹配算法进行匹配所得的匹配图, 图中标记 10 对成功匹配的点对。其中分层匹配算法是采用文献[15]中金字塔分层匹配算法实现的影像匹配算法, 基于 NCC 的匹配算法采用文献[5]中的影像匹配算法, 灰度匹配算法采用相关系数法作为相似度函数, 改进匹配算法是指本文提出的结合误匹配剔除策略和搜索窗口确定策略的分层影像匹配算法, 其他条件相同。

实验结果表明, 本文采用的误匹配点剔除策略和搜索窗口确定方法相结合的金字塔分层影像匹配算法, 与采用分层搜索算法实现的影像匹配算法和基于 NCC 的匹配算法相比, 在保证匹配精度的同时, 明显提高了匹配效率; 与灰度匹配算法相比, 匹配精度和匹配效率都有很大的提高。

表 1 影像匹配实验结果

Table 1 Experimental results of image matching

Image group	Point number	Algorithm	Accuracy /%	Time consumed /ms
First group	3146	Layered algorithm	98.3379	13047
		NCC matching algorithm	97.8932	16216
		Gray matching algorithm	91.4268	14123
		Improved matching algorithm	98.4107	6484
Second group	5216	Layered algorithm	98.6617	19438
		NCC matching algorithm	98.1035	23920
		Gray matching algorithm	91.9325	20616
		Improved matching algorithm	98.7040	10093
Third group	5182	Layered algorithm	98.7049	20469
		NCC matching algorithm	97.9525	24538
		Gray matching algorithm	92.1376	21223
		Improved matching algorithm	98.7264	10687

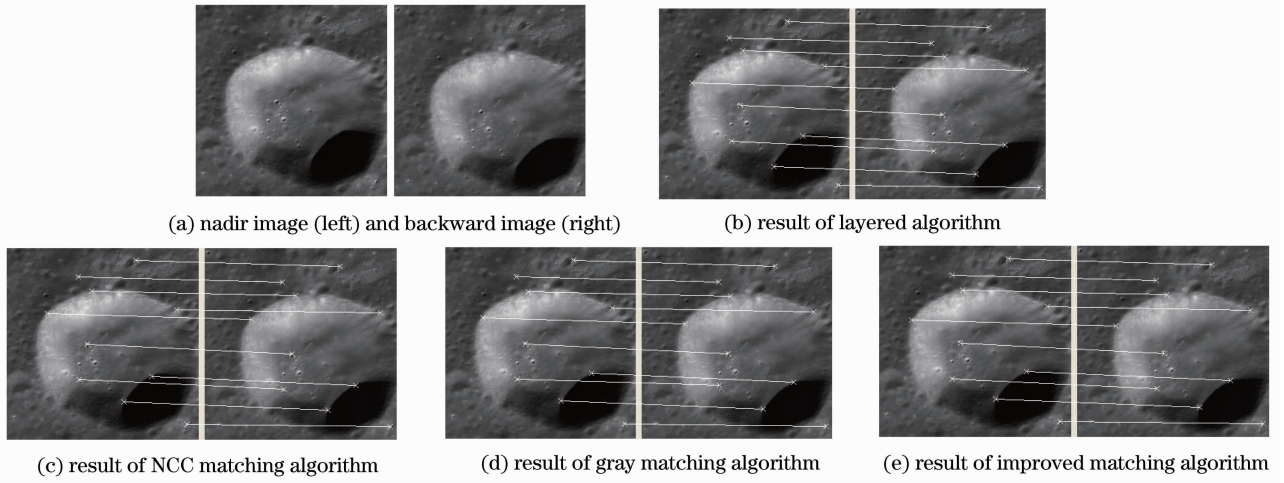


图 5 三线阵 CCD 影像匹配结果(正视影像与后视影像)

Fig. 5 Visual diagrams of the three-line-array CCD image matching for nadir and backward images

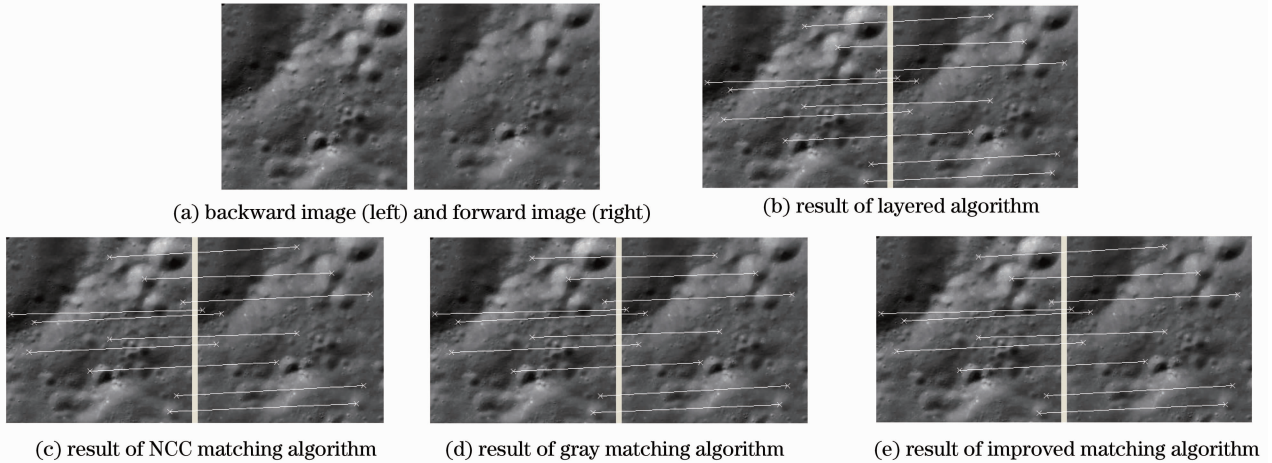


图 6 三线阵 CCD 影像匹配结果(后视影像与前视影像)

Fig. 6 Visual diagrams of the three-line-array CCD image matching for backward and forward images

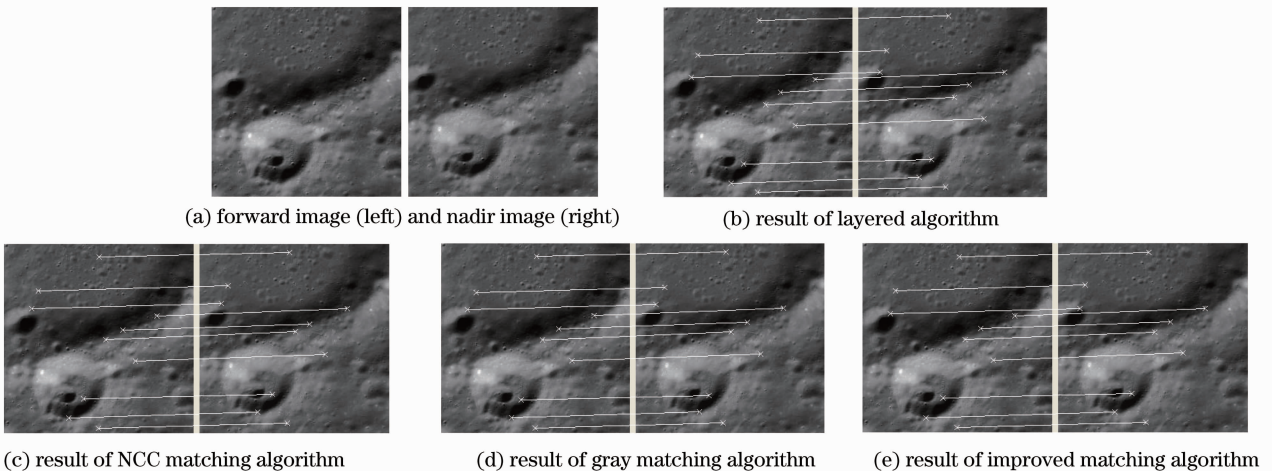


图 7 三线阵 CCD 影像匹配结果(前视影像与正视影像)

Fig. 7 Visual diagrams of the three-line-array CCD image matching for forward and nadir images

7 结 论

提出了一种改进分层影像匹配算法,该算法通过构造搜索策略减少非同名像点的匹配时间和搜索时间,大大降低了运算量,从而提高了匹配效率和配准精度。采用该算法针对三线阵 CCD 影像数据做了仿真实验,取得了较好的结果。预期它也适用于嫦娥二号探月工程二期的二线阵 CCD 影像数据,因为本文三组实验分别是对三线阵 CCD 的前视影像、正视影像和后视影像中的任意两对影像进行的仿真实验。其可行性需在获得二期数据后加以验证。

参 考 文 献

- O. Kayadibi. Recent advances in satellite technologies using to generate the digital elevation model (DEM)[C]. 4th International Conference on Recent Advances in Space Technologies, 2009,380~385
- Zong Liang, Wu Yanhui. A parallel matching algorithm based on image gray scale[C]. 2009 International Joint Conference on Computational Sciences and Optimization, 2009,109~111
- Zhang Chao, Wang Qionghua, Li Dahai *et al.*. Acquisition of parallax images for multiView auto-stereoscopic display based on SIFT matching algorithm[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(7): 1989~1993
张超,王琼华,李大海等.基于SIFT匹配算法的多视点自由立体显示视差图像的生成[J].光学学报,2010,**30**(7): 1989~1993
- Fu Xiang, Zeng Jiexian. A novel image retrieval method based on interest points matching and distribution[J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(3): 774~778
符祥,曾接贤.基于兴趣点匹配和空间分布的图像检索方法[J].中国激光,2010,**37**(3): 774~778
- J. N. Sarvaiya, Patnaik Suprava, Bombaywala Salman. Image registration by template matching using normalized cross-correlation[C]. 2009 International Conference on Advances in Computing, Control, and Telecommunication Technologies, 2009, 819~822
- Tang Jin, Li Qing. Fast template matching algorithm[J]. *J. Computer Applications*, 2010, **30**(6): 1559~1561
唐璁,李青.一种快速的模板匹配算法[J].计算机应用,2010,**30**(6): 1559~1561
- R. Iwa, H. Yoshimura. New method for increasing matching accuracy and reducing process time of fingerprint data by the fractional Fourier transform[C]. Proceedings of 2010 IEEE 17th International Conference on Image Processing, 2010, 3061~3064
- Li Baolei, Zhang Yaojun. Projection decomposition algorithm of X-ray dual energy computed tomography based on projection matching[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(3): 0311002
李保磊,张耀军.基于投影匹配的X射线双能计算机层析成像投影分解算法[J].光学学报,2011,**31**(3): 0311002
- Haifeng Liu, Chuangbai Xiao, M. Deng *et al.*. A faster image registration algorithm[C]. 3rd International Congress on Image and Signal Processing, 2010,1218~1221
- Bao Wenxia, Liang Dong, Tang Jun. Matching algorithm based on probabilistic relaxation of spectral correlation[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(3): 708~712
鲍文霞,梁栋,唐骏.一种基于谱相关性的概率松弛匹配算法[J].光学学报,2010,**30**(3): 708~712
- Hao Zhicheng, Zhu Ming. Serial image registration based on multiple restriction matching algorithm[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(3): 702~707
郝志成,朱明.基于多约束准则匹配算法的系列图像配准[J].光学学报,2010,**30**(3): 702~707
- Shao Shiwei, Tong Chunya. A matching method for multi-characteristic vector elements of complex polygon[C]. 2010 International conference on Multimedia Technology, 2010
- Zhao Fei, Hu Xin, Guan Zequn *et al.*. Research on automatic matching technology of three linear CCD image[J]. *J. Zhengzhou Institute of Surveying and Mapping*, 2008, **3**(4): 12~14
赵斐,胡莘,关泽群等.三线阵 CCD 影像的像点自动匹配技术研究[J].测绘科学,2008,**3**(4): 12~14
- Y. Jane, B. Prabir. A wavelet-based coarse-to-fine image matching scheme in a parallel virtual machine environment[J]. *IEEE Trans. Image Processing*, 2000, **9**(9): 1547~1559
- Zhang Hongyuan, Chen Zili. Research on classical image matching algorithm and its improved method[J]. *Ordnance Industry Automation*, 2008, **27**(9): 91~94
张红源,陈自力.图像匹配经典算法及其改进方法研究[J].兵工自动化,2008,**27**(9): 91~94
- Meng Xiangzhong, Ni Jinpi, Zhu Yanbo. Research on vibration signal filtering based on wavelet multi-resolution analysis

- [C]. 2010 International Conference on Artificial Intelligence and Computational Intelligence, 2010,115~118
- 17 Hu Zunfeng, Dang Hongshe, Li Xiaorui. A novel fast sub pixel edge location method based on Sobel-OFMM[C]. IEEE International Conference on Automation and Logistics, 2008,828~832
- 18 Zhang Jingmin, Zhang Zhijia, Wang Dongshu. A fast pyramid image matching algorithm based on wavelet decomposition [J]. *Microelectronics & Computer*, 2007, **24**(1): 207~209
- 张敬敏, 张志佳, 王东署. 基于小波分解的塔式快速图像匹配算法[J]. *微电子学与计算机*, 2007, **24**(1): 207~209