

# MVLL 算法中地表断裂特征的 自适应窗口变化策略研究

纪松<sup>1</sup> 范大昭<sup>1,2</sup> 张永生<sup>1</sup> 刘航冶<sup>1,3</sup>

(1 信息工程大学测绘学院,郑州市陇海中路 66 号,450052)

(2 北京大学遥感与地理信息系统研究所,北京市海淀区颐和园路 5 号,100871)

(3 东华理工大学江西省数字国土重点实验室,抚州市学府路 56 号,344000)

**摘要:**针对线阵 CCD 影像,研究了 MVLL 算法的匹配走向,得出了匹配走向即建筑物底部至对应屋顶的连线在匹配过程中为近似直线的结论。分析了 MVLL 算法中地表断裂特征通常匹配至屋底的匹配难点,改进了相关参数自适应调整算法,给出了自适应窗口变化算法的流程。两组 ADS40 线阵影像的断裂特征匹配实验表明,经过自适应窗口变化后,地表断裂特征能够成功匹配,MVLL 算法的自适应性增强。

**关键词:**MVLL; 匹配走向; 断裂特征; 窗口变化; 相关系数

**中图法分类号:**P237.3

影像匹配是数字摄影测量的核心,随着大(多)重叠度数码摄影、三线阵相机的广泛运用,大量影像数据可直接用于影像匹配。于是,利用冗余影像数据最大限度地减少信息盲区,将单立体(两度重叠)匹配的病态解转化为多视(多度重叠)匹配的确定解,是影像匹配技术研究发展的热点,也是数字摄影测量摆脱传统问题束缚、加速全自动化进程的关键<sup>[1]</sup>。

铅垂线轨迹法(vertical line locus, VLL)是物方型单立体影像匹配算法<sup>[2]</sup>。多视铅垂线轨迹法(multiple-view VLL, MVLL)根据 VLL 算法的基本思想,在线阵影像准核线限制条件下,综合利用多张重叠影像(线阵)的信息较好地解决了相似特征、遮挡特征等传统单立体影像匹配的瓶颈问题,极大地提高了影像匹配的可靠性与成功率<sup>[3]</sup>。然而,实验表明,对于城镇等具有高大建筑物的影像,MVLL 算法的匹配结果并不十分理想,误匹配问题不可避免<sup>[3]</sup>。进一步研究发现,MVLL 算法的误匹配主要发生在断裂地表所对应的影像区域<sup>[3]</sup>。本文对断裂地表的特征进行了深入分析,试图寻找一种适用于断裂地表特征的 MVLL 算法匹配策略。

## 1 地表断裂特征的 MVLL 算法匹配分析

### 1.1 MVLL 算法的匹配走向

VLL 算法认为,在中心投影条件下,空间任意一条铅垂线以中心投影方式投射到影像上仍是一条直线,且该直线称为投影辐射线<sup>[4]</sup>。对于线阵影像,当影像经过几何校正后,影像成像关系以及铅垂线的投影辐射线如图 1 所示。图 1 中, $P_1$ 、 $P_2$ 、 $P_3$  表示地面铅垂线上的点,线阵传感器沿飞行轨迹飞行,线阵扫描面  $C_1P_1G_1O_1$ 、 $C_2P_2G_2O_2$ 、 $C_3P_3G_3O_3$  之间互相平行,分别使  $P_1$ 、 $P_2$ 、 $P_3$  点成像于  $E_1$ 、 $E_2$ 、 $E_3$  点。当  $P_1$  与  $P_3$  点分别为铅垂线的底点与顶点, $P_2$  点在铅垂线上移动时, $E_1$ 、 $E_2$ 、 $E_3$  点之间组成的线段即为地面铅垂线在线阵影像上的投影辐射线。

设传感器成像时焦距为  $f$ ,分辨率为  $R$ ,航高为  $H$ ,立体成像角为  $\alpha$ 。同时,设铅垂线高度为  $h$ ,铅垂线距地面飞行轨迹的垂直距离为  $s$ 。当铅垂线上一点的高度  $k$  在投影辐射线上变化时, $E_1E_2E_3$  上像点水平位置  $x$  与垂直位置  $y$  之间的关系为(以像素为单位):

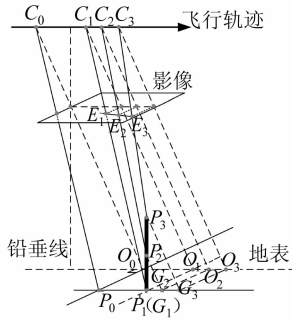


图1 线阵影像成像关系以及铅垂线的投影辐射线  
Fig.1 Imaging Geometry of Line-array Image and Projection Line of a Plumb Line

$$\begin{cases} x = k \cdot \tan\alpha/R \\ y = s \cdot H \cdot \cos\alpha / ((H - k) \cdot R) \end{cases} \quad (1)$$

进一步计算  $y$  与  $x$  之间的关系,得:

$$y = \begin{cases} \frac{s \cdot H \cdot \sin\alpha}{H \cdot R \cdot \tan\alpha - x \cdot R^2}, x \in (0, h \cdot \tan\alpha/R] \\ \frac{s \cdot H}{(H - k) \cdot R}, x = 0, k \in [0, h] \end{cases} \quad (2)$$

对传感器、地面铅垂线的参数赋值,根据式(2)解算投影辐射线,其中,  $f = 62.5 \text{ mm}$ ,  $R = 0.21 \text{ m}$ ,  $H = 2000 \text{ m}$ ,  $\alpha = 0.5 \text{ rad}$ . 改变参数  $h$ 、 $s$ ,解算  $\Delta\theta$  与  $\Delta P$ ,见表1。其中,  $\Delta\theta$  表示投影辐射线上起始点与其他点连线之间的最大倾角偏差;  $\Delta P$  表示投影辐射线与该线段首末两点连线(直线)之间的最大距离(单位为像素)。相应参数下的投影辐射线的形状如图2所示。

表1 模拟参数下的投影辐射线解算关系表  
Tab.1 Solution Results Table of Projection Radiation by Simulation Parameters

$h/m$	$s/m$	$\Delta\theta$	$\Delta P$
50	0	0	0
100	300	0.685 7	0.009 8
200	500	2.173 2	0.123 1
500	800	7.877 8	2.210 4

MVLL 算法的匹配走向即投影辐射线,从理论上讲,匹配走向实际上是建筑物底部至顶部的连线方向,图3中的虚线段给出了MVLL算法在不同视角、同一断裂特征处的匹配走向。

### 1.2 断裂特征的MVLL算法匹配难点

传统影像匹配算法立足于地表连续条件,对于高大建筑物密集、地表起伏剧烈的高分辨率遥感影像,地表断裂特征是匹配的难点<sup>[5]</sup>。根据以上分析,由于高大建筑物的屋顶特征处地表断裂严重,在投影误差的影响下,屋顶周围的规则相关窗口所包含的影像内容在不同影像中具有较大差

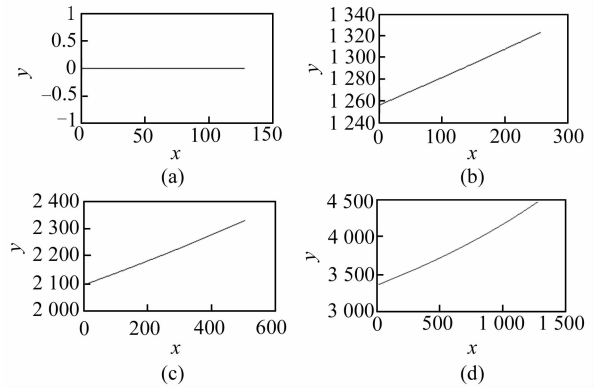


图2 MVLL算法的匹配走向(模拟参数下的解算结果)

Fig.2 Matching Line of MVLL Algorithm



图3 MVLL算法的匹配走向(同一特征、不同视角)

Fig.3 Matching Line of MVLL Algorithm

异,即相似内容较少。而对于建筑物屋底,由于地表连续,屋底周围的规则相关窗口所包含的影像内容相似部分较多,于是,在利用影像提取数字表面模型(digital surface model, DSM)等目标三维信息的过程中,对于地表断裂特征,在固定大小的正方形相关窗口条件下,MVLL算法更易于匹配获取特征底部的高程值,降低了信息提取的可靠性。

## 2 MVLL算法自适应窗口变化匹配策略

针对MVLL算法,本文尝试不断改变相关窗口参数,解决断裂特征的误匹配问题。文献[5-7]提出了适用于GC3和AMMGC多视匹配模型的相关参数自适应调整算法,该算法将相关窗口沿上、下、左、右4个方向扩展(改变大小),在匹配相关系数最大值 $\rho_{max}$ 、最大值与次局部最大值 $\rho'_{max}$ 的比值 $\rho_{1/2}$ 等参数的约束下,完成匹配工作。然而,当用于MVLL匹配模型时,该算法只能对部分断裂特征有效,对于另一些断裂特征,特征底部变化窗口的相关测度仍有可能高于其顶部变化窗口的相关测度,误匹配问题从理论上无法避免。如图4所示,图4(a)、4(b)为错误扩展方向,图4(c)为正确扩展方向,但是图4(a)、4(b)所示窗口的相关测度

仍然可能大于图 4(c)所示窗口的相关测度。

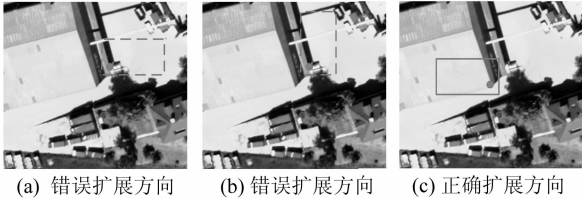


图 4 高大建筑物相关窗口扩展方向

Fig. 4 Window Extension Direction of a High Building

为进一步获取断裂特征在 MVLL 算法上的正确相关窗口扩展方向,提高匹配可靠性,本文将相关参数自适应调整算法扩展于 MVLL 匹配模型,并称为自适应窗口变化算法,具体步骤如下。

1) 选取匹配点,利用规则窗口进行 MVLL 匹配,计算  $\rho_{max}$ 、 $\rho'_{max}$  和  $\rho_{1/2}$ 。给定相关系数阈值  $\xi_1$  (一般给定为 0.4) 和比值阈值  $\xi_2$  (一般给定为 1.2),当满足以下条件时,认为当前匹配点为地表断裂特征点:

$$\left\{ \begin{array}{l} \xi_1 < \rho_{max} < 0.9 \\ \xi_1 < \rho'_{max} < 0.9 \end{array} \right\} \cup \left\{ \begin{array}{l} \rho_{max} > 0.9 \\ \rho_{1/2} < \xi_2 \end{array} \right\} \cup \left\{ \begin{array}{l} \rho_{max} > \xi_1 \\ \rho'_{max} < \xi_1 \\ \rho_{1/2} < \xi_2 + \rho_{max} \end{array} \right.$$

2) 划分 4 扩展窗口或者 8 扩展窗口,扩展方向分别为 L、R、T、B 或者 L、R、T、B、LT、LB、RT、RB,分别对应于左、右、上、下、左上、左下、右上、右下方向。

3) 给定一个扩展方向  $d$ ,移动窗口,如  $d = L$  时,将匹配窗口的最右侧中心移动至匹配特征处,计算扩展窗口下的多像匹配参数  $\rho_{max}$ 、 $\rho'_{max}$  和  $\rho_{1/2}$ 。在窗口大小阈值(原始窗口大小的 1.5 倍)的限制下,如果  $\rho_{max}$  和  $\rho_{1/2}$  的数值均增加,窗口继续扩展,直到两参数数值均减小为止。

4) 如果  $\rho_{max} < \xi_1$ ,将该匹配点标记为误匹配点;如果  $\rho_{max} > \xi_1$ ,且匹配参数不满足 1) 中的条件时,说明匹配准确,则计算匹配点的高程  $Z$ ;对于其他情况,计算方向  $d$  下  $\rho_{max}$  所对应的匹配点高程  $Z_d$ ,加至点集  $\{Z_d\}$ 。随后,给定另一个扩展方向,重复步骤 3),直至所有扩展方向结束为止。

5) 分析点集  $\{Z_d\}$ ,如果  $\max\{Z_d\} > 0$ , $d = \{L, R, T, B, LT, LB, RT\}$ ,则  $\max\{Z_d\}$  为断裂特征经过自适应窗口变化后的匹配高程。

### 3 实验与分析

#### 3.1 实验数据

本文选用两套实验数据,实验数据 1 为西安临潼实验区的 ADS40 航空数字影像,焦距为

62.5 mm,影像获取时间为 2006 年 7 月 30 日,测区平均高程为 600 m,地面采样间隔为 0.48 m,相对航高为 4 800 m,文中选用其中一条航带上的前视、下视与后视全色影像;实验数据 2 为 ADS40 相机(焦距同前)获取的瑞士 Wald Krich 实验区(由瑞士 Leica 公司提供)影像,影像获取时间为 2002 年 5 月 16 日,实验区平均高程为 650 m,地面采样间隔为 0.21 m,相对航高为 2 000 m,文中选用其中两条航带上的前视、下视与后视全色影像。

#### 3.2 匹配实验与分析

在实验数据 1 中,选取一个建筑物的拐角点,以  $15 \times 15$  大小的规则匹配窗口、0.5 m 的迭代步长、上下 20 m 的高程误差进行 MVLL 多视匹配实验,如图 5(a)所示,其中,“+”表示人工给定的初始匹配点(实际工作中是将地面划分规则格网,无需人工选点),“×”表示最终的匹配结果,直线段表示 MVLL 匹配算法在各张影像上的匹配走向,且下视图中,正方形窗口表示匹配窗口。

从图 5(a)可以看出,其 MVLL 匹配算法失效,匹配结果位于建筑物的屋底(以“×”表示)。在规则匹配窗口下,MVLL 匹配中相关系数的参数情况如表 2 所示。根据 MVLL 算法的原理,下视与后视(N-B)、下视与前视(N-F)像对予以选用,综合后的相关系数(MVLL)曲线参数  $\rho_{max}$  与  $\rho'_{max}$  均位于 0.4~0.9 以内。根据自适应窗口变化算法的原理,该匹配点需要进行相关窗口变化。

在同样的参数设置下,利用本文给出的自适应窗口变化算法,对该匹配点作 MVLL 多视匹配,匹配结果如图 5(b)所示。图 5(b)下视图中的长方形窗口表示匹配中使用的匹配窗口。

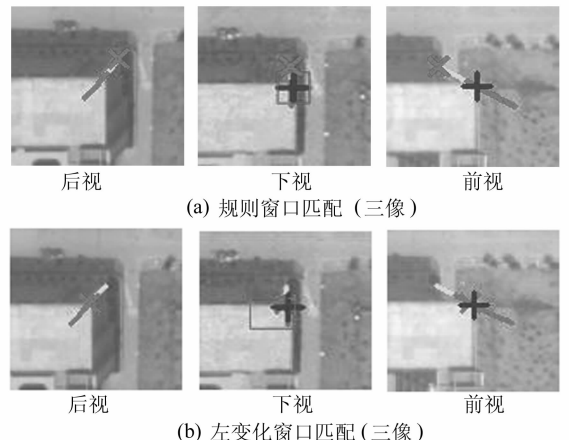


图 5 规则窗口和断裂特征 MVLL 左变化窗口匹配(三像)

Fig. 5 Regular and MVLL Left Extension Window Matching of Discontinuity Feature

MVLL 左变化窗口匹配中相关系数的参数情况如表 2 所示,可以看出,  $\rho_{max} > 0.9$  且  $\rho_{1/2} > 1.2$ , 这表明经窗口左变化后,匹配点成功匹配,且显著性较高。

位于建筑物的屋底(×表示)。

表 2 MVLL 匹配中相关系数参数与状态(三像)

Tab. 2 Parameters and Status of MVLL Correlation Coefficients

	$\rho_{max}$	$\rho'_{max}$	$\rho_{1/2}$	匹配状态
N-B	0.639 9	0.521 1	1.227 9	选用
N-F	0.775 1	0.673 0	1.152 7	选用
MVLL	0.725 5	0.649 6	1.116 8	窗口变化
变化后 MVLL	0.903 8	0.619 7	1.458 5	成功

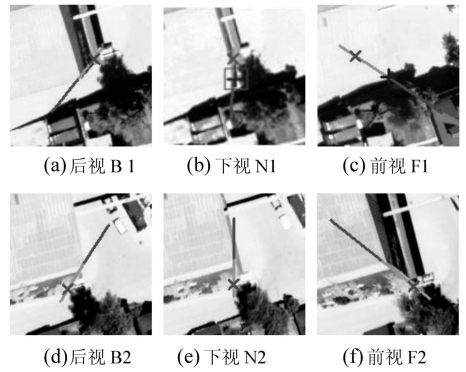


图 7 断裂特征 MVLL 规则窗口匹配(六像)  
Fig. 7 MVLL Regular Window Matching of Discontinuity Feature

图 6 给出了 MVLL 匹配算法在规则窗口与左扩展窗口下的相关系数曲线,图中横轴表示高差步长,步距为 0.5 m。从图 6(a)中可以看出,相关系数最大值在 -37 位置(屋底),且该峰值不明显,而图 6(b)中曲线的峰值在 +2 位置处(屋顶),且峰值突出,这表明经过窗口扩展后,该匹配点得以成功匹配。

由于规则窗口 MVLL 匹配相关系数参数符合自适应窗口变化条件,对该特征进行自适应窗口变化下的 MVLL 匹配,匹配结果如图 8 和表 3 所示。从表 3 中可以看出,经过窗口左变化后, MVLL 算法选用了第二航线的下视、前视影像和第一航线的后视、下视影像作多视匹配,匹配结果准确,如图 8 所示的匹配结果位于建筑物的屋顶(×表示)。

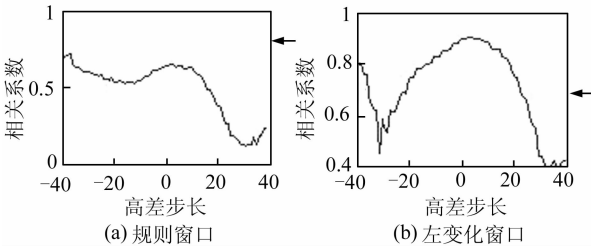


图 6 MVLL 匹配相关系数曲线图(三像)

Fig. 6 Graphs of Correlation Coefficients of MVLL Matching

随后,利用实验数据 2 对断裂特征点进行 MVLL 匹配实验,匹配参数的设置与符号含义与实验 1 相同。匹配结果如图 7 和表 3 所示。从表 3 中可以看出,在规则匹配窗口下, MVLL 算法选用了第二航线的三张影像与第一航线的下视影像进行多视匹配,匹配结果错误,如图 7 所示的匹配结果

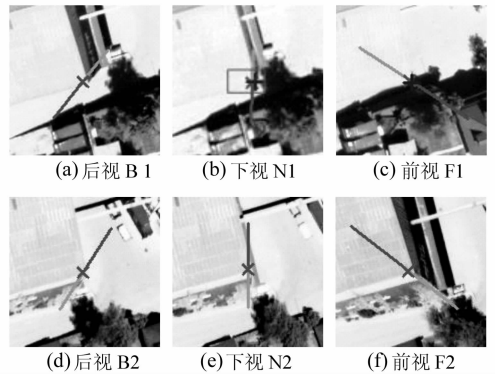


图 8 断裂特征 MVLL 左变化窗口匹配(六像)  
Fig. 8 MVLL Left Extension Window Matching of Discontinuity Feature

表 3 MVLL 匹配中相关系数参数与状态(六像)

Tab. 3 Parameters and Status of MVLL Correlation Coefficients

	规则窗口 MVLL					窗口左变化后 MVLL				
	N1-B1	N1-F1	N1-B2	N1-N2	N1-F2	N1-B1	N1-F1	N1-B2	N1-N2	N1-F2
$\rho_{max}$	0.335 4	0.397 1	0.663 9	0.736 6	0.680 4	0.971 8	0.345 3	0.326 3	0.832 8	0.967 7
$\rho'_{max}$	0.305 6	0.389 4	0.660 2	0.590 5	0.271 8	0.756 2	0.326 0	0.271 0	0.233 1	0.748 1
$\rho_{1/2}$	1.097 5	1.019 8	1.005 6	1.247 4	2.503 3	1.285 1	1.059 2	1.204 1	3.572 7	1.293 5
匹配状态	剔除	剔除	选用	选用	选用	选用	剔除	剔除	选用	选用

图 9 给出了该断裂特征点在规则窗口和左变化窗口下 MVLL 匹配相关系数曲线,图中横轴表示高差步长,步距为 0.5 m。从图 9(a)中可以看出,相关系数最大值在 -25 位置(屋底),且该峰

值不明显,而图 9(b)中的曲线峰值在 +2 位置处(屋顶),且峰值十分突出。这表明经过窗口扩展后,该点得以成功匹配。

以上实验表明,在直线匹配走向和自适应窗

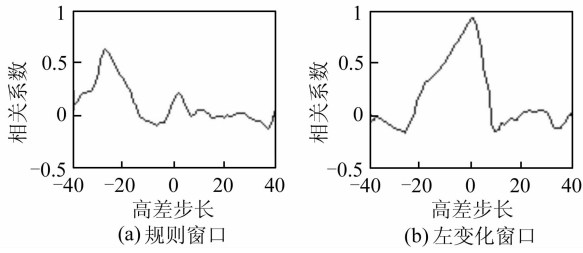


图 9 MVLL 匹配相关系数曲线图(六像)

Fig. 9 Graphs of Correlation Coefficients of MVLL Matching

口变化算法的辅助下, MVLL 算法能够在一定程度上避免地表断裂特征的误匹配问题, 其算法性能得到了较大改善。然而, 本文给出的自适应窗口变化算法无法直接获取变化窗口的扩展方向, 只是通过多个方向扩展的手段选取最优结果。为了进一步提高自适应窗口变化算法的实用性, 需要就地地表断裂特征的准确判断、匹配窗口的形状以及扩展方向的智能获取等做进一步研究。

### 参 考 文 献

- [1] 张祖勋. 从数字摄影测量工作站 (DPW) 到数字摄影测量网格 (DPGrid)[J]. 武汉大学学报·信息科学

版, 2007, 32(7): 565-571

- [2] 郑顺义, 张祖勋, 张剑清. 基于物方影像匹配和概率松弛的断面自动提取[J]. 测绘信息与工程, 2004, 29(2): 26-27
- [3] 纪松, 范大昭, 张永生, 等. 多视匹配 MVLL 算法及其在 ADS40 线阵影像中的运用[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2009, 34(1): 29-31
- [4] 张祖勋, 张剑清. 数字摄影测量学[M]. 武汉: 武汉测绘科技大学出版社, 1995
- [5] Zhang Li. Automatic Digital Surface Model (DSM) Generation from Linear Array Images [D]. Zurich: Swiss Federal Institute of Technology Zurich, 2005
- [6] Zhang Li, Gruen A. Multi-image Matching for DSM Generation from IKONOS Imagery [J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2006, 60: 195-211
- [7] 戴晨光, 贾新梅, 史新元, 等. 三线阵影像多视匹配 AMMGC 优化模型[J]. 测绘科学技术学报, 2008, 25(5): 376-379

第一作者简介: 纪松, 博士生, 现主要从事摄影测量与遥感多视匹配的理论研究工作。

E-mail: jisong\_chxy@163.com

## Self-adaptive Window Extension Strategies of Discontinuity Features for MVLL Algorithm

Ji Song<sup>1</sup> FAN Dazhao<sup>1,2</sup> ZHANG Yongsheng<sup>1</sup> LIU Hangye<sup>1,3</sup>

(1) Institute of Surveying and Mapping, Information Engineering University, 66 Middle Longhai Road, Zhengzhou 450052, China)

(2) Institute of Remote Sensing and GIS, Peking University, 5 Yiheyuan Road, Haidian District, Beijing 100871, China)

(3) Jiangxi Province Key Lab for Digital Land, East China Institute of Technology, 56 Xuefu Road, Fuzhou 344000, China)

**Abstract:** Matching line of MVLL algorithm was investigated for line-array CCD images, and it can be concluded that the matching line was the line between top feature and its corresponding bottom feature and can be regarded as a straight line. For MVLL algorithms, the difficulties of discontinuity feature that usually matched to the bottom were analyzed, and the algorithm of self-adaptive adjustment of correlation parameters was improved. After the process of self-adaptive window extension algorithm was given. The matching experiments were done on discontinuity features using two ADS40 line-array image datasets. The results show that, after applying the self-adaptive window extension algorithm, discontinuity features could be successfully matched and the self-adaptive function of MVLL algorithm was thus enhanced.

**Key words:** MVLL; matching line; discontinuity feature; window extension; correlation coefficients