

武汉大学学报(信息科学版)

Geomatics and Information Science of Wuhan University

ISSN 1671-8860, CN 42-1676/TN

## 《武汉大学学报(信息科学版)》网络首发论文

题目: 半全局约束下的多基线立体影像 MVLL 匹配方法  
作者: 纪松, 张永生, 杨喆, 戴晨光  
收稿日期: 2020-09-09  
网络首发日期: 2022-05-07  
引用格式: 纪松, 张永生, 杨喆, 戴晨光. 半全局约束下的多基线立体影像 MVLL 匹配方法[J/OL]. 武汉大学学报(信息科学版).  
<https://kns.cnki.net/kcms/detail/42.1676.TN.20220507.1611.003.html>



**网络首发:** 在编辑部工作流程中, 稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定, 且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式(包括网络呈现版式)排版后的稿件, 可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定; 学术研究成果具有创新性、科学性和先进性, 符合编辑部对刊文的录用要求, 不存在学术不端行为及其他侵权行为; 稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准, 正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性, 录用定稿一经发布, 不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容, 只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

**出版确认:** 纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊(光盘版)》电子杂志社有限公司签约, 在《中国学术期刊(网络版)》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版, 以单篇或整期出版形式, 在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊(网络版)》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物(ISSN 2096-4188, CN 11-6037/Z), 所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

## 引用格式：

纪松, 张永生, 杨喆, 等. 半全局约束下的多基线立体影像 MVLL 匹配方法[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2022, DOI: 10.13203/j.whugis20200478 (JI Song, ZHANG Yongsheng, YANG Zhe, et al. MVLL Match Method for Multi-baseline Stereo Imagery Based on Semi-global Constraint [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2022, DOI: 10.13203/j.whugis20200478)

# 半全局约束下的多基线立体影像 MVLL 匹配方法

纪松<sup>1</sup> 张永生<sup>1</sup> 杨喆<sup>2</sup> 戴晨光<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 信息工程大学, 河南 郑州 450001

<sup>2</sup> 西安测绘研究所, 陕西 西安 710054

**摘要：**在多基线立体影像 MVLL 匹配过程中, 将物方空间点沿地面铅垂线上的准确高程搜索, 等效至像方空间沿核线方向上的准确视差搜索, 进行影像匹配测度计算与物方半全局约束优化, 获取整体最优条件下的多基线立体影像匹配结果, 实现半全局约束下的多基线立体影像 MVLL 匹配。采用多类型地形特征与局部区域影像进行匹配实验与对比分析, 实验结果表明, 本文方法能够对多类型地形特征的物方空间匹配测度进行优化, 获取更加可靠的匹配结果, 具有更高的影像匹配性能。

**关键词：**半全局; 多基线; MVLL; 物方空间; 约束

**中图法分类号：**P237

**文献标识码：**A

多基线立体影像匹配方法是计算机视觉和摄影测量中三维场景恢复的重要技术方法, 该方法能够利用多视角影像提供的冗余信息, 覆盖信息盲区, 生成与 LiDAR 相媲美的点云数据, 近年来得到了广泛的研究与应用<sup>[1]</sup>。

按照处理单元的不同, 多基线立体影像匹配方法可以分为单立体像对匹配融合方法、多立体像对整体匹配方法两大类<sup>[1]</sup>。单立体像对匹配融合方法的核心思想是对多度重叠影像两两匹配, 获取多个匹配视差图(深度图), 通过视差图融合来获取多基线立体匹配结果; 该方法主要研究内容包括单立体像对匹配与视差图获取、视差图融合等, 典型应用系统有 SURE、像素工厂(Pixel Factory)等<sup>[2]</sup>。为了提高匹配结果的可靠性, 单立体像对匹配融合方法通常采用全局匹配算法, 如动态规划法(Dynamic Programming)、图割法(Graph Cut)、置信传播法(Belief Propagation)及半全局匹配法(Semi Global Matching, SGM)等<sup>[3-8]</sup>, 进行优化处理。

多立体像对整体匹配方法采用影像之间固有的几何约束关系, 在像方空间基准或者物方空间基准下, 通过匹配测度的整体性计算与分析来获取匹配结果, 主要包括“几何约束互相关”(Geometrically Constrained Cross Correlation, GC<sup>3</sup>)<sup>[9]</sup>、“多视铅垂

线轨迹法”(Multi-view Vertical Line Locus, MVLL)<sup>[10]</sup>以及 PMVS (Patch Based Multi-view Stereopsis)<sup>[11]</sup>, MicMac<sup>[12]</sup>等匹配方法。其中, GC<sup>3</sup> 和 MVLL 匹配方法采用影像间的“准核线”、“铅垂线”几何约束, 计算局部匹配窗口在多张影像中的“归一化互相关均值”(Sum of Normalized Cross Correlation, SNCC)匹配测度<sup>[12-13]</sup>, 分析并获取多基线立体影像匹配结果; PMVS 和 MicMac 匹配方法则根据构像模型, 计算匹配面元与影像像素的对应关系及其“归一化互相关”(Normalized Cross Correlation, NCC)匹配测度<sup>[14]</sup>, 分析并获取多基线立体影像匹配结果。在匹配测度的计算过程中, GC<sup>3</sup>, MVLL, PMVS 和 MicMac 匹配方法均使用了局部影像匹配窗口中的灰度信息, 且匹配窗口灰度信息相互独立, 因此属于局部影像匹配方法。

与全局影像匹配方法相比, 局部影像匹配方法的匹配基准是相互独立的, 且匹配过程没有考虑局部影像场景的光滑性、整体影像场景一致性和最优性等问题, 匹配结果中往往存在着较多的误匹配和粗差。为此, GC<sup>3</sup>, MVLL, PMVS 等多立体像对整体匹配方法虽然能够利用多视影像提供的冗余信息, 在一定程度上提高影像匹配可靠性, 但是误匹配结果和匹配粗差依然广泛存在, 需要进一步优化处理<sup>[15-20]</sup>。

**收稿日期：**2020-09-09

**项目资助：**国家自然科学基金面上项目(41971427), 高分遥感测绘应用示范系统(二期)(42-Y30B04-9001-19/21)。

**第一作者：**纪松, 博士, 副教授, 主要从事多基线立体影像匹配理论与方法研究。E-mail: jisong\_chxy@163.com

**通讯作者：**张永生, 博士, 教授, yszhang2001@vip.163.com

本文提出了一种半全局约束下的多基线立体影像 MVLL 匹配方法,该方法通过立体像对之间固有的物方几何关系,在 MVLL 匹配方法的基础上,采用半全局影像匹配思想,对物方匹配单元实施高程一致性约束,将匹配方法的局部最优调整至整体最优,得到优化条件下的影像匹配结果,具有较高的匹配可靠性。

## 1 MVLL 匹配方法的半全局约束策略及方法步骤

### 1.1 MVLL 匹配方法及其特点

“多视铅垂线轨迹法”(Multi-view Vertical Line Locus, MVLL)是一种物方多基线立体匹配方法,该方法从多基线角度对传统的铅垂线轨迹法 (Vertical Line Locus, VLL)<sup>[10]</sup>进行了改进,在利用多张影像信息的同时,从地面铅垂线的投影辐射线方向,对影像匹配的搜索范围进行约束,以获取精确、可靠的立体匹配结果,该方法的详细匹配过程见文献[10]。与单立体影像匹配方法相比, MVLL 匹配方法的可靠性得到了较大的提高;但是,在影像匹配过程中,该方法的各个待匹配地面点相互独立,没有使用邻近地面点的匹配信息,难免发生匹配错误,仍然具有一定的改进空间。

### 1.2 SGM 影像匹配方法

SGM 是一种基于像方的单立体影像匹配方法,该方法通常用于经过核线纠正后的两张重叠影像,通过视差代价函数的构造和多路径聚合,寻找全局最优值,获取密集同名像点<sup>[21-22]</sup>。SGM 方法中,相邻的待匹配像点不再是相互独立关系,而且互为约束、相互预测。该方法的一个最大特点是通过多个方向(通常为 8 方向或者 16 方向)的一维平滑约束来近似二维平滑约束,极大地简化了全局最优解的寻找过程,因而在地貌形状的保持上具有一定的优势;该方法还可以与金字塔影像匹配方法相结合,利用金字塔影像匹配结果提供匹配初值,减少视差搜索范围,提高匹配效率,具体匹配过程见文献[23]。

### 1.3 MVLL 匹配方法中的半全局约束策略

本文借鉴 SGM 方法思路,对 MVLL 方法进行调整<sup>[23]</sup>,使其既能采用局部铅垂线约束,又能进行全局性约束,进一步提高 MVLL 匹配方法的匹配性能。本文将调整后的方法称之为“多分辨率半全局多视铅垂线轨迹法”(SGM-MVLL)方法,其匹配模型如图 1 所示。

图 1 中给出了位于同一航带 (Strip1 航带) 上的三张三线阵影像,原始影像记为  $Strip1-I^0$ ,

$Strip1-I^1$  和  $Strip1-I^2$ ; 三线阵影像的金字塔影像记为  $Strip1-I^0$ ,  $Strip1-I^1$  和  $Strip1-I^2$  ( $i=1, 2, \dots, n$ ), 其中  $n$  为金字塔影像的层次;  $P_0$  为待匹配分析的地面点,  $Z_0$  为  $P_0$  点的高程初值,  $\Delta Z$  为  $P_0$  点的高程误差范围, 且  $P_0$  点的高程误差范围为  $[Z_0 - \Delta Z, Z_0 + \Delta Z]$ ;  $SNCC^i$  ( $i=0, 1, 2, \dots, n$ ) 为地面点  $P_0$  在第  $i$  层金字塔影像上的匹配测度曲线;  $x$  轴,  $y$  轴和  $d$  轴构成的三维空间为匹配测度曲线  $SNCC$  对应的高程搜索空间。

在金字塔影像匹配测度曲线  $SNCC^i$  ( $i=0, 1, 2, \dots, n$ ) ( $i$  位金字塔影像层次) 分析过程中, 本文采用物方虚拟至像方约束、物方半全局多路径聚约束策略, 实现 MVLL 匹配方法半全局优化。

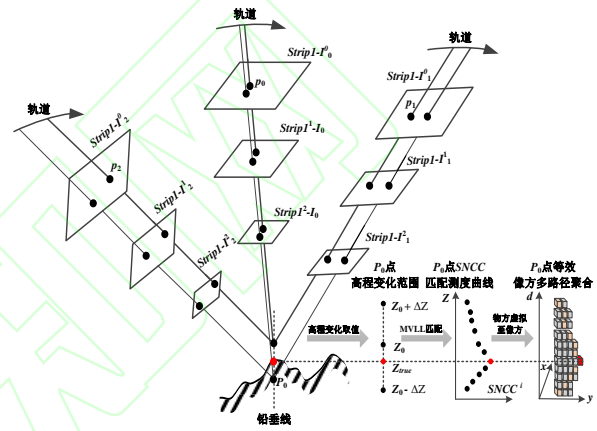


图 1 SGM-MVLL 多基线立体匹配模型

Fig.1 Multi baseline stereo matching model of SGM-MVLL

### 1.3.1 MVLL 匹配方法的物方虚拟至像方约束

MVLL 匹配方法的物方虚拟至像方约束策略如图 2 所示。该策略将 MVLL 匹配测度的计算过程等价于 SGM 匹配测度的计算过程, 实现 MVLL 方法的匹配测度计算过程的物方向像方虚拟。图 2 中,  $P_0$  为地面上一点, 其平面坐标为  $(X_p, Y_p)$ 、高程坐标初值为  $Z_0$ 、高程误差范围为  $\Delta Z$ ;  $P_0$  点的平面坐标为  $(X_p, Y_p)$  已知, 且为固定值;  $P_0$  点的准确高程坐标为  $Z_p$ , 该值未知, 需要通过影像匹配来获取;  $P_0$  点的地面铅垂线向  $n$  张匹配影像投影, 投影辐射线上的像点为  $(x_i, y_i)$ ,  $i=1, 2, \dots, n$ 。通过图 2 所示的虚拟方法, 本文采用如下两种等价手段, 将 MVLL 方法的多像匹配测度计算过程等价于 SGM 方法的两张核线影像匹配测度计算过程。

等价手段一: 以地面点  $P_0$  的平面坐标  $(X_p, Y_p)$  作为固定的物方约束, 将其等价于 SGM 匹配方法中的基准像点 (如图 2 中的  $(X_p, Y_p)$  与  $(x_p, y_p)$  的对应关系)。

等价手段二: 根据地地面点  $P_0$  的高程变化区间所对应的投影辐射线  $(x_i, y_i)$ ,  $i=1, 2, \dots, n$ ; 选取其中



一张影像作为基准影像，其余影像作为搜索影像，计算多张影像在投影辐射线上的  $SNCC$  匹配测度（通过  $NCC$  匹配测度来获取），并将该匹配测度等价于等效核线影像获取的匹配测度，实现地面高程点变化区间与核线影像像点搜索区间的等价（如图 2 中的地面点  $P_0$  与等效核线影像上的①②③,...,⑧对应关系）。

该约束策略的意义为：借用 MVLL 方法的多像综合处理能力，解决了 SGM 匹配方法只能两两影像匹配的难题，实现了任意多张影像的整体性 SGM 匹配测度的统一计算，为 SGM 匹配方法的多基线立体匹配处理提供了一种新的技术途径，也为 MVLL 匹配方法的物方半全局多路径聚合约束提供了基础。

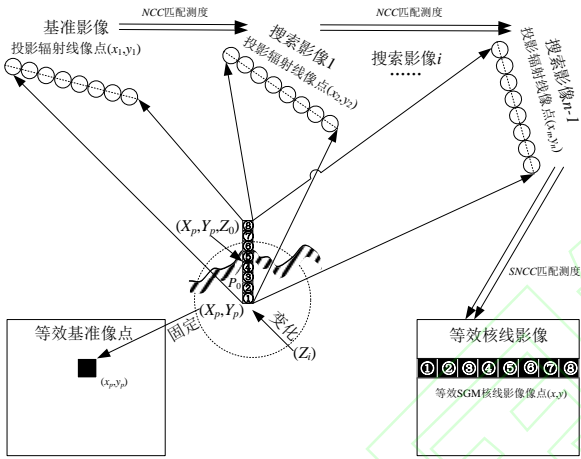


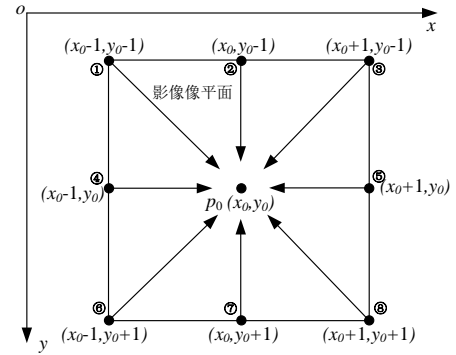
图 2 MVLL 匹配测度计算过程的物方虚拟至像方

Fig.2 Virtual object space to image space in the calculation of MVLL matching measure

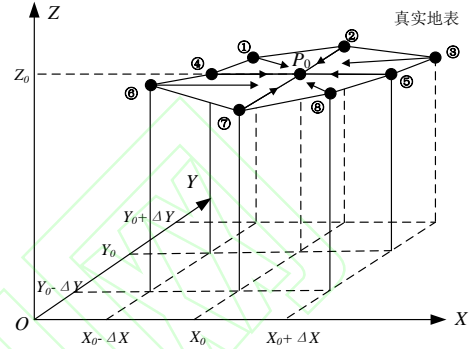
### 1.3.2 MVLL 匹配方法的物方半全局多路径聚合约束

本文将匹配测度的 SGM 像方多路径聚合转换为 MVLL 的物方多路径聚合（以 8 路径为例），即将像点  $p_0(x_0, y_0)$  的 8 邻域像点  $((x_0-1, y_0-1), (x_0, y_0-1), (x_0-1, y_0), \dots, (x_0+1, y_0+1))$  等价于物点  $P_0(X_0, Y_0, Z_0)$  的 8 邻域物点  $((X_0-\Delta X, Y_0+\Delta Y, Z_1), (X_0, Y_0+\Delta Y, Z_2), (X_0+\Delta X, Y_0+\Delta Y, Z_3), \dots, (X_0+\Delta X, Y_0-\Delta Y, Z_8))$ ， $\Delta X$  和  $\Delta Y$  为物方规则格网间隔，在物方空间上进行匹配测度的半全局多路径聚合，如图 3 所示。具体等价方法可表述如下：

等价方法：将 SGM 的像方相邻点等价于 MVLL 的物方相邻点，采用 8 路径或者 16 路径，实现 MVLL 匹配测度的聚合分析（如图 4 (a) 和 (b) 中的①②③,...,⑧及其箭头所示的八条聚合路径的对应关系）。



(a) SGM 像方半全局多路径聚合



(b) MVLL 物方半全局多路径聚合

图 3 SGM 与 MVLL 半全局多路径聚合约束

Fig.3 SGM and MVLL semi global multi path aggregation constraints

### 1.4 半全局约束下的 MVLL 匹配方法及步骤

根据上述分析，在物方虚拟至像方和物方半全局多路径聚合的约束下，多基线立体影像 MVLL 匹配方法主要包括以下七个步骤。

**步骤一：**选用多张覆盖有同一地面场景的影像，通过影像成像模型、定位参数以及平均高程，计算地面场景的平面坐标范围；按照设定大小的坐标间距（坐标间距的设定取决于匹配结果精度要求）划分地面场景，得到规则平面格网及其坐标点  $\{(X_0+c \times \Delta X, Y_0+r \times \Delta Y) | c=1, 2, 3, \dots, m; r=1, 2, 3, \dots, n\}$ ，其中  $(X_0, Y_0)$  为格网左下角点平面坐标， $\Delta X$  和  $\Delta Y$  为坐标间距， $m$  和  $n$  为格网的行列数量。

**步骤二：**选择成像视角与地面铅垂线夹角最小的影像作为基准影像  $I_0$ ，其余影像作为待匹配影像  $I_i (i=1, 2, \dots)$ ；通过  $I_0$  与  $I_i (i=1, 2, \dots)$  的特征点匹配，计算匹配影像的视差均值及其方差；随后根据同名特征点交会高程，计算地面场景的高程均值  $Z_{\text{mean}}$  和高程误差  $\Delta Z$ ，同时设置高程变化参数  $Z_0$ （参数大小通常为影像分辨率大小的二分之一）。

**步骤三：**在最顶层影像金字塔的视差均值低于阈值参数的条件下（通常为 10 像素），对影像  $I_i (i=0, 1, 2, \dots)$  进行金字塔处理，并通过  $Z_0$  计算各层金字塔影像对应的高程变化参数  $PZ$ 。

**步骤四：**顺序选取规则格网点( $X_c, Y_r$ )，给定点位高程  $Z_{cr}$  (对于最顶层金字塔影像， $Z_{cr}$  等于  $Z_{mean}$ ；对于其它金字塔影像层次， $Z_{cr}$  由上一层匹配结果传递得到)，根据影像成像模型以及定位参数，计算格网点( $X_c, Y_r$ )在影像  $I_i(i = 0, 1, 2, \dots)$  上的像点并映射至对应金字塔层次，得到像点  $p_i(i = 0, 1, 2, \dots)$ ；随后计算像点  $p_0$  与  $p_i(i = 1, 2, \dots)$  之间的相关系数测度均值  $SNCC$ 。

**步骤五：**对于选取的格网点( $X_c, Y_r$ )，按照对应金字塔层次的  $PZ$  大小，在高程取值区间  $[Z_{mean} - \Delta Z, Z_{mean} + \Delta Z]$  内，从低至高逐步变化格网点高程并重复步骤四，得到多个  $SNCC$  测度并构成匹配测度曲线 ( $SNCC$  曲线)；随后，按照本步骤方法，获取所有格网点  $\{(X_o + c \times \Delta X, Y_o + r \times \Delta Y) \mid c = 1, 2, 3, \dots, m; r = 1, 2, 3, \dots, n\}$  的  $SNCC$  曲线。

**步骤六：**采用物方虚拟至像方和物方半全局多路径聚合策略，将高程取值区间等效为视差取值范围，将  $SNCC$  曲线等效为匹配代价，在整个地面场景规则格网点的  $SNCC$  曲线上进行匹配代价聚合，计算最优等效视差图，转换得到所有规则格网点的匹配高程。

**步骤七：**对于地面场景中每一个规则格网点，从影像数据的最顶层金字塔开始，重复步骤四至步骤六，直至最底层金字塔影像 (即原始分辨率影像)，得到半全局约束下的多基线立体影像 MVLL 匹配结果。

## 2 实验与分析

### 2.1 实验数据

实验中采用了国内登封地区的天绘一号卫星三线阵全色影像数据，数据获取时间为 2015 年 7 月 1 日，其影像的地面分辨率为 5.0 米，影像数据的定位文件为“有理多项式参数”文件 (RPC)，文中分别利用了前视、下视与后视全色影像；同时，为了对实验结果进行精度分析与评价，实验中还采用了登封地区的高精度地形数据 (“中国 (嵩山) 卫星遥感定标场” 高精度地形数据，由 2015 年 4 月获取的 0.10 米分辨率航空无人机影像处理生成，数据的整体高程精度为 0.5 米)。

### 2.2 实验与分析

实验参数设置：给定前视影像、下视影像上的同名点，计算同名点的地面坐标，并将其设置为初始地面点坐标；将地面范围划分为 5 米间距的规则平面格网，计算初始地面点的八邻域地面点；初始地面点表示为 (0, 0) 点，其八邻域地面点分别表示为 (-1, -1), (-1, 0), (-1, 1), (-1, 0), (1, 0), (-1, 1), (0, 1), (1, 1) 点；实验中高程值的变化范围 205 米，即在初始高程的基础上分别降低 100 米和升高 105 米，同时根据影像的地面分辨率大小，设置高程变化值为 5 米，即高程迭代次数为 41 次；在 (105, 310] 高程区间内，第一次迭代时的高程为 110 米，称为第 1 迭代高程，第  $i$  次迭代时的高程为  $105 + 5 \times i$  米，称为第  $i$  迭代高程 ( $i = 1, 2, 3, \dots, 41$ )；SGM 匹配测度采用 8 路径聚合，且对于某一特定点，以该点为中心，采用长 100 像素、宽 100 像素范围内的影像进行匹配测度聚合；SGM 匹配测度聚合时，将  $SNCC$  匹配测度进行了放大 (乘以 100)，并利用数值 100 减去该匹配测度，确保每一点的匹配测度位于 [0, 200] 之间 (数值越小匹配越可靠)，避免多路径聚合时出现负值，造成聚合错误；考虑到卫星影像数据地表连续性较强，SGM 匹配测度聚合时地表光滑约束分别取值为 6 和 20 (等效于  $SNCC$  匹配测度最大值的 6% 和 20%，为经验取值)，分别代表相邻地表、非相邻地表不光滑惩罚系数<sup>[21-23]</sup>；在其它影像数据处理中，相应参数可以根据需要进行变化。

#### 2.2.1 MVLL 匹配测度像方虚拟与连续性分析实验

从实验数据中选取同名像点，如图 4 (a) 和图 4 (b) 中“×”所示的点，计算其所对应地面点 (点①) 的地面坐标初值，通过改变高程值的变化范围，采用 MVLL 匹配方法，计算该地面点及其八邻域地面点的  $SNCC$  匹配测度，结果如图 5 所示。

$SNCC$  匹配测度搜索范围 (即 MVLL 投影辐射线) 如图 4 (a)、图 4 (b) 和图 4 (c) 中的直线所示，由于图 4 (b) 中的图像为下视图像，地面点高程变化引起的像点变化较小，因此搜索范围几乎未变化。

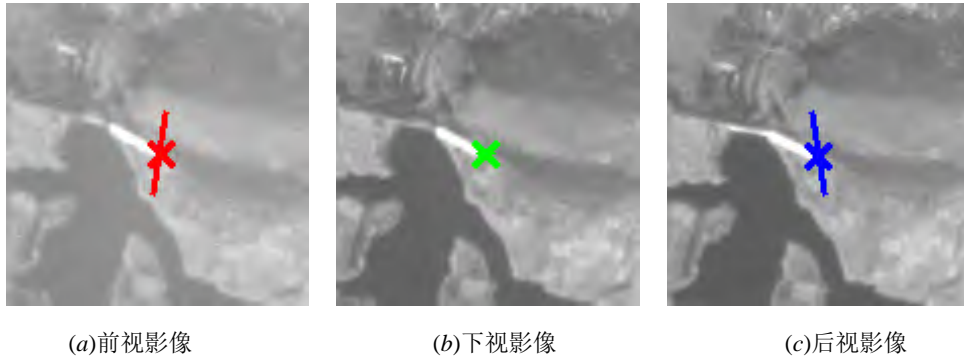


图 4 地面点初值对应的像点位置及其 MVLL 投影辐射线 (点①)

Fig.4 Image point position and its MVLL projection radiation line corresponding to initial ground point (point ①)

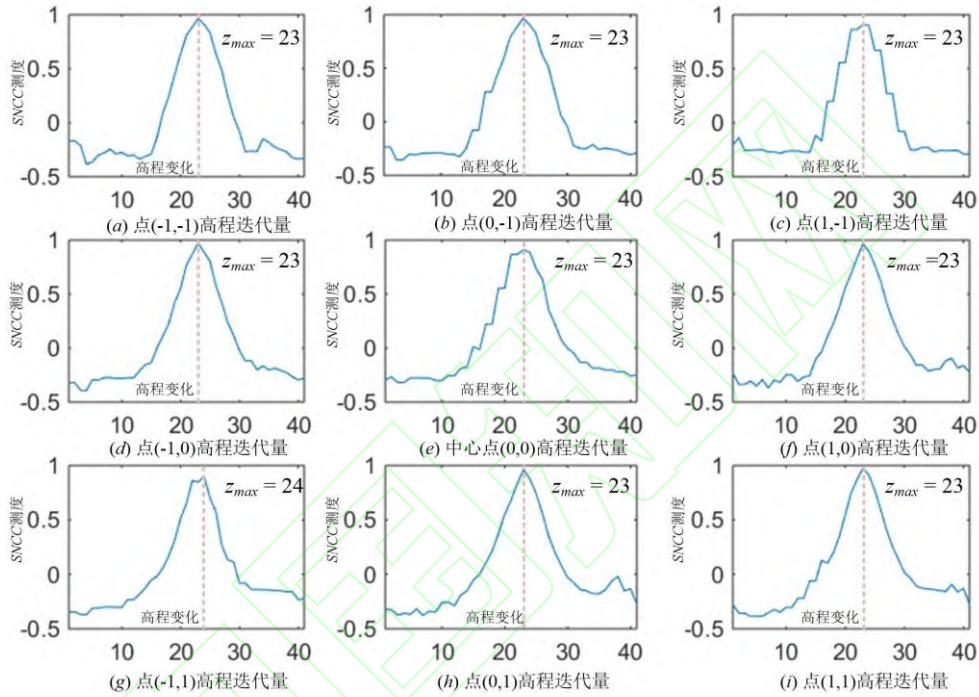


图 5 地面点及其八邻域点的 SNCC 匹配测度曲线 (点①)

Fig.5 SNCC matching measure curve of ground point and its eight neighborhood points (point ①)

图 5 中, 每幅图像的横轴为迭代高程变化量, 纵轴为匹配测度, 下同。从图 5 中可以看出, 地面点①的 SNCC 匹配测度曲线 (如图 5 (e) 所示) 与其八邻域地面点的 SNCC 匹配测度曲线 (分别如图 5 (a) ~图 5 (d), 图 5 (f) ~图 5 (i) 所示) 具有明显的匹配测度峰值, 且峰值位置都位于第 23 迭代 ( $z_{\max} = 23$  表示) 高程处, 即该地面点能够有效得到准确的匹配结果。该实验表明, MVLL 匹配方法将物方虚拟至像方后, 相邻地面点的 SNCC 匹配测度曲线具有较强的一致性, 可以采用半全局约束方法进行优化处理。

### 2.2.2 多类型地面特征的半全局约束 MVLL 匹配实验

从实验数据的不平坦区域 (断裂特征) 中选取

同名像点, 如图 6 (a) 和图 6 (b) 中“×”表示的多山脊交会的山顶点, 通过给定同名点坐标得到其所对应地面点 (点②) 的地面初值。同样, 通过改变高程值的变化范围, 采用 MVLL 匹配方法, 计算该地面点及其两邻域地面点 (为了采用有效篇幅表示, 实验中只选用了 (-1, 0), (1, 0) 两邻域地面点) 的 SNCC 匹配测度, 并对该 SNCC 进行半全局 8 路径聚合分析。其中, 点②及其两邻域地面点的 SNCC 匹配测度如图 7 (a), 图 7 (b) 和图 7 (c) 所示; 点②及其两邻域地面点的半全局 8 路径聚合分析结果如图 7 (d), 图 7 (e) 和图 7 (f) 所示。



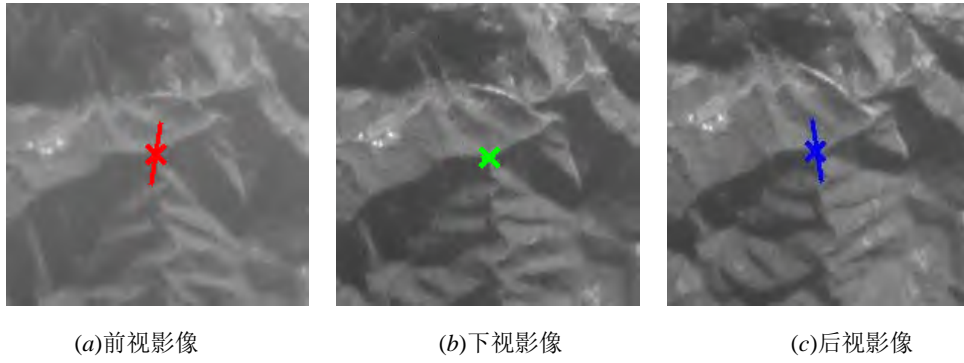


图 6 地面点初值对应的像点位置及其 MVLL 投影辐射线（点②）

Fig.6 Image point position and its MVLL projection radiation line corresponding to initial ground point (point ②)

从图 7 (a), 图 7 (b) 和图 7 (c) 中可以看出, 对于不平整地表区域中的地面点②, 由于使用了多张影像进行 MVLL 匹配, 且匹配过程中使用了投影辐射线约束 (如图 6 中的线段表示的搜索范围), 其匹配测度曲线具有明显峰值; 但是由于该地面点位于不平整地表位置, 其最佳匹配结果出现了多处峰值, 如图 7 (a) 和图 7 (b) 中的最佳匹配位置位于第 21 和 22 高程迭代处, 对准确匹配解获取的

造成了干扰。采用半全局 8 路径聚合分析后, 如图 7 (d)、图 7 (e) 和图 7 (f) 所示, 半全局 8 路径聚合后的匹配测度曲线具有明显的唯一最小值, 地面点②及其两邻域地面点的匹配干扰问题消除, 表明半全局多路径匹配测度聚合分析虽然基于地表连续条件, 但是对于不平整的地面点, 同样能够获得准确匹配结果。

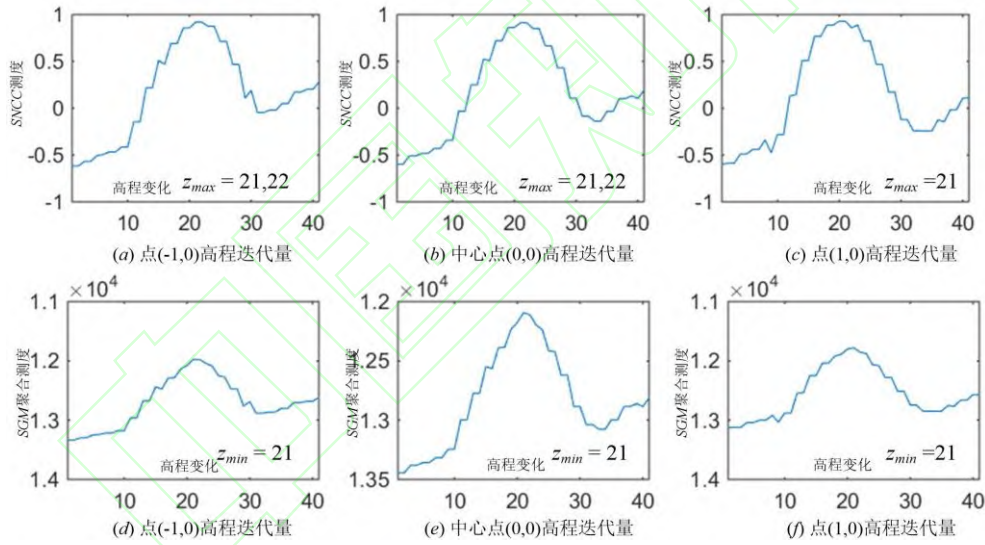


图 7 地面点及其两邻域点的 SNCC 匹配测度曲线与 SGM 聚合测度曲线（点②）

Fig.7 SNCC matching measure curve and SGM aggregation curve of ground point and its two neighborhood points (point ②)

从实验数据中的相似性纹理的区域中选取同名像点, 如图 8 (a) 和图 8 (b) 中“x”表示的地面点, 通过给定同名点坐标得到其所对应地面点 (点③) 的地面初值, 其 MVLL 匹配过程中的投影辐射

线约束如图 10 中的线段表示, 该点及其两邻域地面点 ((-1, 0), (1, 0) 邻域) 的 SNCC 匹配测度及其半全局 8 路径聚合后的匹配测度如图 9 所示。

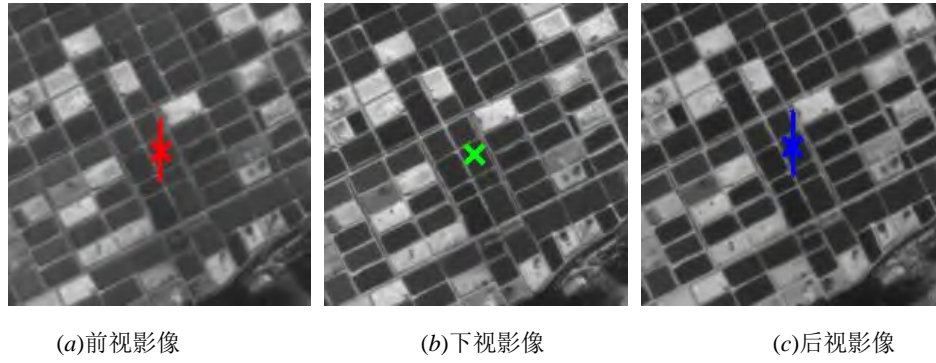


图8 地面点初值对应的像点位置及其 MVLL 投影辐射线（点③）

Fig.8 Image point position and its MVLL projection radiation line corresponding to initial ground point (point ③)

图 8 (b) 中, 由于下视影像的投影辐射线较短, 地面点③所对应的影像像点几乎位于同一像点位置, 且该像点位置所对应的匹配窗口几乎为纯灰度纹理窗口, 变化的匹配信息较少, 造成 MVLL 匹配发生错误: 如图 9 (a)、图 9 (b) 和图 9 (c) 中, SNCC 匹配测度曲线具有明显的多峰值 (纹理相似、匹配窗口信息缺失造成的匹配测度曲线震荡), 且点③及其两邻域地面点的最佳高程位置分别位于第 17、第 5 和第 6 高程迭代处, 匹配结果明显错误。在以点③为中心的较大地面区域内 (长 100、宽 100 的地面格网范围), 采用半全局 8 路径匹配测度聚合方法对 SNCC 匹配结果进行聚合分析, 点③及其

两邻域地面点的半全局聚合结果如图 9 (d)、图 9 (e) 和图 9 (f) 所示; 从结果中可以看出, 半全局聚合得到的 SGM 匹配测度曲线具有明显的峰值, 在一定程度上消除了 SNCC 匹配测度曲线的震荡, 且最佳高程位置位于第 15 高程迭代处, 得到了准确匹配结果, 实现了对 MVLL 匹配方法的优化。

从实验数据的山体遮挡区域中选取同名像点, 如图 10 (a) 和图 10 (b) 中“x”表示的地面点, 通过给定同名点坐标得到其所对应地面点 (点④) 的地面初值, 其 MVLL 匹配过程中的投影辐射线约束如图 10 中的线段表示。

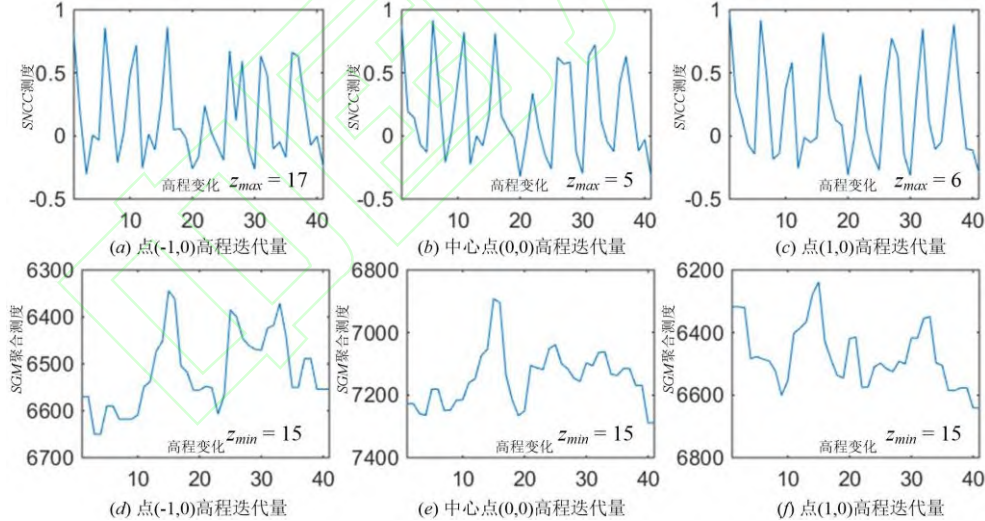


图9 地面点及其两邻域点的 SNCC 匹配测度曲线与 SGM 聚合测度曲线 (点③)

Fig.9 SNCC matching measure curve and SGM aggregation curve of ground point and its two neighborhood points (point ③)

从图 10 中可以看出, 由于影像成像视角不一致, 部分山体区域在前视影像上被遮挡。此时, 下视影像和前视影像、下视影像和后视影像的 NCC 匹配测度以及三张影像的 SNCC 匹配测度分别如图 11 (a)、图 11 (b) 和图 11 (c) 所示。从图 11 (a) 中可以看出, 由于点④在前视影像上被遮挡, 下视影像和前视影像的 NCC 匹配测度极值较小, 且匹

配测度曲线极值位置位于第 3 和第 4 高程迭代处, 明显偏移高程初值, 发生匹配错误; 从图 11 (b) 和图 11 (c) 中可以看出, 下视影像和后视影像的 NCC 匹配测度、三张影像的 SNCC 匹配测度均具有匹配测度曲线峰值, 且匹配测度曲线极值位置位于第 34 高程迭代附近, 匹配结果准确, 避免了前视影像的遮挡问题。



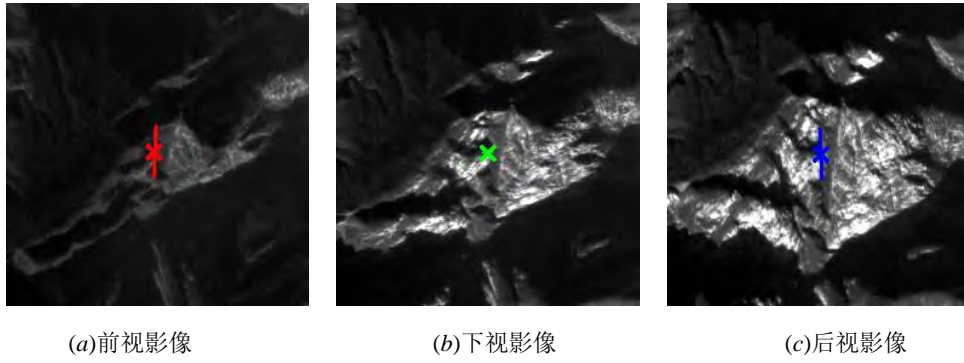


图 10 地面点初值对应的像点位置及其 MVLL 投影辐射线 (点④)

Fig.10 Image point position and its MVLL projection radiation line corresponding to initial ground point (point ④)

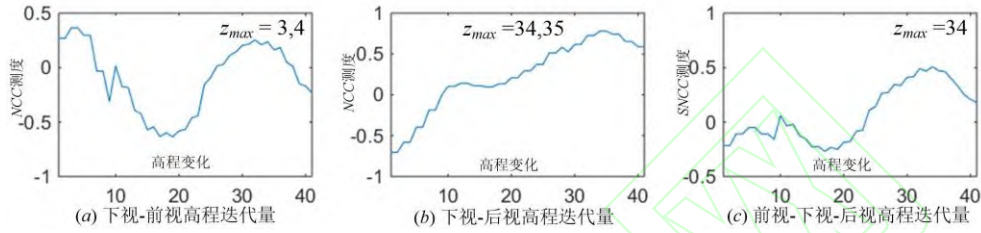


图 11 地面点的 NCC 匹配测度曲线 (点④)

Fig.11 NCC Matching measure of ground point (point ④)

对点④的 SNCC 匹配测度(即本文提出的 SGM 约束 MVLL 匹配方法)进行 SGM 聚合, 该点及其两邻域地面点  $((-1, 0), (1, 0))$  邻域的 SNCC 匹配测度及其半全局 8 路径聚合后的匹配测度如图 12 所示。从图 12 中可以看出, 三张影像 SNCC 匹

配测度的 SGM 聚合结果具有明显的单曲线峰值, 且峰值位置均位于第 35 高程迭代处, 匹配结果准确可靠。该实验表明, 半全局约束下的 MVLL 匹配方法则能够充分利用多张影像信息, 较好地消除影像遮挡带来的匹配问题, 获取准确可靠匹配结果。

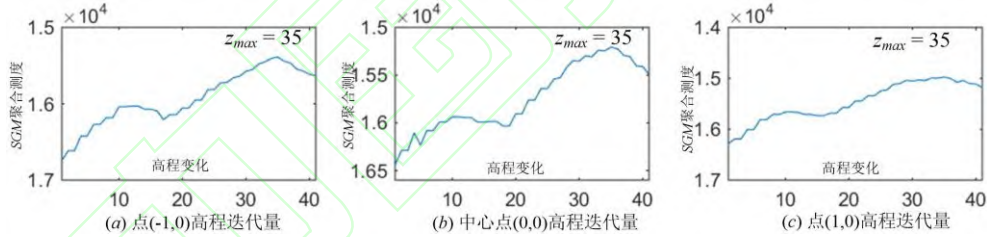


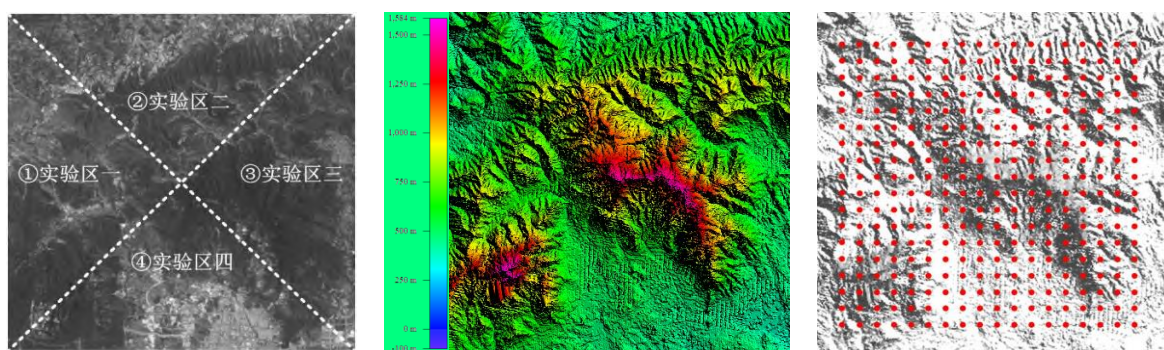
图 12 地面点及其两邻域点的 SGM 聚合测度曲线 (点④)

Fig.12 SGM aggregation curve of ground point and its two neighborhood points (point ④)

### 2.2.3 半全局约束下的多基线 MVLL 区域匹配试验

选取实验影像覆盖的局部地面区域(地面长和宽各 5 千米, 等效成长 1000 像素、宽 1000 像素范围), 并将该区域分成四个实验区(实验区一、二、三主体为山地, 实验区四主体为居民地), 采用本文给出的半全局约束下的 MVLL 匹配方法, 进行多基线立体影像匹配实验; 同时, 采用该实验区的高

精度地形数据作为基准, 从中选取并内插得到 324 个检查点, 对实验结果的高程精度进行检查, 结果如图 13 和表 1 所示。其中, 图 13 (a) 为地面覆盖区域对应的实验影像以及四个实验区划分情况, 图 13 (b) 为匹配结果的高程渲染图, 图 13 (c) 为实验区域高程检查点分布情况图; 表 1 为实验结果的高程精度统计结果。



(a) 区域匹配对应的实验影像 (b) 半全局优化后的匹配结果地形渲染图 (c) 高精度地形数据检查点分布

图 13 半全局约束下的多基线 MVLL 区域匹配结果图

Fig.13 Region matching results of multi baseline MVLL model under semi global constraints

表 1 半全局约束下的多基线 MVLL 区域匹配精度表

Tab.1 Region matching accuracy of multi baseline MVLL model under semi global constraints

	SGM 最大优化高程 (m)	SGM 最小优化高程 (m)	SGM 优化总点数 (10 <sup>6</sup> 个)	SGM 匹配高程精度 (m)	MVLL 匹配高程精度 (m)	SGM-MVLL 匹配高程精度 (m)
实验区一	107.50	0.00	0.69	8.02	7.72	7.15
实验区二	116.50	0.00	0.58	7.54	7.45	6.93
实验区三	124.00	0.00	0.63	8.27	7.93	7.11
实验区四	96.50	0.00	0.87	8.81	8.73	7.68
整体情况	124.00	0.00	2.77	8.40	8.12	7.24

从图 13 (b) 中可以看出, 半全局约束下的 MVLL 匹配结果能够较好地反映实验区的地形情况, 且高精度地形数据检查点分布比较均匀, 可对匹配结果的精度进行检查与分析。从表 1 中可以看出, MVLL 匹配结果在半全局约束下得到了优化, 整体最大优化高程为 124 米、最小优化高层为 0 米, 整体优化点数为  $2.8 \times 10^6$  个, 占总匹配点数的 28%; SGM 像方匹配结果、MVLL 物方匹配结果、SGM-MVLL 半全局物方匹配结果精度分别为 8.40 米、8.12 米和 7.24 米, SGM-MVLL 半全局物方匹配结果的精度最高, 表明半全局约束方法通过全局最优策略的使用, 提升了 MVLL 匹配方法的性能; 另外, 实验区四的 SGM 最大优化高程仅为 96.50m, 且 SGM 像方匹配结果、MVLL 物方匹配结果、SGM-MVLL 半全局物方匹配结果精度分别为 8.81m、8.73m 和 7.68m, 低于其它三个实验区的匹配结果精度, 主要原因在于该实验区以居民地为主体, 地物复杂、建筑物地形不连续, 限制了半全局整体性约束能力; 如何提高建筑物密集区域影像的半全局约束性能, 进一步改善多基线立体影像的 MVLL 匹配效果, 需要进一步研究。

### 3 结语

本文将多基线立体影像 MVLL 匹配方法的物方约束虚拟至像方约束, 在实现任意多张影像匹配

测度整体计算的同时, 采用半全局多路径聚合约束方法, 获取全局最优匹配结果, 实现了半全局匹配方法的全局优化特性、MVLL 匹配方法的多影像整体匹配特性的综合; 采用多类型地形特征进行了半全局约束下的多基线立体影像 MVLL 匹配实验, 实验结果表面: 半全局约束方法能够通过整体最优匹配解的获取, 提高 MVLL 匹配方法在地表断裂、特征相似、影像遮挡等地形位置处的匹配可靠性, 实现 MVLL 匹配方法的区域匹配精度整体性提升。

### 参考文献

- [1] Ji Song. Study on the Strategy and Improvement Method of Multi-View Matching Technology[D]. Zhengzhou: PLA Information Engineering University, 2012 (纪松. 多视匹配策略与优化方法研究[D]. 郑州: 解放军信息工程大学, 2012)
- [2] Rothermel M, Wenzel K, Fritsch D, et al. SURE: Photogrammetric Surface Reconstruction from Imagery[C]. Proceedings LC3D Workshop, Berlin, Germany, 2012
- [3] Gruen A. Development and Status of Image Matching in Photogrammetry[J]. The Photogrammetric Record, 2012, 27(137): 36-57
- [4] Chang J R, Chen Y S. Pyramid stereo matching network[C]//2018 IEEE/CVF Conference on Computer

- Vision and Pattern Recognition. Salt Lake City, UT, USA. 2018: 5410-5418
- [5] Yang Huachao, Yao Guobiao, Wang Yongbo. Dense Matching for Wide Base-Line Stereo Images Based on SIFT[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2011, 40(5): 537-543 (杨化超, 姚国标, 王永波. 基于 SIFT 的宽基线立体影像密集匹配[J]. 测绘学报, 2011, 40(5): 537-543)
- [6] Ai M Y, Hu Q W, Li J Y, et al. A Robust Photogrammetric Processing Method of Low-Altitude UAV Images[J]. *Remote Sensing*, 2015, 7(3): 2302-2333
- [7] Seitz S M, Curless B, Diebel J, et al. A comparison and evaluation of multi-view stereo reconstruction algorithms[C]//2006 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. New York, NY, USA. 2006: 519-528
- [8] Zeglazi O, Rziza M, Amine A, et al. A Hierarchical Stereo Matching Algorithm Based on Adaptive Support Region Aggregation Method[J]. *Pattern Recognition Letters*, 2018, 112: 205-211
- [9] Zhang L. Automatic Digital Surface Model (DSM) Generation from Linear Array Images[D]. Zurich: Swiss Federal Institute of Technology, 2005
- [10] Ji Song, Fan Dazhao, Zhang Yongsheng, et al. MVLL Multi-Image Matching Model and Its Application in ADS40 Linear Array Images[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2009, 34(1): 28-31 (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): 28-31)
- [11] Furukawa Y, Ponce J. Accurate, Dense, and Robust Multiview Stereopsis[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2010, 32(8): 1362-1376
- [12] Rupnik E, Daakir M, Pierrot Deseilligny M. MicMac – a Free, Open-Source Solution for Photogrammetry[J]. *Open Geospatial Data, Software and Standards*, 2017, 2: 14
- [13] Zhang Li, Zhang Jixian. Automatic DEM Generation from High-Resolution Satellite Imagery Based on Multiple-Baseline Image Matching[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2008, 33(9): 943-946 (张力, 张继贤. 基于多基线影像匹配的高分辨率遥感影像 DEM 的自动生成[J]. 武汉大学学报 • 信息科学版, 2008, 33(9): 943-946)
- [14] Zhang Ka, Sheng Yehua, Fu Suxia, et al. Multi-View VLL Matching Algorithm for Optical Aerial Images Based on Constraint of Object Space Positioning Consistency[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2018, 26(7): 1784-1793 (张卡, 盛业华, 付素霞, 等. 基于物方定位一致性约束的光学航空影像多视铅垂线轨迹匹配[J]. 光学 精密工程, 2018, 26(7): 1784-1793)
- [15] Wang Jingxue, Zhu Qing, Wang Weixi. A Dense Matching Algorithm of Multi-View Image Based on the Integrated Multiple Matching Primitives[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2013, 42(5): 691-698 (王竞雪, 朱庆, 王伟玺. 多匹配基元集成的多视影像密集匹配方法[J]. 测绘学报, 2013, 42(5): 691-698)
- [16] Zhang Chunsen, Zhang Qiyuan, Guo Bingxuan, et al. Oblique Image Matching Algorithm Based on Adaptive Initial Object Patch[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2020, 49(1): 108-116 (张春森, 张奇源, 郭丙轩, 等. 倾斜影像自适应初始物方面元优化匹配算法[J]. 测绘学报, 2020, 49(1): 108-116)
- [17] Yuan Xiuxiao, Yuan Wei, Xu Shu, et al. Research Developments and Prospects on Dense Image Matching in Photogrammetry[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2019, 48(12): 1542-1550 (袁修孝, 袁巍, 许殊, 等. 航摄影像密集匹配的研究进展与展望[J]. 测绘学报, 2019, 48(12): 1542-1550)
- [18] Zhu Qing, Chen Chongtai, Hu Han, et al. An Adaptive Dense Matching Method for Airborne Images Using Texture Information[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2017, 46(1): 62-72 (朱庆, 陈崇泰, 胡翰, 等. 顾及纹理特征的航空影像自适应密集匹配方法[J]. 测绘学报, 2017, 46(1): 62-72)
- [19] Lowe D G. Distinctive Image Features from Scale-Invariant Keypoints[J]. *International Journal of Computer Vision*, 2004, 60(2): 91-110
- [20] Yan Li, Fei Liang, Chen Changhai, et al. A Multi-View Dense Matching Algorithm of High Resolution Aerial Images Based on Graph Network[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2016, 45(10): 1171-1181 (闫利, 费亮, 陈长海, 等. 利用网络图进行高分辨率航空多视影像密集匹配[J]. 测绘学报, 2016, 45(10): 1171-1181)
- [21] Hirschmuller H. Accurate and Efficient Stereo Processing by Semi-Global Matching and Mutual Information[C]//CVPR '05: Proceedings of the 2005 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR'05) - Volume 2 - Volume 02.2005: 807-814
- [22] Hirschmüller H. Stereo Processing by Semiglobal



Matching and Mutual Information[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2008, 30(2): 328-341

[23] Zhang Li. *Study on Architecture of Cooperative Processing for Remote Sensing Images and Its Application on*

*Photogrammetry*[D]. Zhengzhou: PLA Information Engineering University, 2015 (张丽. 遥感影像协同处理体系及摄影测量应用研究[D]. 郑州: 解放军信息工程大学, 2015)

## MVLL Match Method for Multi-baseline Stereo Imagery Based on Semi-global Constraint

JI Song<sup>1</sup> ZHANG Yongsheng<sup>1</sup> YANG Zhe<sup>2</sup> DAI Chenguang<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Information Engineering University, Zhengzhou 450001, China

<sup>2</sup> Xi'an Research Institute of Surveying and Mapping, Xi'an 710054, China

**Abstract:** In the multi baseline stereo image MVLL matching process, the accurate elevation of object space points is searched along the ground plumb line, which can be equivalent to the accurate parallax search along the epipolar image space. Under the above conditions, the MVLL matching measure can be calculated and optimized by semi global constraint to obtain more reliable matching results. And then, an optimal solution of the multi baseline stereo image MVLL matching method is obtained under the semi global constraint. The effectiveness of the method is verified by experiments and analysis of various terrain features and local image areas, and the experimental results show that the method can optimize the object space matching measure of different terrain features, obtain more reliable matching results, and have higher image matching performance.

**Key words:** semi global; multi baseline; MVLL; object space; constraint

**First author:** JI Song, PhD, associate professor, specializes in the theories and methods of multi-view matching. E-mail: jisong\_chxy@163.com

**Corresponding author:** ZHANG Yongsheng, PhD, professor, E-mail: yszhang2001@vip.163.com

**Foundation support:** The National Natural Science Foundation of China (41971427); The High Resolution Remote Sensing, Surveying and Mapping Application Demonstration System (Phase II) (42-Y30B04-9001-19/21).

**网络首发:**

**标题:** 半全局约束下的多基线立体影像MVLL匹配方法

**作者:** 纪松, 张永生, 杨喆, 戴晨光

**DOI:** 10.13203/j.whugis20200478

**收稿日期:** 20200909

**引用格式:**

纪松, 张永生, 杨喆, 等. 半全局约束下的多基线立体影像 MVLL 匹配方法[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2022, DOI: 10.13203/j.whugis20200478 (JI Song, ZHANG Yongsheng, YANG Zhe, et al. MVLL Match Method for Multi-baseline Stereo Imagery Based on Semi-global Constraint [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2022, DOI: 10.13203/j.whugis20200478)

网络首发文章内容和格式与正式出版会有细微差别, 请以正式出版文件为准!

您感兴趣的其他相关论文:

多视匹配 MVLL 算法及其在 ADS40 线阵影像中的运用

纪松, 范大昭, 张永生, 杨靖宇

武汉大学学报·信息科学, 2009, 34(1): 28-31

<http://ch.whu.edu.cn/article/id/1127>