



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: 结合线对几何特征及单线描述符约束的直线匹配算法
作者: 刘肃艳, 王竟雪, 沈昭宇, 王强
DOI: 10.13203/j.whugis20210147
收稿日期: 2021-03-24
网络首发日期: 2021-09-29
引用格式: 刘肃艳, 王竟雪, 沈昭宇, 王强. 结合线对几何特征及单线描述符约束的直线匹配算法[J/OL]. 武汉大学学报(信息科学版).
<https://doi.org/10.13203/j.whugis20210147>



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、外文字符、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：

刘肃艳, 王竞雪, 沈昭宇, 等. 结合线对几何特征及单线描述符约束的直线匹配算法[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2021, DOI: 10.13203/j.whugis20210147 (LIU Suyan, WANG Jingxue, SHEN Zhaoyu, et al. Line Matching Algorithm Based on Pair-wise Geometric Features and Individual Line Descriptor Constraints[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2021, DOI: 10.13203/j.whugis20210147)

结合线对几何特征及单线描述符约束的直线匹配算法

刘肃艳¹ 王竞雪^{1,2} 沈昭宇¹ 王强³

1. 辽宁工程技术大学测绘与地理科学学院, 辽宁 阜新 123000;
2. 西南交通大学地理科学与环境工程学院, 四川 成都 611756;
3. 天津师范大学 地理与环境科学学院, 天津 300387

摘要：针对单直线几何属性的弱稳定性及非“一对一”匹配结果难以检核问题, 提出一种结合线对几何特征及单线描述符约束的直线匹配算法。所提算法将邻域内满足一定几何条件约束的两直线构建线对, 作为一个整体进行匹配。匹配过程中首先利用线对中两直线交点的核线约束匹配候选范围, 然后逐一采用线对内角度、线段间距离比、线对邻域辐射信息三种属性特征对匹配候选进行筛选, 最后根据三角形区域灰度相似性确定最终匹配对。检核过程中首先根据直线与核线夹角及直线斜率建立同名线对中单直线的对应关系, 然后每组同名线对分裂得到两组同名直线, 在此基础上对应地建立两直线梯度描述符并计算两直线描述符间的相似性, 最后结合共线几何和描述符相似性对匹配结果进行检核, 删除错误匹配, 并对结果中的共线直线进行合并, 得到“一对一”的同名直线。选取典型纹理特征的航空影像和不同变换类型的近景影像进行参数分析及直线匹配实验, 实验结果表明, 所提算法匹配正确率较高, 在纹理相似、视角变化、旋转变化、尺度变化、光照变化的复杂场景下匹配正确率均高于95%, 具有较好的鲁棒性, 且可有效解决因直线断裂等原因造成的复杂匹配关系难以检核问题。

关键词：直线匹配; 组直线匹配; 结果检核; 共线几何; 直线描述符

中图分类号： P23

文献标志码： A

直线特征较点特征包含更丰富的几何和语义信息, 在建筑物三维重建过程中加入直线对目标物的轮廓约束可以改善基于点特征重建^[1-3]产生的墙面不平整、屋檐和墙体连接部分结构粘连、模型扭曲等问题^[4-6]。此外, 也可以直接利用直线匹配结果实现重建得到更符合人类视觉感知特点的三维模型^[7-8]。因此, 获得可靠的直线匹配结果是建筑物精细三维重建的关键。

目前直线匹配方法可分为单直线匹配、组直线匹配^[9]。单直线匹配通常采用直线自身属

性信息或结合邻域灰度信息完成匹配。该类型算法依赖于特征信息的稳定性以及直线端点的准确性, 为此研究者在此基础上加入几何约束, 如核线约束^[10], 用于缩小候选直线搜索范围或获得两直线重叠特征邻域, 此外, 还有点与线的几何关系约束^[11-13]、三角网约束^[14]、直线间描述符相似性约束^[15-16]。这些几何约束不依赖于直线邻域特征信息, 从而对局部形状畸变严重区域的匹配也具有较强的鲁棒性, 同时通过求解两直线的重叠部分, 降低了直线端点不准确对匹配带来的影响。而对于影像上存在

收稿日期：2021-3-24

项目资助：国家自然科学基金项目（41871379, 42071343, 42001412）；辽宁省兴辽英才计划项目（XLYC2007026）。

第一作者：刘肃艳, 博士, 主要从事直线匹配、三维重建研究。suhao-surprise@qq.com

通讯作者：王竞雪, 博士, 教授。xiaoxue1861@163.com

纹理重复、遮挡、直线提取断裂、视差不连续及影像变换等复杂场景的直线匹配,还存在一定的局限性。

与单一直线匹配方法相比,以两条直线或多条直线为匹配基元的组直线匹配,经过编组得到的直线对几何约束方式更加灵活且约束更具鲁棒性。其中,直线编组方式有基于空间邻近性的局部聚类编组^[17]、基于组合数理论的直线自由编组^[18]、根据直线的共面性与邻近性编组^[19-20]。由此,直线对较单一直线的匹配约束属性有较大程度增加,文献[21-23]采用直线对的四个端点位置关系、端点连线的夹角、直线对中两直线或其延长线的夹角、直线邻域特征信息等属性构建直线对之间的相似性约束,该方法在大多数图像变换下,局部区域内直线的属性结构相对稳定,但部分情况下依赖于直线端点之间的对应关系,当端点位置不准确时匹配失败。此外,直线交点比提取的特征点包含的信息更加丰富,基于此,文献[19]和文献[20]分别构建线—交点—线(line-junction-line,LJL)结构和V型结构线对,将其作为匹配基元参与匹配,使直线对中两直线与交点包含的信息得到充分利用。

此外,在获得同名直线的基础上,直线匹配结果核检是关键。受拍摄环境和直线提取算法的影响,目标场景中的同名直线在两幅影像上有不同程度断裂;另外,受编组算法的影响,一条直线重复参与编组。上述因素导致匹配结果中出现“一对多”、“多对一”、“多对多”的正确与错误混淆存在的匹配关系,若按原有的“一对一”匹配算法^[11-12]确定同名直线,会剔除部分正确的匹配直线。考虑到组直线匹配结果的冗余信息,文献[24]结合匹配约束条件如距离比值、直线描述符等总体加权相似度评分,通过使用最邻近距离和次邻近距离比值(nearest/next distance ratios, NNDRs)和双阈值的迭代及更新过程来验证匹配。但该方法仅核检同名单直线匹配结果,未考虑“多”直线的存在及匹配正确性。文献[25]将同名直线初始匹配结果按照从左到右、从右到左的重复索引搜索检测方法将其分为“一对一”和非“一对一”的匹配对应关系,拟合其中的“多”直

线,获得最终的“一对一”同名直线,但该方法在假设匹配结果正确的前提下直接对“多”直线进行拟合,未核检结果中包含的错误匹配。在此基础上,文献[26]加入共线几何约束对此改进,将不符合共线情况的“多”直线对应的同名直线结果整体剔除,从而提高了匹配结果正确率,但这种对包含错误匹配结果整体剔除的核检方法同时剔除了“多”直线中存在的正确匹配,降低了同名直线匹配数目,此外,该方法默认“一对一”匹配结果正确,未进行核检。

综上,与已有研究成果相比本文主要做出了以下3方面的改进:(1)为了解决纹理相似及直线端点不对应导致的直线匹配失败问题,本文提取线对内两直线间有效的几何特征、线对支撑区域用于匹配相似性判断,确定同名直线对;(2)现有研究利用灰度相似性确定同名直线对,取相似性系数最大且大于一定阈值的候选直线对为最佳匹配对,为了避免由于影像变形、纹理相似产生较大相关系数引起的错误匹配,研究保留相似性系数在0.9~1范围的所有匹配候选,并用于后续进一步核检;(3)构建直线的梯度描述符,并将其用于两直线间相似性计算。本文算法在结果核检中,根据直线间梯度描述符相似性对“一对一”匹配结果进行核检,结合共线约束对“一对多”、“多对一”和“多对多”匹配结果进行核检,剔除“多”直线中的错误匹配直线,同时拟合正确的共线“多”直线。

1 算法原理

本文算法流程如图1所示。预处理阶段需要对输入的影像对进行直线提取与同名点匹配。匹配阶段主要包括直线对提取、直线对匹配和匹配结果核检三大步骤,分别为:

1) 分别在参考影像、搜索影像上提取直线对,通过搜索当前直线邻近区域内同时符合距离、角度约束条件的直线,并将其分别与当前直线编组构建直线对。

2) 以提取到的直线对为匹配基元,根据初始同名点解算基础矩阵,计算参考影像上直

线对的交点在搜索影像上的核线进而约束获得相应的候选直线对集。结合线对内角度、直段间距离比、线对邻域辐射信息三种属性特征对匹配候选逐步进行筛选。在此基础上利用线对内两直线及其交点参与构建的三角形区域，通过区域灰度相关确定同名直线对。

3) 通过对线对内单直线匹配结果进行核算剔除错误匹配。依据上一步中根据直线与核

线夹角以及直线斜率建立匹配线对中两组单直线的对应关系，得到每组同名线对对应的两组同名直线，对应地建立两直线梯度描述符并计算两描述符间相似性系数，结合共线几何和描述符相似性对匹配结果进行核算、整合，最终得到“一对一”同名直线并输出。

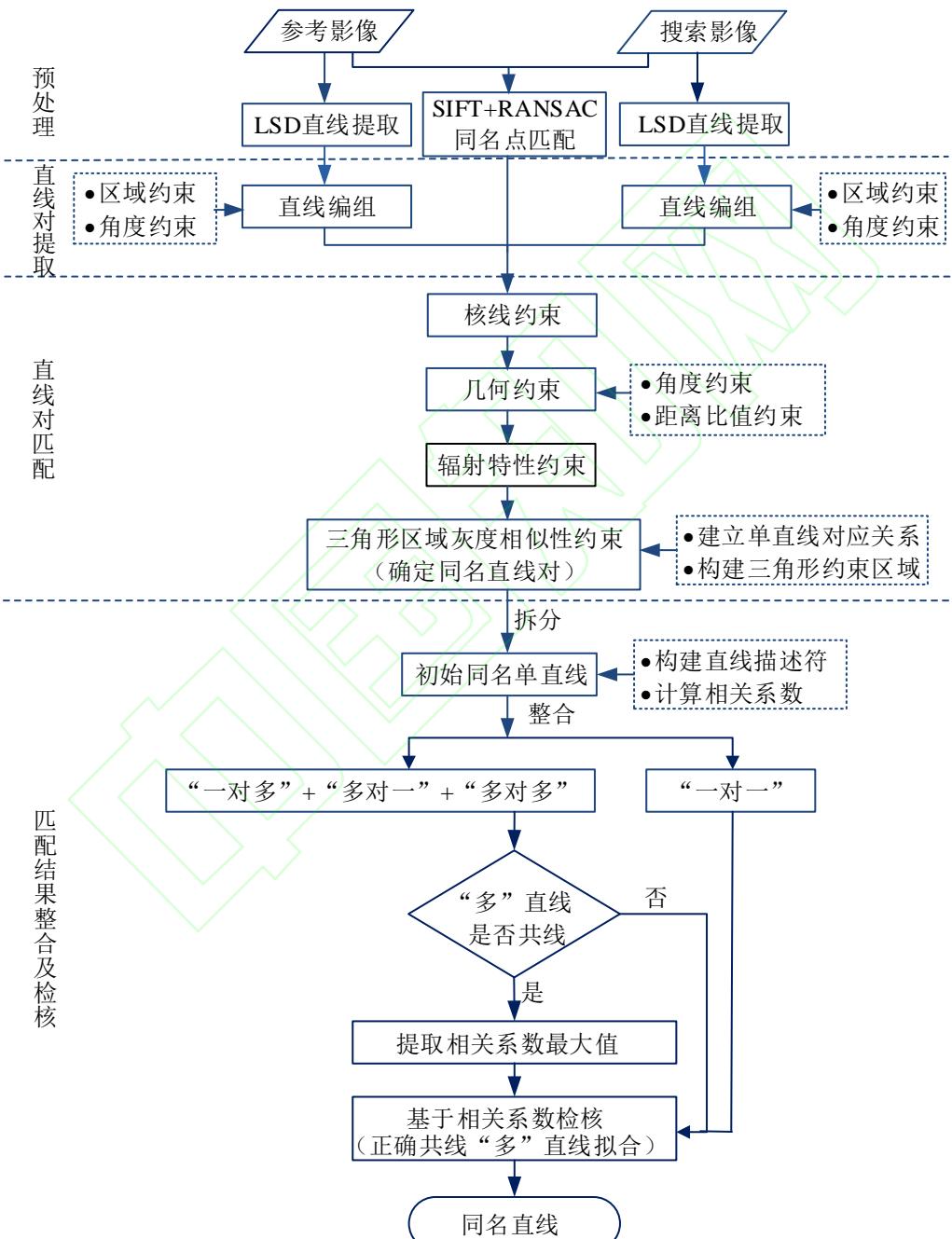


图 1 算法流程图
Fig. 1 Flowchart of the Proposed Algorithm

1.1 几何约束的直线编组

直线编组即分别对参与匹配的两幅影像上提取的特征直线按照一定的算法进行两两组合,进而建立每组中两直线间的几何属性及拓扑关系。本文采用直线检测(line segment detector, LSD)算法^[27]分别提取参考影像和搜索影像中的特征直线,结果表示为
 $L=\{l_1, l_2, l_3, \dots, l_i, \dots, l_m\}$,
 $R=\{r_1, r_2, r_3, \dots, r_j, \dots, r_n\}$,其中m和n分别为参考影像和搜索影像的直线提取数目。假设影像上任一直线 l_i 作为目标直线,则该影像上其余直线即为待编组直线。分别对两幅影像上的提取直线依次进行编组,编组过程如下:

1) 构建直线编组约束区域:以目标直线 l_i 两端点坐标为基准,确定约束区域的四个端点

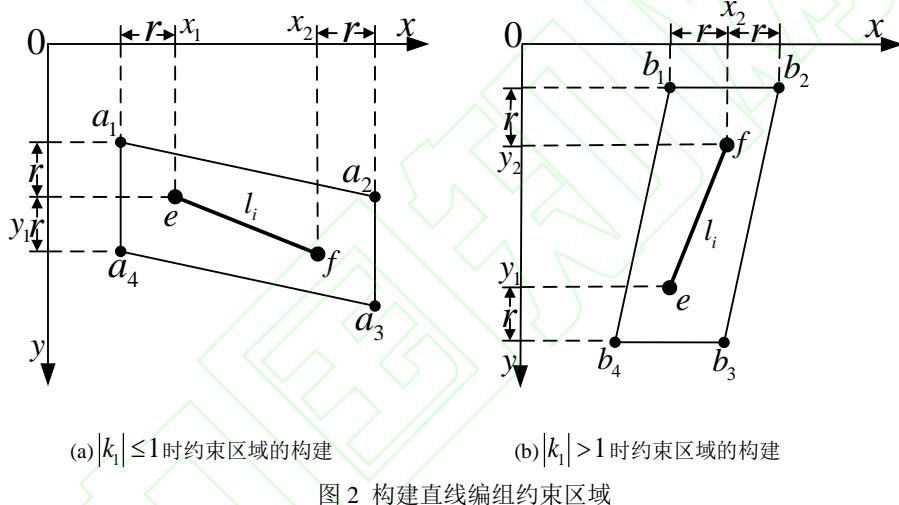


图 2 构建直线编组约束区域

Fig. 2 Construction of Group Constraint Region for Line

2) 几何约束直线编组:以图 2(a)构建的编组约束区域为例,为目标直线 l_i 编组,依次判断待编组直线是否与编组约束区域存在包含、相交、通过的任一关系,若是,继续判断待编组直线与目标直线 l_i 的夹角 θ 是否在 $[T_{1\theta}, T_{2\theta}]$ 角度范围内,若是,则将该直线与目标直线 l_i 编为一组,如图 3 中满足条件的编组线对分别被表示为 $G_1^L(l_i, l_2, D_1^L)$ 、 $G_2^L(l_i, l_5, D_2^L)$ 、 $G_3^L(l_i, l_6, D_3^L)$ 、 $G_4^L(l_i, l_1, D_4^L)$,其中 D^L 表示直线对中两直线的交点。

基于图 2 构建的约束区域,采用上述方法分别对参考影像、搜索影像中的每条直线依次编组,其编组结果分别表示为
 $GL=\{G_1^L(l_i^1, l_i^1, D_1^L), G_2^L(l_i^2, l_i^2, D_2^L), \dots, G_U^L(l_i^U, l_i^U, D_U^L)\}$ 、

坐标,同时,直线斜率不同相应的约束区域构建方式也不同。如图 2 所示,直线 l_i 两端点坐标分别为 $e(x_1, y_1)$ 、 $f(x_2, y_2)$,斜率为 k_i 。如图 2(a)所示,当 $|k_i| \leq 1$ 时,假设 $x_1 < x_2$,则以约束区域左上方顶点 a_1 为起点,顺时针方向计算相应顶点坐标分别为 $a_1(x_1-r, y_1-r)$ 、 $a_2(x_2+r, y_2-r)$ 、 $a_3(x_2+r, y_1+r)$ 、 $a_4(x_1-r, y_1+r)$;如图 2(b)所示,当 $|k_i| > 1$ 时,假设 $y_1 > y_2$,则以约束区域左上方顶点 b_1 为起点,顺时针方向计算相应顶点坐标分别为 $b_1(x_2-r, y_2-r)$ 、 $b_2(x_2+r, y_2-r)$ 、 $b_3(x_1+r, y_1+r)$ 、 $b_4(x_1-r, y_1+r)$ 。即以直线两端点处分别沿 x 轴、y 轴方向扩展 r 个像素,作为编组直线的活动区域。

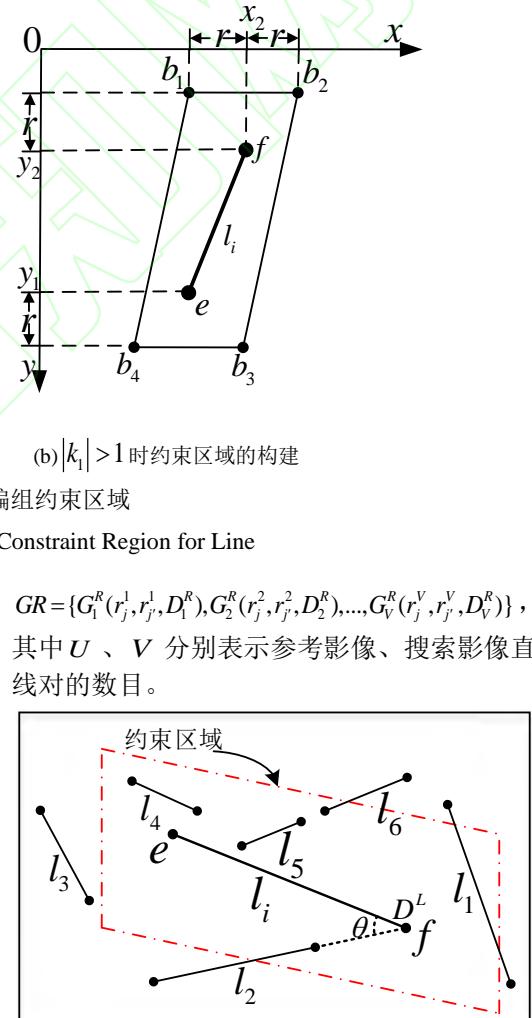


图 3 满足几何约束条件的线对

Fig. 3 Line Pairs Satisfying Geometric Constraints

1.2 直线对匹配

在完成直线编组的基础上, 逐一对参考影像上的目标直线对寻找其在搜索影像上的最佳同名直线对, 该过程包含 5 种约束, 依次为核线约束、角度约束、距离比值约束、辐射特性约束和区域灰度相关性约束。前 4 种约束用于逐步缩小候选直线对的搜索范围, 最后一种约束用于确定目标直线对的同名直线对。

1.2.1 匹配候选约束

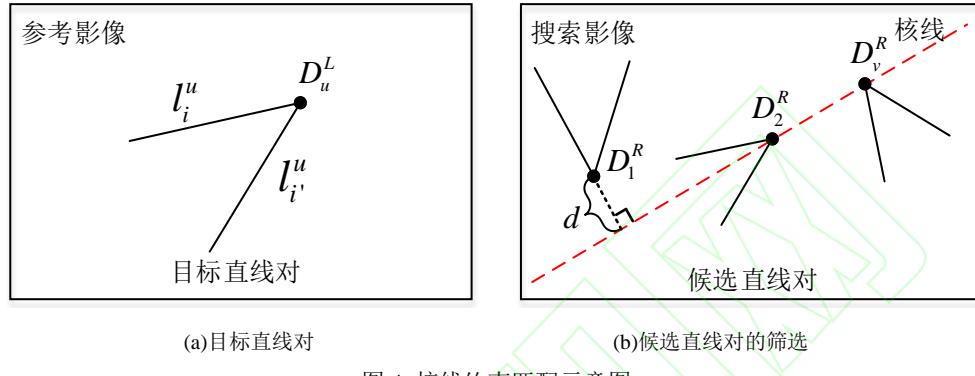


图 4 核线约束匹配示意图

Fig. 4 Diagram of Epipolar Constraint Matching

2) 角度约束。当拍摄角度发生变化时, 目标场景在不同影像中也随之发生旋转变化, 该情况给此类影像直线匹配增加了一定的难度。而同一场景对应的两条提取直线的夹角角度值不会跟随影像旋转而发生变化, 因此本算法加入角度约束解决影像旋转对直线匹配带来的困难。对满足核线约束的候选直线对进一步利用角度约束缩小候选直线对搜索范围。

如图 5 所示, 在参考影像上, 某一目标直线对为 $G_u^L(l_i^u, l_i'^u, D_u^L)$, 其中两直线 l_i^u 、 $l_i'^u$ 的交点为 D_u^L , 夹角为 α , 两直线各自的中点分

1) 核线约束。核线约束可以将特征线对的搜索空间从二维降至一维, 进而提高匹配效率和可靠性。先计算任一目标线对 $G_u^L(l_i^u, l_i'^u, D_u^L)$ 的交点 D_u^L 在搜索影像上的核线, 进而计算各特征线对的交点 $\{D_1^R, D_2^R, \dots, D_v^R\}$ 到该核线的垂直距离 d_0 , 选择距离小于一定阈值 T_{da} 对应的特征线对作为候选直线对。如图 4 所示, 符合条件的候选直线对交点分别为 D_1^R 、 D_2^R 、 D_v^R 。

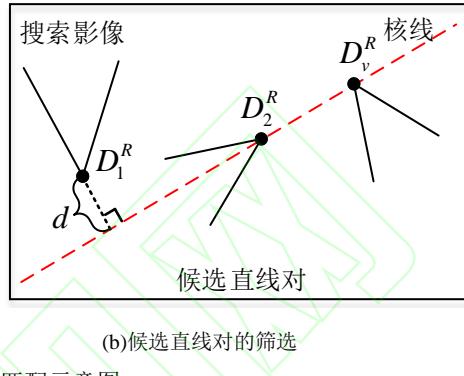


图 4 核线约束匹配示意图

别为 s 、 t , 假设中点 s 的横坐标值小于中点 t 的横坐标值, 则角度 β 为直线 l_i^u 与由中点 s 指向中点 t 的直线向量的夹角。同理, 该目标直线在搜索影像上的候选直线对 $G_v^R(r_j^v, r_{j'}^v, D_v^R)$ 的相应两个角度分别为 α' 和 β' 。那么, 同时满足 $|\alpha - \alpha'| < T_\alpha$ 和 $|\beta - \beta'| < T_\beta$ 条件的候选直线对作为角度约束后的候选直线对。

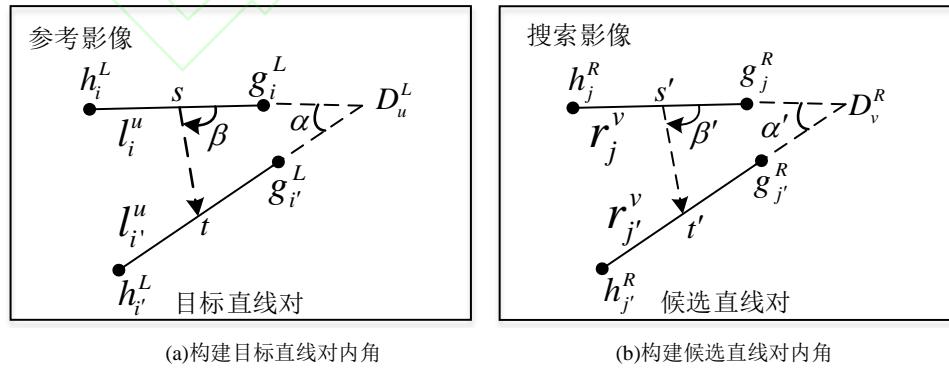


图 5 角度约束匹配示意图

Fig. 5 Diagram of Angle Constraint Matching

3) 距离比值约束。当拍摄距离发生变化时, 目标场景在不同影像中也随之发生尺度变化, 而由两条直

线及两直线四个端点确定的距离比值不受尺度变化的影响。进而利用距离比值参与候选直线对约束具有较

强的鲁棒性。因此对满足角度约束的候选直线对进一步采用距离比值约束继续缩小候选直线对搜索范围。

如图 5 所示, 在参考影像上, h_i^L 和 g_i^L 为直线 l_i^u 的两端点, $h_{i'}^L$ 和 $g_{i'}^L$ 为直线 $l_{i'}^u$ 的两端点, 那么距离比值即为两直线的长度之和与四个端点中两端点之间距离和的平均值之比 $d_{ii'}^L$ 。用向量描述该距离比如公式(1)所示。同理, 在搜索影像上对应计算每个候选直线对的距离比值 $d_{jj'}^R$ 。依次计算所有候选直线对与目标直线对的距离比值的差的绝对值, 将满足条件 $|d_{ii'}^L - d_{jj'}^R| < T_{db}$ 的候选直线对作为距离比值约束后的候选直线对。

$$d_{ii'}^L = \frac{|\overline{h_i^L g_i^L}| + |\overline{h_{i'}^L g_{i'}^L}|}{\frac{1}{4}(|\overline{h_i^L h_{i'}^L}| + |\overline{h_i^L g_{i'}^L}| + |\overline{g_i^L h_{i'}^L}| + |\overline{g_i^L g_{i'}^L}|)} \quad (1)$$

式中, $|\cdot|$ 表示向量的模长。

4) 辐射特性约束。由于拍摄条件不同, 同一场景在不同影像中可能存在辐射畸变, 此时, 可以利用辐射特性约束来解决辐射畸变对直线匹配带来的影响。故利用辐射特性约束对满足距离比值约束的候选直线对再次缩小搜索范围。

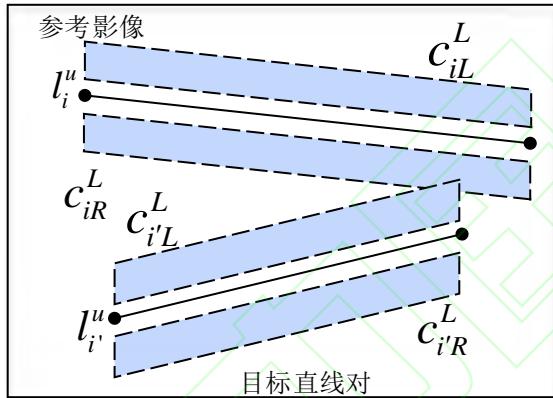


图 6 直线两侧邻域窗口示意图

Fig. 6 Diagram of Neighborhood Windows on Both Sides of the Lines

如图 6 所示, l_i^u 、 $l_{i'}^u$ 为参考影像上某一目标直线对中的两条直线, 采用图 2 编组约束区域构建方法, 在直线 l_i^u 、 $l_{i'}^u$ 两侧分别构建邻域窗口, 并计算每个邻域窗口中的颜色均值分别为 c_{iL}^L 和 c_{iR}^L 、 $c_{i'L}^L$ 和 $c_{i'R}^L$, 然后利用公式(2)计算目标直线对的辐射特性值 $C_{ii'}^L$ 。同理在搜索影像上对应求得每个候选直线对的辐射特性

值 $C_{jj'}^R$, 依次计算每个候选直线对与目标直线对的辐射特性值的差的绝对值, 将满足条件 $|C_{ii'}^L - C_{jj'}^R| < T_c$ 的候选直线对作为辐射特性约束后的候选直线对。

$$C_{ii'}^L = \min(\|c_{iL}^L - c_{i'L}^L\|, \|c_{iL}^L - c_{iR}^L\|, \|c_{iR}^L - c_{i'L}^L\|, \|c_{iR}^L - c_{i'R}^L\|) \quad (2)$$

式中, $\|\cdot\|$ 表示欧几里得范数。

1.2.2 三角形区域灰度相关约束确定同名直线对

通过以上 4 个步骤的条件约束逐步缩小候选直线搜索范围, 利用三角形区域灰度相关约束确定最终同名直线对。首先建立目标直线对与候选直线对内单直线对应关系, 同时利用核线几何确定对应直线同名端点得到对应直线段; 然后基于直线对内交点和两直线段构建两影像上对应的三角形区域; 最后根据两区域灰度相关系数确定最终同名直线对。具体步骤如下:

1) 建立同名线对内单线对应关系。如图 7(a)所示, 核线 $H_{D_v^R}$ 、 $H_{D_v^L}$ 分别为候选直线对交点 D_v^R 、目标直线对的交点 D_v^L 在对应影像中的核线。以 x 轴正向为直线向量的正方向, 分别计算目标直线对、候选直线对内两直线向量分别与对应核线向量的夹角角度值 ω_i^L 和 $\omega_{i'}^L$ 、 ω_j^R 和 $\omega_{j'}^R$ 。根据每个直线对中角度差的绝对值大小分以下两种情况建立单直线对应关系。

① 当 $|\omega_i^L - \omega_{i'}^L| > T_\omega$ 且 $|\omega_j^R - \omega_{j'}^R| > T_\omega$ 时, 分别比较每个直线对中所包含的两个角度值的大小, 根据“大角一大角”和“小角一小角”的原则建立单直线的对应关系。如图 7(a)所示, 在目标直线对中 $\omega_{i'}^L < \omega_i^L$, 在候选直线对中 $\omega_{j'}^R < \omega_j^R$, 故记录单直线对应关系分别为 (l_i^u, r_j^v) 、 $(l_{i'}^u, r_{j'}^v)$ 。

② 当 $|\omega_i^L - \omega_{i'}^L| < T_\omega$ 或 $|\omega_j^R - \omega_{j'}^R| < T_\omega$ 时, 即存在直线对中的两个角度接近相等情况, 由于编组时对直线对中两直线夹角范围的限制, 故在该条件下直线对中两直线与核线的两个夹角必分布在核线的两侧, 此时两直线的斜率相差较大, 与条件①判断方法类似, 根据直线斜率的大小建立单直线的对应关系。

其中, 由于接近相等的两个角度差值较小, 本文取值 $T_\omega = 10^\circ$ 。

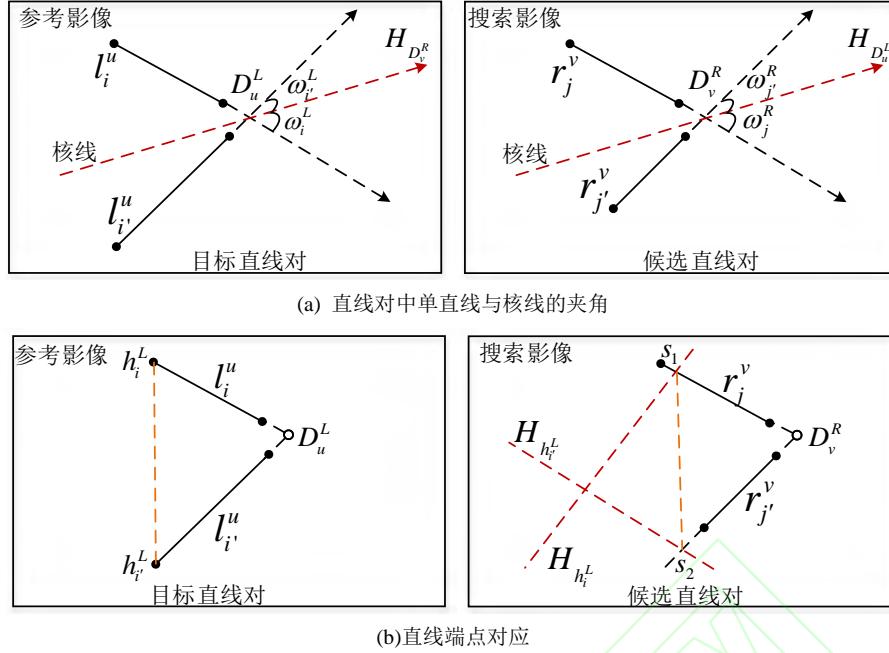


图 7 构建三角形区域

Fig. 7 Construction of Triangular Region

2) 区域灰度相关。采用文献[26]中三角形相关区域构建及灰度值提取方法, 得到两影像对应的三角形区域, 如图 7(b)中的两三角形 $\Delta D_u^L h_i^L h_{i'}^L$ 、 $\Delta D_v^R s_1 s_2$ 。利用灰度相关系数计算公式计算两三角形区域灰度相关系数 ρ , 选取 ρ 值最大且大于一定阈值 T_ρ 的灰度相关区域对应的候选直线对为目标直线对的同名直线对。当存在 $\rho \in [0.9, 1]$ 时, 对应的候选直线对与目标直线对具有高度相关性, 为了避免因影像纹理相似造成两张影像上非同一目标场景的两个直线对灰度区域相关性较大而代替了正确的同名直线对, 故将该范围内的所有候选直线对保留, 等待后续检核。

1.3 结合共线约束与直线描述符相关性的匹配结果检核

依据已构建的线对中单直线对应关系, 拆分每对同名直线对为两对同名单直线。此时, 同名单直线并不能作为最终匹配结果, 原因有三方面。第一, 由于在编组过程中同一直线多次参与编组, 使结果中存在重复匹配; 第二, 利用灰度相关确定同名直线对时, 部分目标直线对对应的多个灰度相关性较高的候选直线对得到保留, 因此匹配结果中重复匹配和错误匹配混合存在; 第三, 由于直线提取断裂和直线匹配错误, 导致匹配结果包含非“一对一”的匹配关系, 如“一对多”、“多对一”及“多对多”。故需要对匹配结果进行整理及检核。考虑到构建稳定的直线描述符, 利用直线间描述符的相似性可以筛选错误匹配, 而共线几何可以判断“多”直线中每条直线间的共线情况, 因此将两种方法相结合, 对匹配结果中存在的“一对一”、非“一对一”的两类对应关系分别进行检核。

1.3.1 直线间共线几何关系的建立

受拍摄环境和直线提取算法的影响, 部分直线提取存在断裂, 使得匹配结果中存在非“一对一”对应关系。因此, 根据共线条件判断结果中是否存在断裂直线, 方法如下:

在确保两直线零重叠的条件下, 若两直线端点间的最小距离大于阈值 T_{de} 则两者不共线; 相反, 分别计算其中一条直线的两个端点到另一条直线的垂直距离, 其中最大距离如果小于阈值 T_{de} 那么两直线共线, 反之, 不共线。

1.3.2 单直线之间相似性测度计算

借鉴文献[28]中构建Daisy描述符描述点邻域梯度变化的思想, 本文构建直线描述符用于描述直线局部邻域内梯度变化情况, 进而构建直线的相似性度量。具体构建方法如下:

1) 确定同名单直线重叠部分。以参考影像上的直线为基准, 在搜索影像上找到对应同名直线与其重叠的部分, 原理与图 7 中确定交点 s_1 、 s_2 方法类似, 计算参考影像上直线两个端点在搜索影像上的两条核线分别相交于对应的同名直线得到两个交点, 以这两个交点为端点的直线即为重叠直线段。

2) 确定直线邻域。如图 8(a)所示, 分别构建同名直线在参考影像、搜索影像上的直线邻域。以直线重叠部分中点为圆心, 构建两层半径递增的圆环, 以直线方向为起点顺时针为每层圆环选取 8 个间隔 45° 的采样点 x_k , 采样点 x_k 用黑色实心圆表示。同时, 为了避免由于拍摄视角的变化造成目标物直线特征的一侧被遮挡对匹配带来的影响, 如图 8(b)所示去掉直线上的采样点, 直线每侧剩余 n_p 个采样

点，在直线两侧分别构建描述符，即每条直线两侧可分别获得1个直线描述符。

3) 构建直线描述符。根据影像中直方图区间的数量计算方向直方图，然后对每个方向直方图利用标准差递增的高斯卷积核进行平滑处理，每个采样点确定一个方向梯度直方图，直线每侧的整体描述符由该侧所有采样点直方图连接而成。为了避免影像旋转对匹配产生影响，旋转每个采样点的梯度方向向量，使其与直线方向保持一致。同时为了保证直线透视畸变的不变性，调整两层圆环的半径从内到外分别为对应直线长度的 $1/2$ 和 $1/4$ 。最终得到参考影像上直线两侧的直线描述符 E_v^L 和搜索影像上直线两侧的直线描述符 E_v^R ，其中， $v \in \{L, R\}$ 表示直线左侧邻域和右侧邻域。

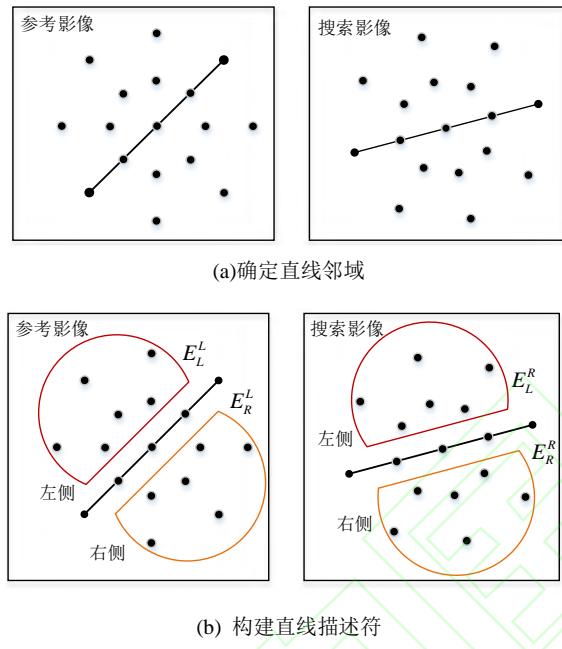


图8 构建直线描述符

Fig. 8 Construction of Line Descriptor

4) 计算描述符相关性。利用公式(3)、(4)分别计算每对同名直线之间描述符的欧氏距离 M_s 、互相关系数 C_s 。为了增强相关性指标 M_s 、 C_s 的可靠性，利用公式(5)确定同名直线最终的描述符相关系数。

序号	对应关系	参考影像 (直线索引号)	搜索影像 (直线索引号)	共线情况
1	一对多	177	40 708 1187	$r: 40 708$
2	多对一	63 416 1239	113	$l: 416 1239$
3	多对多	1680	1976 2119	$l: 1680 1729$
		1729	1976 2119 2058	$r: 1976 2058$
		1856	2119	

(a) 整理

$$M_s(E_v^L, E_v^R) = \frac{1}{1 + \left(\sum_{k=1}^{n_p} \|E_v^L(x_k) - E_v^R(x_k)\| \right)^2} \quad (3)$$

式中， $\|\cdot\|$ 表示欧几里得范数，分母中的平方增加了较小欧式距离描述符的影响。

$$C_s(E_v^L, E_v^R) = \sum_{k=1}^{n_p} \left\{ \max \left[0, \rho(E_v^L(x_k), E_v^R(x_k)) \right] \right\}^2 \quad (4)$$

式中， $\rho(E_v^L(x_k), E_v^R(x_k))$ 表示两个描述符的互相关系数， $\max(\cdot)$ 消除描述符负相关性的影响，平方对描述符的相关性起到了强调的作用。

$$Sim_D = \min \left\{ \max \left[M_s(E_v^L, E_v^R), M_s(E_v^R, E_v^L) \right], \max \left[C_s(E_v^L, E_v^R), C_s(E_v^R, E_v^L) \right] \right\} \quad (5)$$

式中， $\max(\cdot)$ 确保提取到同名直线较高的相关系数的同时避免了直线一侧邻域被遮挡带来的影响， $\min(\cdot)$ 确保最终的相关性指标 Sim_D 的可靠性。

依次利用公式(3)、(4)、(5)分别计算拆分后每对同名直线间的描述符相关系数 Sim_D 。

1.3.3 确定最终同名直线

对拆分后的同名直线采用文献[25]中匹配结果检索方法建立结果中非“一对一”对应关系间的关联。结合直线间描述符相似性系数 Sim_D 值和共线几何对“一对一”、非“一对一”匹配结果进行整理与核检，最终得到正确的“一对一”的同名直线。

1) “一对多”、“多对一”对应关系的核检。判断结果中是否存在共线的直线，若存在，将其共线直线作为一个整体，选取其中包含的对应关系中的最大 Sim_D 值作为该整体的 Sim_D 值。更新结果对应关系，并从中选取最大 Sim_D 值对应的对应关系作为最终的同名对应关系。若不存在共线直线，则直接选择结果中最大 Sim_D 值对应的对应关系为正确的对应关系。剔除其余错误匹配，并将剩余结果中的共线直线拟合为一条直线。如图9所示，序号1、2分别对应的是“一对多”与“多对一”匹配关系整理与核检过程。

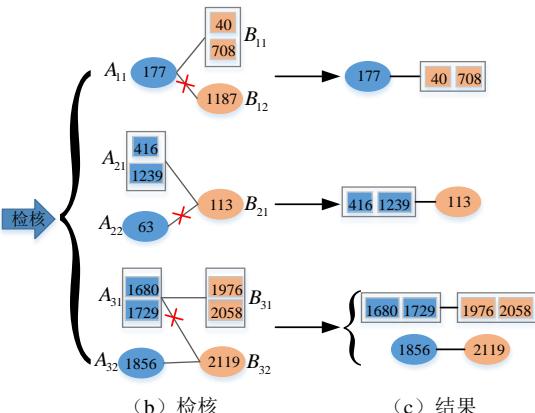


图 9 匹配结果整理及检核

Fig.9 Integration and Checking of Matching Results

2) “多对多”对应关系的检核。“多对多”匹配关系体现在“一对一”、“一对多”、“多对一”对应关系交叉存在。以图 9 中序号 3 对应的一组“多对多”匹配关系的检核为例, 该组匹配关联的直线条索引分别表示为 1680-(1976、2119)、1729-(1976、2119、2058)、1856-2119。

①判断“多”直线中包含的直线共线情况。在参考影像上, 判断得到共线集合 $A_{31}=\{1680, 1729\}$ 、不共线集合 $A_{32}=\{1856\}$; 然后分别判断每个集合 A_{ij} 中所有直线对应在搜索影像上的同名直线的共线情况, 并分类存入集合 B_{ij} 中, 如集合 A_{31} 对应匹配集合分别为 $B_{31}=\{1976, 2058\}$ 、 $B_{32}=\{2119\}$, 集合 A_{32} 对应匹配集合 $B_{32}=\{2119\}$ 。

②利用直线间描述符相关系数对匹配结果进行检核。对于共线直线集合, 选取对应关系中最大的 Sim_D 值作为两个匹配集合的描述符相关系数值, 然后比较每组匹配集合的 Sim_D 值, 保留 Sim_D 值最大且大于阈值 T_D 的一组匹配集合作为最终的匹配结果, 如 $Sim_D(A_{31}, B_{31}) > Sim_D(A_{31}, B_{32})$ 且

$Sim_D(A_{31}, B_{31}) > T_D$ 、 $Sim_D(A_{32}, B_{32}) > T_D$, 故得到最终的两组同名直线用索引表示为(1680、1729)-(1976、2058)和 1856-2119, 同时将其共线直线 1680 和 1729、1976 和 2058 分别拟合为一条直线, 进而得到“一对一”的同名直线。此外, 在“多”直线共线判断过程中, 若出现参考影像中索引为 2119 的直线包含在集合 B_{31} 中的类似情况, 即索引为 1976、2058、2119 的三条直线共线, 此时, 舍弃参考影像上索引为 1856 的直线, 得到匹配结果用索引表示为(1680、1729)-(1976、2058、2119), 同时也将相应的共线直线进行拟合。

3) “一对一”匹配关系检核。剔除描述符相关系数 Sim_D 值小于一定阈值 T_D 对应的同名直线, 得到正确的“一对一”同名直线。

2 实验与分析



图 10 6 组实验影像

Fig. 10 Six Sets of Test Images

实验选取 6 组影像对, 如图 10 所示, 图 10(a)~10(c) 为 3 组航空影像对, 图 10(d)~10(f) 为 3 组近景影像对。图 10(a)影像存在遮挡场景及车辆等动态目标物, 影像大小分别为 1406×1497 像素、 1405×1465 像素; 图 10(b) 影像中建筑物较密集, 建筑物顶部形状较为规则, 影像视角变化较小, 影像大小分别为 499×463 像素、 487×450 像素; 图 10(c) 两张影像视角变化明显, 影像中包含建筑物立面信息, 屋顶结构简单但纹理重复较多, 影像大小分别为 644×978 像素、 670×986 像素。图 10(d)~10(f) 依次存在旋转角大约 19° 的旋转变换、尺度比约为 1:1.5 的尺度变换、光照变换, 影像对大小依次为 640×460 像素、 800×600 像素、 600×900 像素。实验首先对每组影像采用 SIFT 算法与 RANSAC 算法相结合方式进行同名点匹配与 LSD 直线提取, 其结果如表 1 所示, 在此基础上进行直线匹配与结果检核实验。

表 1 6 组实验影像的同名点与直线提取数目

Tab. 1 The Number of Corresponding Points and Extracted Lines for Six Sets of Test Images

实验影像	同名点数目 /对	提取直线数目/条	
		参考影像	搜索影像
图 10(a)	738	2128	2453
图 10(b)	349	398	406
图 10(c)	136	934	1040
图 10(d)	349	488	526
图 10(e)	486	689	884
图 10(f)	500	914	613

2.1 阈值分析

本文算法在直线编组、直线对匹配和匹配结果检验三部分都分别应用到了不同的约束条件，每个约束条件都有一个参数与其对应。参数阈值的选取将会对直线匹配结果中同名直线的数目和正确率产生较大的影响，尤其在参数较多的情况下，如何选取参数使其对匹配结果的影响达到一个平衡状态是一项重要的工作。

1) 直线编组参数阈值的选择。在直线编组过程中涉及到直线邻域扩展长度 r 和两直线夹角值 θ ，选择图 10(a)影像进行实验，在保持其他参数一致条件下，分别变换参数阈值 $\theta \in [40^\circ, 130^\circ]$ 、 $\theta \in [25^\circ, 150^\circ]$ 、 $\theta \in [10^\circ, 170^\circ]$ 和 $r=5$ 、 $r=12$ 、 $r=19$ 、 $r=26$ 进行直线匹配。结果统计如表 2 所示。

表 2 不同编组参数阈值的直线匹配结果

Tab. 2 Line Matching Results by Different Grouping Parameter Thresholds

θ 取值范围	r 值 /像素	编组直线数目/对				匹配结果中包含 直线的数目/条				检验结果中包含 直线的数目/条				正确匹配数 目/对	匹配正确率 /%		
		同名直线对		拆分后同名直 线数目/对		参考		搜索		检验后同名直 线数目/对		参考					
		影像	影像	数目/对	线数目/对	影像	影像	影像	影像	影像	影像	影像	影像				
[40°, 130°]	5	706	745	213	301	268	250	200	219	216	196	216	216	196	98.0		
	12	1773	1869	495	581	501	466	374	418	404	373	404	404	373	99.7		
	19	2984	3264	754	799	673	623	477	537	514	474	514	514	474	99.4		
	26	4520	4977	1172	1075	856	783	581	665	627	571	627	627	571	98.3		
	33	6164	6832	1640	1333	991	911	645	757	709	631	709	709	631	97.8		
[25°, 150°]	5	748	792	219	312	279	261	211	230	227	207	227	227	207	98.1		
	12	1907	2015	511	601	520	485	392	436	422	391	422	422	391	99.7		
	19	3252	3543	789	830	701	648	500	562	537	495	537	537	495	99.0		
	26	5689	6481	1232	1114	886	810	599	686	645	589	645	645	589	98.3		
	33	6752	7456	1716	1375	1019	940	662	778	727	648	727	727	648	97.9		
[10°, 170°]	5	862	950	226	323	290	272	220	239	236	216	236	236	216	98.2		
	12	2217	2432	533	628	545	508	409	453	439	407	453	453	407	99.5		
	19	3763	4252	823	864	731	674	519	582	566	515	582	582	515	99.2		
	26	5689	6481	1290	1151	916	832	613	702	660	603	660	660	603	98.4		
	33	7789	8910	1792	1415	1047	960	672	789	736	657	736	736	657	97.8		

从表 2 中可以看出，当 r 取同一个值时，随着 θ 取值范围逐渐增大，对应各列直线数目增加幅度较小，匹配正确率基本不变，为确保更多提取直线参与编组与匹配，本文选择 $\theta \in [10^\circ, 170^\circ]$ 。而在 θ 的每一个取值范围内，随着 r 值的逐渐增大，参考影像、搜索影像上的编组直线数目在大幅度增加，对应表中各列直线数目一直保持增加趋势，但随着 r 值的增大，无意义的重复编组逐渐增加，进而增加了后续检验的复杂程度，导致匹配正确率降低。因此，为保证匹配结果中同名直线的数目较多、匹配正确率相对较高，本文选择 $r = 26$ 。

2) 匹配约束参数阈值的选择。在组直线匹配过程中涉及到的每个约束条件都分别有相应的约束参数与其对应，即 T_{da} 、 T_α 、 T_β 、 T_{db} 、 T_c 、 T_ρ 6 个参数。固定编组参数阈值 $r = 26$ 、 $\theta \in [10^\circ, 170^\circ]$ 和结果检验参数阈值。分别选择一组航空影像图 10(a)和一组近景影像图 10(e)在各匹配参数分别取不同值时进行直线匹配实验，通过对比和分析实验结果，选择相对合适的参数阈值，其中编组直线在图 10(a)参考影像、搜索影像上相应数目分别为 5689 对、6481 对；图 10(e)参考

影像、搜索影像上编组直线数目分别为 2694 对、4063 对。

核线约束中参数阈值 T_{da} 的确定。固定其他参数阈值， T_{da} 分别取值为 2、7、12、17 进行匹配实验，实验结果数据变化趋势用折线图表示，见图 11，图 11 中分析的指标与表 2 中包含的指标类似。

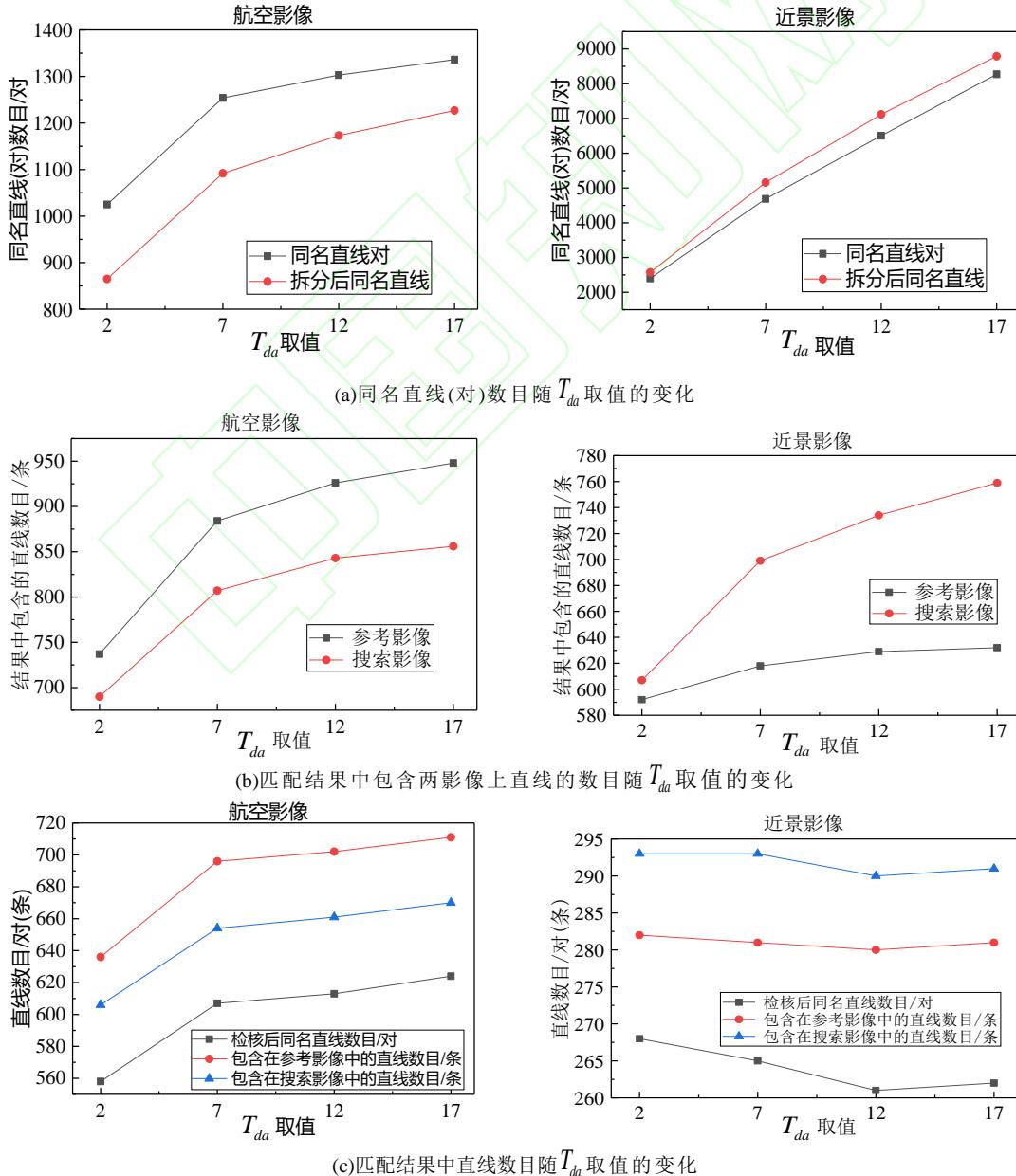
对于航空影像，如图 11(a)-(d)左侧折线图所示，从直线数目角度分析，随着 T_{da} 取值逐渐增大，该组影像各阶段匹配数目曲线均呈现增长趋势，且都在 $T_{da} < 7$ 时增长幅度较大， $T_{da} > 7$ 时增长幅度趋于平缓。结合图 11(c)和(d)从匹配正确率角度分析，随着 T_{da} 取值增大，初步筛选条件放宽，越多无意义的直线在该步骤的核线约束后被保留，增加了后续检验的复杂度，出现了在匹配结果中同名直线数目、正确匹配数目都保持增加趋势的条件下，而匹配正确率逐渐降低的现象。综合考虑同名直线数目和匹配正确率，本文选择 $T_{da} = 7$ 。

对于近景影像，如图 11(a)-(d)右侧折线图所示，随着 T_{da} 取值逐渐增大，匹配得到的同名直线对数目及

包含在对应影像中的直线数目曲线呈现增长趋势, 而对结果中同名直线数目及包含在对应影像中的直线数目影响较小。此时, 正确同名直线数目和匹配正确率在 $T_{da} = 2$ 时达到峰值, 随后呈现下降趋势。为此, 同时考虑同名直线数目以及匹配结果正确率, 本文选择 $T_{da} = 2$ 。

此外, 对于近景影像, 随着 T_{da} 取值逐渐增大, 出现同名直线对数目比编组直线数目多的现象, 这是由于该组近景影像提取的直线数目相对较少, 随着约束条件放宽, 直线重复参与编组情况增多, 同时本文算法在确定同名直线对时改变了现有研究中确定唯一同名直线对方法取而代之的是保留了灰度相关度较高范围内的所有同名直线对, 这些被保留的直线对中包含了大量的重复直线。此后, 这些直线会进一步通过后续检核。

同参数 T_{da} 分析指标, 分别对其余的匹配约束参数 T_α 、 T_β 、 T_{db} 、 T_c 、 T_ρ 和结果检核参数 T_d 、 T_{dc} 、 T_{de} 依



次进行实验分析, 选择出合适的参数阈值。如表 3 所示为本文参数阈值选择结果。

其中, 根据分析研究将相关系数 ρ 的基础参数阈值设置为 $T_\rho = 0.75$, 鉴于匹配过程中由相似性纹理引起的灰度相似测度会存在多峰值且存在虚假峰值现象, 其值一般大于 0.9 且在 0.9 附近, 因此进一步以 0.9 为分界点。对于 $\rho \in [0.75, 0.9)$, 选择相关系数最大值对应的候选组对为匹配同名直线对, 而对于满足 $\rho \in [0.9, 1]$ 的所有候选直线对全部保留, 后续检核过程中进一步确定其正确匹配, 以此增加匹配结果中同名直线数目和提高匹配正确率。此处建议读者可根据该经验和相关需要适当选取灰度相关系数阈值。

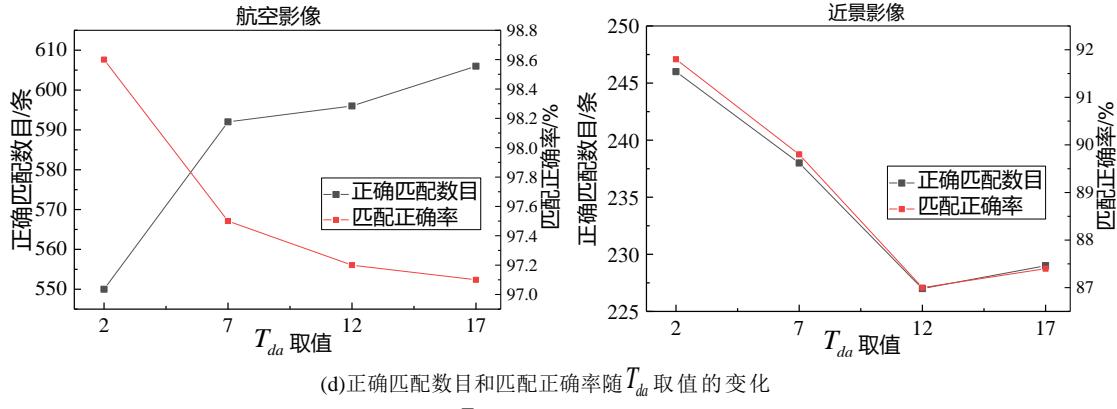


图 11 参数阈值 T_{da} 的不同取值对匹配结果的影响

Fig. 11 The Influence of Different Parameter Thresholds T_{da} on the Matching Results

表 3 参数阈值选取结果
Tab. 3 Result of Parameter Threshold Selection

影像类型	编组阈值		匹配约束阈值						结果检核阈值	
	T_r	θ	T_{da}	$T_\alpha = T_\beta$	T_{db}	T_C	T_ρ	T_D	T_{dc} / T_{de}	
航空影像	26	[10°, 170°]	7	15°	1.4	6	0.75	0.85	12/1.7	
近景影像			2	5°	0.4	2			6/0.7	

2.2 不同算法对比分析

采用表 3 中参数阈值, 本文算法对图 10 所示的 6 组影像进行直线匹配与检核实验。为了验证本文算法的有效性, 对于 6 组影像数据, 在同名点获取和直线提取结果相同的前提下分别实现了文献[13]中以线点仿射不变结构为主的直线匹配算法 (New Line-Points Invariant, N-LPI) 和文献[15]中以均值-标准差直线描述符 (Mean-Standard Deviation Line Descriptor, MSLD) 为主的直线匹配算法, 鉴于文章篇幅限制, 仅选取本文算法实验结果图进行显示, 如图 14 所示, 目视判读匹配结果正确与否, 红色代表正确匹配直线, 蓝色代表错误匹配直线。并将三种算法匹配结果数据统计于表 4, 表中第 3~13 列存储数据的含义与表 2 第 3~13 列存储数据的含义相同。两种对比算法均为单直线匹配算法, 故不涉及表中第 3~8 列结果, 用 N/A 表示。

从结果中包含同名直线正确匹配数目和匹配正确率两个角度分析。对于同名直线正确匹配数目, 如表 4 第 12~13 列所示, 与其他两种算法相比, 本文算法正确匹配数目最高为图 10(a)、(c)组影像, 此外, 除图 10(d)组影像外, 本文算法的正确匹配数目均比 MSLD 算法高。对于图 10(b)、(d)、(e)、(f)组影像, N-LPI 算法的正确匹配数目最高, 分别是本文算法的 1.08 倍、2.94 倍、2.0 倍、1.31 倍; 对于匹配正确率, 本文算法相对于其他两种算法较有优势, 均在 96% 以上, 最高为 100%, 三种算法中本文算法匹配正确率最高为图 10(a)、(b)、(c), 比 N-LPI 算法分别高 30.3%、1.4%、38.5%, 比 MSLD 算法分别高 13.6%、2.9%、9.7%。对图 10(d)、(e)、(f)的匹配正确率, 本文算法与 N-LPI 算法接近, 且比 MSLD 算法分别高 18.2%、75%、5.1%。此外, 对于 10(e)组

影像, MSLD 算法的正确匹配数目和匹配正确率较低, 几乎不能匹配。根据以上分析, 可以得出如下结论:

N-LPI 算法, 对于图 10 中三组近景影像匹配效果较好, 但对于航空影像结果中错误匹配较多。分析其原因, 受同名点数量的影响, 相对于近景影像, 这三组航空影像获得的同名点较为稀疏, 该算法在构建线点仿射不变性结构过程中舍弃了直线邻域小于 3 个同名点的直线, 使得一部分直线因邻域同名点数量不满足条件而未参与匹配, 从而在一定程度上降低了最终结果中同名直线数目; 另外, 受同名点精度的影响, 在匹配过程中单应矩阵是由线点不变结构中直线邻域的同名点计算获得, 由于影像存在纹理相似程度较大、视角变化较大, 除了同名点稀疏外其准确性也较低, 此时用相应的同名点计算得到的单应矩阵不可靠, 进而影响了后续匹配, 故提高了错误匹配概率, 实验过程中发现 N-LPI 算法对图 10(c)组影像匹配的结果中正确匹配直线仅分布在建筑物顶部形状较为规则的场景中, 对于建筑物屋顶边缘、立面的纹理相似程度较大、视角变化较大以及存一定的尺度变化场景中匹配效果较差。而对于三组近景影像, 在满足同名点数量和精度的前提下, 该线点不变结构算法对旋转变化、光照变化、尺度变化影像匹配效果较好。

除图 10(e)组影像外, MSLD 算法对其余 5 组影像的匹配效果均介于其他两种算法之间。该算法对旋转变化、光照变化、视角变化条件下的直线匹配鲁棒性较好。但该 MSLD 描述符构建本身未考虑尺度变化因素, 如对图 10(e)组尺度变化影像匹配效果较差。此外, 在构建 MSLD 描述符过程中, 同时考虑直线两侧信息, 而航空影像特征直线多分布在建筑物边缘, 再加上纹理重复因素的影响使得两张影

像上同一目标物提取直线两侧纹理信息一致性较弱, 对两张影像上同一目标物直线两侧边缘相似性计算产生了影响, 从而降低了匹配正确率。

相较于其他两种算法, 本文算法存在的优势:

(1) 采用直线编组方式, 可通过改变编组阈值使更多提取直线参与直线匹配; (2) 在直线匹配过程中采用编组直线中两直线之间的几何关系和直线对构成的邻域特征相结合的方式完成直线匹配, 摆脱了对同名点的依赖, 同时解决了因仅使用直线邻域特征约束而受场景复杂特征因素(如纹理重复、视角变化、尺度变化等)影响使匹配效果不稳定的问题;

(3) 在采用直线邻域特征(辐射特性、描述符构建)进行匹配和检核时, 分别考虑直线两侧信息, 有利于建筑物边缘匹配。(4) 采用灰度相似性约束确定同名直线对时, 与原有最佳同名直线对的确定方法不同的是本文算法保留了灰度相关性系数在0.9~1范围所有候选直线对, 并将其加入后续检核, 避免了因影像中纹理相似、纹理重复现象导致错误同名直线对灰度相关性系数高于正确同名直线对灰度相关性系数而导致错误匹配, 提高了匹配正确率。如图13所示为图10(c)影像建筑物立面匹配结果局部放大图, 两张影像存在一定的视角变化和尺度变化, 并且纹理相似情况明显, 从图中匹配直线可以看出用本文算法对此类复杂场景影像的匹配结果较好。

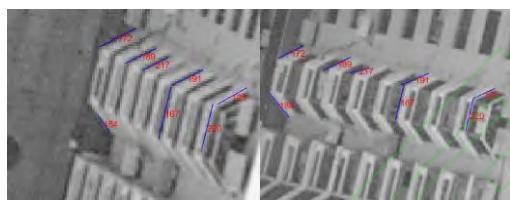


图 12 复杂场景直线匹配结果

Fig. 12 Line Matching Results for Complex Scenes

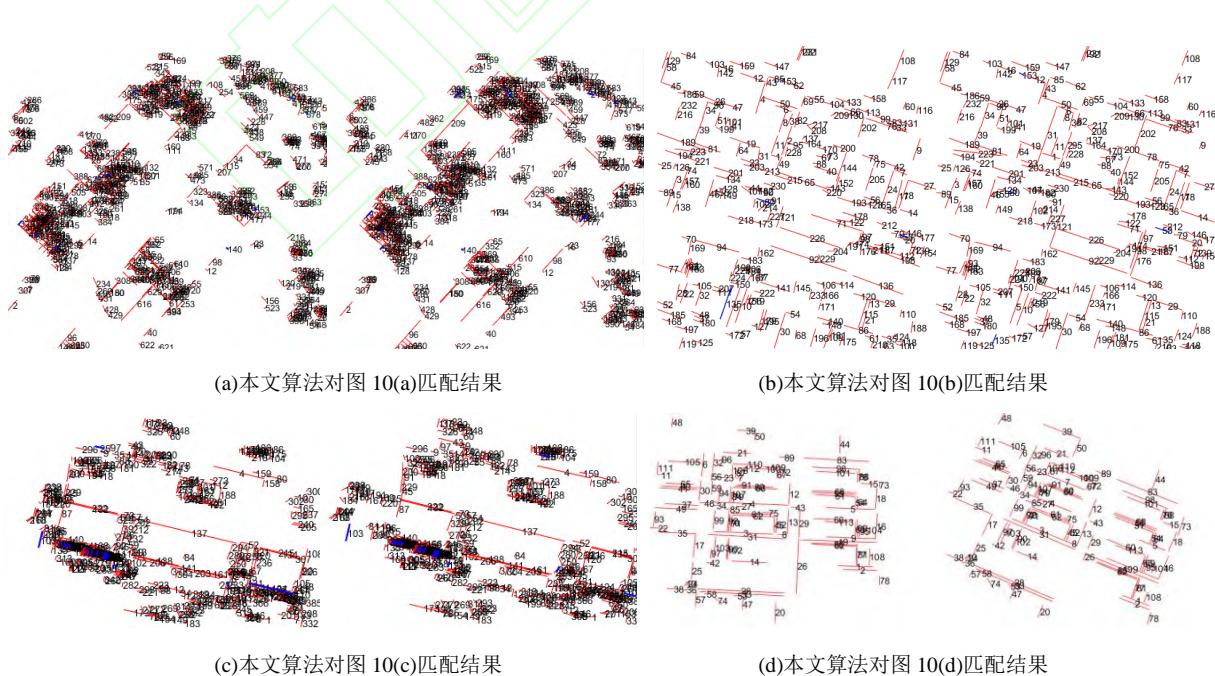
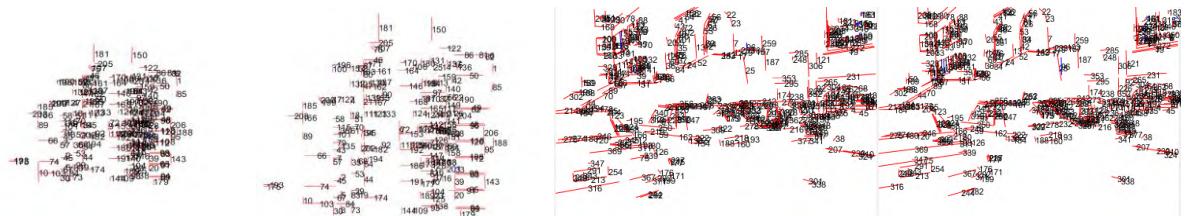


图 13 断裂直线匹配结果检核

Fig. 13 Fracture Line Matching Result Check

此外, 从本文算法结果检核角度看, 如表4第9-11列, 6组影像的最终同名直线数目比其包含在原始参考影像、搜索影像上提取直线的数目分别少108条/60条、25条/29条、32条/8条、0条/1条、0条/3条、28条/10条, 由于其中包含“一对一”、“一对多”、“多对一”和“多对多”匹配关系, 本文通过检测这些对应关系, 采用直线描述符相似性约束检核“一对一”匹配, 并结合直线间共线几何检测

“多”直线中共线直线、剔除错误匹配直线并将正确的共线“多”直线进行拟合, 提高了匹配正确率, 保留了直线的完整性。如图13所示, 为图10(b)影像中匹配结果局部放大图, 检核断裂直线匹配结果得到正确的“一对多”、“多对一”、“多对多”匹配关系如图13(a)所示, 拟合其中的共线“多”直线, 如图13(b)所示, 得到最终的“一对一”同名直线。



(e)本文算法对图 10(e)匹配结果

(f)本文算法对图 10(f)匹配结果

图 14 直线匹配结果
Fig. 14 Line Matching Results

表 4 不同算法直线匹配结果

Tab. 4 Line Matching Results by Different Algorithms

立体像对	算法	编组直线数目/对				匹配结果中包含直线的数目/条				检核结果中包含直线的数目/条				正确匹配数目/对	匹配正确率/%		
		参考影像	搜索影像	同名直线拆分后同名直线数目/对		参考	搜索	检核后同名直线数目/对		参考	搜索						
				对	数目/对			影像	影像		影像	影像					
	N-LPI	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	882	882	882	882	600	68.0				
图 10(a)	MSLD	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	366	366	366	366	310	84.7				
	本文算法	5689	6481	1306	1142	906	840	630	738	690	619	619	98.3				
	N-LPI	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	256	256	256	256	248	96.9				
图 10(b)	MSLD	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	173	173	173	173	165	95.4				
	本文算法	1099	1086	851	860	344	342	233	258	262	229	229	98.3				
	N-LPI	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	224	224	224	224	129	57.6				
图 10(c)	MSLD	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	214	214	214	214	185	86.4				
	本文算法	3965	4894	1199	836	488	468	385	417	393	370	370	96.1				
	N-LPI	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	332	332	332	332	332	100				
图 10(d)	MSLD	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	148	148	148	148	121	81.8				
	本文算法	1259	1201	132	143	129	126	113	113	114	113	113	100				
	N-LPI	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	412	412	412	412	409	99.3				
图 10(e)	MSLD	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	25	25	25	25	6	24.0				
	本文算法	2694	4063	528	590	369	361	206	206	209	204	204	99.0				
	N-LPI	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	499	499	499	495	495	99.2				
图 10(f)	MSLD	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	331	331	331	308	308	93.1				
	本文算法	3674	6481	2117	1768	648	483	385	413	395	378	378	98.2				

3 结论

本文提出一种结合线对几何特征及单线描述符约束的直线匹配算法。该方法将满足一定几何条件约束的直线对作为匹配基元，对其进行整体匹配，充分利

用及挖掘线对中两直线间所包含的几何属性信息及灰度信息，兼顾结构拓扑，提高线对匹配可靠性，有效解决了混合视角变化、纹理重复等复杂场景直线匹配难题；匹配结果检核阶段，借鉴点梯度描述符构建线梯度描述符，提高描述符可靠性，结合共线约束及描述符间相似性，对结果进行检核及整合，有效解决匹

配结果中存在的非“一对一”的匹配冲突问题，并使得部分直线提取断裂情况得到了完善；算法分别用于航空影像及近景影像直线匹配实验，并分别与不同算法进行对比分析，兼顾匹配数目及匹配精度两方面，本文算法对航空影像存在较大的优势。后续将进一步提高本文算法对近景影像的直线匹配。此外本文算法涉及的参数较多，如何选择合适的参数阈值使匹配效果达到一个平衡的状态，其过程比较复杂，因此，如何自适应灵活设置参数值，降低其对匹配结果的影响也是后续进一步研究的重点。

参 考 文 献

- [1] Wang H, Jia Z H, Zhang Y F. Aerial Image Matching Based on NSST and Quaternion Exponential Moment[J]. *International Journal of Performativity Engineering*, 2018, 14(11).
- [2] Lu S H. Study and Implementation of Image 3D Reconstruction Based on Feature Matching Strategy by Geometric Constraints[D]. *Tsinghua University*, 2018.(陆胜寒. 基于影像几何约束匹配策略的三维重建方法研究与实现[D].清华大学, 2018.)
- [3] Wang W Q, You X, Yang J, et al. ElasticFusion for Indoor 3D Reconstruction with an Improved Matching Points Selection Strategy[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2020,45(9):1469-1477. (王玮琦, 游雄, 杨剑, 等. 一种改进匹配点对选取策略的ElasticFusion室内三维重建算法[J]. 武汉大学学报(信息科学版),2020,45(9):1469-1477.)
- [4] Cao L. Research on 3D Building Model Reconstruction and Optimization Method Based on Line Features of Oblique Images[D]. *PLA Strategic Support Force Information Engineering University*, 2020.(曹林. 基于倾斜影像线特征的建筑物三维模型重建与优化方法研究[D].战略支援部队信息工程大学, 2020.)
- [5] Chi Y C. Reconstruction and Evaluation Based on Image Edge Feature for Space Target[D]. *Harbin Institute of Technology*, 2019.(池雨灿. 基于图像边缘特征的空间目标重建与评估方法[D].哈尔滨工业大学, 2019.)
- [6] Liang Y. Research on 3D Model Reconstruction of Building form Close Range Image Sequence[D]. *Nanjing Normal University*, 2013.(梁艳. 基于近景图像序列的建筑物三维模型重建研究[D].南京师范大学, 2013.)
- [7] Zhang Y X. Research and Implementation of Multi-View Geometric 3D Reconstruction Algorithms Based on Linear Features[D]. *Yanshan University*, 2019.(张焱鑫. 基于直线特征的多视图几何三维重建算法研究与实现[D].燕山大学,2019.)
- [8] Manuel H, Michael M, Horst B. Efficient 3D Scene Abstraction Using Line Segments[J]. *Computer Vision and Image Understanding*, 2017, 157:167-178.
- [9] Schmid C and Zisserman A. Automatic Line Matching Across Views[C]. *IEEE International Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, 1997, 666 -671.
- [10] Liang Y, Sheng Y H, Zhang K, et al. Linear Feature Matching Method Based on Local Affine Invariant and Epipolar Constraint for Close-range Images[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2014,39(2):229-233. (梁艳, 盛业华, 张卡, 等. 利用局部仿射不变及核线约束的近景影像直线特征匹配[J].武汉大学学报(信息科学版),2014,39(2):229-233.)
- [11] Schmid C, Zisserman A. The Geometry and Matching of Lines and Curves Over Multiple Views[J]. *International Journal of Computer Vision*, 2000, 40(3):199-233.
- [12] Li C, Liu Y W, Hu M, et al. Study on Street Elevation 3D Reconstruction-Oriented Straight Line Matching for Close-Range Images[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2010, 35(12):1461-1465.(李畅, 刘亚文, 胡敏, 等. 面向街景立面三维重建的近景影像直线匹配方法研究[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2010,35(12):1461-1465.)
- [13] Jia Q, Fan X, Gao X K, et al. Line Matching Based on Line-Points Invariant and Local Homography[J]. *Pattern Recognition*,2018, 81:471-483.
- [14] Zhang Y S, Zhu Q, Wu B, et al. A Hierarchical Stereo Line Matching Method Based on A Triangle Constraint[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2013, 38(5):522-527.(张云生, 朱庆, 吴波, 等.一种基于三角网约束的立体影像线特征多级匹配方法[J]. 武汉大学学报:信息科学版, 2013, 38(5):522-527.)
- [15] Wang Z H, Wu F C, Hu Z Y. MSLD: A Robust Descriptor for Line Matching[J]. *Pattern Recognition*, 2009, 42(5):941-953.
- [16] Xing J, Wei Z, Zhang G. A Line Matching Method Based on Multiple Intensity Ordering with Uniformly Spaced Sampling[J]. *Sensors (Basel, Switzerland)*, 2020, 20(6).
- [17] Wang L, Neumann U, You S. Wide-Baseline Image Matching Using Line Signatures[C]. *2009 IEEE 12th International Conference on Computer Vision. IEEE*, 2010.
- [18] Al-Shahri M, Yilmaz A. Line Matching in Wide-Baseline Stereo: A Top-Down Approach[J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2014, 23(9):4199-4210.
- [19] Li K, Yao J, Lu X, et al. Hierarchical Line Matching Based on Line-Junction-Line Structure Descriptor and Local Homography Estimation[J]. *Neurocomputing*, 2016, 184:207-220.
- [20] Li K, Yao J. Line Segment Matching And Reconstruction via Exploiting Coplanar Cues[J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2017, 125:33-49.
- [21] Kim H, Lee S. A Novel Line Matching Method Based on Intersection Context[C]. *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 2010, 1014–1021.
- [22] Kim H, Lee S. Simultaneous Line Matching and Epipolar Geometry Estimation Based on the Intersection Context of Coplanar Line Pairs[J]. *Pattern Recognition Letters*, 2012, 33(10):1349-1363.
- [23] Li K, Yao J, Lu X. Robust Line Matching Based on Ray-Point-Ray Structure Descriptor[J]. *Asian Conference on Computer Vision. Springer International Publishing*. 2014.
- [24] OK A O, Wegner J D, Heipke C, et al. Matching of Straight Line Segments from Aerial Stereo Images of Urban Areas[J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2012, 74(1):133-152.
- [25] Wang J X, Song W D, Wang W X. Line Matching Algorithm for Aerial Image Based on Corresponding Points and Z-Plane Constraints. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2016, 45(1):87-95. (王竞雪, 宋伟东, 王伟玺. 同名点及高程平面约束的航空影像直线匹配算法[J]. 测绘学报, 2016, 45(1):87-95.)
- [26] Wang J X, Zhu Q, Wang W X. Reliable Line Matching Algorithm for Stereo Images with Topological Relationship[J]. *Acta*

- Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2017, 46(11):1850-1858.(王竟雪, 朱庆, 王伟玺. 顾及拓扑关系的立体影像直线特征可靠匹配算法[J]. 测绘学报, 2017, 46(11):1850-1858.)
- [27] Gioi R G V, Jakubowicz J, Morel J M, et al. LSD: A Fast Line Segment Detector with a False Detection Control[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2010, 32(4):722-732.
- [28] Tola E, Lepetit V, Fua P. Daisy: An Efficient Dense Descriptor Applied to Wide-Baseline Stereo[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2010, 32(5):815-816

Line Matching Algorithm Based on Pair-wise Geometric Features and Individual Line Descriptor Constraints

LIU Suyan¹ WANG Jingxue^{1,2} SHEN Zhaoyu¹ WANG Qiang³

1. School of Geomatics, Liaoning Technical University, Fuxin 123000, China;

2. Faculty of Geosciences and Environmental Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 611756, China;

3. Tianjin Normal University School of Geography and Environmental Sciences, Tianjin 300387, China

Abstract: **Objectives:** In the field of line matching and checking, the geometric attributes of the individual line are weakly stable, and non one-to-one matching results are difficult to be checked. To address the problems above, a line matching algorithm based on pair-wise geometric features and individual line descriptor constraints was proposed. **Methods:** For matching process, firstly two line segments which satisfied certain geometric constraints in the neighborhood were grouped into a line pair and matched as a whole. Secondly, the epipolar constraint of the intersection in the line pair was used to determine the matching range. Then characteristic angles within line pairs, distance ratio between line segments and the radiation information of the neighborhood of line pairs were used to narrow the range of the matching candidates. Finally, the final matching pairs was obtained by caculating the gray similarity of triangle region. For checking process, initially according to the angle of line with epipolar and the slope of line, the corresponding relation between individual lines was established. Moreover, each corresponding line pair was split into two groups of corresponding individual lines. Then, descriptors were established for two single lines in each group and the similarity between the two line descriptors was calculated. Eventually, collinear geometry and descriptor similarity were combined to check the matching results, eliminate the false matches. Collinear lines in the results were merged and one-to-one matching results were obtained. **Results:** Aerial images with typical texture features and close-range images of different transformation types were selected for experiments. The results demonstrate that the proposed algorithm has a high matching accuracy. The matching accuracy rate is higher than 95% in complex scenes with similar texture, perspective change, rotation change, scale change and illumination change. **Conclusions:** The proposed algorithm has good robustness to different types of images, and also has advantages for complex line matching check.

Key words: line matching; pair-wise line matching; results checking; collinear geometry; line descriptor

CLC number: P23

Document code: A

First author: LIU Suyan, PHD, specializes in line matching and 3D reconstruction. E-mail: suhao-surprise@qq.com.

Corresponding author: WANG Jingxue, PHD, professor. E-mail: xiaoxue1861@163.com.

Foundation Support: The National Natural Science Foundation of China (41871379, 42071343, 42001412); Revitalization Talents Program of Liaoning Province (XLYC2007026).

网络首发:

标题: 结合线对几何特征及单线描述符约束的直线匹配算法

作者：刘肃艳, 王竟雪, 沈昭宇,王强

收稿日期：2021-03-24

DOI: 10.13203/j.whugis20210147

引用格式：

刘肃艳, 王竟雪, 沈昭宇,等. 结合线对几何特征及单线描述符约束的直线匹配算法[J].武汉大学学报·信息科学版, 2021, DOI: 10.13203/j.whugis20210147 (LIU Suyan, WANG Jingxue, SHEN Zhaoyu, et al. Line Matching Algorithm Based on Pair-wise Geometric Features and Individual Line Descriptor Constraints[J].Geomatics and Information Science of Wuhan University,2021, DOI: 10.13203/j.whugis20210147)

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：

Freeman 链码优先级直线提取算法研究

赵丽科, 宋伟东, 王竟雪

武汉大学学报·信息科学版, 2014, 39(1): 42-46..

<http://ch.whu.edu.cn/article/id/2861>



利用局部仿射不变及核线约束的近景影像直线特征匹配

梁艳, 盛业华, 张卡, 杨林

武汉大学学报·信息科学版, 2014, 39(2): 229-233.

<http://ch.whu.edu.cn/cn/article/doi/10.13203/j.whugis20120611>