引文格式：汪玉成,张宁. 结合不规则直线段描述符与几何约束的直线段匹配算法[J]. 地理空间信息, 2025, 23(3): 9-12. doi:10. 3969/j.issn. 1672-4623.2025.03.003

结合不规则直线段描述符与几何约束的直线段匹配算法

汪玉成[1]，张　宁[1*]
（1. 六安市空间数据应用有限公司，安徽 六安 237000）

摘　要：针对传统直线匹配方法易漏选、匹配无力和部分直线描述符特异性较差等问题，提出了一种结合不规则直线描述符与几何约束的直线段匹配算法。通过网络公开数据集中4种不同影像变换类型数据对该算法进行验证，并与其他算法进行了对比分析。结果表明，相较于对比算法，该算法的平均正确率分别提高了27.5%、14.2%和1.2%，平均正确匹配数目分别增加了247、290和182个，充分体现了算法的有效性与准确性。

关键词：近景影像；极线约束；三角网约束；直线段描述符；透视变换
中图分类号：P231　　**文献标志码：**B　　**文章编号：**1672-4623（2025）03-0009-04

Line Segment Matching Algorithm Combining Irregular Line Segment Descriptors with Geometric Constraints

WANG Yucheng[1], ZHANG Ning[1]
(1. Liu'an Spatial Data Application Co., Ltd., Liu'an 237000, China)

Abstract: In response to the problems of traditional line matching methods such as easy omission, weak matching, and poor specificity of some line descriptors, we proposed a line segment matching algorithm combining irregular line segment descriptors with geometric constraints. We used the data of four different image transformation types in the open network data set to verify this algorithm, and compared it with other algorithms. The results show that the average correct rate of algorithm is improved by 27.5%, 14.2% and 1.2% respectively, and the average numbers of correct matches are increased by 247, 290 and 182 respectively, effectively illustrating the effectiveness and accuracy of this algorithm.

Key words: close-range image, epipolar constraint, triangulation constraint, line segment descriptor, perspective transformation

基于影像的三维重建因其场景应用范围广、成本低廉和操作门槛低等特点一直是三维重建的热点研究课题[1]，影像匹配则是其中最重要的一环，目前通常利用特征点匹配生成密集点云进一步构建三维模型，但对于人造场景往往会丢失或模糊细节信息。线特征作为场景特征之一，可有效勾勒物体的结构，还可作为匹配基元恢复物体的三维信息[2]。近年来，国内外学者提出了多种直线段匹配方法，可分为单直线段匹配方法和组直线段匹配方法[3]，前者利用自身属性（梯度、灰度和斜率）结合先验知识（极线约束、透视变换约束和邻域约束等）完成直线段匹配[4]；后者则利用直线间的邻域拓扑关系建立组别并构建匹配基元，同时采用可靠约束找寻同名直线段。参考文献[5]~[16]提出了各种直线段匹配算法，但都存在一定的局限性，如易漏选、匹配无力和部分直线描述符特异性较差等，因此本文提出了一种近景影像的直线匹配算法。首先进行双层筛选，降低候选直线段的数量；再利用不规则直线段描述符进行匹配，对于未获得候选直线段的线段，则采用全局透视变换矩阵筛选对应的直线段。

1　算法描述

本文提出的结合不规则直线描述符（ILSD）与几何约束的直线段匹配算法的具体步骤为：①输入一组影像作为基础数据，将其中一个作为参考影像，另一个作为搜索影像；②利用SIFT[17]、SURF[18]、ASIFT[19]和参考文献[20]算法等匹配算法进行特征提取匹配，并利用RANSAC[21]等精提取算法对匹配点进行精提取，得到基础矩阵与高精度匹配点；③对参考、搜索影像进行直线段提取；④利用极线约束获取参考影像直线段对应影像上的候选直线段；⑤利用同名三角网约束对候选直线段进行二次筛选，进一步减少候选直线段，若二次筛选后仍存在候选直线，则利用ILSD进行匹配，剩余参考影像直线段则利用透视变换约束进

第一作者简介：汪玉成（1994—），硕士，助理工程师，主要从事摄影测量与遥感工作，E-mail：751301647@qq.com。
通信作者：张宁（1994—），硕士，助理工程师，主要从事摄影测量与遥感工作，E-mail：95817850@qq.com。

行匹配，二者获取匹配的总集即为最终匹配结果。

1.1 极线约束

极线约束是立体像对间的一种“点对线”几何约束，即目标点的匹配点对应在某一条直线上。基于该性质将参考影像（即目标）直线段两端点的极线映射至搜索影像上，理想情况下，对应的直线段端点应位于极线上，但由于直线提取误差等因素的影响，很难保证完全对应。目标直线段面临的具体情形见图1，图中 Epline_A 与 Epline_B，即黄色与绿色虚线分别对应目标直线段 AB 的极线，$A_iB_i(i=1,2,3,4,5)$ 为潜在的匹配直线段，与 Epline_A 和 Epline_B 所形成的区域存在一定的交集，其中 A_1B_1 为理想情况下的正确直线段匹配结果，其对应匹配直线段两端点均在目标直线段的极线上；$A_iB_i(i=6,7)$ 为潜在候选直线段，与 Epline_A 和 Epline_B 所形成的区域无任何交集。

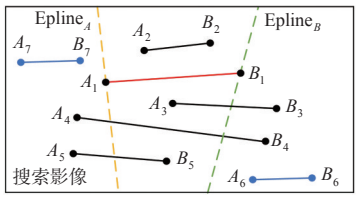
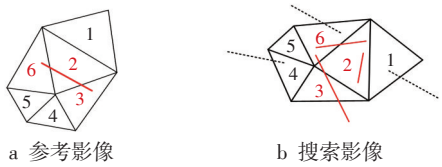


图1 候选直线示意图

1.2 同名三角网约束

通过极线约束初步筛选了目标直线段的候选直线段，但目标直线段的潜在候选直线段仍较多，为进一步提高算法运行效率，本文进行了二次筛选。通过对影像进行特征匹配与精提取获得高精度匹配点，由此构建同名三角网，确定目标直线段所在的三角形索引，并获取目标直线段候选直线段集合所在的三角形索引，两个索引的交集则为目标直线段二次候选直线段。图2a中红色直线段为目标直线段，经过的三角形索引为2、3、6，图2b中目标直线段的初次候选直线段集合为黑色虚线与红色直线段总和，由于黑色虚线所在的三角形索引与目标直线段索引无任何交集，所以黑色虚线不作为候选直线段，仅保留红色直线段部分。



a 参考影像 b 搜索影像

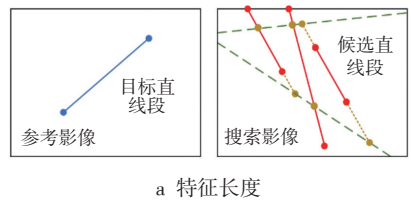
图2 同名三角网约束示意图

1.3 ILSD

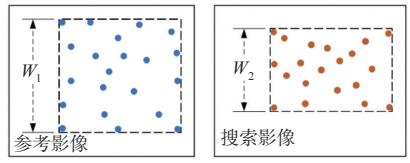
MSLD与LBD描述符利用仿射变换使其构建的描述区域呈矩形，但原始数据一旦被处理，都会存在一定的损失，因此为提高数据利用的完整度，本文建立了一种ILSD，由参考文献[22]得到启发，通过不规则描述区域对直线段进行定量描述，同时子区域间的相互重叠增加了区域间的相互联系，在一定程度上避免了由于视角变化带来的描述区域不一致的问题。

1）描述区域的构建。对于长度为len的任意直线段 L，首先将该直线段作为中心线构建直线描述区域，宽为 W，同时将描述区域等分为4个子区域 $\text{LSDR}=\{R_i, i=1,2,3,4\}$，每个子区域利用相邻描述区域边中点构建直线描述子区域；然后将4个子区域再划分为4个子窗口 $R=\{w_j, j=1,2,3,4\}$，至此得到了具备4个子区域、16个子窗口的直线描述区域。

构建目标直线段候选直线段的描述区域时，由于直线段提取算法提取断裂等原因，将导致目标直线段与候选直线段的直线特征区域不一致，为保证其一致性，利用目标直线段两端点与候选直线段的延长交点作为候选直线段的直线特征区域，图3中红色直线段为候选直线段，暗黄色端点形成的直线段为候选直线段特征区域。为保证目标直线段的描述区域宽与目标直线段宽相匹配，由匹配点所在参考影像与搜索影像形成的最大外接矩形宽度比值确定，而候选直线段描述区域的宽度 $W_H=W/S$。



a 特征长度

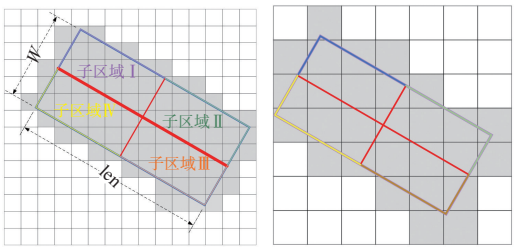


b 特征宽度

图3 候选直线特征区域示意图

2）描述符向量的构建。描述区域构建完成后，需统计16个子窗口的梯度信息，与传统直线段描述符不同的是，本文将直线描述区域等分为4块，以加大描述符向量间的特征差异，子区域间的相互重叠可降低视角变化差异带来的负面影响。本文对16个子窗口内的梯度信息进行统计并归一化，图4a中的矩形为直线描述区域，灰色阴影部分为参加描述符构建的像素块。

首先计算影像 x 和 y 方向的梯度 grad_x、grad_y，再求取梯度值 $\text{grad}=\sqrt{\text{grad}_x^2+\text{grad}_y^2}$ 和梯度方向 β。由



a 描述区域示意图　　b 局部放大图

图4　不规则描述符构建示意图

于影像拍摄将产生噪声等误差，为提高精度可采用Prewitt、Sobel和Scharr算子等三阶梯度模板，根据子窗口的所有像素 V 的梯度方向统计梯度值，得到4个方向区间上的梯度值。

$$\boldsymbol{G}=\begin{cases}\boldsymbol{G}_1=\sum\limits_{\alpha_1\leqslant\beta<\alpha_2}\omega\times\mathrm{grad}_{(m,n)}\\ \boldsymbol{G}_2=\sum\limits_{\alpha_2\leqslant\beta<\alpha_3}\omega\times\mathrm{grad}_{(m,n)}\\ \boldsymbol{G}_3=\sum\limits_{\alpha_3\leqslant\beta<\alpha_4}\omega\times\mathrm{grad}_{(m,n)}\\ \boldsymbol{G}_4=\sum\limits_{\alpha_4\leqslant\beta<\alpha_5}\omega\times\mathrm{grad}_{(m,n)}\end{cases}\quad(m,n)\subseteq w \tag{1}$$

式中，$\boldsymbol{G}$ 为每个子窗口4个梯度区域内的梯度信息向量；$\alpha_i(i=1,2,\cdots,5)$ 为分割梯度区间内的节点值；ω 为权重系数，$\omega=e^{-d^2/2\mathrm{dis}^2}$，$d$ 为像素块与直线段的距离，$\mathrm{dis}=W/2$；w 为子窗口内的所有像素块。

利用式（1）分别对每个子区域中的子窗口构建梯度信息向量，每个子区域的梯度信息向量 $GR_i(i=1,2,3,4)$ 大小为4×4；再计算该向量的标准差 $\mathrm{std}(\cdot)$ 与均值 $\mathrm{mean}(\cdot)$，为进一步降低场景敏感变换带来的负面影响，归一化得到子区域的描述符向量 $DR_i=\left[\mathrm{Norm}(\mathrm{std}(GR_i))\ \mathrm{Norm}(\mathrm{mean}(GR_i))\right]_{1\times8}(i=1,2,3,4)$；然后对所有子区域进行上述操作，得到1×32维的描述符向量 DR；最后计算候选直线段的描述符向量间的欧氏距离 dis_D，并规定低于阈值 Thdis_D 的为匹配直线段。

1.4　透视变换约束

透视变换约束的表达式为：

$$\begin{bmatrix}u''\\v''\\\delta''\end{bmatrix}^{\mathrm{T}}=\begin{bmatrix}u'\\v'\\1\end{bmatrix}^{\mathrm{T}}\begin{bmatrix}A&B&C\\D&E&F\\G&H&I\end{bmatrix} \tag{2}$$

式中，$u'=u''/\delta'$；$v'=v''/\delta'$；(u,v)、(u',v') 为变换前、后的像点坐标；$A\sim I$ 为透视变换参数。

由于参数求解在同乘一个系数时结果不变，令 $I=1$ 可知，未知参数有8个，一对匹配点可列出2个方程，位置参数为8个，则至少使用4对匹配点进行参数求取，当匹配点集合对数大于4时，通常采用最小二乘法拟合结果。针对目标直线段无候选直线段的情况，利用可靠匹配点计算得到透视变换矩阵 $\boldsymbol{P}$，计算该类目标直线段在搜索影像上的虚拟坐标，并分别遍历搜索影像上的全部直线段，双向计算端点到直线段的距离，求取均值，若小于设定阈值，则被认为是匹配直线段结果。

$\overline{AB}$ 两端点 A、B 经过透视变换在搜索影像上的位置为 A'、B'，由此构建虚拟直线段 $\overline{A'B'}$，计算 A'、B' 至候选直线段 $\overline{A''B''}$ 的距离 pldis_1、pldis_2（红色虚线）；再计算 A''、B'' 至 $\overline{A'B'}$ 的距离 pldis_3、pldis_4（绿色虚线）；然后求取4个点到直线的平均距离 $\mathrm{pldis}=\mathrm{mean}(\mathrm{pldis}_1,\mathrm{pldis}_2,\mathrm{pldis}_3,\mathrm{pldis}_4)$，若虚拟直线段与候选直线段的距离较接近，则有极大可能为对应的匹配直线段，因此设定距离阈值 Thpldis，若小于该阈值则被认定为匹配直线段（图5）。

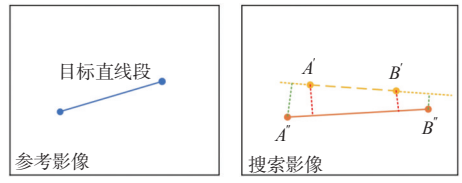


图5　透视变换约束示意图

2　实验结果与分析

为进一步验证本文算法的有效性与可行性，本文利用Matlab 2018a软件，硬件环境为Windows10操作系统，Intel(R) Core(TM) i7 10750H，16 GB运行内存，64位操作系统，对网络公开数据集进行验证。实验数据包含视点变换、尺度变换、旋转变换和明暗变换4种影像变换类型，大小分别为800像素×600像素、800像素×600像素、640像素×480像素和640像素×480像素。

2.1　参数设置

本文利用极线约束与三角网约束获取参考影像目标直线段的候选直线段，再利用ISLD匹配描述符向量，设定欧氏距离阈值 $\mathrm{Thdis}_D=1$，低于该阈值认定为匹配直线段；同时针对未有候选直线段的目标直线段，利用透视变换计算虚拟端点，其虚拟端点构建的直线段与搜索影像直线段的双向端点距离均值 pldis 若低于距离阈值 $\mathrm{Thpldis}=2$ 则作为匹配直线段。

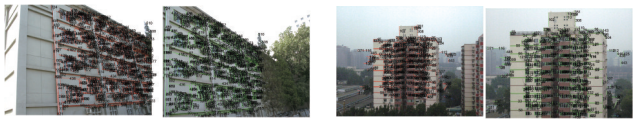
2.2　算法对比与分析

为对比本文算法的有效性与先进性，采用相同影

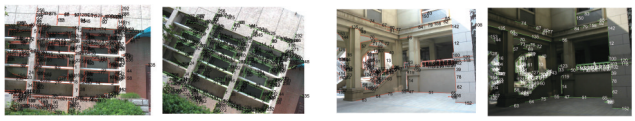
像数据与输入数据，将本文算法与MSLD、LBD和参考文献[15]算法进行对比，正确率统计判定方式为人工目视判读，结果见表1，可以看出，本文算法与参考文献[15]算法的正确率较平稳且较高，而MSLD算法与LBD算法的正确率并不稳定，MSLD算法甚至出现了急剧下跌的趋势，分析认为是MSLD算法未考虑不同尺度下描述区域变化的问题；本文算法的正确匹配数目远超其他算法，分析认为是本文算法采用了双层匹配，给予多次匹配机会，降低了匹配丢失的可能性，参考文献[15]算法虽采用了双检核方式，但对匹配失败的目标直线段未采用再次匹配，造成匹配丢失，MSLD算法与LBD算法采用小于阈值即正确的验证方式，由于直线段提取存在误差，其邻近特征信息会出现较大差异，无法正确匹配，同样没有二次匹配的机会，造成匹配丢失，同时MSLD算法与LBD算法在尺度变换影像中，由于存在高度相似的纹理，描述符特异性不强，只能降低阈值来提高准确率，匹配丢失现象较严重。本文算法的匹配结果见图6。

表1 算法对比

影像数据	提取直线数目		匹配算法	匹配直线总数目	正确匹配数目	正确率/%
	参考影像	搜索影像				
视点变换	1 286	1 345	MSLD	496	544	91.2
			LBD	322	302	93.7
			文献[15]	522	471	90.2
			本文算法	821	791	96.3
尺度变换	1 039	1 174	MSLD	27	5	18.5
			LBD	99	85	85.8
			文献[15]	301	297	98.7
			本文算法	437	452	96.7
旋转	664	703	MSLD	120	107	89.2
			LBD	140	119	85.0
			文献[15]	151	146	96.7
			本文算法	354	342	96.6
明暗变换	662	299	MSLD	72	93	77.4
			LBD	112	73	65.2
			文献[15]	92	96	95.8
			本文算法	159	154	96.9



a 视点变换 b 尺度变换



c 旋转变换 d 明暗变换

图6 本文算法匹配结果

3 结 论

本文提出了一种结合ILSD与几何约束的直线段匹配算法，采用多级匹配策略，以几何约束与描述符约束作为第一匹配阶段，对未匹配成功者采用几何约束进行二次匹配，改进了传统描述符的描述区域问题，增加了其特异性，有效解决了部分直线描述符特异性较差、部分匹配算法易漏选等问题。相较于对比算法，本文算法的平均正确率分别提高了27.5%、14.2%和1.2%，平均正确匹配数目分别增加了247、290和182个，证明了本文算法的有效性与可靠性。本文算法未在宽基线影像变换中进行实验，后续将对其进行深入研究分析。

参考文献

[1] 张宁. 基于近景影像的准稠密三维点云获取[D]. 阜新:辽宁工程技术大学,2021

[2] Wang J X, Zhu Q, Liu S Y, et al. Robust Line Feature Matching Based on Pair-wise Geometric Constraints and Matching Redundancy[J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing,2021,172:41-58

[3] 张平,王竞雪. 直线对几何特征约束的近景影像特征匹配[J]. 遥感信息,2020,35(4):124-132

[4] 何腕营,王竞雪. 结合特征编组与局部描述的直线匹配算法[J]. 测绘科学,2020,45(6):126-133

[5] 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

[6] 符祥,尹红,黄勇,等. 基于相关点与几何约束的直线匹配方法[J]. 南昌航空大学学报(自然科学版),2018,32(1):41-47

[7] 李依泽,宋伟东,李淼. 三角网约束的航空影像直线匹配方法[J]. 遥感信息,2018,33(1):58-63

[8] 王竞雪,张雪. 结合几何约束和梯度描述子的直线段匹配[J]. 测绘通报,2018(5):29-34

[9] 王竞雪,崔昊. 局部点、线仿射不变性约束的近景影像直线段匹配[J]. 地球信息科学学报,2019,21(2):137-146

[10] 王竞雪,何腕营. 多重约束条件下的LBD描述子与直线段匹配[J]. 中国图象图形学报,2019,24(2):237-247

[11] Zhang L L, Koch R. An Efficient and Robust Line Segment Matching Approach Based on LBD Descriptor and Pairvise Geometric Consistency[J]. Journal of Visual Communication and lmage Representation,2013,24(7):794-805

[12] 徐辛超,李旭佳,马钰,等. 一种适合航空影像的直线匹配方法[J]. 测绘科学,2020,45(2):92-97

（下转第17页）