

# 基于相对定向结果和多视几何约束的序列影像直线相关研究

吴 军<sup>1</sup> 陈丹清<sup>1</sup>

(1 山东科技大学地球信息科学与工程学院, 青岛市经济技术开发区前湾港路 579 号, 266510)

**摘 要:** 以对序列影像进行连续像对相对定向的结果(自由网相机参数和部分同名像点)为基础, 对 VIDEO 序列影像的直线相关问题进行了研究, 提出并实现了相关的算法, 给出了在具体实践中的应用效果。

**关键词:** 序列影像; 直线相关; 多视几何

**中图法分类号:** P231.5; TP751; P237.9; TP753

目前, 影像直线相关的方法主要分为单直线特征相关和组直线特征相关两种。以关系匹配<sup>[1~4]</sup>为代表的组直线特征相关, 虽然能更多地利用直线特征间的拓扑信息(共线、共点、相对方位等)完成直线的匹配, 但对拓扑关系分析的复杂性以及对结构分割错误的敏感性影响了其在实际中的运用。单个直线特征相关主要考虑单个直线特征的几何特性——方向、长度以及重叠范围<sup>[5~7]</sup>, 或利用核线几何将直线段看作一系列的点计算相关系数作为检验准则<sup>[8,9]</sup>。该方法在二度重叠影像(two-view geometry, 双视几何)的直线相关中取得了较好的效果, 但相关操作所要求的运算量影响了它在多度重叠影像或序列影像中的运用。此外, 相关系数阈值确定的自适应仍然是一个有待解决的问题。

## 1 算法原理

本文主要是利用二度重叠影像间的同名像点及核线约束, 形成目标直线特征在其相邻影像上的匹配窗口, 再利用三度重叠影像(three-view geometry, 三视几何)来确定最后的同名直线特征, 以此为基础, 完成序列影像中所有同名直线的确定。

### 1.1 同名像点的视差约束

本文在对序列影像进行直线相关处理前, 已采用连续像对相对定向计算出序列影像的相对定

向元素(自由网相机参数), 并利用灰度匹配得到了一定数目的同名像点<sup>[10~13]</sup>。尽管同名像点在影像上的分布与该影像上直线特征间的相互关系无法确定, 且存在着部分同名像点的误匹配, 但由于序列影像间的重叠度高, 相邻影像间几何特征的透视变形差异较小, 可根据直线特征周围同名像点间的视差来粗略估计其同名直线的位置, 从而确定出一个以预测直线为中心的匹配窗口, 即给定目标直线  $L(X_1, X_2)$ , 设其在相邻影像上预测出的同名直线为  $L'(X'_1, X'_2)$ 。令  $d_1 = X_1 - X'_1$  ( $d_1 = (x, y)$ ,  $d_1$  表示视差矢量, 可由点  $X_1$  邻域内的同名点的视差所决定), 同名像点  $P_i(x, y)$ ,  $P'_i(x, y)$  ( $i = 0, 1, 2, \dots, n$ ) 在以点  $X_1$  为圆心、半径为  $R_0$  的圆区域内,  $Len_i$  表示点  $P_i(x, y)$  与  $X_1$  间的距离, 则有:

若  $\exists Len_k < 3$ ,  $k \in [0, n]$ ,  $d_1 = P_k - P'_k$  否则,

$$d_1 = \frac{\sum_{i=0}^n (P_i(x, y) - P'_i(x, y)) \frac{1}{Len_i}}{\sum_{i=0}^n \frac{1}{Len_i}}$$

同理, 可计算出  $d_2 = X_2 - X'_2$  预测同名直线的初始位置为:

$$L'(X'_1, X'_2) = L(X_1 - d_1, X_2 - d_2) \quad (1)$$

进一步地, 考虑到视差的不一致, 可认为目标直线的同名直线位于以预测直线为中心, 左、右相距间隔为  $d_0$  的平行区域内。

1.2 双视几何约束

同名像点的视差约束将搜索空间限定为以预测直线为中心的平行区域内, 利用双视几何约束可继续缩小直线搜索空间。双视几何即核线几何, 反映了两张像片之间的内部投影几何关系, 被广泛应用于计算机视觉及数字摄影测量, 以解决立体视觉中的点相关问题, 其数学形式可表达为基本矩阵  $F$ 。设  $x, x'$  分别为位于左、右像片上的同名像点,  $l'$  为左像点  $x$  在右像片上的同名核线,  $l$  为右像点  $x'$  在左像片上的同名核线,  $e, e'$  分别为左、右像片上的核点, 则  $F$  将具有如下性质<sup>[14, 15]</sup>:

$$x^T F x = 0; l' = F x, l = F^T x'; F e = 0, F^T e' = 0$$

尽管不能依靠搜索同名点的办法来确定两张像片上的同名直线特征, 但可以通过直线端点所决定的核线束来缩小直线特征的搜索空间<sup>[7, 8]</sup>。

1.3 三视几何约束

从几何上讲, 三度重叠影像提供了空间直线的冗余信息, 当固定中间影像上的直线特征时, 可由三视几何约束直接得到同名直线的组合(假定其在左、右影像上的同名直线存在), 其原理如下。

设空间直线成像于连续三幅影像, 中间影像上对应的影像直线特征为  $L_m$ , 在左、右影像上的备选同名直线集为  $L_l = \{ l_i, i \in [0, m] \}$ ,  $L_r = \{ l_j, j \in [0, n] \}$ , 则由  $l_i$  和  $l_j$  分别构成的解译面(由摄影中心、像片直线和空间直线所构成的空间平面)将确定一条惟一的空間直线(当两解译面不平行时), 进而投影到中间影像, 得到预测直线  $L_{ij}$ (由于端点无法确定, 实际上确定了该直线方程的表达形式), 定义  $L_{ij}$  与  $L_m$  间的误差  $e_{ij}^l$ , 可得到误差矩阵  $E_L = \{ e_{ij}^l, i \in [0, m], j \in [0, n] \}$ , 则当  $l_i, l_j$  同时为  $L_m$  对应的同名直线时,  $e_{ij}^l$  最小。考虑到同名直线的不惟一性(由于遮挡、阴影或直线提取算子的原因, 影像上的直线特征存在断裂的情形), 以  $\min\{E_L\}$  所对应的左、右影像上的直线作为基准, 对小于限差  $T_e$  的所有  $e_{ij}^l$  对应的备选直线进行共线测试, 以找出  $L_m$  在左、右影像上对应的所有同名直线。

如图 1 所示, 直线误差定义为目标直线  $L_m$  的端点  $X_1, X_2$  及其在预测直线上的投影点  $S_1, S_2$  所围区域的面积  $e_{ij}^l = \text{Area}(X_1, S_1, S_2, X_2)$ 。

令  $h_1, h_2, h(s)$  分别为目标直线  $L_m$  上的点  $X_1, X_2, P(s)$  到预测直线  $L_g(m_x, m_y, m_z)$  的距离,  $l$  为目标直线  $L_m$  的长度, 则有:

$$h_1 = \frac{m_x \cdot x_1 + m_y \cdot y_1 + m_z}{\sqrt{m_x^2 + m_y^2}}$$
$$h_2 = \frac{m_x \cdot x_2 + m_y \cdot y_2 + m_z}{\sqrt{m_x^2 + m_y^2}}$$
$$h(s) = h_1 + s \cdot \frac{h_2 - h_1}{l}$$
$$e_{ij}^l = \int_0^l h^2(s) ds = \frac{1}{3}(h_1^2 + h_1 h_2 + h_2^2)$$

考虑到  $l$  是关于直线长度的因变量, 不利于限差  $T_e$  的给定, 因此, 重新定义:

$$e_{ij}^l = \frac{(h_1^2 + h_1 h_2 + h_2^2)}{3} \tag{2}$$

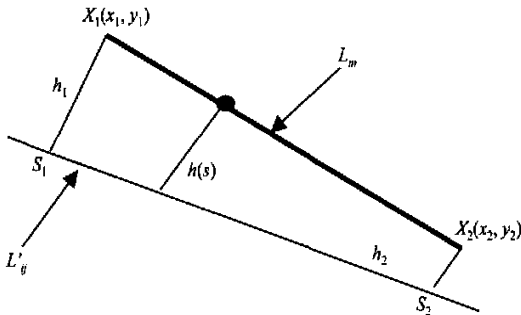


图 1 直线误差定义  
Fig. 1 Definition for Line Error

2 直线预测定义

设左、中、右三幅影像的投影矩阵分别为  $P', P$  和  $P''$ , 通过对三幅影像的投影矩阵进行同一透视变换, 可使其中某一投影矩阵为  $[I | 0]$ 。现假定透视变换后的投影矩阵分别为:

$$P' = [A | a], P = [I | 0], P'' = [B | b]$$

式中,  $A$  和  $B$  为投影矩阵左边的  $3 \times 3$  矩阵,  $a$  和  $b$  为右边的  $3 \times 1$  向量, 并记  $a_i$  和  $b_i$  表示相应投影矩阵的第  $i$  列( $i=1, 2, 3, 4$ )。若空间直线  $L$  对应于左、中、右三幅影像上的影像直线特征分别为  $l', l$  和  $l''$ , 直线所对应的解译面依次为  $S', S$  和  $S''$ , 则有:

$$S' = P'^T l', S = P^T l, S'' = P''^T l''$$

式中,  $l = [m_x, m_y, m_z]^T$ ,  $m_x, m_y, m_z$  满足直线方程  $m_x X + m_y Y + m_z = 0$ 。

由于三个解译面将交于一条空间直线  $L$ , 则该空间直线上的任一点  $O(X, Y, Z)$  均同时位于三个解译面上, 即  $S'^T O = S^T O = S''^T O = 0$ 。若定义矩阵  $M = [S' \ S \ S']^T$  则有:

$$M = [P'^T l' \ P^T l \ P''^T l'']^T = \begin{bmatrix} A^T l' & l & B^T l'' \\ a^T l' & 0 & b^T l'' \end{bmatrix}, M^T O = 0$$

显然,  $M$  的秩为 2, 则其列向量  $S, S', S''$  线性相关, 令  $S = K_1 S' + K_2 S''$ , 利用  $M$  矩阵中第二行、第二列的零元素可解出:

$$K_1 = k(b^T l''), K_2 = -k(a^T l')$$

式中,  $k$  为非零的比例常数。

将上式代入  $M$  矩阵的第一行, 可推出:

$$l_i = l'^T (b a_i^T) l' - l'^T (a b_i^T) l'' = l'^T (a_i, b^T) l' - l'^T (a b_i^T) l'' \quad (3)$$

式中,  $i = 1, 2, 3$ ;  $l_i$  为影像直线  $l$  的第  $i$  个分量。

事实上, 若定义矩阵  $T = [T_1 \ T_2 \ T_3]$ ,  $T_i = a_i b^T - a b_i^T$ , 该矩阵  $T$  即为三视张量 (trifocal tensor)。该三视张量建立三幅影像中同名直线间的相互关系, 由相机内方位元素及三幅影像间的相对运动惟一确定, 独立于场景结构。式(3)表明已知左、右影像上的一对同名直线时, 可直接得到中间影像上所对应的同名直线的方程表达形式。由于任意两个不平行的解译面确定一条空间直线, 则总可认为分别位于左、右像片上的两直线特征是对应于某一空间直线的同名直线对, 并得到中间像片上对应的同名直线 (该空间直线的投影直线), 从而完成直线的预测。

### 3 算法实施步骤

以单张像片为单位, 通过直线提取操作, 逐个建立序列影像中所有影像的直线特征集合, 直线提取的具体算法参见文献[11]。

#### 3.1 确定目标直线特征的备选同名直线集

##### 3.1.1 目标直线特征匹配结构的表示

考虑到三视几何约束的处理过程, 本文定义目标直线特征的匹配结构如下。

TargetLine Struct{

LineID: 目标直线在对应像片直线特征集合中的索引号;

ImageID: 目标直线所对应像片在像片集合中的索引号;

pLeftImgLineID: 初始时, 表示目标直线在左像片上的备选直线集; 结束时, 表示目标直线在左像片上的同名直线集 (以直线特征所在直线特征集合中的索引号表示);

nLeftImgLines: 初始时, 表示目标直线在左像片上的备选直线的数目; 结束时, 表示目标直线在左像片上的同名直线的数目;

pRightImgLineID: 初始时, 表示目标直线在右像片上的备选直线集; 结束时, 表示目标直线在右像片上的同名直线集 (以直线特征所在直线特征集合中的索引号表示);

nRightImgLines: 初始时, 目标直线在右像片上的备选

同名直线的数目; 结束时, 表示目标直线在右像片上的同名直线的数目;

bIsFind: 结果处理标志, 表明是否具有同名直线。

}

##### 3.1.2 目标直线特征匹配窗口的建立

1) 匹配窗口左、右边界直线的确定。根据给定直线  $L(X_1, X_2)$  及其邻域内的同名像点, 可由式(1)预测出同名直线:  $L'(X', X'_2) = L(X_1 - d_1, X_2 - d_2)$ 。令  $S = \max(\|d_1\|, \|d_2\|)$ , ( $\|\cdot\|$  表示矢量的长度), 则以直线  $l'$  为中心, 得到间隔为  $S/3$  的平行于  $l'$  的两条直线  $l'_b, l'_s$  即为搜索窗口的左、右边界直线。

2) 匹配窗口上、下边界直线的确定。根据基本矩阵计算出直线  $L$  两端点  $X_1, X_2$  所对应的核线  $l'_{e1}, l'_{e2}$  则搜索窗口上、下边界直线  $l'_b, l'_s$  的确定方法为: 若  $l'$  平行于  $l'$ , 则  $l'$  过点  $X_1$  且垂直于直线  $l'$ , 否则,  $l'_b = l'_{e1}$ ; 若  $l'$  平行于  $l'$ , 则  $l'_s$  过点  $X_2$  且垂直于直线  $l'$ , 否则,  $l'_s = l'_{e2}$ 。

3) 由直线  $l'_b, l'_s, l'_b, l'_s$  确定搜索窗口的封闭范围。

##### 3.1.3 “歧义”直线的初步剔除

设搜索窗口  $W$  的四个顶点为  $V_{tl}, V_{tr}, V_{bl}, V_{br}$ ,  $\overrightarrow{V_{tl}V_{tr}}, \overrightarrow{V_{bl}V_{br}}$  分别为上、下边界线段,  $S_l$  表示直线特征  $l$  备选的同名直线集合, 则根据双视几何约束, 对于影像上任一直线段  $l \in S_l$ , 必须满足:  $\overrightarrow{V_{tl}V_{tr}} \cap l \neq \emptyset$  或  $\overrightarrow{V_{bl}V_{br}} \cap l \neq \emptyset$  (直线段与上、下边界线存在公共点); 直线段  $l$  包含于搜索窗口  $W$ 。

利用直线特征的方向特性, 对  $S_l$  的备选直线进行检测。设  $L$  与备选直线段  $l \in S_l$  的夹角为  $\alpha$  ( $\alpha \leq 90^\circ$ ), 仅当  $\alpha < \alpha_0$  ( $\alpha_0$  为自适应阈值) 时, 备选直线段  $l$  予以保留。令  $\text{Len} = \min(L, l)$ ,  $\epsilon$  表示可接受的直线特征的最小长度, 则有:

$$\alpha_0 = \begin{cases} 90^\circ & \text{Len} < \epsilon \\ \max(15^\circ, \tan^{-1}(\epsilon / \sqrt{\text{Len}^2 - \epsilon^2})), & \text{Len} \geq \epsilon \end{cases}$$

#### 3.2 三度重叠影像中同名直线的确定

依据上述方法, 可确定目标直线段  $L$  在左、右相邻影像上备选的同名直线集  $L'_b, L'_s$ 。当  $L'_b, L'_s$  均不为空时, 可由三视几何约束确定同名直线组合, 其步骤如下。

1) 确定投影变换矩阵, 对三张影像进行同一投影变换, 计算三视张量<sup>[10]</sup>;

2) 利用式(3), 由三视张量及左、右影像上的备选同名直线  $L'_i \in L'_b, L'_j \in L'_s$  计算得到预测直线, 并根据式(2)计算预测直线与目标直线段  $L$  间的误差, 建立误差矩阵  $E_L$ ;

3) 搜索误差矩阵  $E_L$ , 并对满足限差  $T_e$  的备

选同名直线进行共线测试,以找出目标直线特征在左、右影像上对应的所有同名直线。

3.3 序列影像中同名直线的搜索

根据定义的目标直线特征的匹配结构,可方便地沿左、右方向进行迭代搜索,获取目标直线在序列影像中的所有同名直线特征。以沿目标直线特征右方向进行搜索为例,同名直线的搜索过程如下。

- 1) 根据目标直线特征的索引(LineID),记录该直线特征,检测目标直线特征的结果处理标志(bIsFind),若存在同名直线特征,则转入步骤 2);否则,终止搜索过程。
- 2) 依次取出目标直线特征在右影像中的同名直线作为目标直线特征,对照已记录的同名直线特征进行重复性检测,若不重复,则转入步骤 1)。

4 试验结果与结论

本文所使用的序列影像由数码 VIDEO(焦距为 10.5mm)在 400m 的高空垂直(存在小角度的倾

斜)摄录而获取,像幅大小为 1 080 像素×1 920 像素,序列影像重叠度约为 90%。本文对其中的 12 幅连续影像进行了直线相关测试(限于篇幅,仅显示其中三张连续影像上局部区域内的直线相关结果)。图 2 为从序列影像中抽取的三张连续影像(依次记为左、中、右影像)及直线提取的结果;图 3 为 3 张影像上直线相关的最终结果。整个直线相关过程耗时约 1min(不包括直线提取的时间,计算机 CPU 主频为 550Hz),左、中、右影像上提取的直线特征分别为 253、227、249 条,得到同名直线共 197 对,其中匹配错误的同名直线约 17 对,遗失的同名直线约 21 对,匹配失误差率为 8.6%,匹配成功率为 89.5%。由该试验结果可看出如下几点。

- 1) 由于充分运用了各种几何约束条件,尤其是三视几何对同名直线的惟一约束性,使直线相关的结果具有较高的准确性。
- 2) 由于在消除“歧义”直线时,避免了运算量很大的影像灰度的相关计算,使整个序列影像的直线相关在速度上获得了较高的效率。



图 2 三张影像上的直线特征  
Fig. 2 Extracted Lines in Three Images

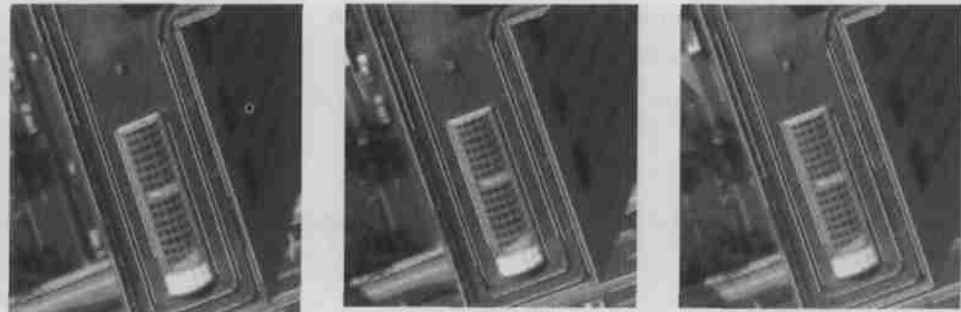


图 3 三张影像上的直线相关结果  
Fig. 3 Line Matching Results in Three Images

参 考 文 献

1 Ayache N, Faverjon B. Efficient Registration of Stereo Images by Matching Graph Descriptions of Edge Segments. IJCV, 1987

2 Gros P. Matching and Clustering: Two Steps Towards Object

Modelling in Computer Vision. IJRR, 1995
3 Horaud R, Skordas T. Stereo Correspondence Through Feature Grouping and Maximal Cliques. PAMI, 1989
4 Venkateswar V, Chellappa R. Hierarchical Stereo and Motion Correspondence Using Feature Groupings. IJCV, 1995
5 Ayache N. Stereovision and Sensor Fusion. MIT; MIT—Press, 1990
6 M'edoni G, Nevatia R. Segment-based Stereo Matching. CVGIP, 1985
7 Zhang Z. Token Tracking in a Cluttered Scene. IVC, 1994, 12(2): 110~120
8 Baillard C, Zisserman A. Automatic Reconstruction of Piecewise Planar Models from Multiple Views. Computer Vision and Pattern Recognition. 1999(6): 559~565
9 Schmid C, Zisseman A. Automatic Line Matching Across Views. Technical Report, University of Oxford, 1997
10 张永军. 基于序列图像的工业钣金件三维重建与视觉检测.[ 博士论文]. 武汉: 武汉大学, 2002
11 张祖勋, 吴 军, 张剑清. 一种基于线空间的直线抽取算法研究. 武汉大学学报·信息科学版, 2004, 29(3): 189~194
12 王之卓. 摄影测量原理. 武汉: 武汉测绘科技大学出版社, 1984
13 张祖勋, 张剑清. 数字摄影测量学. 武汉: 武汉测绘科技大学出版社, 1997
14 郑南宁. 计算机视觉与模式识别. 北京: 国防工业出版社, 1998
15 马颂德, 张正友. 计算机视觉——计算理论与算法基础. 北京: 科学出版社, 1998

---

第一作者简介: 吴军, 副教授, 博士. 现从事计算机视觉、数字摄影测量与三维城市建模领域的研究。  
E-mail: wujun93161@hotmail.com

# Line Stereo Matching Among Image Sequence by Using Result of Relative Orientation and Geometry Constrains from Multiply Views

WU Jun<sup>1</sup> CHEN Danying<sup>1</sup>

(1 Geoinformation Science and Engineering College, Shandong University of Science and Technology, 579 Qianwangang Road  
Qingdao Economic and Technical Development Area, Qingdao 266510, China)

**Abstract:** This paper proposes a line stereo matching strategy, which integrates the result of relative orientation and geometry constrains. The averaged parallax which comes from homo-points in two adjacent images is used to locate the search center for target line feature. Then with the epipolar constraint existing between two views, the search range (matching window) for target line feature can be formed and the candidate lines can be selected from that special matching window.

**Key words:** image sequence; line stereo matching; multiple view geometry

**About the first author:** WU Jun, associate professor, Ph. D. majors in computer vision, digital photogrammetry and 3D city modeling.  
E-mail: wujun93161@hotmail.com

(责任编辑: 晓晨)