

# 无需相似性量测的多片影像匹配

邵巨良

(武汉测绘科技大学 GIS 研究中心, 武汉市珞喻路 129 号, 430079)

**摘 要** 讨论一个摄影测量网络的三维自动重建, 其中, 重点讨论了无需相似性量测的多片影像匹配。该匹配算法包括了所有影像作为参考影像的连续考虑和整个网络同时匹配。本文中, 三维坐标矢量只用于剔除多余候选点, 对精度提高无任何贡献。本方法的精度是通过子像素的特征点提取和多片交会得到的。

**关键词** 多片影像匹配; 三维目标重建; 核曲线链; 整体质量控制; 精度

**分类号** P 231.5

习惯上, 航空摄影测量的像片区域覆盖的航向重叠为 60%, 旁向重叠为 20%~30%, 这限制了匹配中的单位像片数量, 即尽管许多像片可连接成一区域, 但基本是双像匹配。众所周知, 双像匹配的稳健性、精度和遮挡始终难以较好解决, 寻求多片匹配正是本文的出发点。在近景摄影测量和计算机视觉中, 更适合用多片匹配的方法<sup>[7,8]</sup>。

用几何条件的多片匹配, 基本的计算策略是用最小二乘法递归决定匹配点<sup>[4]</sup>。该方法的突出特点是通过引入各种参数得到高精度的结果。参数包括内外方元素、影像特征参数、模型改正系数、控制点坐标和数字表面模型。主要缺点是要求较高精确度的初值和计算速度特别慢, 这些缺点显然不容忽视。Heipke 提出目标空间方法用于多片匹配, 但仍沿用最小二乘匹配<sup>[5]</sup>。

另外, 多片匹配常常需要选择一个影像作为“参考”影像, 在参考影像上说明影像特征或灰度模板, 然后通过一定的约束在其它影像上找同名点。可是当参考影像上重要特征提取错误、漏掉或被遮挡, 那么对应目标点的匹配机会即永远消失。尽管可轮流由一影像作为参考影像, 可是最小二乘匹配的低效率限制了该方法的实际应用。

为解决这一问题, 一种方法是假设目标体积由体元组成, 并由一个三维累积器表示<sup>[1]</sup>。整个过程分 3 步实现: ① 三维累积器按 Z 轴分成多个平面单元; ② 每个影像特征点反投影到目标空间, 通过累积器的体元并记录它们; ③ 对体元进行检查, 体元上累计数越大, 说明越有可能是三维的目标点。可以想象, 当精度要求较高时, 该方法的计算机内存容量需相当大, 而且, 当像机检校不够完善

时, 匹配精度严重地受影响。另一种方法是遍选参考影像, 但不用最小二乘匹配。Maas 用一个累积器来计数核线通过的数量<sup>[6]</sup>。在某一影像特征点上, 这些核线是由其它影像上特征点形成。一个特征点上累计数越多, 说明与之对应的点越有可能成为同名点。此方法优点是可以不用影像的相似性量测, 因此, 可同时处理许多影像 (例如大于 20, 每个影像大小为 1 524×1 012 像素)。不足之处则是在像片重叠数量不很多的情况下 (例如 3 或 4) 易出现匹配粗差。

鉴于上述分析, 为了对一个区域的摄影测量网络进行三维重建, 本文采取以下措施: ① 不采用相似性量测, 因此在提取每一影像的特征点后, 可以不再占用计算机内存, 只保留它们的内、外方位元素和特征点坐标。这样可以同时处理许多影像。② 采用深度约束减少候选点。较之金字塔方法, 它的优点是不会出现上一级错误导致下一级错误匹配。并且, 工业目标表面的影像需要用一定的投影模板来增强特征, 而此种模板不宜重采样至较小的影像。③ 交会错误是决定概率函数的来源之一, 并且不采用最小二乘匹配。这样, 目标空间匹配的过度参数化即可避免。并且, 目标表面知识 (模型) 或深度数据预先并不要求已知。④ 一个多片摄影测量网络内, 不要求所有影像都重叠, 但必须通过其它影像连接在一起, 并同时整个网络匹配。⑤ 用松弛方法进行整体匹配质量控制。⑥ 考虑两种匹配多义性: 重复多义性和偏差多义性。它们将在第 3 节中详述。

实例验证了该方法的正确性, 这包括模拟的卡车所载沙的体积的量测 (主要用于矿的开采量)、汽车门的形状量测、岩体表面状态监测、装计

计算机盒子的表面形状恢复和一小城镇的数字高程模型 (DEM)的建立。在较好的几何配置下,若用 4 个重叠影像,匹配精度为 0.14 像素,运行速度为每秒 120 个三维目标点。

### 1 摄影测量网的初始重建

不同影像上同名点需满足以下条件:① 从多个影像的同名点交于对应目标点的位置错误应该小于某一范围;② 同名点必须位于对应的核曲线上;③ 每个影像应能考虑作为参考影像。下面介绍后两个条件。

#### 1.1 核曲线

两像机投影中心、目标点及两对应的影像点  $a_1(x_1, y_1)$  和  $a_2(x_2, y_2)$  的共面条件为:

$$\begin{vmatrix} B_X & B_Y & B_Z \\ U_1 & V_1 & W_1 \\ U_2 & V_2 & W_2 \end{vmatrix} = 0 \quad (1)$$

其中  $B_X, B_Y, B_Z$  各为  $X, Y, Z$  坐标轴的基线分量长度;  $U_1, V_1, W_1$  为左点  $a_1$  的模型坐标;  $U_2, V_2, W_2$  为右点  $a_2$  的模型。上式可改写为:

$$\begin{aligned} & ([C_{00} \ C_{01} \ C_{02}] [x_1 \ y_1 \ -f_1]^T \cdot \\ & [R'_{00} \ R'_{01} \ R'_{02}] + [C_{10} \ C_{11} \ C_{12}] \cdot \\ & [x_1 \ y_1 \ -f_1]^T [R'_{10} \ R'_{11} \ R'_{12}] + \\ & [C_{20} \ C_{21} \ C_{22}] [x_1 \ y_1 \ -f_1]^T \cdot \\ & [R'_{20} \ R'_{21} \ R'_{22}]) [x_2 \ y_2 \ -f_2]^T = 0 \quad (2) \end{aligned}$$

其中,

$$\begin{aligned} C_{00} &= B_Y R_{20} - B_Z R_{10}, C_{01} = B_Y R_{21} - B_Z R_{11} \\ C_{02} &= B_Y R_{22} - B_Z R_{12}, C_{10} = B_Z R_{00} - B_X R_{20} \\ C_{11} &= B_Z R_{01} - B_X R_{21}, C_{12} = B_Z R_{02} - B_X R_{22} \\ C_{20} &= B_X R_{10} - B_Y R_{00}, C_{21} = B_X R_{11} - B_Y R_{01} \\ C_{22} &= B_X R_{12} - B_Y R_{02} \end{aligned}$$

式中,  $R'_{ij} (i=0, 1, 2, j=0, 1, 2)$  与  $R_{ij} (i, j=0, 1, 2)$  为左、右像片的旋转矩阵元素  $x_1, y_1$  和  $x_2, y_2$  及内外方位元素互为线性函数。可是目前用于近景摄影测量和计算机视觉中的 CCD 数字像机都存在镜头畸变,最大甚至达到 20 像素。由此,  $x_1, y_1, x_2, y_2$  需要非线性改正 (Fraser, 1997)。结果,这导致同名点不在对应的核线上,而位于核曲线上。图 1 给出了核线与核曲线的对照表示。

式 (2) 中,  $C$  和  $R'$  与影像点无关,只与外方位元素有关,因此该式可避免许多参数的重复计算。

(a) 不考虑镜头畸变改正时的核线影像 (b) 考虑镜头畸变时的核曲线影像

图 1 核线与核曲线

Fig. 1 Epipolar Lines and Epipolar Curves

一“右影像”点与一“左影像”点可通过对应的两像机投影中心构成一条核曲线。同理,一影像点在其它  $N-1$  个重叠影像上的同名点产生  $N-1$  条核曲线。由此,对一个目标点,  $N$  个重叠影像生成  $N(N-1)$  条核曲线。这些核曲线构成一条核曲线链。同时,该目标点与核曲线链上影像点构成了摄影测量网络的一个节点。

在一核曲线链上,由于像机检校的不完整性、特征点定位误差、外方位元素的误差及特征点重复性(即一条核曲线上有多个特征点通过),一特征点可产生多个候选点(多义性)。前 3 个因素导致交会误差,交会误差则引起匹配的偏差多义性。在一核曲线上,相距较远的多个特征点则引起重复多义性。这两种匹配多义性构成了本文所要解决的基本问题。图 2 显示了这两种多义性。  $A_1$  是真实目标点,  $A_2$  很接近于  $A_1$ , 即为偏差多义性。相反,  $A_3$  远离  $A_1$ , 则为重复多义性。显然,若目标点近似值已知,重复多义性即可剔除,偏差多义性则依赖于多片交会余差来决定。可是近似值未知

时,这两种需联合考虑。下节将会详述。

#### 1.2 所有影像的连接考虑

为简单起见,假设有 4 个影像,第一个影像上的一特征点已知。特征点与目标点的(包括所有候选点所产生的)三维连接过程为:首先,搜索第二影像核曲线上所有候选点。其次,计算前方交会得目标点坐标。若坐标在像机与目标深度的阈值之内,该点保留。选择其中之一目标候选点,投影到其它影像上,得到一影像点,比较邻域内是否有特征点,若有,再判断该特征点是否满足在前面影像上对应特征点构成的核曲线上,若满足则保留这些点。当第一影像上所有特征点计算完毕,相似地再计算下一影像上的特征点。当所有影像上的特征点完成后,一个初始的整个区域的三维重建即形成,如图 3 所示。图中,空心圆和空心椭圆各表示多义的特征点和虚拟目标点;实心圆和椭圆表示真实的特征点及目标点;实线表示真实的影像-目标投影线;虚线表示虚拟的影像-目标投影线。

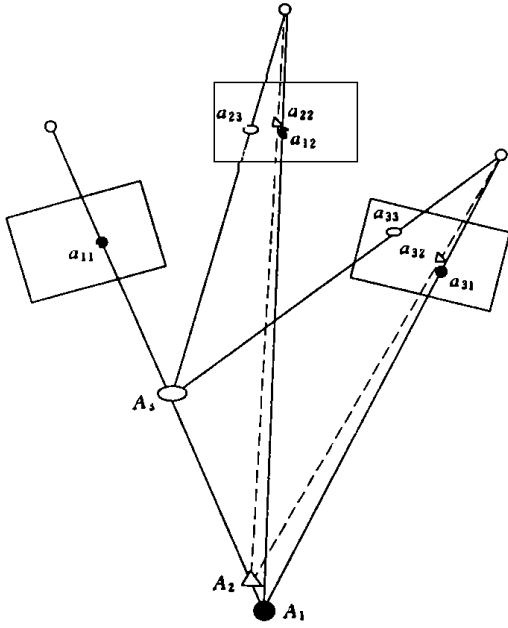


图 2 一特征点有多个候选匹配点, 两种多义性  
Fig. 2 A Feature Point with Many Matching Points, Two Kinds of Ambiguities

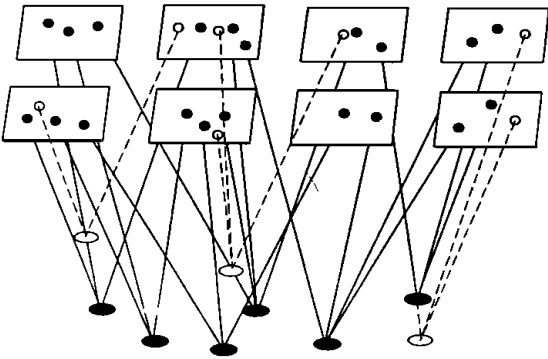


图 3 初始的整个区域的三维重建  
Fig. 3 Initial 3-D Reconstruction

正如前所述, 每个特征点可能有多个候选点, 为消除多义性, 同一影像中相邻域内特征点的视差或深度的相容性需要检查来达到整个网络的一致匹配。

## 2 整体质量控制

为消除该两类匹配多义性, 两类相容性函数用于松弛处理。一类与多片空间交会误差有关, 另一类则与特征点的匹配局部一致性有关。然后, 由此而得的两类松弛概率联合而得总的松弛概率。假设影像  $i$  上一点  $a_i$  和影像  $j$  上一候选点  $b_j$  初始匹配成功, 则概率联合为:

$$P_{ij} = P'_{ij} + \lambda \cdot P''_{ij} \quad (3)$$

其中  $P'_{ij}$  和  $P''_{ij}$  为两类标准化的概率, 它们分别为第一、二类的松弛概率;  $\lambda$  是一控制系数, 它控制两类概率对总概率的贡献量。迭代过程如下:

$$P_{ij}^{k+1} = A + B \cdot P_{ij}^k \quad (4)$$

其中  $A$  和  $B$  为控制收敛速度的系数。当一个节点上的所有点的概率超过一给定阈值时, 该节点被接受, 与该节点有关的各影像上特征点与一目标点匹配成功。

### 2.1 偏差多义性的松弛概率

前已述及, 偏差多义性与多片空间交会误差有关。虽然任何三影像点实际上不会交于一点, 但这些交会点将会位于一定的误差范围之内。该误差范围可以从内、外方位元素和特征点定位的精度估计得来或直接给定一经验值。因此, 一个偏差多义性的拒绝判别因子将决定于该交会误差。可是, 由于像机检校的不完善 (特别是在近景摄影测量和计算机视觉中) 和特征点定位误差, 同名点的交会误差不会很小, 在此情形下, 用交会误差单独决定单点的匹配结果, 将无疑造成相邻点匹配的不协调。

由此, 引出一个利用交会误差解决偏差多义性的方法。即通过概率迭代的松弛方法, 概率对于点  $a_i$  和候选点  $b_j$  计算如下:

$$P'_{ij} = P_{\Sigma} \cdot f(e_{ij}) \quad (5)$$

$$f(e_{ij}) = \exp \frac{1}{e_{ij} + c} \frac{1}{e_{ij} + c}, \text{ 或 } \frac{1}{e_{ij}^{1/2} + c}$$

其中,  $P_{\Sigma} = \sum_{k \in N, k \neq i, j} P_{jk}$

这里,  $P'_{ij}$  是第一类型的概率;  $f(e_{ij})$  是当前点在影像  $i$  与  $j$  的交会误差  $e_{ij}$  的可供选择的多种函数;  $P_{\Sigma}$  是当前迭代中由影像  $j$  与  $k$  ( $k \in N, N$  为总的影像数量) 上相关点的概率  $P_{jk}$  总和。  $P_{jk}$  在开始迭代时为一常数 (例如 1);  $c$  为防止计算机溢出而设的小常数。

$P'_{ij}$  的物理意义是交会误差越小和 (或) 与该目标点对应的影像点越多, 对当前候选点的支持越大。这便是一种匹配点决定的整体考虑。

### 2.2 重复多义性的松弛概率

不失一般性, 重复多义性的消除是通过局部区域内的一致性来决定的。但通常该方法在影像空间中实现, 例如一致的视差成了近于标准的双像立体点特征匹配的约束条件。然而, 本文中方法则在目标空间中实现。这是因为, 影像平面与目标面有很大倾角, 影像之间有很大旋转。这两者都不可能使影像空间上的相邻特征点进行视差的比较。本文中, 一个局部的深度一致性作为相容性条件。如图 4 所示, 影像  $L_1$  上点  $a_1$  在影像  $L_2$  有

个候选点  $b_0$  和  $b_1$  点  $a_1$  的物理“邻居”是  $a_3$   $a_3$  和  $a_4$  它们在  $L_2$  上的候选点分别为  $b_3$   $b_3$  和  $b_4$  按照目标空间深度一致性,只有点  $A_2$  与  $A_1$  在容许域内,而  $A_3$  和  $A_4$  则不在。因此点  $a_1$  和  $a_2$  是相容性“邻居”。另一方面,没有点与  $A_0$  相容,这导致了  $a_1 - b_1$  为可能的候选匹配对。同样,因  $A_3$  和  $A_4$  在相容邻域内,故点  $a_3$  和  $a_4$  是相容性邻居。物理邻居不一定是相容性邻居,而相容性邻居则必定是物理邻居。并且,相容性邻居本身无任何意义,只有当一定的候选对存在时才有意义。

义性的松弛概率为  $P_{ij} = \sum_{R} P_{ij}$  其中  $R$  为一局部区域,点  $a$  满足影像  $i$  与  $j$  之间的相容性条件。

### 3 实验

为了确定多片整体匹配的计算时间和精度,本文方法通过由 20 个影像组成的一个摄影测量网络实现。影像由柯达 DCS420 数字像机获取。被摄目标为一个装计算机的盒子,体积约  $1 \text{ m}^3$ 。每个影像约有 1 200~ 1 800 个特征点。匹配速度为每秒 120 个三维目标点。利用的是 PC Pentium-200 处理器。由于盒子表面很光滑,我们用深度误差作为精度评定的对象。在 4 度重叠下 (4 张像片),中误差为 0.11 mm,相当于 0.14 像素。图 5 的左上角显示了该摄影测量网络的摄站配置,其

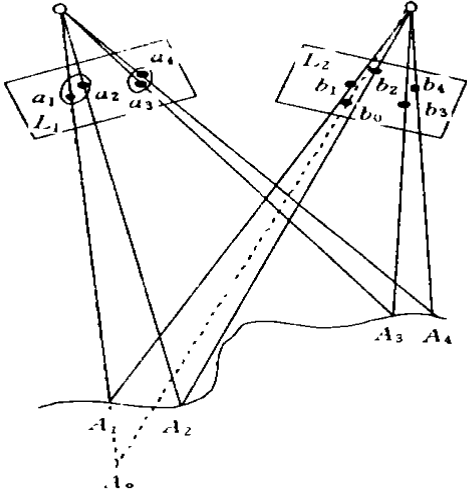


图 4 由深度一致性作为相容性条件得到相容邻居

Fig. 4 Compatible Neighbours

如果目标表面光滑程度高,局部深度一致性则由局部坡度一致性代替。这是因为前者更容易许一定程度的表面不连续,而后者则能够控制粗差。但粗差在多片情况下 (如大于 5) 较少出现。

从相容性关系,局部一致性相互支持重复多

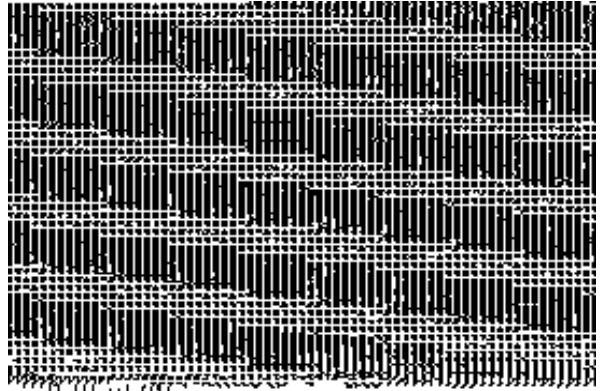


图 5 一摄影测量网络对一盒子的量测

Fig. 5 A Box Measured by a Photogrammetric Network

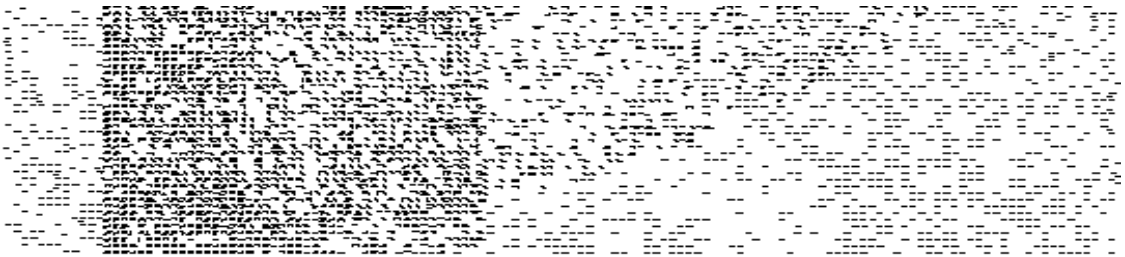


图 6 用数字像机进行数字高程模型获取

Fig. 6 Achieving DEM with Digital Camera

余的是不同视点的三维重建图。表面的光滑度表明了结果与 0.14 像素的精度符合。

本文第二个应用例子为空中摄影测量对一小城镇的数字高程模型的获取。影像由柯达数字像

机 18 mm 焦距的 DCS200 获取,共 24 个影像被引用。由于采用的是基于特征点的匹配,因而不可能有效地量测建筑物。但它们的基本位置可从 DEM 中看到,如图 6 所示。由于检查点的精度主

要决定于重叠的影像数量、像机的检校完善性、像机的质量、区域的平差结果和特征点定位误差, 既然影像取自 Maas<sup>[6]</sup>, 且所用控制点一样, 特征点定位方法一样, 即 Foerstner 算子, 那么唯一可能不同的因子是重叠的影像数量。但显然在数量接近时, 两种结果就应该相近。Maas 得到的中误差是平面 0.027 m 和高程 0.109 m。本文不作进一步实验。

### 参 考 文 献

- 1 Collins R. A Space-Sweep Approach to True Multi-Image Matching. In: Proceedings of 1996 IEEE Computer Society Conference on Pattern Recognition. San Francisco, CA, 1996. 358~ 363
- 2 Foerstner W. A Feature Based Correspondence Algorithm for Image Matching. In: Proceedings of the Symposium on from Analytical to Digital. Finland Rovaniemi, 1986. 150~ 166
- 3 Fraser C. Digital Camera Self-calibration. ISPRS International Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 1995 (5): 149~ 159
- 4 Gruen A, Baltsavias E. Geometrically Constrained Multi-photo Matching. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 1988, 54 (4): 633~ 641
- 5 Heipke C. A Global Approach for Least Squares Image Matching and Surface Reconstruction in Object Space. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 1992, 58 (3): 317~ 323
- 6 Maas H G. Automatic DEM Generation by Multi-Image Feature Based Matching. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, 1996, 31 (B3): 484~ 489
- 7 Shao J, Fraser C. Multi-image Matching for Automatic Object Reconstruction. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, 1998, 32(B5)
- 8 Shao J, Fraser C. Network Vision. In: Proceedings of International Conference on Pattern Recognition. Brisbane, Australia, 1998
- 9 Wang Z. Principles of Photogrammetry (with Remote Sensing). Beijing Publishing House of Surveying and Mapping, 1990

## Multi-image Matching Without Similarity Measurement

*Shao Juliang*

(The Centre for GIS, W TU SM, 129 Luoyu Road, Whuan, China, 430079)

**Abstract** This paper deals with automatic reconstruction of a digital multi-ray photogrammetric network, which comprises multiple nodes, each node indicating one object point and its corresponding multiple imaging rays. In the automatic reconstruction, a novel multi-image matching (MIM) technique without similarity measurement is proposed. The technique includes consecutive consideration of all images as reference images. In the proposed strategy, matching accuracy is enhanced by sub-pixel interest point extraction and multi-ray triangulation.

**Key words** multi-image matching; automatic object reconstruction; epipolar curve chains; global quality control; accuracy