

利用航空影像生成 DEM 的多层次整体优化方法

柴登峰^{1),2)} 彭群生¹⁾

¹⁾(浙江大学 CAD&CG 国家重点实验室, 杭州 310027) ²⁾(浙江大学空间信息技术研究所, 杭州 310027)

摘要 利用航空影像生成数字高程模型(DEM)通常包括两个步骤,首先采用特征匹配方法建立稀疏对应并确定其高程,然后采用内插方法生成密集高程数据。匹配过程没有进行整体优化,内插过程往往引入误差,它们都将降低 DEM 生成质量。将 DEM 生成表述为像素标号问题,匹配影像直接生成 DEM,不但进行整体优化而且去除内插对 DEM 质量的影响。在此基础上,提出了层次标号策略,首先构造多分辨率 DEM,然后确定最低分辨率高度场,并自顶向下逐步确定剩余分辨率高度场。多分辨率表达形式和层次标号策略提高了求解效率,能处理数据量非常大的航空影像。利用较高层标号结果限定较低层节点的状态空间,不但提高搜索效率而且提高求解可靠性。实验结果表明上述方法能够生成高质量 DEM。

关键词 DEM 生成 立体匹配 马尔可夫随机场 整体优化

中图法分类号: TP391.41 文献标识码: A 文章编号: 1006-8961(2009)07-1458-05

Multi-level Global Optimization Approach for DEM Generation from Aerial Imagery

CHAI Deng-feng^{1),2)}, PENG Qun-sheng¹⁾

¹⁾(State Key Laboratory of CAD&CG, Zhejiang University, Hangzhou 310027)

²⁾(Institute of Spatial Information and Technique, Zhejiang University, Hangzhou 310027)

Abstract Traditional approaches to generate digital elevation model(DEM) from aerial imagery consist of two steps. The first step establishes feature correspondences and determines their height, and the second interpolates height to generate dense DEM. Because the first step does not apply global optimization and the second step usually introduces interpolation error, they impair the quality of DEM. This paper describes DEM as Markov random fields, formulates DEM generation as pixel labeling. It generates DEM in a global optimization framework and does not need interpolation. Then, this paper constructs multi-resolution Height Fields and proposes a multi-level pixel labeling strategy. It determines the Height Fields on the highest level at first, and then determines the Height Fields on the rest levels step by step. It improves efficiency greatly. At last, this paper modified Belief Propagation algorithm to determine Height Fields on a specific level. It passes Height Fields on the higher level to the lower level, restricts the possible height and reduces the search space greatly. As a result, it improves both efficiency and quality. Experimental results have shown that high quality DEM have been generated by the proposed approach.

Keywords DEM generation, stereo matching, Markov random fields, global optimization

基金项目: 国家自然科学基金项目(60673032); 国家高技术研究发展计划(863)项目(2007AA01Z316); 浙江省教育厅科研基金项目(Y200804874)

收稿日期: 2008-09-02; 改回日期: 2008-12-26

第一作者简介: 柴登峰(1974 ~), 男, 讲师。2006 年于浙江大学获应用数学专业博士学位。已发表论文 10 余篇。E-mail: chaidf@cad.zju.edu.cn

1 引言

立体匹配是摄影测量领域的重要研究课题,它是利用航空影像生成 DEM 的核心和关键^[1]。区域相关方法在参考图像中选择规则分布格网点,然后依据灰度信息为其搜索对应点^[2]。特征匹配方法首先检测图像显著特征,然后利用灰度、邻接关系等信息搜索对应特征点^[3]。最近,朱庆等人利用图像可靠特征点组成三角网,约束对应点搜索,提高匹配可靠性^[4]。Zhang 和 Gruen 在特征匹配基础上采用区域相关方法得到密集对应场,提高匹配精度和可靠性^[5]。由于图像特征呈不规则分布,特征之间邻接关系很难描述,这种信息没有得到充分利用,从而影响匹配质量和 DEM 生成质量。

立体匹配也是计算机视觉领域的核心研究课题^[6-9]。近年来,Boykov 等人利用马尔可夫随机场描述图像视差场,将立体匹配表述为马尔可夫随机场最大后验估计,进一步表述为像素标号问题,归结为能量最小化问题,即整体优化方法^[10]。由于成功描述相邻像素的相互作用,整体优化能显著提高匹配质量^[11-12]。整体优化问题的求解方法包括模拟退火、交换 (α - β swap) 算法、扩张 (α expansion) 算法和置信传播 (belief propagation) 算法等^[13-15]。上述算法求解效率比较低,不能高效匹配航空影像。

将 DEM 描述为马尔可夫随机场,将多幅航空影像看作观测数据,将 DEM 生成描述为像素标号问题。该方法匹配航空影像直接生成 DEM,削弱内插误差对 DEM 质量的影响。在此基础上,提出一种层次求解策略。首先构造多分辨率高度场,然后确定最高层高度场,将求解结果传递给下一层,并自顶向下逐步确定每层高度场。上层粗略解不但提供下层初始解,而且限定下层精确高度的范围,从而提高求解效率。

2 DEM 生成的问题描述

DEM 是 3 维地表的数字描述,它记录离散采样地面点的空间位置(平面位置和高程)。对于格网形式 DEM,采样点平面位置呈规则格网分布。将 DEM 描述为高度场,并用标号表示高度,将 DEM 生成描述为像素标号问题。

2.1 DEM 描述为马尔可夫随机场

图 1 中左图为格网形式 DEM 示意图,圆圈表示 DEM 采样点平面位置,它们呈规则格网分布。图 1 中右图为马尔可夫随机场示意图,白色节点表示隐节点,每个隐节点对应一个随机变量,黑色节点表示观测节点,每个观测节点与相应隐节点关联,相邻隐节点之间邻接关系以边表示,马尔可夫随机场估计就是根据观测节点的取值确定隐节点随机变量的取值。将 DEM 描述为马尔可夫随机场,即高度场,隐节点表示 DEM 格网点,隐节点随机变量的取值表示该点高程值,观测节点表示观测所得的多幅影像。这样,利用多幅影像生成 DEM 就可以表述为高度场最大后验估计问题。

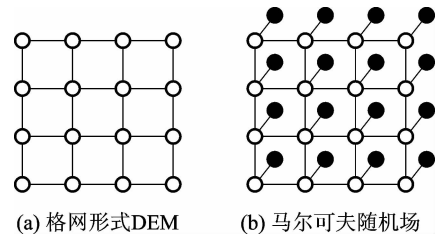


图 1 DEM 与马尔可夫随机场

Fig. 1 DEM and MRF

2.2 DEM 生成描述为像素标号问题

根据贝叶斯估计理论,后验概率可以由先验概率和似然概率计算而得。因此,高度场最大后验估计问题就是确定后验概率达到最大值的高度场,即

$$f^* = \arg \max_{f \in F} P(f | D) = \arg \max_{f \in F} \frac{P(D | f) P(f)}{P(D)}$$

其中, f 表示高度场, F 表示由所有可能高度场组成的集合, D 表示观测数据, $P(f | D)$, $P(f)$ 和 $P(D | f)$ 分别表示高度场后验概率、先验概率和观测数据似然概率。由于 $P(D)$ 与 f 无关,因此有:

$$f^* = \arg \max_{f \in F} P(D | f) P(f)$$

根据马尔可夫随机场的性质,DEM 生成可以表述为如下像素标号问题。

问题 DEM 生成的像素标号描述 为 DEM 的每个格网点 $i \in G$ 分配一个高度值 $f_i \in H$, 以使下述概率最大化:

$$P(f | D) = \frac{1}{Z} \prod_{i \in G} \varphi(f_i) \prod_{i \in G, j \in N_i} \psi(f_i, f_j)$$

其中, G 为由所有格网点组成的集合, N_i 为由格网点 i 的所有邻近格网点组成的集合, H 为由所有可

能高度值组成的集合, $\varphi(f_i)$ 表示将高度 f_i 赋给 i 的合适程度, 对应于似然概率, $\psi(f_i, f_j)$ 表示高度 f_i 和 f_j 分别赋给 i 和 j 的惩罚函数, 对应于先验概率, Z 是归一化常数, 使得所有高度场的概率之和为 1。

在摄影测量领域, 通常采用特征检测和匹配方法建立稀疏特征对应关系, 然后依据三角测量原理确定地面点空间位置, 最后采用摄影内插方法确定每个格网点高度值。由于稀疏图像特征呈不规则分布, 图像特征邻接关系难于描述, 不利于在立体匹配中加以利用, 易于降低立体匹配质量。此外, 摄影测量内插过程必然带入新的误差, 降低 DEM 生成质量。将 DEM 描述为马尔可夫随机场为描述和利用格网点邻接关系奠定基础, 将 DEM 生成描述为像素标号问题, 不但可以利用立体匹配直接生成 DEM, 避免摄影测量内插过程, 而且可以采用整体优化方法求解。

3 DEM 生成的层次求解方法

图割算法和置信传播算法是目前的高效求解方法, 其执行效率与高度场规模和高度集规模有关, 由于高度场和高度集规模相当大, 因此它们的求解效率很低。下面提出层次求解方法以解决上述矛盾。

3.1 层次求解方法

如图 2 所示, 对于给定规则网格, 采用四叉树方式将相邻 4 个节点合并为一个节点, 以此得到较低分辨率网格, 类似地, 可以构造更低分辨率的网格, 从而构造多分辨率高度场。多分辨高度场能有效缩小规模, 为快速求解奠定基础。

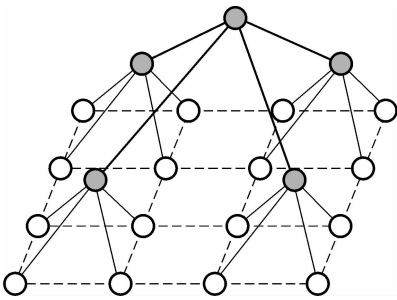


图 2 多分辨率高度场

Fig. 2 Multi-resolution height field

在构造多分辨率高度场基础上, 提出自顶向下的层次求解方法。首先在最高层求解取最粗略(最低分辨率)高度场, 然后将其传递给下一层作为

初始高度场并求取精确高度场, 重复上述过程直至最底层, 最终得到最精确(最高分辨率)高度场, 以此作为最终高度场。

上层粗略高度场传递给下层, 给出精确高度场的近似估计, 不但可以提供初始高度场, 而且可以限定精确高度场的范围。在将上层求解结果传递给下层时, 每个节点的高度直接作为其子节点的初始高度, 通过这种方式, 下层每个节点都获得一个初始高度, 这样就确定了一个初始高度场。由于精确高度在粗略高度附近, 因此以其初始高度为中心确定一个高度区间, 以此作为该节点的高度范围, 这样就缩小了可能高度数目, 从而缩小解空间。从初始高度场出发, 能量函数最小化方法能够在缩小的解空间中快速搜索到精确高度场。

3.2 基于置信传播的层次求解算法

置信传播算法引入从隐节点 j 到隐节点 i 的消息 $m_{ji}(f_i)$ 表示节点 j 认为节点 i 取各高度的概率, 并采用如下规则迭代更新消息:

$$m_{ji}(f_i) \leftarrow \sum_{f_j} \phi_j(f_j) \psi_{ji}(f_j, f_i) \prod_{k \in N_j \setminus i} m_{kj}(f_j)$$

在此基础上, 采用下式计算节点 i 取各高度的置信度:

$$b_i(f_i) = k \phi_i(f_i) \prod_{j \in N_i} m_{ji}(f_i)$$

其中, k 为归一化常数, 使得所有高度置信度之和为 1。最后, 各个节点取置信度最大的高度为最终高度。

算法需要存储相邻节点之间传递的消息, 每对相邻节点之间的消息是一个 2 维数组, 其大小由高度集规模决定, 计算复杂度也由此控制。通常高度数目很大, 不但消耗大量计算时间, 而且消耗很大内存空间。

由于每个节点具有自己的高度取值空间, 它们分别为一段高度区间。改进置信传播算法用以求取每个节点的精确高度, 算法记录每个节点的高度取值空间, 然后仅仅计算和存储取值空间内高度的消息和置信度, 不但可以减少计算量, 而且可以节省存储空间。

下面给出算法描述:

- (1) 输入高度集 H , 高度区间长度 l , 高度场层数 n , 迭代次数 k ;
- (2) 采用四叉树方式构造 n 层高度场;

- (3) 设置 $i \leftarrow n$, 并将第 i 层作为当前层;
- (4) 设置每个节点的高度空间为 H ;
- (5) 迭代执行 k 次改进的置信传播算法, 以此确定每个节点的高度;
- (6) 若 $i = 1$, 则结束; 否则, 设置 $i \leftarrow i - 1$, 并将第 i 层作为当前层;
- (7) 设置每个节点的初始高度为其父节点高度;
- (8) 设置每个节点的高度取值空间为以其初始高度为中心且长度为 d 的区段;
- (9) 重复执行第 5、6 步。

4 实验结果

采用由航空数码相机拍摄所得的彩色图像进行实验, 匹配 7 幅图像生成 DEM, 由于图像数据量很大, 图 3 仅给出其中两幅彩色图像, 中央部分由房屋组成的三角形区域为 7 幅图像共同覆盖的区域。3 幅灰度图像为不同层次求解所得的 DEM, 灰度值表

示高度值, 亮度较大表示高度值较大。该实验采用如下方式定义似然概率和先验概率:

$$\begin{aligned}\phi(f_j) &= \exp(-\sigma(f_j)) \\ \psi_{ji}(f_j, f_i) &= \exp(-\delta(f_j \neq f_i))\end{aligned}$$

其中, 由高度 f_j 可以确定多幅影像投影点, 它们颜色的方差记为 $\sigma(f_j)$ 。

实验中, 最底层 DEM 的规模为 185×128 , 高度集规模为 256 个高度等级。若直接采用置信传播算法, 则需要存储规模为 256×256 的消息数组, 由于每个浮点数需要 4 B, 因此消息数组需 256 K 内存空间。整个算法需要 5 920 M 内存空间用以存储消息, 根本不能实现。采用 3 层表达形式, 最高层仅需 370 M 内存用以存储消息, 可以快速确定高度场。剩余层节点高度空间为初始高度周围的 10 个等级, 内存需求和计算时间都大大降低, 求解时间在几秒钟之内。由此可见, 层次求解方法能够满足应用需要。由图 3 看出, DEM 整体生成质量较高, 在高度突变区域存在某些质量较低的点, 这些点往往在高层的匹配就比较低, 拟针对该问题开展进一步研究, 以期提高较高层的匹配质量。针对 6 组不同数据进行实验均取得良好结果, 但由于航空影像数据量非常大, 这里没有给出其余实验结果。实验结果表明, 层次优化方法能够高效匹配航空影像。

5 结论

采用马尔可夫随机场表示 DEM, 将利用多幅影像生成 DEM 描述为像素标号问题, 为 DEM 生成提供了新的理论框架。该框架利用立体匹配直接恢复格网点高程值, 避免摄影测量内插过程, 减少误差来源, 该框架采用整体优化方法改善匹配质量和 DEM 生成质量。在此基础上, 构造了多分辨率高度场表示 DEM, 并提出一种基于置信传播算法的层次求解方法。该方法首先确定最高层高度场, 然后将求解结果传递给下一层, 并自顶向下逐步确定每层高度场。上层粗略解不但提供下层初始高度场, 而且限定下层精确高度的范围。上述方法缩小了求解空间, 减少了内存消耗和计算时间消耗, 保证能够采用整体优化方法求解 DEM 生成问题。

由于采用由粗到细的求解策略, 较粗层的求解结果直接影响较细层的求解质量, 由实验结果可以看出, 匹配质量较差的点往往由高层误匹配所导致,

图 3 实验结果示意图

Fig. 3 Illustration of experimental results

下一步将拟针对该问题开展进一步研究,利用多种信息提高较高层匹配质量。另外,还将采取二叉树方式构造标号空间的多分辨率表达形式,进一步提高求解效率。

参考文献 (References)

- 1 Zhang Zu-xun, Zhang Jian-qing. Digital Photogrammetry [M]. Wuhan: Press House of Wuhan University, 2001. [张祖勋,张剑清. 数字摄影测量学[M]. 武汉:武汉大学出版社, 2001.]
- 2 Konecny C, Pape D. Correlation techniques and devices [J]. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 1981, **47**(3): 323-333.
- 3 Zhang Zu-xun, Zhang Jian-qing, Wu Xiao-liang, *et al.* Global image matching with relaxation method [A]. In: Proceedings of International Colloquium on Photogrammetry, Remote Sensing and Geographic Information System [C], Wuhan: WTUSM Press, 1992: 11-14.
- 4 Zhu Qing, Zhao Jie, Lin Hui, *et al.* Triangulation of well-defined points as a constraint for reliable image matching [J]. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 2005, **71**(9): 1063-1069.
- 5 Zhang Li, Gruen A. Multi-image matching for DSM generation from IKONOS imagery [J]. ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing, 2006, **60**(3): 195-211.
- 6 Barnard S T, Fischler M A. Computational stereo [J]. ACM Comp. Surveys, 1982, **14**(4): 553-572.
- 7 Dhond U R, Aggarwal J K. Structure from stereo-a review [J]. IEEE Transactions on System, Man and Cybern, 1989, **19**(6): 1489-1510.
- 8 Brown M Z, Burschka D, Hager G D. Advances in computational stereo [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2003, **25**(8): 993-1008.
- 9 Scharstein D, Szeliski R. A taxonomy and evaluation of dense two-frame stereo correspondence algorithms [J]. International Journal of Computer Vision, 2002, **47**(3): 7-42.
- 10 Boykov Y, Veksler O, Zabih R. Markov random fields with efficient approximations [A]. In: Proceedings of IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition [C], Santa Barbara, CA, USA, 1998: 648-655.
- 11 Tappen M, Freeman W. Comparison of graph cuts with belief propagation for stereo, using identical mrf parameters [A]. In: Proceedings of International Conference on Computer Vision, Nice, France, 2003: 900-907.
- 12 Szeliski R, Zabih R, Scharstein D, *et al.* A comparative study of energy minimization methods for markov random fields [A]. In: Proceedings of European Conference on Computer Vision [C], Graz, Austria, 2006: 16-29.
- 13 Boykov Y, Veksler O, Zabih R. Fast approximate energy minimization via graph cuts [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2001, **23**(11): 1222-1239.
- 14 Kolmogorov V, Zabih R. Visual correspondence with occlusions using graph cuts [A]. In: Proceedings of International Conference on Computer Vision [C], Vancouver, BC, Canada, 2001: 508-515.
- 15 Sun Jian, Shum Heung-yeung, Zheng Nan-ning. Stereo matching using belief propagation [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2003, **25**(7): 510-524.