

用立体影像匹配和数学形态变换自动生成 DEM

林 怡 陈 鹰

(同济大学遥感技术应用研究中心, 上海 200092)

摘 要 数学形态学已经成为计算机图象处理的一个重要研究领域,并在遥感影像分析中得到了卓有成效的应用.将数学形态学的理论方法引入了建立数字高程模型(DEM)的研究,提出了一种利用立体象对,自动匹配识别同名点并提取地表三维坐标,继而用数学形态变换建立 DEM 的方法.该方法首先利用正交小波变换对影像进行分解、重建、特征提取,并利用影像与特征结合的匹配方法进行亚像素匹配;然后根据匹配得到离散的地面点数据,用形态变换的方法构建泰森多边形、Delaunay 三角网(TIN);最后内插成格网 DEM. 试验证明,该方法具有数据结构简单、运算速度快、精度好等优点.

关键词 计算机图象处理(520·6040) 影像匹配 数学形态变换 多尺度特征提取 数字高程模型 泰森多边形 Delaunay 三角网

中图法分类号: TP751.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1006-8961(2003)04-0447-06

Auto-Generating DEM with Stereo Image Matching and Mathematical Morphologic Transformation

LIN Yi, CHEN Ying

(The research center of Remote Sensing technology, Tongji university, Shanghai 200092)

Abstract Mathematical morphology has already become the important research field of computer image processing, and it has been applied effectively in the remote sensing image analysis. This paper introduces mathematical morphology into the research of building DEM, provides a algorithm that those homologous points can be auto-recognized from stereo images by using image matching and the 3D-coordinates of ground points are extracted, then the DEM can be built by using morphologic transformation. The research injects new vigor into the arithmetic of auto-building DEM. This paper discusses the method of using orthogonal wavelet to decompose and reconstruct a image, feature extraction and matching combining image and feature. The algorithm for auto-building Thiessen polygon, Delaunay triangular net (TIN) and regular net (GRID) of DEM is presented with the discrete ground points from stereo-matching. Experiments prove that this arithmetic has the virtue of simple data construction, high speed, efficient and high accurate.

Keywords Computer image processing, Image matching, Mathematical morphologic transformation, Multi-resolution feature extraction, DEM, Thiessen polygon, Delaunay triangular net

0 引 言

近几年提出的国家地球空间数据框架(GSDF)^[1]中,数字高程模型(DEM)是不可缺少的基础地理信息之一.它为三维GIS的建立奠定了基础,并且可以与数字摄影测量与遥感的其他信息结

合建立三维可视化模型,它将成为虚拟现实的的重要组成部分,用于建筑设计、城市与交通规划、环境监测、三维建模以及大型工程项目的设计等.此外,DEM还能在工业、考古、医学等空间信息处理方面,发挥广泛的作用.数学形态学是影像分析的一个重要工具,它已经在遥感影像处理中得到了广泛的应用^[2,3].数学形态变换的基本思想是用具有一定形

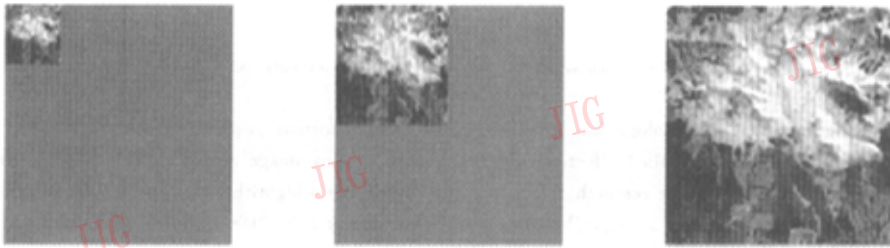
基金项目:国家 863 计划(2001AA1131020);教委博士点基金(20010247024)

收稿日期:2002-07-12;改回日期:2002-11-11

态的结构元素去度量和提取图象中的对应形状和特征以达到分析和识别图象的目的. 本文将数学形态学的理论方法和影像匹配相结合, 提出了一种自动生成 DEM 的方法. 这里采用了基于小波变换的影像匹配方法, 利用小波正交分解与重建实现了分层匹配; 同时, 采用特征与影像叠加进行了亚像素匹配, 并利用匹配后的有序同名点解算得到离散的地面点, 进而用形态变换的方法构建泰森(Thiessen)多边形、自动生成 Delaunay 三角网(TIN), 最后内插成格网 DEM. 将数学形态学引入到 DEM 的研究, 可促使栅格数据处理方法的进一步理论化, 从而发现复杂问题中更深入的规律性. 这大大提高了非规则三角形网 TIN 构网的速度和精度, 使得生成与表现 DEM 的方法更加理论化, 而且使之在效率上有更多的发展余地.

1 利用小波变换进行影像匹配

影像匹配的可靠性、效率和精度是生成 DEM



(a) 分解影像(2²) (b) 重建影像(2¹) (c) 重建影像(2⁰)

图 1 影像的小波分解与重建

1.2 基于小波变换的特征提取与影像匹配

在小波金字塔影像的基础上, 采用影像边缘特征与影像灰度相结合进行小波分层匹配. 根据二维平滑函数 θ 与小波函数 $\varphi(x, y)$ 的关系^[5], 可写出规范的二维二进小波变换的两个分量

$$\left. \begin{aligned} W_{2^j}^{(1)} f(x, y) &= f * \varphi_{2^j}^{(1)}(x, y) = 2^j \frac{\partial}{\partial x} (f * \theta_{2^j}(x, y)) \\ W_{2^j}^{(2)} f(x, y) &= f * \varphi_{2^j}^{(2)}(x, y) = 2^j \frac{\partial}{\partial y} (f * \theta_{2^j}(x, y)) \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

上式是 2^j 空间梯度向量, 同时可得特征梯度的幅值与幅角的表达式

$$\left. \begin{aligned} M_{2^j} f(x, y) &= \sqrt{|W_{2^j}^{(1)} f(x, y)|^2 + |W_{2^j}^{(2)} f(x, y)|^2} \\ A_{2^j} f(x, y) &= \arctan\{W_{2^j}^{(2)} f(x, y)/W_{2^j}^{(1)} f(x, y)\} \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

在式(3)中, 采用二次样条小波函数作为卷积

的关键问题. 采用多尺度二维二进小波变换, 可以生成多尺度影像, 进行分层影像匹配. 小波多尺度影像的优点在于, 能够保证被分解影像的信息量, 同时可进行逐级还原而不占内存.

1.1 影像金字塔的生成

根据小波变换的正交多尺度分析的理论与方法^[4,5], 可以直接写出影像 $f(x, y)$ 分解与重建的公式

$$\left. \begin{aligned} f^{(j)} &= H_r H_c f^{(j-1)} \\ d_b^{(j)} &= G_c H_r f^{(j-1)} \\ d_v^{(j)} &= H_c G_r f^{(j-1)} \\ d_s^{(j)} &= G_c G_r f^{(j-1)} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

$$f^{(j-1)} = H_r H_c f^{(j)} + G_c H_r d_b^{(j)} + H_c G_r d_v^{(j)} + G_c G_r d_s^{(j)} \quad (2)$$

式中, H 是平滑滤波器, G 是高通滤波器; \bar{H} 和 \bar{G} 分别是 H 和 G 的对偶算子, $d_b^{(j)}$ 、 $d_v^{(j)}$ 和 $d_s^{(j)}$ 分别是影像在水平、垂直和对角线方向的特征; 下标 r 和 c 表示沿行和列方向进行滤波运算. 在分解与重建中, 图 1 是采用 Daubechies 具有紧支集正交小波滤波器^[4]对一幅影像进行分解与重建的例子.

核, 并由式(4)建立梯度图和方向图, 利用梯度方向断面检测法, 进行跟踪与细化^[6]提取边缘特征, 并将边缘特征与影像叠加, 如图 2 所示, 这种边缘实际上构成了影像的轮廓, 可以作为匹配的基础.

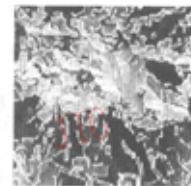


图 2 影像与边缘特征叠加

首先在金字塔顶层进行匹配,某一位置为中心的左右影像窗口经过中心化后的误差能量可以写成^[7]

$$\sigma_e^2 = \sigma_l^2 - \sigma_{ll}^2 / \sigma_c^2$$

信噪比为

$$SNR = \sigma_l / \sigma_e$$

式中, σ_l 和 σ_e 分别为左影像和右影像的方差; σ_{ll}^2 为左右影像的协方差,为使这一误差能量达到最小,可以用相关系数最大作为极值度量

$$\rho = \sqrt{1 - 1 / (SNR)^2} \Rightarrow \max \quad (5)$$

当匹配中出现多峰值时,可以根据特征提取的结果,将两影像特征矢量总点数之差的绝对值最小作为约束条件^[7],得到唯一解

$$\text{abs} \left(\sum_i V_{li} * n_i - \sum_j V_{rj} * n_j \right) \Rightarrow \min \quad (6)$$

全部的点匹配完成后,根据广度优先的原则,扩展到

下一层,直至最底层时,则进行最小二乘法匹配^[8],以便得到亚像素匹配精度

$$\left. \begin{aligned} V &= AX - L \\ A &= \left[\begin{array}{cccc} \frac{\partial g_x^b}{\partial x} & \frac{\partial g_x^b}{\partial x} x_0^b & \frac{\partial g_y^b}{\partial y} & \frac{\partial g_y^b}{\partial y} y_0^b \end{array} \right] \\ X &= [dx^b \quad df_x^b \quad dy^b \quad df_y^b]^T \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

其中, V 表示误差方程的余差矢量, L 为常数矢量, X 为未知数矢量, g 表示影像梯度,上标 b 表示右影像,下标 0 表示影像窗口中心,而未知数的答案为

$$\hat{X} = (A^T P A)^{-1} (A^T P L)$$

其中, P 是误差方程式中观测值的权系数矩阵. 经过上述影像匹配过程,即可获得同名点影像,如图 3 所示. 利用立体像对外方位元素,进行前方交会,即可得到相应的地面点坐标,然后,运用数学形态变换,建立 DEM.

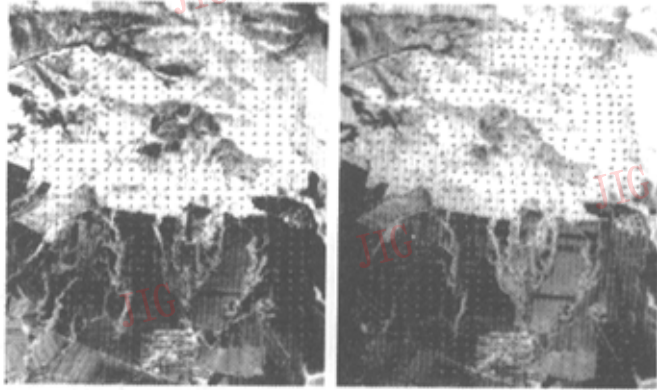


图 3 立体匹配结果

2 用数学形态变换生成 DEM

众所周知,DEM 具有两种表达方式,三角网(TIN)和规则格网(GRID).

2.1 泰森(Thissen)多边形的生成

根据地面离散点构建 TIN 和 GRID 的关键是生成泰森多边形,首先,将立体匹配得到的离散点的集合定义为点集 P ,由 P 可构成最小分辨率二值图象,称为图象集合 A ,欲求点集 P 的泰森多边形,就是将图象集合 A 进行形态变换的过程.生成泰森多边形的形态变换算子主要是腐蚀、序贯腐蚀、击中不击中、细化、序贯细化和条件序贯细化等.为此,根据文献[2]、[3]、[9],引入如下定义

腐蚀 集合 A 被结构元素 B 腐蚀

$$A \ominus B = \bigcap \{ A + (-b); b \in B \} = \{ x; (B)_x \subset A \}$$

序贯腐蚀 用 B 对集合 A 进行迭代腐蚀

$$A \ominus \{ B \} = \dots ((A \ominus B) \ominus B) \ominus B \dots$$

击中不击中 用结构元素 B 对集合 A 进行探测的过程

$$A * B = (A \ominus E \cap A' \ominus F) \quad (8)$$

其中, E 与 F 是结构对, $B = (E, F)$, 且 $E \cap F = 0$, 当用 E 在某一点上去探测 A 的内部,可以填入;同时用 F 探测 A 的外部(A 的补集 A')也可以填入时,则在该点上有输出,否则无输出.

细化 利用结构对 B 对集合 A 进行击中不击中运算的结果与 A 的差集,定义为

$$A \oplus B = A \setminus (A * B)$$

序贯细化 用 B 对 A 进行迭代细化

$$A \otimes \{ B_i \} = (((A \otimes B_1) \otimes B_2) \otimes \dots \otimes B_n) \otimes B_1 \dots \quad (9)$$

其中, $k=1, \dots, 8$, 表示8个方向.

条件序贯细化 在序贯细化的迭代过程中, 引入约束条件 Y , 使序贯细化满足预定的目标

$$A \otimes \{B_k\}; Y = \dots (\dots ((A \otimes B_1) \cup Y) \otimes B_2) \cup Y \dots \quad (10)$$

从点集 P 生成泰森多边形, 就是利用上述形态变换算子来构建骨架^[2]:

$$SK(A) = A \otimes \{L_k\}$$

$$\{C_i\} = \dots (\dots ((A \otimes L_1) \cap C_i) \otimes L_2) \cap C_i \dots \quad (11)$$

式中, L 是一个八方向结构元素^[9], 每一次迭代都用8个不同方向的结构对对图象进行细化, 以获得对称的细化效果. C 是一个约束数字圆盘, 为了保证序贯细化的迭代过程各向同性, 首先生成一个栅格数字圆盘 D (例如直径为7), 用 D 作为结构元素对图象 A 进行序贯腐蚀, 在 A 的每一个点上形成相应的数字圆盘 C .

$$C_i = A \ominus D_i$$

以 C 作为约束条件, 按式(11)对集合 A 进行结构化处理. 如图4所示, 如果仅用序贯细化, 其中间结果呈菱形, 得到的泰森多边形是不均匀的; 而用条件序贯细化, 每次细化的结果与数字圆盘求交, 中间结果呈圆形, 最后得到的泰森多边形具有各向同性, 这样能严格地保证一个像素的宽度以及点之间的拓扑关系, 从而保证 TIN 的可靠性.

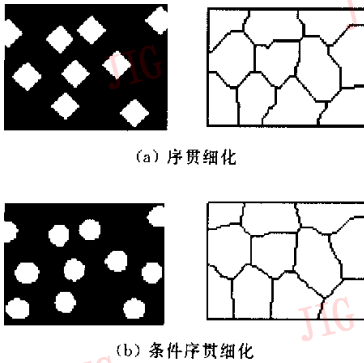


图4

2.2 TIN 的建立与 DEM 生成

泰森多边形是对点集进行结构化处理的结果, 每个多边形中包含且仅包含一个点, 它们之间严格的拓扑关系是生成 TIN 的基础. 上述从立体影像中获得的离散地面点生成 TIN 所涉及的形态变换算子主要有膨胀、序贯膨胀和条件序贯膨胀等, 定义如下:

膨胀 图象集合 A 被结构元素 B 膨胀

$$A \oplus B = \cup \{A+b; b \in B\}$$

序贯膨胀 用 B 对 A 进行迭代膨胀

$$A \oplus \{B\} = \dots (((A \oplus B) \oplus B) \oplus B) \dots \quad (12)$$

条件序贯膨胀 在序贯膨胀的情况下, 为了避免图象在序贯膨胀时无限地增长, 引入约束条件 Y , 使膨胀达到预定的目的

$$A \oplus \{B\}; Y = \dots [(((A \oplus B) \cap Y) \oplus B) \cap Y] \oplus B \dots \quad (13)$$

TIN 的构建就是要从泰森多边形中某一点 p 出发, 发现其具有“距离最近”的拓扑关系的点并连接即可完成, 现根据上述变换算子, 将构建 TIN 的算法归纳如下:

首先, 将式(11)构成的泰森多边形定义为集合 T , 即 $T = SK(A)$

第1步, 如图5所示, 以 T 中某 p 点为核, 以 T 的补集 T^c 为约束条件进行条件序贯膨胀, 使膨胀不越过该点多边形的边界, 于是可得到 p 点所在的多边形 D

$$D = p \oplus \{R\}; T^c \quad (14)$$

其中, R 是一个正交叉结构元素, 即

$$R = \begin{bmatrix} \emptyset & 1 & \emptyset \\ 1 & 1 & 1 \\ \emptyset & 1 & \emptyset \end{bmatrix}$$

它能保证膨胀不越过该点多边形的对角线边界, 从而严格保证点之间的拓扑关系.

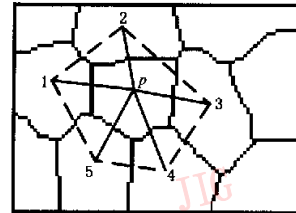


图5 TIN 的构成

第2步, 用 3×3 的矩形结构元素 H 对 D 进行膨胀, 使其越过边界, 并与 D 的补集 D^c 进行交运算, 以保持边界线

$$D' = (D \oplus H) \cap D^c \quad (15)$$

第3步, 以 T^c 为约束条件对 D' 进行条件序贯膨胀, 使其不越过相邻边界, 从而得到包含 p 点及其相邻点 1、2、3、4、5 的多边形 DD

$$DD = D' \oplus \{R\}; T^c \quad (16)$$

第4步, 用 DD 与图象集合 A 进行交运算, 得 p 和它的相邻点图形 PP

$$PP = A \cap DD \quad (17)$$

按图 5,依次连接 p 和它的相邻点,即可构成 TIN。

根据 TIN,同样可以按照膨胀、条件序贯膨胀算子构建规则格网的 DEM^[9]。

3 实验结果与小结

实验利用航空遥感立体像对,分辨率为 $50\mu\text{m}\times 50\mu\text{m}$,区域大小为 $2.3\times 4.0\text{km}^2$,该地区北部为山丘,南部为平地,左右影像变形较大,对于影像匹配来说,属于较为困难的地区。实验在 TJDDEM-1 系统中进行,除了进行内定向、相对定向、绝对定向外,用小波变换算法对影像匹配模块进行了改进,并与数学形态变换结合构成了新的 DEM 生成软件包 TJDDEM-2。在金字塔影像的构建中采用了 Daubechies 5 系数滤波器^[5,7],并采用方向断面检测法^[8,10]进行特征提取,选用了作为小波分层系数进行立体匹配,采用像方等间隔立体匹配的结果显示于图 3。根据地面起伏变化,不等间隔立体匹配,按前方交会求得不规则地面离散点,并用数学形态变换算法,构成 TIN 如图 6 所示;图 7 是根据 TIN 生成的 DEM,为便于检验,图中叠加了该地区的影像纹理,结果表明,它们是完全吻合的。

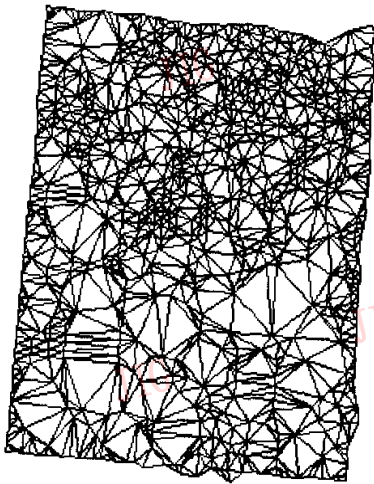


图 6 用立体影像生成的 TIN

用数学形态变换生成 DEM 不仅可以用立体影像作为数据源,而且可以用地图采样数据、地面实测数据等作为数据源,图 8 是利用杭州西湖地区地图扫描影像,经过矢量化的数据,用上述方法和软件,

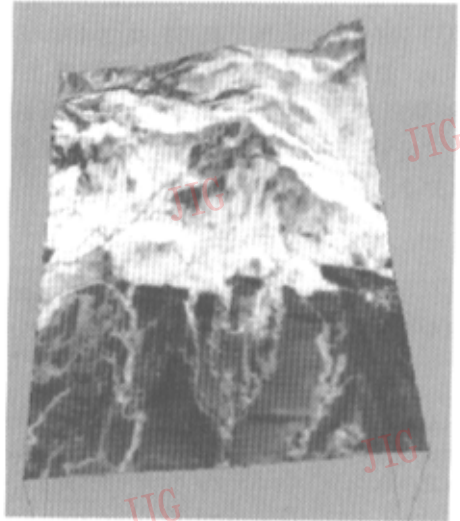


图 7 DEM 与正射影像叠加的三维图

生成的 DEM 三维图象,数据点共 16 万多个,区域大小为 $8\times 6\text{km}^2$,DEM 间隔为 $10\text{m}\times 10\text{m}$,图 9 是叠加了相应的正射影像的三维立体景观图。

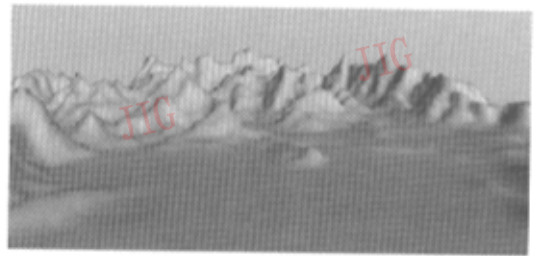


图 8 用地图数据生成的 DEM 三维图

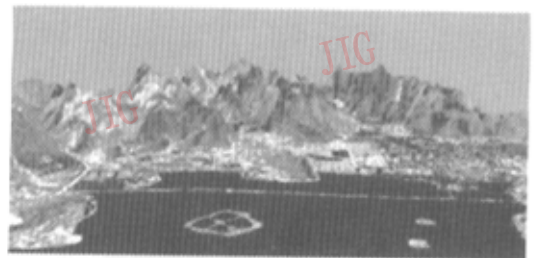


图 9 DEM 与正射影像叠加的三维景观

通过实验,可以得出如下初步结论:

(1) 用立体影像匹配与数学形态变换相结合,数字影像定向、同名点的获取、三维坐标的解算、泰森多边形的建立、Delaunay 三角网的生成,以及 DEM 的构建,是一个全数字处理的过程,这对 DEM 生成的全自动化是一条十分有利的途径。

(2) 在用数学形态变换建立 DEM 的过程中,

是用二值图象分析方法实现的,其数据结构简单,可以大大节省存储空间,而且具有较快的速度。

同时,能够保证数据点之间正确的拓扑关系,从而能够保证 DEM 的可靠性。这正是形态变换的方法优于“分割-归并法”、“逐点插入法”和“逐步生长法”的关键。

参 考 文 献

- 1 李德仁,龚健雅,朱欣焰等. 我国地球空间数据框架的设计思想与技术路线[J]. 武汉测绘科技大学学报, 1998, 23(4): 297~303.
- 2 崔屹. 图像处理与分析[M]. 北京: 科学出版社, 2000.
- 3 章毓晋. 影像处理与分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 2000.
- 4 程正兴. 小波分析算法与应用[M]. 西安交通大学出版社, 1998.
- 5 陈鹰, 简剑峰, 林怡. 基于小波变换的实时影像匹配[J]. 中国图象图形学报, 1998, 3(12): 1011~1014.
- 6 陈鹰, 李铁军, 熊兴华. 带约束条件的特征与最小二乘法影像匹配[J]. 中国图象图形学报, 1998, 3(4): 299~303.
- 7 CHEN Ying, Ye Qin, ZHONG Zhi-yong. Research on the matching between radar image and optical one based on wavelet [J]. Selected Papers for English Edition, Acta Geodaetica et Cartography 2000: 25~31.

- 8 Xiong X H, Chen Y, Li T J. A remote sensing image subpixel matching algorithm combined edge with gray [A]. In: Proceedings of the 1997 IEEE International Conference on Intelligent Processing System [C]. 北京: 万国学术出版社, 1997: 1450~1456.
- 9 陈鹰, 林怡. 基于数学形态学的 TIN 和 GRID 自动生成研究[J]. 测绘学报, 2002, 31(增刊): 86~91.
- 10 CHEN Ying. Wavelet-based image matching for different sensor [A]. In: Inter. Archives of Isprs [C]. Amsterdam: GITT, 2000: 171~182.



林怡 1970年生,现为同济大学测量与国土信息工程系、同济大学遥感技术应用研究中心博士研究生。主要研究方向为数字摄影测量、遥感影像信息系统和计算机视觉。先后获军队科技进步奖一、二、三等奖6项,发表论文10余篇。



陈鹰 1941年生,现任同济大学教授、博士生导师,长期从事数字摄影测量、图象信息工程、影像GIS及计算机视觉的研究。先后获国家科技进步奖,省部级科技进步奖多项,发表论文70余篇。