

31-96
1X
基于摄影测量的逼真地形显示技术*朱 庆 张庆珩
(北方交通大学 北京)

P23

A
提 要 逼真地形显示对于更好地理解地形结构、提高地理数据分析水平、辅助空间决策等有着十分重要的作用。由于自然地形表面细节的非常不规则性和极端复杂性,逼真地形显示一直是计算机图形学面临的挑战之一。本文论述了一种基于摄影测量的有效的逼真地形显示技术。该技术充分利用数字摄影测量的既有成果,如数字影像数据和数字地面模型,采用纹理映射方法将影像映射到数字地面模型上,作为地形表面的纹理细节。本文详细介绍了有关透视变换、可见表面识别和多边形表面着色等的实用算法。对于地理信息系统、测绘、城市规划、道路选线与设计等学科具有实用价值。

关键词 摄影测量 逼真地形显示 纹理映射 多边形描绘

1 前言

30多年来计算机科学的发展说明,只有将计算机高速精确的计算能力、庞大的数据存储能力与人的逻辑判断、综合分析能力相结合才会取得最好的结果。所以,对于各类决策支持系统的设计,往往不是建立一个精确的问题求解过程,而是制造一个人-机交互的环境。众所周知,图形在人类的知识体系中起着非常重要的作用,一幅图胜抵千言万语。在人-机交互系统中,图形可以起到示意、提示及解释的作用。由于地理数据特有的空间性质和人类对自身生存环境已有的认识,三维地形的立体显示对于认识和理解现实数据的本质,揭示出概念上和客观实体间的关系是十分必要的。特别是从逼真图形中产生的直觉知识和理解,可以改进决策,大大提高分析数据的计算水平。今天,逼真地形显示对于地理信息系统(GIS)、CAD的优化决策和环境评估等的影响越来越明显,越来越重要。

由于自然地形是经过极其复杂的物理、化学过程作用的结果,再加上人类活动的影响,往往都非常不规则、十分复杂。各种勘测工作总是不可能完全翔实地获得关于地形各种微小细节的数据,而有所综合取舍。所以,地形的逼真显示一直面临许多困难和问题^[1]。在摄影测量领域,广泛使用具有丰富景观信息和准确几何度量特征的正射影像(orthophotoimage)^[2]。得到正射影像的技术被称为正射纠正(orthographic rectification),即改正由于像片倾斜和地形起伏等引起的像变形。然而,正射影像由于受到视点的严格限制,目视化效果远不能满足多种透视和景观动画的需要。

本文目的旨在利用摄影测量数字化成果,将数字化影像数据作为纹理映射到三维数字地面模型上。通过对数字地面模型进行各种透视投影变换,利用多边形描绘技术,产生具有各种透视效果的逼真地形显示。根据产生真实感图形的基本过程,本文主要包括以下三部分:地形

* 铁路工程总公司资助项目

本文于1994年12月19日收到修改稿。朱庆 博士生 北方交通大学土建系 邮编:100044

几何造型与可见表面识别、纹理映射和多边形描绘。

2 地形几何造型与可见表面识别

要产生地形的逼真显示,首先必须建立描述地面几何形状模型。这在计算机图形学中称为造型(modelling)。在计算机图形学中,景物造型常常是多边形面片(polygon facets)进行描述。三角形面片由于是刚体变换不变的,适合于各种不同的数据分布密度。基于三角形的各种几何算法比较简单、可靠^[1,3];特别是 Delaunay 三角形由于其唯一性和良好的三角形性质被认为是最适宜于表面逼近的。所以,不规则表面造型几乎都是基于三角形面片。关于建立不规则三角形网络的理论与算法请参阅文献[4]。对地形表面的这种多边形网络描述被称为数字地面模型(Digital Terrain Model,简称 DTM),DTM 至今已是测绘的主要产品之一。很显然,这种模型相对于地形细节来说还是很粗糙的。

在产生逼真地形显示之前,为了达到全方位的观察效果,要对 DTM 进行各种仿射变换,如平移、旋转、缩放等,将其从通用坐标系(X, Y, Z)变换到视见坐标系(X_v, Y_v, Z_v)。为了获得逼真的观察效果,还要进行可见表面识别即常说的消隐。要判断哪些面片从观察者位置看得见,位于视场外的面片将被裁剪掉(clipped),而视场内的各面片还必须查明其部分或全部被其他面片隐藏,可见表面识别问题曾一度是计算机图形学研究的热点。至今有许多成熟实用的方法,文献[5]的研究表明,基于目标空间的深度排序方法(Depth-Sort)对大多数情况来说是效率最高的。由于组成 DTM 的三角形面片均只在各三角形的边界处相交,不存在诸如相互穿插等不确定性,因此采用深度排序方法处理 DTM 也是可靠的。所谓深度排序,即将所有三角形面片根据其到视点的距离(又称深度)进行排序。如果从离视点最远的面片开始(back-to-front)进行多边形描绘(rendering),很显然,近处物体的颜色将覆盖掉较远处物体颜色,最后结果自然已消除了隐藏部分。因为这类类似于画家的创作——先画背景,再逐步在背景上添加前景物体,故又称画家算法(painter's algorithm)。

3 纹理映射

关于纹理(texture),至今没有一个严密一致的定义。通常情况下,纹理可视为覆盖一个表面的重复许多次的一种细节模式,或者一般地视为映射到一个多维空间的一个多维图象^[6]。纹理映射(texture mapping)意指一个纹理函数到一个三维表面的映射。这个函数的定义域可以是一维、二维或者三维的;既可以表示为一个二维图象阵列,也可以表示为一个纯粹的数学函数。纹理映射被认为是产生复杂细节现象的一个相对简单有效的方法。因为采用纹理映射不需要对一个表面每一个三维细节都进行复杂的模拟和描绘。并且纹理映射结果的真实感更强。

对目的而言,纹理函数由一个二维图象阵列——数字化像片数据定义。这里的像片主要指航摄像片。因摄影测量有精确的控制点信息,影像灰度均匀且具有与视觉观察一致的分辨率。特别是航片几乎记录了地面上各种地物的灰度信息,这对于全方位立体观察是必需的。而一般从地面上拍摄的像片基本上不具备上述特点,特别是由于受视点(拍摄位置)的限制,地物往往互相遮挡,影像信息不充分,不可能用于建立多角度视觉模型。而卫星影像往往由于比例尺太小,地物的影像模式不明显,这对于建立大比例尺的视觉模型(如工程用的)是不利的。所以,一

般只有航摄像片才用于建立地形的逼真显示。由于数字化像片数据是一个离散的栅格数据,因此,在映射之前,需要在纹理空间 (U, V) 用这些离散数据构造连续的纹理函数 $f(U, V)$ 。最简单易行的办法是采用双线性内插。如图 1 所示, a, b, c, d 分别为二维阵列纹理值。在纹理空间中的任意位置 (U, V) 处的纹理值可由 e 和 f 的线性内插得到,而 e 和 f 又分别是 a 与 c, b 与 d 之间的线性内插。

纹理映射涉及纹理空间(象片平面)、景物空间和图象空间(屏幕)三个空间之间的映射。首先将纹理映射到三维物体表面,然后再映射到屏幕图象。从纹理空间到景物空间的映射又被称为表面参数化。最精确的方法自然是根据中心投影原理建立纹理坐标 (U, V) 与三维景物空间坐标 (X_e, Y_e, Z_e) 之间的直接映射,即众所周知的从象点坐标到物空间坐标的直接线性变换

$$\begin{aligned} U &= \frac{a_1 X_e + b_1 Y_e + c_1 Z_e + d_1}{a_3 X_e + b_3 Y_e + c_3 Z_e + d_3} \\ V &= \frac{a_2 X_e + b_2 Y_e + c_2 Z_e + d_2}{a_3 X_e + b_3 Y_e + c_3 Z_e + d_3} \end{aligned} \quad (1)$$

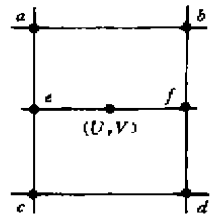


图 1 双线性内插

由于每一象素点(pixel)都要进行这样一个运算,计算工作量十分庞大。实际上采用简单近似的仿射映射一般也能取得满意的效果

$$\begin{aligned} U &= a_1 X_e + b_1 Y_e + c_1 Z_e + d_1 \\ V &= a_2 X_e + b_2 Y_e + c_2 Z_e + d_2 \end{aligned} \quad (2)$$

显然,(2)比(1)节省大量计算,效率高得多。不难发现,要建立这样一个映射至少需要 4 个控制点已知其纹理坐标 (U, V) 和物空间坐标 (X_e, Y_e, Z_e) 。

控制点选取可直接利用摄影测量控制点,也可用一般数字地面模型的数据点。对数字摄影测量而言,所有 DTM 点的纹理坐标和物空间坐标均是已知的,故可直接利用。而对常规数字化摄影测量来说,控制点对应的纹理坐标则可以在像片扫描数字化时人机交互式地得到。这种情况下,要求控制点在像片上的影像应易于识别。为了减少映射造成的位置误差,控制点应充分覆盖有效的影像范围。

将具有纹理特征的三维景物表面映射到屏幕空间 (x, y) ,这只是一个投影问题。为了取得与人类视觉相一致的观察效果,一般采用透视投影(perspective projection)

$$\begin{aligned} x &= \frac{X_e}{Z_e} \times \text{focal-length} \\ y &= \frac{Y_e}{Z_e} \times \text{focal-length} \end{aligned} \quad (3)$$

式中,focal-length 类似于照相机焦距的作用,表示投影表面(屏幕)离观察者的距离。文献[7]的经验表明,该值取屏幕大小的 3 倍时将获得最佳的视觉效果。

4 多边形描绘

利用景物的三维描述和纹理映射,产生在 CRT 上显示二维灰度阵列的过程被称为描绘(rendering)。描绘的主要任务是将景物描述表示成为一个经浓淡处理(shading)的显示像素阵

列。描绘结果的真实感取决于最终浓淡处理的效果。因此,模拟各种反射、折射和吸收现象的浓淡处理便成为近几年真实感图形生成的一个研究重点。物体的反射可见光能量包含了物体空间与光谱两方面的信息,是观察和识别物体的根本依据。由于自然界中各种物体的波谱反射特性千差万别,加之各种不同光源的混合作用,使得逼真模拟自然景物的光照效果尤为困难。本文提出的方法,由于直接利用了摄影象片数字化的灰度数据,从而避开了复杂的浓淡处理。

具体实现纹理映射的表面描绘通常有三种方法^[5],即屏幕空间扫描法、纹理空间扫描法和两步法。由于后两种方法不具备消隐功能,因此不宜于用来描绘深度排序的多边形面片。屏幕空间扫描法有时亦称为逆映射,实质上是一种隐藏面消除算法,因此被广泛采用。本文利用这一方法,从远到近描绘每一个三角形面片,并充分利用画面沿扫描线的连贯性质,采用增量(increment)算法,大大减小了运算工作量。该描绘算法的程序流程图如图 2。

其中,流程①计算屏幕上一个象素点(x,y)对应的视见坐标(X_s,Y_s,Z_s)_{x,y},本文的方法是利用相应三角形顶点的视见坐标进行双线性内插。另一种选择是不经流程①,直接计算各三角形顶点对应的纹理坐标(用映射关系式(2)),进而双线性内插各屏幕象素点对应的纹理坐标。可见,这样处理可以节省大量计算(每一个象素点的纹理坐标不是用式(2)计算,而是线性内插)。但不足的是,笔者经试验发现这种处理会导致严重的图象混淆现象(aliasing),丢失微小的细节,使得纹理图案变形。比如,道路在像片上的影像是一条光滑连续的直线,而映射出来的屏幕图形却是锯齿状的。

上述三角形描绘的双线性内插方法——扫描线增量算法如图 3 所示。一条水平扫描线与三角形面片 ABC 有两个交点(左和右),令左点的屏幕坐标为(x_{min},y_i),右点的坐标为(x_{max},y_i)。那么

$$x_{\min} = \frac{y_i - y_A}{y_C - y_A}(x_C - x_A) + x_A$$

$$x_{\max} = \frac{y_i - y_A}{y_B - y_A}(x_B - x_A) + x_A$$

由此,利用式(3)的逆映射便可算出左右两点的视见坐标

$$\begin{pmatrix} X_s \\ Y_s \\ Z_s \end{pmatrix}_{\text{left}} \quad \begin{pmatrix} X_s \\ Y_s \\ Z_s \end{pmatrix}_{\text{right}}$$

进而计算扫描线上左右点间的视见坐标增量

$$\begin{pmatrix} X_s \\ Y_s \\ Z_s \end{pmatrix}_{\text{increment}} = \left[\begin{pmatrix} X_s \\ Y_s \\ Z_s \end{pmatrix}_{\text{right}} - \begin{pmatrix} X_s \\ Y_s \\ Z_s \end{pmatrix}_{\text{left}} \right] / (X_{\max} - X_{\min})$$

那么,扫描线上左右点间其他象素点对应的视见坐标的计算可直接采用增量加法

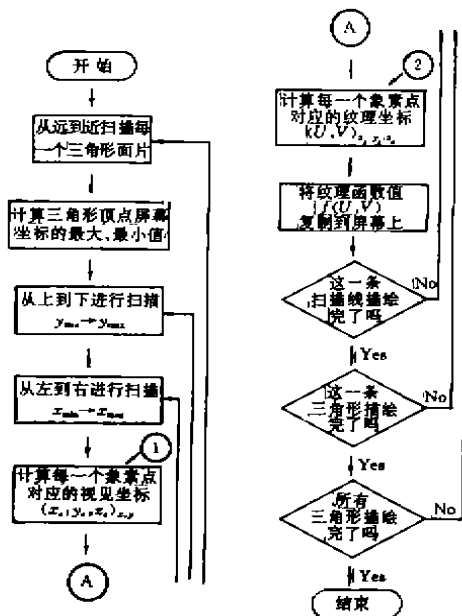


图 2 纹理映射程序框图

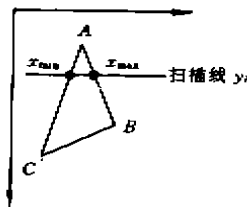


图 3 扫描线增量法

$$\begin{pmatrix} X_i \\ Y_i \\ Z_i \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} X_i \\ Y_i \\ Z_i \end{pmatrix}_{i-1} + \begin{pmatrix} X_i \\ Y_i \\ Z_i \end{pmatrix}_{\text{-increment}}, \text{其中} \begin{pmatrix} X_i \\ Y_i \\ Z_i \end{pmatrix}_0 = \begin{pmatrix} X_i \\ Y_i \\ Z_i \end{pmatrix}_{\text{-left}}$$

可见,用增量法(只有一个加法运算)较之由(3)式的逆映射(一个乘法和一个除法)计算各象素点对应的视见坐标效率要高得多。实际结果也证明,这样处理的效率和质量均是令人满意的。

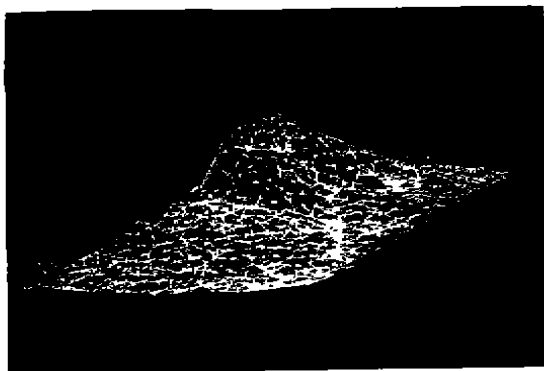


图 4 线框透视图



图 5 景观透视图

5 实验与结论

为了验证基于摄影测量的逼真地形显示技术的正确性和实用性,笔者利用铁三院航测队实际生产所使用的航空摄影像片和由 DIGIP 系统(有关 DTGIP 航测数字化测图系统的详细情况请参阅文献[8])得到的数字地面模型数据进行了应用实验,所用航片的摄影比例尺为 1:10000,象幅大小为 23 cm×23 cm,象片数字化由 Scan Maker 600 Z 完成,数字化分辨率为 150 DPI。地面上 1 km 长 800 m 宽的一个区域在航片上的有效影像数字化后采用非压缩的 TIF 格式共占 1M 存储单元。数字地面模型共有 1262 个数据点,建成 2454 个三角形面片。全部处理均在微机 CompaQ 386/33(VGA 卡)上进行,采用 640×480+16 Colors 模式,约需 10 min 机时。处理结果如下:

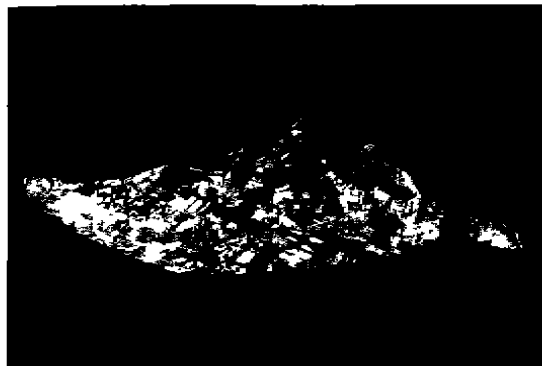


图 6 不同视点和视角的景观透视图

图 4 为常规线框形式的透视图,这对于表现整个地区大的地形起伏是显而易见的。但对于一些细小的地形起伏和线状特征(如果加上诸如道路、河流等)却难于识别。

图 5 为采用本文方法建立的景观透视图,很显然,各种地形起伏和地物分布都十分明显,根据需要,还可实现不同角度和方位的立体观察。图 6 为另一视点处看到的情况。

综上所述,可以得出如下结论:

(1) 本文采用摄影测量和纹理映射方法有效地建立起具有丰富景观信息和精确几何度量特征的地面立体模型,解决了计算机图形学关于地形逼真造型所面临的问题。

(2) 该技术所采用的各种算法充分考虑了地形数据的特点和计算机处理的优化,是可靠、

高效和实用的。

(3) 本文成果可作为现有数字化摄影测量系统的有益补充,扩大了摄影测量的应用潜力。可望在三维可视化 CAD、地理信息系统和环境规划与评估等领域得到应用。

6 参考文献

- 1 J. Amanatides, Realism in Computer Graphics: A Survey, IEEE, Computer Graphics & Applications, Vol. 7, No. 1, pp. 44-56, 1987
- 2 李德仁、郑肇保, 解析摄影测量. 北京: 测绘出版社, 1992
- 3 彭群生、梁友栋, 真实感图形的计算机生成. 计算机学报, 1989, (3)
- 4 朱庆、张庆珩. 关于建立顾及地形特征的带状数字地面模型的研究. 铁路 CAD 学术交流会, 1994
- 5 A. R. Dennis, An Overview of Rendering Techniques, Computer & Graphics, Vol. 4, No. 1, pp. 101-115, 1990
- 6 P. S. Heckert, Survey of Texture Mapping, IEEE, Computer Graphics & Applications Vol. 6, No. 11, pp. 56-67, 1986
- 7 L. O. Angell, High-Resolution Computer graphics Using C, Macmillan Education LTD., 1990
- 8 朱庆、王长进、张尚达. 一种实用的航测数字化测图系统 DIGIP. 西南交通大学学报, 1992, (4)

TECHNIQUE OF PHOTOGRAMMETRY-BASED REALISTIC TERRAIN DISPLAY

Zhu Qing Zhang Qinghang

Dept. of Civil Engineering, Northern Jiaotong University, Beijing 100044

Abstract The applications of 3-D realistic terrain display to the terrain structure comprehension, geographic data analysis and spacial decision, etc are very important and have received a great deal of attention. However, because of the irregularity and complexity of natural terrain surface's texture details, the realistic terrain display is one of the most challenging problems in computer graphics. In this paper, a efficient technique of realistic terrain display based on photogrammetry is introduced. This technique fully utilizes the existing achievements of digitized photogrammetry, such as digitized photo data and digital terrain models. The digitized photo data is mapped onto the digital terrain model as terrain surface's texture details by "texture mapping". The practical methods about perspective transformation, visible surface identification and polygon rendering are also presented by the authors. The research results of this paper can be used in geographic information system (GIS), surveying and mapping, urban planning, route aligning and designing, and so on.

Keywords photogrammetry; realistic terrain display; texture mapping; polygon rendering

(责任编辑 张武美)