

# 基于真实环境图象的三维动态仿真系统研究

李自力 朱光喜 朱耀庭

(华中理工大学电子与信息工程系, 武汉 430074)

张小敏

(武汉化工学院土木工程系, 武汉 430074)

**摘要** 针对在城市规划中, 建筑设计方案的计算机三维图形与真实环境图象进行匹配及合成的问题, 研究和提出了一种基于摄影测量学反透视原理的, 对实际环境摄像经抽样采集的图象序列进行亮度、方差及平均色度合成的图象分析方法, 并研究了一种基于单象空间后方交会解析摄影测量技术一阶渐近迭代计算的求解虚拟摄像机参数的算法, 同时提出了基于关键帧技术的适合于图象合成时, 计算分割区域随时间变化的动态掩模算法, 还在太阳系行星运动规律的基础上, 建立了适合于计算机虚拟三维世界坐标系的日照模型, 以及相应的求解任意时刻、任意经纬度虚拟世界坐标位置处的虚拟太阳光源方向和强度的算法. 这些算法已被应用到基于真实环境图象的三维动态仿真系统中. 实验结果表明, 这些算法是行之有效的.

**关键词** 透视匹配 世界坐标 图象掩模 光照模型

中图法分类号: TP391.9 Tu201.4 文献标识码: A 文章编号: 1006-8961(2000)12-1030-04

## 3D Dynamic Simulation System Based on Real Environmental Images

LI Zi-li, ZHU Guang-xi, ZHU Yao-ting

(Department of Electronics & Information Engineering, Huazhong University of Science & Technology, Wuhan 430074)

ZHANG Xiao-min

(Department of Civil Engineering, Wuhan Institute of Chemistry & Engineering, Wuhan 430074)

**Abstract** The investigation of the problem that concerns the match and composition between the virtual 3D computer graphics or image for the architecture planned to build and the real environment image sequence has been carried out. The major research way is to make anti-perspective calculation on the image sequence extracted from the video clip about the real environment based on photogrammetry and make analysis of lightness, average square error and average chroma on the image sequence. The algorithm has been studied to get the parameters of the virtual camera by calculating out the parameters of the real camera with linear asymptote iterative calculation based on the technology of single photo analytical photography in photogrammetry. The algorithm of dynamic masking has been put forward to synthesize virtual image sequence and real environment image sequence based on keyframe technology when the segmentation edge varies with time. The model of virtual sunlight in computer's virtual 3D world coordinate space has been established based on the rules of the elliptical motion of planet in the solar system and the rules of earth's rotation to simulate the sunlight at any time in a year and in any position with arbitrary longitude and latitude in the world. These algorithms have been applied to the 3D dynamic simulation system based on real environment images. The result of experiments proves that these algorithms are effective.

**Keyword** Perspective match, World coordinate system, Image masking, Model of lighting

## 0 前言

城市中的建筑, 特别是高层建筑对城市的景观有非常重要的影响. 一幢形象不美的高层建筑不仅

严重影响城市的面貌, 而且会造成较大的经济损失, 所以在城市规划中, 对建筑设计方案预先进行科学的评审就显得非常必要. 过去这项工作多采用缩小了的沙盘模型或根据绘制的不同方向的建筑物设计图纸及实景图来进行评审, 而随着计算机三维图形

技术、图象处理及视频压缩技术、多媒体技术的日趋成熟,使研制基于真实环境的城市建筑规划与建筑设计方案动态仿真系统成为可能,而且使用这种动态仿真多媒体系统能逼真地虚拟设计方案中的建筑在建成以后的规划景观效果,进而能辅助城市规划部门作出评审和决策.在计算机三维图形与真实地理环境图象匹配的研究中,涉及到摄影测量学中的单象空间后方交会摄影测量技术、几何透视问题<sup>[1,2]</sup>和太阳光照与阴影模型技术<sup>[3]</sup>.具体地讲,就是在计算机三维图形仿真系统中,其虚拟世界坐标系、虚拟摄像机参数应与真实世界坐标系(也称大地坐标系)、真实摄像机参数相一致,且计算机三维图形仿真系统中虚拟世界坐标系的太阳光光源参数(包括位置、亮度)及环境变量(如雾的浓度等)应与真实世界坐标系中的太阳光光源参数及环境变量相一致.另外,该系统中具有较高质量/压缩比的视频压缩算法可保证高质量的图象输出和实时播放.

## 1 基于真实环境图象三维动态仿真系统的技术构成

### 1.1 建筑设计方案虚拟三维图形与真实环境景象的透视匹配

透视匹配的计算过程是,先将从数字摄像机获得的环境景象或从录像带上用采集卡通过采样得到的数字视频通过剪辑抽取成静态图象序列,再对这些静态图象序列,根据摄影测量原理进行摄像机参数提取的反透视计算,这些摄像机参数包括站点坐标、投影方向、镜头焦距或成象视角<sup>[1]</sup>,而计算出的所有参数值则组成摄像机参数数据库,然后通过给计算机三维图形仿真系统虚拟世界坐标系中的虚拟摄像机赋值,以构成虚拟摄像机的动画轨迹.这样就可以保证在图象合成时,能够对虚拟建筑影像的动画与真实环境摄像进行精确透视匹配.此过程的计算原理如图 1 所示,图中  $O-XYZ$  为大地坐标系(真实世界坐标系); $S-xyz$  为成象坐标系; $S(X_s, Y_s, Z_s)$  为  $O-XYZ$  坐标系中的摄像机站点坐标; $P$  为成象图片, $o$  为图片  $P$  的中心, $2L_x$ 、 $2L_y$  为图片  $P$  的尺寸; $|S_o| = f$  为焦距; $S-xyz$  坐标系  $z$

轴的负方向为投影方向; $A, B, C, D \dots$  等为大地坐标系中的测量控制点(即物方控制点),其对应的象点(即象方控制点)为  $a, b, c, d \dots$ ;  $\varphi = 2\arctan[(L_x^2 + L_y^2)^{1/2}/f]$  为镜头成象视角.计算中要有 4 个以上的测量控制点.

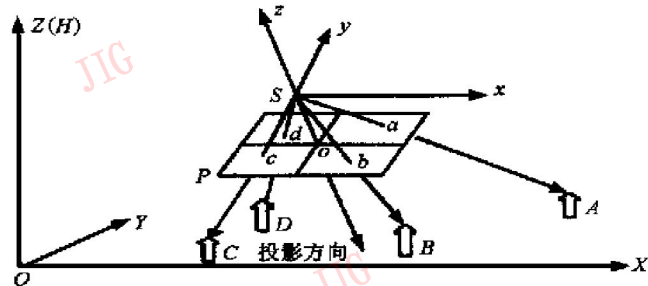


图 1 透视成象摄影测量模型示意图

$S-xyz$  坐标系在  $O-XYZ$  坐标系中的相对方向也可用转角系统  $(A, \gamma, \kappa)$  表示,而转角系统  $(A, \gamma, \kappa)$  的意义如下:方位角  $A$  为摄影方向(即成象坐标系  $S-xyz$  中  $z$  轴的负方向)的水平投影与  $O-XYZ$  坐标系中  $X$  轴的夹角;倾角  $\gamma$  为成象坐标系  $S-xyz$  中  $z$  轴方向与  $O-XYZ$  坐标系中  $Z$  轴的夹角,即摄影方向与铅垂方向的夹角;自转角  $\kappa$  为图片  $P$  绕  $z$  轴转动时,偏离象片主纵线的转角,即  $S-xyz$  坐标系的  $xy$  平面绕  $z$  轴自转时,  $x$  轴同  $xy$  平面与过  $S$  点的水平面交线的夹角.

$S-xyz$  的  $z$  轴在  $O-XYZ$  坐标系中的方向余弦为  $(-\cos A \sin \gamma, \sin A \sin \gamma, \cos \gamma)$ ,摄影方向在  $O-XYZ$  坐标系中的方向余弦为  $\xi = (\cos A \sin \gamma, -\sin A \sin \gamma, -\cos \gamma)$ .这样在  $O-XYZ$  坐标系中摄像机参数可用 {站点坐标  $S$ , 摄影方向  $\xi$ , 自转角  $\kappa$ , 焦距  $f$ , 镜头视角  $\varphi$ , 图片尺寸  $2L_x, 2L_y$ } 数据结构表示.

匹配时测量控制点的物点坐标  $(X, Y, Z)$  与其象点坐标  $(x, y, -f)$  之间的关系需满足下列投影方程

$$\begin{vmatrix} X - X_s \\ Y - Y_s \\ Z - Z_s \end{vmatrix} = \lambda \mathbf{R}_{A\gamma\kappa} \begin{vmatrix} x \\ y \\ -f \end{vmatrix} \quad (1)$$

其中,  $\mathbf{R}_{A\gamma\kappa}$  为旋转变换矩阵,其作用是把成象坐标系  $S-xyz$  中的点转换到原点为  $S(X_s, Y_s, Z_s)$ ,且坐标轴平行于  $O-XYZ$  坐标系主轴的坐标系  $S-uvw$  中,  $\lambda$  为比例常数.  $\mathbf{R}_{A\gamma\kappa}$  也可用  $(A, \gamma, \kappa)$  表示为

$$\mathbf{R}_{A\gamma\kappa} = \begin{vmatrix} a_1 & a_2 & a_3 \\ b_1 & b_2 & b_3 \\ c_1 & c_2 & c_3 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} -\sin A \cos \kappa + \cos A \cos \gamma \sin \kappa & \sin A \sin \kappa + \cos A \cos \gamma \cos \kappa & -\cos A \sin \gamma \\ -\cos A \cos \kappa - \sin A \cos \gamma \sin \kappa & \cos A \sin \kappa - \sin A \cos \gamma \cos \kappa & \sin A \sin \gamma \\ \sin \gamma \sin \kappa & \sin \gamma \cos \kappa & \cos \gamma \end{vmatrix} \quad (2)$$

由式(1)可得如下象点坐标计算表达式

$$\begin{cases} x = F_x(X, Y, Z, X_s, Y_s, Z_s, A, \mathcal{Y}, \kappa, f) = -f \frac{a_1(X - X_s) + b_1(Y - Y_s) + c_1(Z - Z_s)}{a_3(X - X_s) + b_3(Y - Y_s) + c_3(Z - Z_s)} \\ y = F_y(X, Y, Z, X_s, Y_s, Z_s, A, \mathcal{Y}, \kappa, f) = -f \frac{a_2(X - X_s) + b_2(Y - Y_s) + c_2(Z - Z_s)}{a_3(X - X_s) + b_3(Y - Y_s) + c_3(Z - Z_s)} \end{cases} \quad (3)$$

式中,假定摄像机是事先校准的,所以不考虑象心偏移  $x_0, y_0$ .

由于式(3)是非线性方程,因此用其直接代入一组控制点的物点坐标和像点坐标来求取待定参数

$$\frac{\partial F_x}{\partial X_s} \Delta X_s + \frac{\partial F_x}{\partial Y_s} \Delta Y_s + \frac{\partial F_x}{\partial Z_s} \Delta Z_s + \frac{\partial F_x}{\partial A} \Delta A + \frac{\partial F_x}{\partial \mathcal{Y}} \Delta \mathcal{Y} + \frac{\partial F_x}{\partial \kappa} \Delta \kappa + \frac{\partial F_x}{\partial f} \Delta f = x - F_x(X, Y, Z, X_{s0}, Y_{s0}, Z_{s0}, A_0, \mathcal{Y}_0, \kappa_0, f_0) \quad (4)$$

$$\frac{\partial F_y}{\partial X_s} \Delta X_s + \frac{\partial F_y}{\partial Y_s} \Delta Y_s + \frac{\partial F_y}{\partial Z_s} \Delta Z_s + \frac{\partial F_y}{\partial A} \Delta A + \frac{\partial F_y}{\partial \mathcal{Y}} \Delta \mathcal{Y} + \frac{\partial F_y}{\partial \kappa} \Delta \kappa + \frac{\partial F_y}{\partial f} \Delta f = y - F_y(X, Y, Z, X_{s0}, Y_{s0}, Z_{s0}, A_0, \mathcal{Y}_0, \kappa_0, f_0) \quad (5)$$

$$X_{s0} = X_{s0} + \Delta X_s \quad Y_{s0} = Y_{s0} + \Delta Y_s \quad Z_{s0} = Z_{s0} + \Delta Z_s \quad A_0 = A_0 + \Delta A \quad \mathcal{Y}_0 = \mathcal{Y}_0 + \Delta \mathcal{Y} \quad \kappa_0 = \kappa_0 + \Delta \kappa \quad f_0 = f_0 + \Delta f \quad (5)$$

这种迭代计算一直进行至误差收敛到预定的允许范围为止.

图1中测量控制点  $A, B, C, D \dots$  在  $O-XYZ$  坐标系中的坐标为  $A(X_A, Y_A, Z_A), B(X_B, Y_B, Z_B), C(X_C, Y_C, Z_C), D(X_D, Y_D, Z_D) \dots$ , 经  $S(X_s, Y_s, Z_s)$  对成像平面  $P$  作透视投影变换后的象点在  $S-xyz$  坐标系中的坐标分别为  $a(x_a, y_a, -f), b(x_b, y_b, -f), c(x_c, y_c, -f), d(x_d, y_d, -f) \dots$ , 一般实用中要有4个以上的测量控制点才能解算这组待定参数.

### 1.2 基于关键帧技术的动态掩模算法

将计算所得到的真实摄像机参数数据库,赋值给虚拟世界坐标系中的虚拟摄像机,以构成虚拟摄像机的运动轨迹,并将生成的虚拟建筑成象动画的图象序列作为图象合成的中景,然后对真实环境摄像的数字视频剪辑获得的图象序列作基于内容的图象分割,以形成掩模,从而把环境图象分成前景和背景,其前景是对虚拟建筑有遮挡的部分(如图2所示).文中是采用以型值点序列为控制点的闭合B-样条曲线作为勾画掩模的分割曲线,并在对真实环

$X_s, Y_s, Z_s, A, \mathcal{Y}, \kappa, f$  是很困难的.实际计算中是用初始待定参数将式(3)展开成关于待定参数修正值的线性方程组,然后将求解出并修正后的待定参数值再代入式(3),其计算结果与像点作误差比较如下式所示.

境图象序列进行分割中,让掩模分割曲线跟踪待分割区域的边缘.闭合B-样条曲线的次数可依待分割区域边缘的平滑程度而取1次、2次、3次,其中1次闭合B-样条曲线是以型值点间的直线段依次连接而成的多边形;2次闭合B-样条曲线可保证切矢量的连续( $C^1$ 连续);3次闭合B-样条曲线还可保证曲率的连续( $C^2$ 连续).这样掩模分割曲线在整个图象序列中将形成随帧号而变形的动态过程,这个过程可用基于关键帧技术的型值点坐标位置动态插值自动生成算法去拟合<sup>[3,4]</sup>(如图3所示).该插值算法可以是对帧号(即时间)的一阶线性插值,也可以是二阶抛物线插值或三阶立方插值,究竟采用哪种插值,这将取决于型值点拟合待分割区域边缘上对应点的运动特征.这种动态掩模算法的实现,类似于基于关键帧的二维动画变形技术,它是用基于内容分割的图象分割边缘线,去匹配真实环境景象的数字视频剪辑序列中同一内容随时间而变形的轮廓线.在图象被分割部分的边缘上,需使用低通滤波算法以保



图2 武汉市某综合楼设计规划效果实例



图3 相邻关键帧之间掩模分割曲线的变形

--  $t_1$  关键帧处的掩模分割曲线  
- - -  $t_2$  关键帧处的掩模分割曲线  
(同一型值点  $Q_j$  在关键帧之间的位置由  $t_1, t_2$  处的位置插值计算)

证图象被分割处, 在与作为中景的虚拟建筑动画相合成时的平滑。

### 1.3 基于真实环境图象的三维动态仿真系统的光照模型

在进行基于真实环境摄像的城市建筑规划动态仿真中, 需要在虚拟世界坐标系中, 虚拟一个真实环境的室外光源, 文献[5]即研究了一种基于阴影匹配的建立人工光源的算法. 本文中, 虚拟室外光源的有效方法是模拟太阳光的方法. 由于一年中的每一天, 地球在围绕太阳转动的椭圆轨道上的位置是确定的, 而每一天中的任一时刻, 地球围绕自转轴转过的角度也是确定的, 因此就能以太阳系公转周期模型和地球自转周期模型来建立一个算法, 以确定任意一天的任意时刻太阳相对于地球上任意经纬度处的方位和光照强度. 这就是在虚拟世界坐标系中建立虚拟太阳的依据. 根据真实环境摄像的日期、时刻以及当地的地理经纬度值就可求出虚拟太阳光源在虚拟世界坐标系中的位置和亮度, 然后再对虚拟太阳光源这个对象的属性赋值. 该算法模型如图 4 所示.

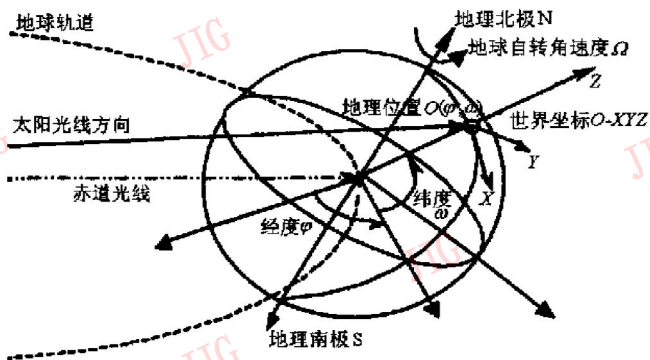


图 4 虚拟太阳光源模型的算法示意图

## 2 结 论

基于真实环境图象的三维动态仿真系统已投入商业运行(图 2 即为用此系统仿真的一个实际建筑方案的实例), 并已取得了良好的社会效益。

### 参 考 文 献

- 王之卓. 摄影测量原理. 北京: 测绘出版社, 1979.
- 董国耀. 透视和体视. 北京: 北京理工大学出版社, 1992.

- Bethel E W, Uselton S P. Shape distortion in computer-assisted keyframe animation, State-of-the-Art in Computer Animation. In: Proceedings of Computer Animation'89, Springer-Verlog, Tokyo, Japan, 1989: 215~ 224.
- Kockanek D H U. Interpolating spline for keyframe animation. In: Proceedings of Graphics Interface'84, Nat. Pes. Council of Canada, Ottawa, Ont., Canada, 1984: 41~ 42.
- Jean Philippe, Thirio. Realistic 3D simulation of shapes and shadows for image Processing, Graphical Models and Image Processing, 1992, 54(1): 82~ 90.



李自力 1965 年生, 讲师, 现为该系博士研究生. 主要研究方向为计算机图形、虚拟现实与仿真及科学计算可视化。



朱光喜 1945 年生, 教授, 博士生导师, 1969 年毕业于华中工学院无线电工程系, 曾主持完成国家自然科学基金、部委基金和“九五”国家重点攻关项目十余项, 已发表学术论文 100 余篇。



朱耀庭 1939 年生, 教授, 博士生导师, 中国通信学会会士, 1960 年毕业于华中工学院无线电工程系. 长期从事通信与电子系统方面的科研工作, 已主持完成国家自然科学基金、部委基金和“九五”国家重点攻关项目十余项, 其中多项成果为国内首创, 并达国际先进水平, 已发表学术论文 100 余篇。



张小敏 1965 年生, 讲师, 从事建筑与土木工程结构的仿真及计算可视化研究。