

基于照片的混合建模系统几何模型求解原理研究

吴炜煜 谢成林

(清华大学土木工程系, 北京 100084)

摘要 为了快速精确地建立建筑实体的三维模型, 提出了一种混合建模系统中的单目视觉求解算法. 该方法从二维图片数据中提取三维实体的边缘轮廓, 并附加约束条件, 以构造三维实体的空间参数约束方程, 然后通过求解得到实体的空间坐标参数, 再利用纹理提取及转换等技术, 来实现从照片到计算机中三维真实感实体的创建. 实验表明, 该求解模型建模效率高、实用性强, 能够用于大多数建筑实体的建模.

关键词 混合建模 计算机视觉 模型求解 虚拟现实

中图法分类号: TP391.TU3 文献标识码: A 文章编号: 1006-8961(2000)05-0380-05

A New Solution Method for Geometrical Model Based on Single-vision of Hybrid Modeling Systems

WU Wei-yu, XIE Cheng-lin

(Department of Civil Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084)

Abstract In order to construct three dimension model of architectural solid, a new solution method for geometrical model based on single-vision of hybrid modeling system has been developed. In this method, edge profiles were pickup from image first. Space parameter equations of 3D solid was constructed by adding additional restriction condition. By solving the equations, space coordination and others parameter of 3D solid was obtained. At last, visual reality was achieved by introducing texture pickup and transition technique. Experiments has proved that the method has high modeling efficiency and wide practicability. It can be used for modeling of most architectural solids.

Keywords Hybrid modeling, Computer visualization, Solution method for model, Visual reality

0 引言

计算机的诞生, 对人类的生活和生产产生了巨大的推动作用. 近年来, 随着计算机技术的飞速发展, 以及三维建模技术的日益完善, 以及计算机视觉理论技术的不断突破, 虚拟现实、三维动画等计算机三维视觉技术均获得了巨大的发展, 其不但在制造业、建筑业、军事科技、地理信息系统等领域得到了广泛的应用, 而且逐步进入了大众生活, 尤其在广告业、影视娱乐等方面倍受重视.

实现虚拟现实和三维动画的一个关键问题是如

何创建表现实体的三维模型. 到目前为止, 三维建模研究人员提出了以下3种三维建模方法: ①基于几何的建模方法; ②基于图象的建模方法; ③基于几何和基于图象的混合建模方法. 在这3种方法中, 基于几何的建模方法最早被提出来, 也是发展得最为完善的一种建模方法. 因此, 其应用领域也最广. 该方法具有精度高、支持功能复杂、模型描述完备等优点. 但是, 其人机交互工作量大, 建模效率较低. 基于图象的建模方法算法复杂, 所要求的图象数量较大, 且产生的模型精度较低. 而基于几何和基于图象的混合建模方法则吸取了前两者的优点, 并克服了它们的某些缺点, 从而实现了以较少的人机交互工

作量和较少的图象需求量, 产生了精度较高的三维模型. 以混合方法建立三维模型, 不但效率较高, 且模型比较容易实现真实感渲染和虚拟现实应用, 因此这是一种极有前途的三维建模方法^[1].

由于照片等图象记录的是三维信息, 要转化为实体模型的三维信息时必须追加额外信息^[2]. 目前所用的主要方法是基于多目视觉理论, 即利用多幅图象的匹配来实现三维信息的还原. 但这种方法在不同图象间进行元素匹配时, 仍需大量的人机交互, 且算法较为复杂. 另外一种方法是利用图象上记录的灰度信息来反算物体的深度, 从而得到物体的三维信息. 这种方法不但算法复杂, 而且抗干扰能力差, 且可靠性及精度均低. 本文基于单目视觉提出了一种新的解决方法, 在我们的方法中, 利用图象中记录的二维信息, 并附加由某些基本几何原型的空间拓扑关系及映射关系所形成的约束条件, 根据透视投影原理, 形成几何模型参数求解方程组, 然后通过解该方程组, 便可得到模型的三维空间参数. 同时, 利用纹理提取及转换技术, 从原图象中得到三维实体各个面上的纹理图形, 经过变换后, 贴到所形成的三维实体的相应面上, 以形成具有真实感的三维实体模型. 对于三维实体中被遮挡的部分, 有两种解决方案: ① 利用从该实体不同侧面拍到的照片, 分别进行建模信息提取, 然后进行模型融合及配准, 从而确定该三维实体的全部细节; ② 对于规则实体, 可以利用对称性原理, 从已求解出的实体细节推算出不可见部分的细节. 在求解出三维实体的全部细节后, 便可以利用所建立的三维模型进行漫游及虚拟现实等的应用. 该模型可方便地用于虚拟现实、地理信息系统等应用中.

1 混合建模系统几何模型求解基本原理

1.1 混合建模系统几何模型求解过程

在混合建模系统几何模型的表达上, 我们采用了 3 个坐标系统来表达三维实体的空间信息. 这 3 个坐标系分别是全局坐标系、照相机坐标系和基本几何原型的局部坐标系. 文中所有的几何模型计算都是基于这 3 个坐标系展开的.

混合建模系统几何模型的主要原始数据是三维实体的照片图象. 在几何模型求解时, 首先利用该照片图象进行三维实体边缘的提取. 然后, 将提取出来的边缘在照相机坐标系的成像平面上表达出来. 接

着, 利用透视投影法则来形成在照相机坐标系下几何模型的参数方程组. 但此时方程组中方程的个数少于未知参数的个数, 无法求解, 因此需要加入基本几何原型的约束条件, 以形成新的方程, 以便使得模型方程组可以求解. 也就是说, 我们超越了传统的灰度反算或多目匹配的深度提取方法, 而是利用基本几何原型自身的内在约束条件, 从有限的已知条件中求解三维实体的深度信息. 然后, 利用平移及旋转变换, 将模型参数在全局坐标系中表达出来. 最后, 依据可见性原理, 用几何模型的边缘对原始图象进行图象分割, 从而提取出几何模型各个面上的纹理数据, 并利用图象变换技术来形成三维实体各个面上的纹理贴图, 最终得到三维实体真实感表现所需的所有数据. 整个混合建模系统几何模型求解过程及系统工作流程如图 1 所示.

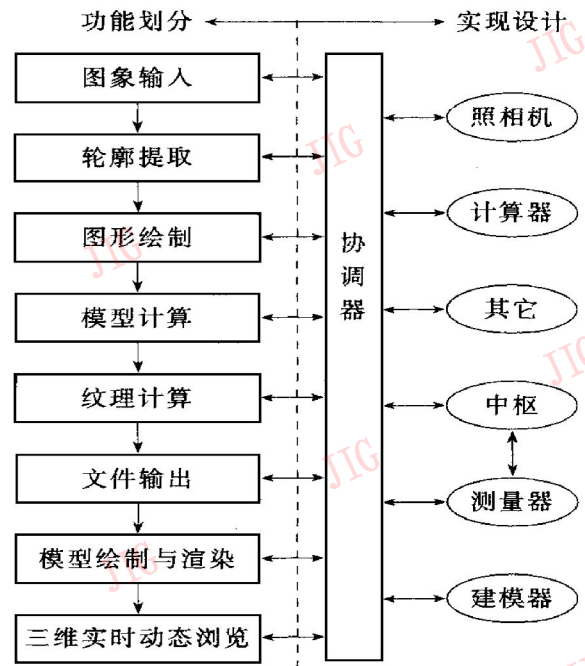


图1 混合建模系统工程流程图

1.2 照片图象轮廓提取

混合建模系统的原始数据源是三维实体的二维照片图象. 但在该二维图象中, 我们最感兴趣的是三维实体的边缘轮廓. 因此, 利用实体边缘在该二维图象中表现为两个具有不同灰度的均匀图象区域边界这一特性, 我们可以用离散形式的边缘检测算子来检测图象灰度分布的梯度, 并设定一个阈值, 将灰度梯度值大于阈值的区域作为三维实体的边缘提取出来. 但由于原始图象一般是彩色图象, 无法直接将一般图象处理方法中所使用的图象象素灰度值作为计算梯度的采样值. 因此, 我们参考灰度图象轮廓提取算法, 设计了用于彩色图象轮廓提取的算法. 为了避

免边缘提取中的一些歧义性,用户还可以利用系统提供的绘图工具,对提取出来的边缘进行编辑或勾勒三维实体的实际边缘,最终形成三维实体的边缘轮廓.

1.3 几何模型基本参数求解方程的确定及求解

在获得了三维实体的边缘轮廓后,混合建模系统则根据用户输入的照片焦距设定、底片实际尺寸或相机扫描范围尺寸等参数,将这些边缘映射到模型计算系统中照相机坐标系的 $z = -f$ 投影平面上,以形成基于几何的输入数据.

经过以上步骤以后,其所形成的几何输入数据仍是一组二维数据,单凭它们是无法推算出三维实体的空间信息的.在数学上,这种情况体现为方程不能封闭求解.为了使模型方程的数量大于或等于未知参数的个数,我们在充分分析各种基本几何原型的空间拓扑关系后,通过加入额外的约束关系,以在模型计算方程组中形成附加的方程,从而使得该方程组可以求解.至于原始的方程组,由于三维实体是按照透视投影的规则,投影到照相机底片上而形成图象映象的,因此可以根据投影法则,建立数学投影模型,以形成几何模型原始方程组.

由于模型求解的最终目标是为了将三维实体的空间信息在统一的全局坐标系上表达出来,因此还需进行从照相机坐标系到全局坐标系的转换.在本文方法中,全局坐标系选择与三维实体中大尺度长方体的局部坐标系一致.在模型计算时,首先选择模型中大尺度长方体作为基本几何原型,并投影到照相机的投影平面上,然后利用基本几何原型的求解方法,推算出该长方体的局部坐标系与照相机坐标系之间的转

换关系及该长方体的空间参数.这样,就得到了全局坐标系与照相机坐标系之间的转换关系,从而为其后基本几何原型空间参数的计算提供基础.几何模型基本参数的求解过程如图2所示.

1.4 纹理数据的提取和转换

在几何模型基本参数求解后,我们就可以求得三维实体各个可见面的顶点在原始图象中的位置.一般来说,围成三维实体的各个面通常是平面(对于一般曲面也可以用一系列平面进行拟合).因此在将三维实体拟合成由一系列平面围成的多面体后,就可以利用上一节中求得的参数,来求其可见面在原始图象中对应的图象区域,然后再将这些区域的纹理数据提取出来.通常,这些区域的形状与三维实体相应面的形状并不相同,这时可利用透视变换,将所提取出的纹理区域形状转化为相应面的形状.最后,利用 Direct3D 技术实现三维实体的纹理贴图,以产生具有真实感的三维形体.对于三维实体中的不可见面,可以利用从不同视角所拍摄的照片进行纹理提取.对于规则实体,也可以通过对应可见面的拟合,来实现三维实体各个面的贴图.

2 混合建模系统几何模型求解算法的实现

2.1 提取几何模型的边缘轮廓

由于混合建模系统对模型几何数据的分析和计算基本上可归结为对构成模型的各个基本几何原型点、线几何元素的操作,因此模型几何数据中的点、线信息构成了模型数据计算的基础.为了进行计算,首先必须得到与模型相关的点、线基本信息.

对于灰度图象,其中实体边缘表现为灰度剧变的区域.由于图象中的灰度变化可以用图象灰度分布梯度来反映,因此可以通过局部图象微分得到

$$\nabla f(x, y) = |g/\alpha, g/\beta|^T = |f_x, f_y|^T \quad (1)$$

其中, $\nabla f(x, y)$ 中包含有局部灰度的变化信息,其幅度为 $e(x, y)$

$$e(x, y) = \sqrt{f_x^2(x, y) + f_y^2(x, y)} \quad (2)$$

该 $e(x, y)$ 可以作为边缘检测算子.为了计算方便,可以将该算子简化为

$$e(x, y) = |f_x(x, y)| + |f_y(x, y)| \quad (3)$$

以上讨论都是针对连续图象数据而言,对于计算机所处理的离散形式图象数据,我们可以得到用离散

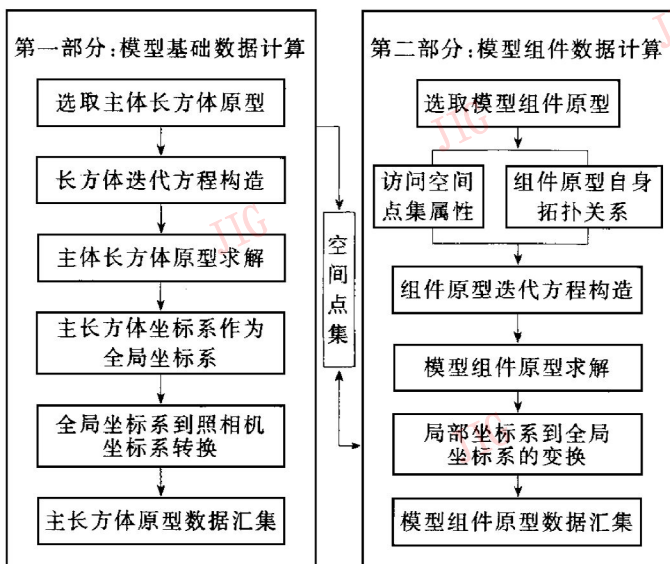


图2 几何模型基本参数的求解过程

方法表示的梯度算子

$$\hat{f}_x = \mathbf{w}_1^T \cdot \mathbf{x} \quad \hat{f}_y = \mathbf{w}_2^T \cdot \mathbf{y} \quad (4)$$

其中 $\mathbf{w}_1, \mathbf{w}_2$ 是用梯度掩模描述的权矢量, 图 3 给出了两个较为常用的权矢量^[3]:

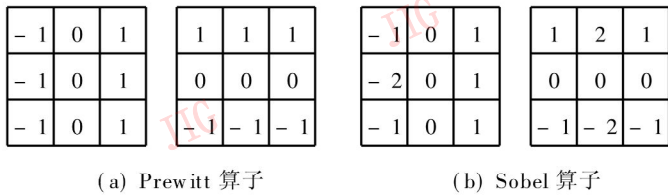


图 3 两个常用的梯度掩模算子

通过边缘检测得到边缘图象 $e(x, y)$ 后, 再根据图象的全局信息确定一个阈值 T , 利用该阈值便可检测到图象的边缘.

$$E(k, l) = \begin{cases} 1 & e(k, l) \geq T \\ 0 & e(k, l) < T \end{cases} \quad (5)$$

混合建模系统所处理的原始图象通常为彩色图象, 而彩色图象的边缘提取算法与灰度图象有所不同. 为了满足最后真实感演示的需要, 我们采用了如下彩色图象边缘检测算法:

$$e_r(x, y) = |f_{rx}(x, y)| + |f_{ry}(x, y)| \quad (6)$$

$$e_g(x, y) = |f_{gx}(x, y)| + |f_{gy}(x, y)| \quad (7)$$

$$e_b(x, y) = |f_{bx}(x, y)| + |f_{by}(x, y)| \quad (8)$$

$$e(x, y) = e_r(x, y) + e_g(x, y) + e_b(x, y) \quad (9)$$

$$T = T_r + T_g + T_b \quad (10)$$

其中, $e_r(x, y)$ 、 $e_g(x, y)$ 、 $e_b(x, y)$ 分别表示彩色图象在红、绿、蓝三基色上的梯度; T_r 、 T_g 、 T_b 分别为三基色上的阈值. 由于任何颜色都可以用红、绿、蓝三基色表示, 故彩色梯度也相应可以用红、绿、蓝三基色上的梯度表示, 由此可以得到公式(9). 而其阈值计算公式与灰度图象中阈值计算公式相同.

2.2 求解几何模型的空间参数

由边缘提取边线后还需要进行透视变换. 设 $P_{si}(x_{si}, y_{si})$ 为照相机坐标系中一点 $P_{ci}(x_{ci}, y_{ci}, z_{ci})$ 经过透视映射到投影平面 $z = f$ 上的一点, 则它们之间的关系为^[4]:

$$\begin{cases} x_{si} \cdot z_{ci} - x_{ci} \cdot f = 0 \\ y_{si} \cdot z_{ci} - y_{ci} \cdot f = 0 \end{cases} \quad (11)$$

对于图象中的任意一点, 我们虽然可以建立两个方程, 但是由于该点在三维空间有三个未知量, 因此方程无法求解. 可是, 对于一个确定的三维实体, 总是由一定数量的基本几何元素按一定组合方式组合而成, 或是可以用一定数量的长方体的组合来近似. 若能求得组成三维实体的各个基本几何元素的

空间参数, 并知道它们的组合方式, 便可以确定三维实体的所有空间参数. 因此我们不妨针对一系列基本几何元素推算出各自的求解算法, 并将三维实体按照给定的基本几何元素进行分割, 以得到各基本几何元素的轮廓及各元素之间的组合关系. 然后分别求解出各基本几何元素的空间参数, 最后将这些参数重新组合, 以得到三维实体的所有空间参数.

由于基本几何元素(如长方体、球体、棱锥、棱台、圆柱、圆锥、圆台等)与建筑构成特定的约束关系, 使我们可以通过简化控制点及拓扑表示的数据, 来减少其空间自由度, 因此可以实现从二维信息向三维信息的反算. 不失一般性, 我们以长方体为例来说明求解过程. 对于一个长方体, 其全部空间参数可以通过以长方体的长 L 、宽 W 、高 H 及长方体局部坐标系相对全局坐标系的 3 个平移分量 x 、 y 、 z 和 3 个旋转分量 α 、 β 、 γ 等 9 个参数确定. 这样长方体的空间自由度可以缩减为 9. 而在照相机位置选择较好时, 在该长方体的照片上可以得到长方体的 6 个顶点. 对于每个顶点, 根据上面给出的投影关系, 可以建立两个投影方程. 这样, 6 个顶点便可以建立 12 个方程, 而其中只有 9 个未知参数, 因而可形成一个超静定方程组. 当采取一定的求解策略(如合理选取其中的 9 个方程进行求解, 而用其它 3 个方程作为校验)便可以求得该长方体的全部空间参数. 对于其它各种基本几何元素, 同样可以利用它们自身的约束来减少其空间自由度后, 进行参数求解.

2.3 实现纹理贴图

在求得三维实体的空间参数后, 便可以构造实体的三维模型. 此时实体三维模型上的各个面通常可以由多边形拟合得到. 对于所有可见面, 均可以投影到照相机的 $z = f$ 投影平面上, 以便求得该面在原始照片上的对应图象区域. 该区域的形状尽管与三维实体相应面的形状可能不太相同, 但它们的顶点个数及顶点之间的关系一定相同.

不妨在实体三维模型和原始照片上相对应的多边形中选取相对应的一对顶点为原点, 建立各自的局部坐标系. 然后设三维实体某个面上的一点在其局部坐标系中的坐标为 $P_c(x, y)$, 其在图象区域中的相应点在该图象区域的局部坐标系中的坐标为 $P_s(u, v)$, 则它们之间存在如下的线性关系:

$$[x, y] = [u, v] \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{bmatrix}$$

若任取上述两个多边形上的两对相对应顶点的坐标

代入该式,并求出待定参数,便可建立起三维实体上某个面与图象区域之间的转化关系.再利用插值和色度分解及合并等方法,便可以以原始图象为基础,构造出与三维实体可见面相匹配的贴图纹理.

3 实验结果

为了验证本文所讨论的混合建模系统几何模型求解方法的实际效果,我们根据该方法开发了建筑实体三维混合建模系统,并利用该系统进行了实例验证^[5].

在实验中,我们选择清华大学中央主楼作为实验对象,利用数码相机从几个不同的位置拍摄中央主楼的照片,并利用水准仪、经纬仪及其它辅助设备对主楼进行了实地测量.最后,利用该混合建模系统计算出的主楼参数与实地测量的数据进行比较.经过比较发现,通过系统计算所得到的数据与实地测量所得到的数据的误差为:

建筑实体长、宽、高误差 < 8%

建筑实体位置平移误差 < 6%

建筑实体空间旋转误差 < 5%

通过误差分析,我们认为误差主要是由于以下原因造成的:①基本几何元素假定与实际形体之间,在拓扑关系上存在差异;②图象边缘提取过程中造成的误差;③照相时聚焦成像不精确所造成的误差;④方程求解及计算舍入误差等.

4 结论

本文提出的混合建模系统几何模型求解原理综合利用了计算机图象处理、计算机图形学、空间透视几何、拓扑学、非线性方程组求解等多学科知识,以

实物照片为基本原始数据,结合少量的人机交互输入,建立了三维实体的空间模型,并实现了真实感演示.该方法提供了一种快捷方便的建模手段,为三维建模技术的发展开辟了新的途径.经过实验验证,我们得出如下结论:该方法具有建模效率高、实现方便、准确性高、模型真实感强等优点,可以广泛地应用于科研、教育、艺术、娱乐等领域,具有很大的发展前景.

参考文献

- 1 吴炜煜,黄大勇. 建筑结构仿真建模方法. 见:第六届全国多媒体学术会议论文集,西安,1997,188~192.
- 2 Michitaka Hirose. Image-Base virtual world generation. IEEE Multimedia, January-March 1997, 27~33.
- 3 崔屹. 数字图象处理技术与应用. 北京:电子工业出版社,1997.
- 4 马颂德,张正友. 计算机视觉——计算理论与算法基础. 北京:科学出版社,1998.
- 5 黄大勇. 建筑实体三维混合建模方法研究[硕士学位论文]. 北京:清华大学土木工程系,1999.



吴炜煜 1945年生,清华大学副教授.主要著作有《多媒体技术开发指南》、《工程数据管理系统》、《多媒体系统软件及应用设计》等11部,发表论文60余篇.感兴趣的研究领域是:计算机图形学、计算机辅助工程、多媒体仿真技术.



谢成林 1974年生,1997年7月毕业于清华大学土木工程系,获结构工程专业学士学位,其后在该系攻读硕士学位.主要研究方向为三维建模、多媒体仿真、计算机辅助设计.