

文章编号:1001-9081(2005)09-2196-03

切片级管线表面三维重建

陈 涵, 邬群勇, 王钦敏

(福州大学 福建省空间信息工程研究中心

数据挖掘与信息共享教育部重点实验室, 福建 福州 350002)

(hichenhan@163.com)

摘 要:在比较表面重建中的面绘制法和体绘制法以及面绘制中的切片级和体素级两种表面重建方法、分析表面重建流程的基础上,提出了一种计算型值点集的方法,它在计算弯道部分的管线时较为简便。该方法通过二次曲面求管线表面轮廓方程进而求得管线的型值点集。之后用三角网格对型值点集进行拼接来获得管线的表面模型,最后利用图形学的方法对管线表面模型进行绘制,达到管线表面三维重建的目的。文末利用 Java3D 给出了一个具体的实现。

关键词:表面重建;切片级;二次曲面;表面轮廓方程;型值点;法矢

中图分类号: TP312 **文献标识码:** A

Slice-based surface reconstruction of 3D pipeline

CHEN Han, WU Qun-yong, WANG Qin-min

(Key Lab for Data Mining and Information Sharing of Ministry of Education,

Spatial Information Research Center of Fujian Province, Fuzhou University, Fuzhou Fujian 350002, China)

Abstract: Based on comparing surface rendering with direct volume rendering and slice-based with volume-based surface reconstruction of 3D objects and analyzing the work-flow of surface reconstruction, a method of calculating shape points which was easier to flexure of pipeline was presented. With this method, shape points were calculated by surface outline equation got from quadratic surface. Then these shape points were patched with triangles grid, which gained the pipeline surface model. Finally, the pipeline models were rendered by means of computer graphics in order to implement 3D pipeline surface reconstruction. At last, a reconstruction instance with Java3D was given.

Key words: 2D slice based; surface reconstruction; quadratic surface; surface outline equation; shape points; normal vector

0 引言

目前不少城市都建立起了二维的管线信息系统。然而管线在地下纵横交错,有的管线甚至与地面垂直,单纯用二维的图形无法直观的表达管线之间的空间关系,因此管线的三维表面重建成为行业的研究热点。

所谓三维表面重建指的是依据各种技术,利用采集到的物体表面三维信息,恢复物体的三维结构并表达出来的工作,它包括了三维数据的采集、拼接、表达等等^[1]。采集到的数据称为数据场型值点集或体数据,而拼接与表达属于表面重构的范畴。表面重建有基于面的绘制法(Surface Rendering)与基于体的绘制法(Direct Volume Rendering)两大类。面绘制法主要利用曲面造型法对数据场型值点集进行多边形面片拼接重构再通过计算机图形学的方法进行绘制;而体绘制法避免了复杂的曲面重构过程,直接研究光线通过数据场时与型值点的关系,再对屏幕上每一个像素点进行 RGB 色彩计算从而显示重建结果。由于体绘制法直接对数据场每一个型值点进行操作,因此它的图像质量要优于面绘制法。但面绘制法采用了成熟的图形学软硬件技术,因此绘制效率较高,在一些不讲究重建细节和高交互性需求的环境得到广泛应用^[2]。

从重建过程处理的基本元素的级别来分可以把面绘制法分为切片级重建^[3]和体素级重建两类^[4-6]。切片级重建主要

通过多边形(一般是三角形)面片直接拼接物体的型值点来构造形体表面;而体素级重建把全部型值点集分为大量体素范围,先在每个体素内构造等值面片再将它们拼接起来从而对物体进行三维重建。当型值点较丰富时使用体素级重建能达到良好的效果;相反,在型值点量较少的情况下体素级重建不但效果不佳并且还会产生较多的中间面片从而影响系统运行的效率。在本文中,考虑到需要实时绘制管线并且型值点集通过计算获得,数据量比较少,因而采用面绘制中的切片级重建方法进行。

从上文的分析可以看出,不论用什么方法型值点集对于表面重建起到了奠定性的作用。对于管线型值点的计算不少学者做了许多研究,常见的有线性插值法、四边形逼近法、曲面拟和法、推算法、裁减法^[7-10]等等。本文介绍一种基于旋转曲面求表面轮廓方程进而计算型值点的算法,它在计算管线弯曲部分的型值点中是十分简便的。

1 切片级管线三维表面重建流程分析

要对二维管线进行三维表面重建,主要有两大步骤。一是进行管线的表面数学建模,二是管线的三维可视化表达。数学建模是用表面轮廓方程来描述管线的表面形状,并通过坐标变换求出管线的型值点集,再对型值点集进行轮廓拼接从而构造管线的表面模型的过程。管线的模型绘制就是利用

收稿日期:2005-03-30;修订日期:2005-05-30 基金项目:国家 863 计划资助项目(2003AA135050)

作者简介:陈涵(1980-),男,福州人,硕士研究生,主要研究方向:Web GIS、Web3D; 邬群勇(1973-),男,助理研究员,博士研究生,主要研究方向:GIS与计算机应用; 王钦敏(1948-),男,福建福清人,研究员,博士,博士生导师,主要研究方向:地球信息科学、电子政务。

计算机图形学技术将管线进行三维表达。因此表面数学建模是可视化表达的基础,模型绘制是表面建模的结果展示,两者缺一不可。整个重建过程如图1所示:

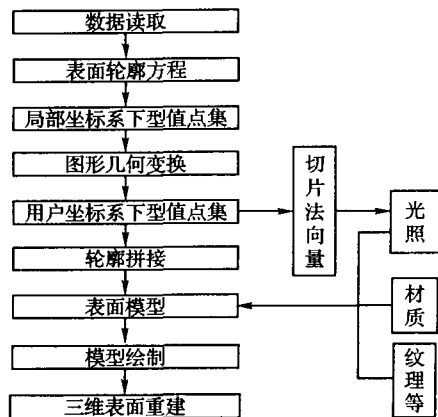


图1 切片级管线三维表面重建流程

2 管线表面轮廓方程及型值点集

表面轮廓方程是对物体表面轮廓的数学描述,管线的表面轮廓方程能够描述管线的表面结构、形状、特性等性质。通过表面轮廓方程对管线进行数学建模是求管线型值点集的基础。一般来说,一条管线主要由直管部分和弯道接口两部分组成。两部分的型值点集的计算既有区别又有联系,分别求出他们各自的表面轮廓方程便可获得管线表面的型值点集。

2.1 直管部分型值点集的计算

2.1.1 直管的表面轮廓方程

直管部分在外观上看起来是一柱面,是一种二次曲面。柱面是一条直线段沿着给定的曲线平行移动产生的曲面,这条直线段称为直母线,给定的曲线叫做准曲线。如果求出这条线段方程和准曲线方程便可求出整个管线表面轮廓方程。

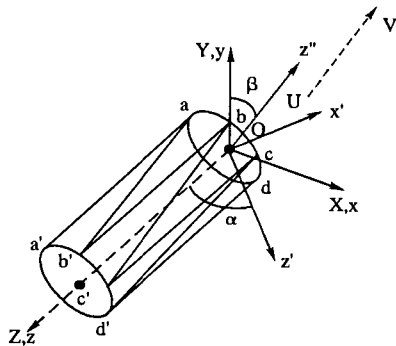


图2 局部坐标系下的管线模型

在用户坐标系 XYZ(图2)下(在图形学中此坐标系能用来让用户自定义形体的坐标),首先从二维图形上的管线获得两个端点的平面坐标 (X, Y) ,并且从这条管线对应的数据库中读取端点的高程值 (Z) 和管线半径 r ,那么这两点在用户坐标系下的空间坐标为 $U(U_x, U_y, U_z), V(V_x, V_y, V_z)$ 。建立向量 \vec{UV} , \vec{UV} 即为管线的轴线, $|\vec{UV}|$ 为管长:

$$H = \sqrt{(V_x - U_x)^2 + (V_y - U_y)^2 + (V_z - U_z)^2}$$

为了便于建立管线的数学模型,另设一局部坐标系 $(oxyz)$ 其初始位置与方向均重合于用户坐标系(在后面的讨论中,小写 x, y, z 表示局部坐标系中的参数)。在局部坐标系中,以 oz 为管线的轴线, xoy 平面为管线的底面,以 H 为长 r 为半径设立管线模型。可以确定直母线为平行于 z 轴并且与 z 轴的距离为

r 的直线段,它起始于 $z = 0$,终止于 $z = H$ 。任取符合条件的两点 $(r, 0, 0)$ 和 $(r, 0, H)$ 构成直母线。将它绕准曲线

$$\begin{cases} x = r \cdot \cos\theta, \\ y = r \cdot \sin\theta, \\ z = 0, \end{cases} \quad 0 \leq \theta \leq 2\pi$$

(图3)旋转就构成了圆柱体管线的表面。因此,直管的表面轮廓方程就由它的准曲线和曲线

$$\begin{cases} x = r \cdot \cos\theta, \\ y = r \cdot \sin\theta, \\ z = H, \end{cases} \quad 0 \leq \theta \leq 2\pi$$

共同构成。直母线每旋转一定的 θ 角,就能求出一对在 $z = 0$ 和 $z = H$ 处的直母线端点坐标,这些端点也就是直管管线在局部坐标系下的型值点,由于局部坐标系与用户坐标系重合,因此局部坐标系下的坐标值等于用户坐标系下的坐标值。记录下所有的 θ 值对应的型值点就构成了型值点集。可以看出,当 $\Delta\theta \rightarrow 0$ 时,型值点越密集,模拟出来的管线就越接近实际管线,但计算量也随之增大。

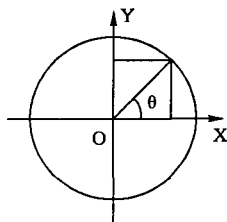


图3 XOY 截面圆

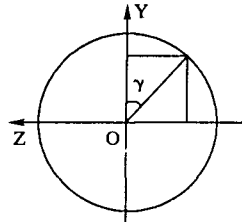


图4 YOZ 截面圆

2.1.2 图形的几何变换与用户坐标系下的型值点集

上述方法计算出来的型值点集是在局部坐标系下的,而要把众多的管线在同一个用户坐标系下进行表示就要通过计算把这些型值点变换到用户坐标系下,这样才能对大量的管线进行同时绘制,这个过程也就是图形的几何变换过程。

图形几何变换是指对图形的几何信息经过几何变换后产生新的图形。它可以看成是坐标系不动而图形变动,变动后的图形在坐标系中的坐标值发生变化;也可以看成是图形不动而坐标系发生变化。本文采用后一种方法进行讨论。为了能将多个变换同时用于多个目标,引入齐次坐标使得变换的表示法统一。所谓点的齐次坐标系就是 n 维向量由 $n+1$ 维向量来表示,一个 n 维向量的齐次坐标表示不唯一,由哑坐标决定大小,一般在二维图形变换中哑坐标取 1。文中用齐次坐标来表示型值点集的变换过程。

如图2,为了将局部坐标系下的管线调整到与用户坐标系中的 \vec{UV} 相重合,要先把 z 轴旋转到 Oz'' 方向,再把 O 点移到 U 点(一切变换都基于右手坐标系)。

以 \vec{UV} 矢量在第一卦限为例,设 (X, Y, Z) 为初始型值点在用户坐标系中的坐标。首先,先将局部坐标系绕着 y 轴旋转 α 角,型值点在用户坐标系中的坐标变为 (X', Y', Z') , (X', Y', Z') 与 (X, Y, Z) 的关系为:

$$\begin{bmatrix} x' & y' & z' & 1 \end{bmatrix} =$$

$$\begin{bmatrix} X & Y & Z & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \cos\alpha & 0 & \sin\alpha & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin\alpha & 0 & \cos\alpha & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

式中

$$\alpha = \arctg\left(\frac{V_x - U_x}{V_z - U_z}\right)$$

同理,然后把坐标系沿着 x' 轴旋转 $-(\frac{\pi}{2} - \beta)$ 就把 z' 旋转到 z'' ,这样就符合管线在用户坐标系中的方向。新的型值点坐标 (X'', Y'', Z'') 与 (X', Y', Z') 之间的关系为:

$$[X'' \ Y'' \ Z'' \ 1] =$$

$$[X' \ Y' \ Z' \ 1] \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\beta & \sin\beta & 0 \\ 0 & -\sin\beta & \cos\beta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

式中

$$\beta = \arccos\left(\frac{V_y - U_y}{|\vec{UV}|}\right)$$

最后,要把局部坐标系的原点平移到用户坐标系中的 U 点位置,新的坐标值 (X''', Y''', Z''') 计算方法如下:

$$[X''' \ Y''' \ Z''' \ 1] =$$

$$[X'' \ Y'' \ Z'' \ 1] \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ T_x & T_y & T_z & 1 \end{bmatrix}$$

式中 T_x, T_y, T_z 是 U 点在用户坐标系中的坐标。那么 (X''', Y''', Z''') 就是直管部分在用户坐标系下最终的型值点坐标。

2.2 弯道接口部分型值点集计算

由于已有数据的限制,当我们连续绘制不在同一条直线上的 2 条直管时(UV 和 VW),将出现管线间连接的缺口如图 5 和图 6。

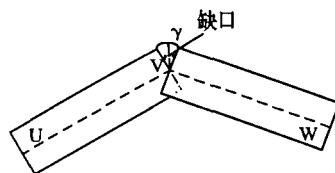


图5 缺口与弯道(侧面)

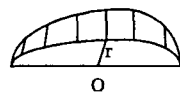


图6 缺口示意图

这就需要我们对缺口也就是弯道接口进行处理。可以用球面的一部分来模拟两管线之间的缺口,此球的球心在 V 点,半径为管线的半径 r 。同理,我们要计算这部分球面的型值点集。

同样,首先在局部坐标系下计算型值点集。球面是一种旋转曲面,也是二次曲面的一种。旋转曲面是由一条曲线 c 绕一固定直线旋转所产生的曲面。固定直线称为旋转轴,曲线 c 成为旋转曲面的母线。为了计算这部分球面,从图 2 和图 5 上可以看出这个球的母线就是 VW 管线在局部坐标系上时 xoy 截面的上半圆,它绕着 x 轴旋转 γ 角而成。同样, $\Delta\gamma \rightarrow 0$ 时,接口越逼真,但计算量也增大。结合图 3、图 4,可以计算球面型值点在局部坐标系下的参数方程也就是接口处的表面轮廓方程为

$$\begin{cases} x = r \cdot \cos\theta, \\ y = r \cdot \sin\theta \cdot \cos\gamma, \\ z = -(r \cdot \sin\theta \cdot \sin\gamma), \end{cases} \quad 0 \leq \gamma \leq \pi$$

其中 γ 为两矢量 \vec{UV} 和 \vec{VW} 夹角。由两向量点积可得

$$\vec{UV} \cdot \vec{VW} = |\vec{UV}| \cdot |\vec{VW}| \cdot \cos\gamma$$

因此

$$\begin{aligned} r &= \arccos\left[\frac{(\vec{UV} \cdot \vec{VW})}{(|\vec{UV}| \cdot |\vec{VW}|)}\right] \\ &= \arccos\left[\frac{(V_x - U_x)(W_x - V_x) + (V_y - U_y)(W_y - V_y) + (V_z - U_z)(W_z - V_z)}{HL}\right] \end{aligned}$$

式中, θ 可取与直管部分计算相同的一组 θ 值,在此基础上旋转一定的 γ 角,就能求出部分球面在局部坐标系下的型值点集。再进行类似的几何变换便可获得用户坐标系下的型值点集。

3 轮廓拼接

轮廓拼接是把型值点集按照一定的顺序用三角面片连接起来,以构成一个封闭的曲面,且这个封闭的曲面是一个没有重叠,没有悬浮,没有交叉的。但是相同点集不同的拼接顺序会产生不同的物体表面,所以安排好合理的拼接顺序最为关键。

作者先按照 θ 与 γ 从小到大的取值把型值点集保存成数组,再将数组中每一个顶点(除第一、第二个点)和位于它之前的两个顶点构成一个三角形平面。直管部分与弯道接口分开进行。如图 2 中型值点顺序为 $a'ab'bc'd'd$,先拼接 $\Delta a'ab'$,然后是 $\Delta ab'b$,接下来 $\Delta b'bc'$,依次类推,最终将所有的管线轮廓拼接起来。

4 模型绘制

在计算机图形学中,将生成真实图形或图像的过程称为绘制。模型绘制过程中涉及众多方面的问题,如光照模型、法矢计算、明暗处理、物体的材质、纹理等等。本文主要重点描述最为关键的物体表面法矢。

文中所讨论的所有绘制技术都是基于 Torrance-sparrow 光照模型^[11]。当光线照射到物体表面的时候,可能被吸收、

反射或者透射。如果这些光线进入人的视觉系统物体就能被看见。在三维场景中也是如此。“人眼”要想看见三维场景中的物体,就必须计算光照及其他的反射方向,这一切都和物体表面的朝向息息相关,而朝向用数学描述就是物体的表面法矢。

通过上述的表面建模与轮廓拼接,已经生成了管线的表面,但是计算机并不知道这些表面究竟是朝什么方向,所以必须计算各个三角形面片的法矢。

以 $\Delta a'ab'$ 平面为例(这样选择是为了描述方便,实际操作中应选择已经经过坐标变换过的点)。三点坐标分别为 $a'(a'_x, a'_y, a'_z)$, $a(a_x, a_y, a_z)$, $b'(b'_x, b'_y, b'_z)$,那么经过这三点的平面方程为,

$$\begin{bmatrix} x & y & z & 1 \\ a'_x & a'_y & a'_z & 1 \\ a_x & a_y & a_z & 1 \\ b'_x & b'_y & b'_z & 1 \end{bmatrix} = 0$$

左边展开为 $Ax + By + Cz = 0$ 的形式后可得

$$\begin{aligned} A &= \begin{bmatrix} a'_y & a'_z & 1 \\ a_y & a_z & 1 \\ b'_y & b'_z & 1 \end{bmatrix} & B &= \begin{bmatrix} a'_x & a'_z & 1 \\ a_x & a_z & 1 \\ b'_x & b'_z & 1 \end{bmatrix} \\ C &= \begin{bmatrix} a'_x & a'_y & 1 \\ a_x & a_y & 1 \\ b'_x & b'_y & 1 \end{bmatrix} \end{aligned}$$

从两个或多个服务提供者同时下载同一流媒体内容的不同部分。

3 结语

基于 CDN 的流媒体系统能有效地提高用户访问的性能,并减轻骨干网络流量,同时也在一定程度上也增加了系统容量,但其建造成本十分昂贵;基于 P2P 技术的流媒体网络虽然成本很低,但在整个因特网范围内实施却有很大的困难,一是很难设计出高效的失效服务节点的查找策略,二是新的流媒体文件必须要分布到足够多节点之后系统才能正常提供改媒体的服务,系统很难及时地自动完成这一功能。结合 CDN 与 P2P 技术的流媒体系统,较好地解决了以上问题。除了本文所重点研究的客户端缓存替换算法外,还有如代理服务器缓存的替换及预取算法、多代理服务器之间的协作机制、失效服务节点的快速替换策略等诸多问题需要进一步研究。

参考文献:

- [1] CRANOR CD, GREEN M, KALMANEK C, *et al.* Enhanced Streaming Services in a Content Distribution Network[J]. IEEE Internet Computing, 2001, 5(4): 66 - 75.
- [2] XU D, HEFEEDA M, HAMBRUSCH S, *et al.* On Peer-to-Peer Media Streaming[A]. Proceedings of IEEE ICDCS 2002[C], 2002.
- [3] XIANG Z, ZHANG Q, ZHU W, *et al.* Peer-to-Peer Based Multimedia Distribution Service[J]. IEEE transactions on Multimedia, 2004, 6(2).
- [4] HEFEEDA M, HABIB A, BOTEV B, *et al.* PROMISE: peer-to-

peer media streaming using Collect-Cast[R]. Technical report, CS-TR 03-016, Purdue University, August 2003.

- [5] HEFEEDA MM, BHARGAVA BK. On-Demand Media Streaming Over the Internet[A]. 9th IEEE Workshop on Future Trends of Distributed Computing Systems (FTDC'03)[C]. San. Juan, Puerto Rico, 2003.
- [6] STOICA I, MORRIS R, KARGER D, *et al.* Chord: A scalable peer-to-peer lookup service for internet applications[A]. Proceedings of the ACM SIGCOMM'01 Conference[C], 2001.
- [7] PADMANABHAN V, WANG H, CHOU P, *et al.* Distributing Streaming Media Content using Cooperative Networking[A]. Proc. of the 12th international workshop on network and operating system support for digital audio and video[C]. Miami, Florida 2002.
- [8] DESHPANDE H, BAWA M, GARCIA-MOLINA H. Streaming Live Media over a Peer-to-Peer Network[R]. Technical Report, Stanford University, August 2001.
- [9] TRAN DA, HUA KA, DO TT. A Peer-to-Peer Architecture for Media Streaming[Z]. IEEE JSAC Special Issue on Advances in Overlay Networks, 2004.
- [10] XU D, CHAI HK, ROSENBERG C, *et al.* Analysis of a Hybrid Architecture for Cost-Effective Streaming Media Distribution[A]. Proc. of SPIE/ACM Conf. on Multimedia Computing and Networking (MMCN 2003)[C]. Santa Clara, CA, January 2003.
- [11] 罗治国. 流媒体内容分发网络的研究[D]. 北京: 中国科学院计算技术研究所, 2004.
- [12] 罗治国, 孙巍, 王行刚. 一种基于传输成本的流媒体缓存替换算法及其性能评价[J]. 通信学报, 2004, (2).

(上接第 2198 页)

显然 $normal = \{A, B, C\}$ 为原点指向平面的单位法矢,也就是 $\Delta\alpha'ab'$ 的表面法矢。依次将每个面都附上法矢,当场景中定义光照时,光线的反射就能正确被计算,也就能被“人眼”所看见。之后,结合赋予管线材质等信息就能绘制出形象的三维管线。

5 试验结果与结论

依据以上所讨论的算法过程,利用 Java 3D 实现了该算法,如图 7 所示。数据来自某管线信息管理系统二维图形数据与其属性数据库。该算法做到了三维管线表面重建的实时性。如果管线的数据被修改,只需要刷新窗口便可将数据的修改结果反映在三维图形上。另外,由表面轮廓方程带来的优势是能够根据物体与视点的距离灵活的取不同的 $\Delta\theta$ 与 $\Delta\gamma$ 进行 LOD(Level OF Detail)的设置从而兼顾绘制效果与绘制速率这对矛盾。此算法为解决二维管线的三维重建提供了一种新的思路。

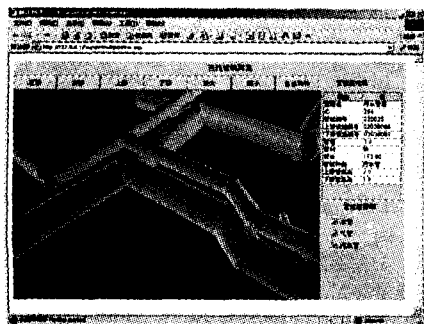


图7 管线表面重建结果

参考文献:

- [1] 孙国辉, 包宏, 靳风荣. 三维物体表面重建方法的分析[J]. 计算机应用研究, 2004, 21(4): 253 - 255.
- [2] 来元. 医学图像表面重建算法研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2001.
- [3] KEPPEL E. Approximating complex surface by triangulation of contour lines[J]. IBM J. Research and Development, 1975, 19(1): 2 - 11.
- [4] CLINE HE, LORENSEN WE, LUDKE S, *et al.* Two Algorithms for Three-Dimensional Reconstruction of Tomograms[J]. Med Phys, 1988, 15(3): 320 - 327.
- [5] HERMAN GT, LIU HK. Three Dimensional Display of Human Organs from Computed Tomograms[J]. Computer Graphics Image Processing, 1979, (9): 1 - 21.
- [6] LORENSEN WE, CLINE HE. Marching Cubes: A High Resolution 3D Surface Construction Algorithm[A]. SIGGRAPH'87 Proceedings[C], 1987. 163 - 169.
- [7] 张大坤, 薛忠明, 王光兴. 基于 Java 3d 的不规则形体三维造型及真实感处理[J]. 计算机工程, 2003, 29(2): 28 - 29.
- [8] 李清泉, 严勇, 杨必胜, 等. 地下管线的三维可视化研究[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2003, 28(3): 277 - 282.
- [9] 杜国明, 龚健雅. 城市三维管网的可视化及其系统功能实现的关键技术[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2002, 10(5): 534 - 537.
- [10] 杨国东. 基于 OpenGL 的管线 3 维显示方法研究[J]. 测绘通报, 2003, (6): 24 - 26.
- [11] 孙家广. 计算机图形学[M]. 北京: 清华大学出版社, 1998.