

文章编号:1004-4213(2011)10-1571-6

# 基于改进光线投影算法的混凝土 CT 三维重建研究

赵亮<sup>1</sup>, 李昌华<sup>1</sup>, 陈登峰<sup>1</sup>, 党发宁<sup>2</sup>, 王丽丽<sup>1</sup>

(1 西安建筑科技大学 信息与控制工程学院, 西安 710055)

(2 西安理工大学 岩土工程研究所, 西安 710048)

**摘 要:**混凝土计算机断层成像试验图像细观研究多集中在二维横切面上,而混凝土计算机断层成像三维重建研究非常少,使混凝土计算机断层成像试验图像细观研究受到了局限,不利于全面分析在各个应力情况下混凝土的受力情况.本文提出一种可视化平台下基于改进光线投影法的混凝土计算机断层成像图像三维重构新技术,并进行可视化系统的实现.结果表明:本文提出的混凝土计算机断层成像图像三维重构方法快速、真实,为建立准确的混凝土材料数值细观模型提供了一种有效辅助方法,具有重要的应用意义.

**关键词:**混凝土 CT 图像;三维重构;改进光线投影法;可视化工具

**中图分类号:** TP391

**文献标识码:** A

**doi:** 10.3788/gzxb20114010.1571

## 0 引言

混凝土是一种特殊的天然缺陷材料,由级配骨料、水泥、砂浆及孔隙等组成,其内部结构非常复杂,具有多尺度性和独特的物理和力学性质,广泛应用于建筑行业的不均匀材料.近年来,X 射线混凝土计算机断层成像(Computerized Tomography, CT)试验成为混凝土、岩石材料细观破裂过程的热点研究课题.X 射线 CT 观察混凝土裂纹演化过程最大优点在于它的无损探测性能和较高分辨率,直接观测试验过程中材料内部结构及物质变化,被用于混凝土、岩石细观结构及损伤方面的研究,取得了较好的结果.目前,国内混凝土、岩石类 CT 图像处理研究主要集中在二维平面上<sup>[1-2]</sup>.一般来说,工业 CT 对数据采集速度与成像速度要求较低,但面临的对象物理性能各异、形状大小相差悬殊,成像环境也各不相同,因此数据缺损现象严重<sup>[3]</sup>;医用 CT 机本身自带的三维可视化系统主要是针对人体组织结构的系统,并不十分适合混凝土结构的三维重建.目前混凝土 CT 图像三维重构研究主要是运用医用三维可视化等专业软件对混凝土 CT 图像细观结构进行三维重建<sup>[4]</sup>,其重建的体数据数目太多,在现有的单机硬件条件下不能满足对其进行计算,并且其重建效果不好,国内外没有一套成熟的针对混凝土 CT 图像的三维重建及可视化系统.

三维重建是计算机可视化的重要研究领域<sup>[4]</sup>,混凝土 CT 三维重建的研究对于建立准确的混凝土材料有限元数值细观模型有较为重要的参考意义,为了便于对混凝土进行更精确细观研究,本文采用图形图像处理和可视化的开发工具包(Visualization Toolkits, VTK)对混凝土 CT 图像三维重构及可视化进行了研究,将光线投影算法应用在混凝土 CT 图像三维重构上,并进行了可视化系统实现,为真实构建混凝土细观数值模型提供了一种辅助方法.

## 1 CT 图像的获取

试件采用高度为 120 mm,直径 60 mm 的圆柱体;混凝土强度为 C15,水灰比大试样为 0.50.水泥使用云南滇西水泥厂生产的 42.5 中热硅酸盐水泥;骨料由大渡河左岸海流沟内的各级配花岗岩人工骨料组成.标准条件下养护 28 天 CT 扫描采用三峡大学第二附属医院——仁和医院的 PHILIPS brilliance 16 排螺旋 CT,扫描图像大小为 512 × 512.该 CT 机可进行图像重建,相当于沿试件的纵向进行了密集的扫描,图像分辨率尚好.此设备具有超薄层扫描(0.5 mm),更快的扫描时间(0.4 s),更大的扫描范围(一圈 16 层),扫描后可获得横断面图像 288 幅,并通过 CT 三维重建可得 170~190 幅纵断面图像.图 1 为正在进行的 CT 试验全景照.加

**基金项目:**国家自然科学基金(No. 50878176)、国家自然科学基金重点项目(No. 90510017)、陕西省教育厅专项计划研究项目(No. 2010JK640)和西安市科技计划项目(No. CXY1014(3))资助

**第一作者:**赵亮(1980—),男,讲师,博士研究生,主要研究方向为模式识别、计算机控制技术. Email: tanatee@163.com

**导师(通讯作者):**李昌华(1963—),男,教授,主要研究方向为图像处理计算机图形与数字建筑. Email: lichangh@pub. xaoonline.com

**收稿日期:** 2011-04-19; **修回日期:** 2011-07-19



图1 CT与加载设备图  
Fig. 1 CT and loading equipment

载设备采用西安理工大学研制的适用于混凝土、岩石类材料细观力学试验研究的加载仪器。

试验采用荷载控制,加载速率 0.1 kN/s,扫描 10 次. CT 机设置的扫描参量:电压 140 kV,电流 250 mAs,层厚 0.5 mm,层间距 5 mm. 图 2 为一个断面不同应力下混凝土受力图.

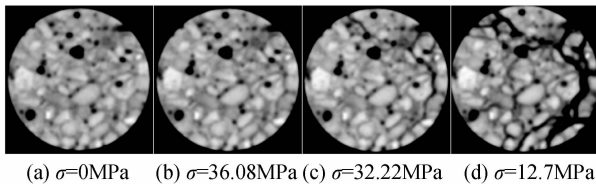


图2 混凝土应力图  
Fig. 2 Stress of concrete

## 2 光线投影加速算法

光线投影算法<sup>[5]</sup>是最常用的以图像空间为序的典型直接体绘制算法. 其基本思想是:按照设定视线的方向,从屏幕上的每个像素点出发,发出一条射线,沿着这条射线按照一定的步长对三维数据场进行等距采样,对距离某个采样点最近的八个体素的属性值做三线性插值运算从而计算出该采样点的属性值(颜色值和不透明度值),对得到的每个采样点的属性值按照从后到前或从前到后的顺序进行逐点合成,从而得到所对应的屏幕上该像素点的颜色值和不透明度值,最终生成显示图像. 其算法流程见图 3.

光线投射法的优点是绘制出的图像质量比较高,不过,因为光线投射算法需要对三维数据场中的数据点进行随机的检索,它涉及到的数据量非常的大,并且因为人们视线的方向是任意的,这样将会导致视线与体素会以任意的角度和方向相交. 当对发出的每条光线和体元进行求交运算时,都需要对所有的体素进行遍历,这样就需要对发出的每条射线进行多次的采样运算,这将导致计算量非常大,绘制图像的速度也会随之减慢. 并且,如果与视点相关的参量一旦有任何的改变,将都会导致算法的重新绘制. 在这样的情况下,必须花费大量的时间重新计算采样点的位置及颜色和透明度值,相当于做了很多无用功,因此导致了绘制速度明显的降低,不能满足软件开发中实时性的要求.

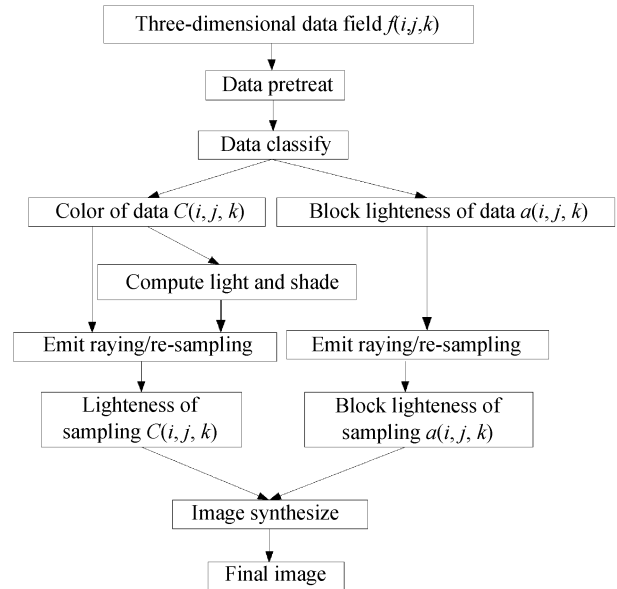


图3 光线投射算法流程  
Fig. 3 Flow chart of ray-casting

### 2.1 数据预处理优化

在三维空间数据场中,并非所有数据都是有用的,整个图像中只有一部分数据是有用的,如果对整个三维空间数据场进行采样运算,就会造成大量不必要的运算,本文采用 Graham 求解最小包围盒凸壳的算法对三维空间数据场进行必要的裁剪,避免了很多不必要的数据计算,从而提供绘制速度. 算法过程如下:

1) 先计算平面凸集中所有点的  $y$  坐标,把  $y$  值最小的点记作  $p_1$ ,之后把它与凸集中所有剩余点进行连接形成线段,接着计算所得到的线段与水平线之间的夹角. 然后对这些点进行词典式排序,即先按照夹角大小进行排序,如果夹角相同就按照与  $p_1$  的距离排序,依次连接得到的序列点集  $p_1, p_2, \dots, p_n$ ,从而形成一个多边形. 因为  $p_1$  是凸壳边界的起点,且  $p_1, p_2$  和  $p_1, p_n$  与水平线的夹角分别最小和最大,所以  $p_2$  和  $p_n$  也肯定是凸壳的顶点.

2) 通过判断某两个点是不是在某一条指定线段的同侧,把  $p_3$  到  $p_{n-1}$  中不是凸壳顶点的点进行删除.

3) 最后把经过删除所得到的凸壳顶点输出.

### 2.2 投射光线体素化及重采样优化

假设  $OUVW$  是图像空间坐标系,  $OXYZ$  是物体空间坐标系. 通过投影多边形的扫描转换记录了在图像空间  $OUVW$  中扫描得到的有效像素点的位置,并将图像空间坐标计算转换为物体空间坐标. 在这里用  $R$  表示旋转矩阵,  $T$  表示平移矩阵,则可以假设从图像空间坐标系到物体空间坐标系的转换矩阵是  $M=R * T$ .

$$R = \begin{pmatrix} r_0 & r_1 & r_2 & 0 \\ r_3 & r_4 & r_4 & 0 \\ r_6 & r_7 & r_8 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad T = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & t_1 \\ 0 & 1 & 0 & t_2 \\ 0 & 0 & 1 & t_3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

在坐标转换过程中可以利用坐标之间的相关性进行优化,由之间的相关性得到迭代关系式,使坐标转换之间的运算量减少,从而极大地提高了图像的绘制速度.

在图 4 中,  $p_1$  的坐标为  $(u_1, v_1, w_1)$ ,  $p_2$  的坐标为  $(u_2, v_2, w_2)$ ,  $p_1$  和  $p_2$  为相邻的两个像素点,都位

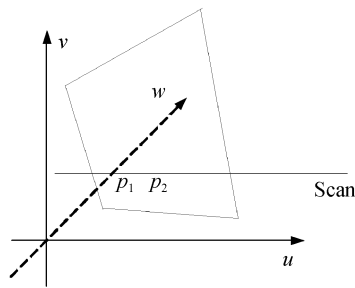


图 4 成像平面相邻点

Fig. 4 Plane of border upon pixels

于图像空间坐标系中的同一扫描线上,由于  $p_1$  和  $p_2$  之间存在相关性,所以  $p_2$  的坐标也可以表示为  $(p_1 \cdot u + 1, p_1 \cdot v, p_1 \cdot w)$ . 这样就可以运用式(1)快速的把  $p_2$  的坐标转换为物体空间坐标系上的坐标

$$\begin{aligned} p_2 \cdot x &= p_1 \cdot x + r_0 \\ p_2 \cdot y &= p_1 \cdot y + r_3 \\ p_2 \cdot z &= p_1 \cdot z + r_6 \end{aligned} \quad (1)$$

式中  $(p_1 \cdot x, p_1 \cdot y, p_1 \cdot z)$  是点  $p_1$  在物体空间坐标系中对应的点  $p_1'$  的坐标. 经过这样的迭代处理,使进行坐标转换处理时的运算量比之前普通的矩阵运算有了大幅度的减少,乘法和加法运算分别减少 9 次和 12 次,进而极大地提高了绘制速度. 对应处在同一扫描线上的所有像素点全都采用这样的迭代关系式来进行坐标转换的计算.

按照视线方向从点  $p_2$  发射一条光线,采用体数据场的包围盒就可以快速求出此投射光线与三维体数据场的起始和终止交点,有效地剪裁了投射光线,这样就可以避免后面阶段的盲目采样,从而减少了无用采样点的数目. 在求交的过程中,只需要考虑光线与长方体包围盒六个表面  $M_1; M_2; \dots; M_6$  的相交情况.

$$\begin{aligned} M_1 &= \min_x \times \Delta x; M_2 = \max_x \times \Delta x; \\ M_3 &= \min_y \times \Delta y; M_4 = \max_y \times \Delta y; \\ M_5 &= \min_z \times \Delta z; M_6 = \max_z \times \Delta z; \end{aligned} \quad (2)$$

因为入射光线方向是任意的,它与长方体包围盒相交的入点和出点有三种情况<sup>[6]</sup>: 1) 交点落在长

方体包表面的内点处; 2) 交点落在长方体棱边的内点处; 3) 交点落在长方体顶点处. 如果求的两个交点重合,那么该光线对应的屏幕上的像素点颜色值设为背景颜色值; 否则需要利用投射光线的方向对这两个交点进行排序,从而确定出入点. 在此利用判定两向量同向的方法对这两个交点进行排序.

如图 5 所示,假设  $M(x_M, y_M, z_M)$ 、 $N(x_N, y_N, z_N)$  是当前入射光线与长方体包围盒 Box 的两个交点,其中  $L=(x_L, y_L, z_L)$  表示投射光线的方向,并且

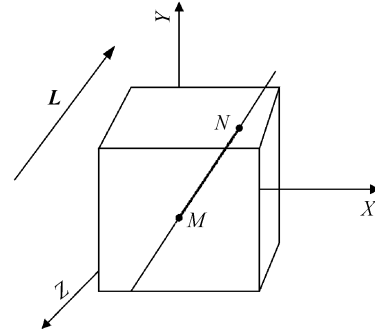


图 5 排序两交点

Fig. 5 Two intersection pixels taxis

它不是零向量. 对  $M$ 、 $N$  进行排序,从而确定出入点<sup>[7]</sup>. 假设  $M$  是入点,  $N$  是出点,从入点到出点的向量  $l=(x_l, y_l, z_l)$  与投射光线的向量  $L$  的关系为:  $l = \lambda L (\lambda > 0)$ , 即要判断向量  $MN=(x_N - x_M, y_N - y_M, z_N - z_M)$  是否与向量  $L$  同向. 本文采用符合函数  $\text{sign}(x)$  进行判断

$$\text{sign}(x) = \begin{cases} 1 & \text{if } x > 0 \\ -1 & \text{if } x < 0 \\ 0 & \text{if } x = 0 \end{cases} \quad (3)$$

从向量  $MN$  的三个分量中找出一个非零向量, 假设  $x_N - x_M \neq 0$ , 如果  $\text{sign}(x_N - x_M) = \text{sign}(x_L)$ , 则可以得到  $M$  是入点,  $N$  是出点; 否则  $M$  是出点,  $N$  是入点.

### 2.3 图像合成优化

图像合成是体绘制过程中的最后一步,有两种图像合成的方法<sup>[8]</sup>: 由前向后法和由后相前法. 众所周知,由前向后合成法具有由后相前合成法没有的优点,即: 利用由前向后合成法进行图像合成时,不透明度值  $O$  肯定是慢慢增大的,当它增大到接近于 1 时,光线后面的体素对该像素点的图像将不会有任何贡献,所以就可以结束计算. 因为由前向后合成法可以剔除掉很多无用的计算,有效地提高了绘制速度,所以本文采用由前向后合成法进行图像的合成.

## 3 混凝土 3 维重建及可视化

本文开发所用的系统硬件为: CPU 为 Intel(R) Core(TM)2 Duo, 内存为 2.00 G, 硬盘为 250 G, 独

立显卡;系统软件是 Windows7;运用 VC6.0 和 VTK 混合编程实现.系统利用 C++ 对核心算法进行编程实现,利用 VTK 进行可视化的实现,并且用功能强大的 MFC 实现图形界面的设计,最后用 VC6.0 实现系统的集成.

### 3.1 可视化工具 VTK

VTK<sup>[9-10]</sup> (Visualization Toolkits) 是一个运用面向对象方法设计的、功能非常强大的可视化和图形图像处理工具箱.它是在 OpenGL 的基础上发展起来的,不仅基于 C++ 类库,还支持 TCL、Java、Python 等多种脚本语言,同时还支持 Unix、Windows 等多种操作系统. VTK 可以处理的数据格式非常多种,比如点阵、图像、体元数据等. VTK 运用面向对象的思想把可视化开发过程中的很多细节都屏蔽起来,同时把一些经常使用的算法封装起来,比如可视化中经常使用的光线投射算法、MC 算法等,从而极大地方便了软件开发人员.同时, VTK 是源码开发的,每个人都可以免费获得和使用,并且还可以在其原有类库的基础上开发自己需要的类库.

### 3.2 混凝土三维重建结果

用试验数据中的四组切片进行实验:静压荷载分别为  $\sigma=0$  Mpa,  $\sigma=36.08$  Mpa,  $\sigma=32.22$  Mpa,  $\sigma=12.7$  Mpa.图 6 显示了使用改进的加速算法对混凝土切片进行三维重构得到的图像效果.数据的绘制时间图如表 1.

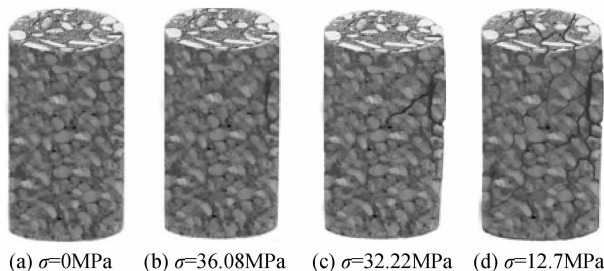


图 6 混凝土 CT 切片重建中加速算法成像效果

Fig. 6 Three-dimensional reconstruction of concrete CT on speedup arithmetic

表 1 算法时间对比

Table 1 Contrast of arithmetic time

Test	Tradition algorithm		Accelerate algorithm	
	Pretreatment time/s	Protract time/s	Pretreatment time/s	Protract time/s
0	15.5	15.6	16.3	2.6
36.08 Mpa	15.5	15.8	16.3	2.7
33.22 Mpa	15.7	15.9	16.5	2.8
12.7 Mpa	16.3	16.1	17.1	3.0

由图 6 可以看出,采用改进光线投影算法生成的混凝土重构图像相比文献[3]的重构结果更加真实地反映出混凝土结构.可以清楚地看到骨料颗粒、硬化水泥砂浆和孔洞等混凝土内部真实的微观结构.尤其是各个应力阶段萌生的细观裂纹也可以清楚地分辨出来.

由于加速算法中很多工作(如求凸壳、投影多边形的扫描转换)都是在预处理阶段完成的,所以导致加速算法在预处理阶段所花的时间比传统算法要长,但可以大大缩短绘制时间.表 1 表明本文所提算法针对传统光线投射算法绘制速度慢的弱点有了明显的加速效果.图 7 为本文三维重建结果和采用 matlab 软件自带函数 isosurface 三维重建结果比较.由图 7 可以判断出,采用 isosurface 对混凝土的 3 维重构效果并不好,其方法不能反映出混凝土边界重构结果(因为重建函数中必须对参量“FaceColor”进行设置,导致柱体的表面无法反映出真实情况).

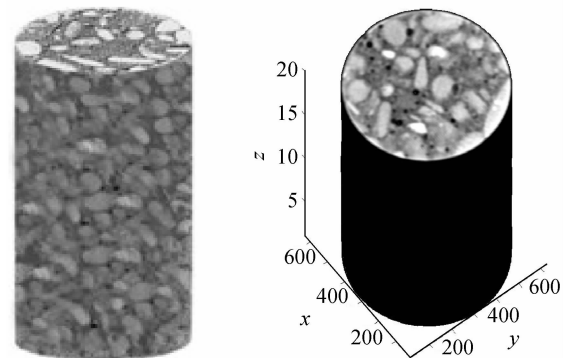


图 7 本文方法和 matlab 软件重建比较

Fig. 7 Compares three-dimension reconstruction of our method to matlab software

### 3.3 混凝土 CT 图像可视化系统

本文开发了一套混凝土 CT 图像可视化系统,总体架构见图 8. DICOM 混凝土 CT 图像可视化系统分为文件输入模块、图像预处理模块、三维绘制模块、交互显示模块和三维显示模块.文件输入模块主要完成对 DICOM 格式混凝土 CT 图像序列的单张和批量的读取和显示.图像预处理模块中使用中值滤波器对图像进行预处理操作,并提供了动态窗宽、窗位的调节以及镜像功能.三维绘制模块主要是利用本文改进的光线投射算法进行混凝土断层图像的三维重建.交互显示模块提供了对重构后三维体的旋转和缩放功能.三维显示模块提供了矢状面和冠状面切片的显示功能.运行效果如图 9.

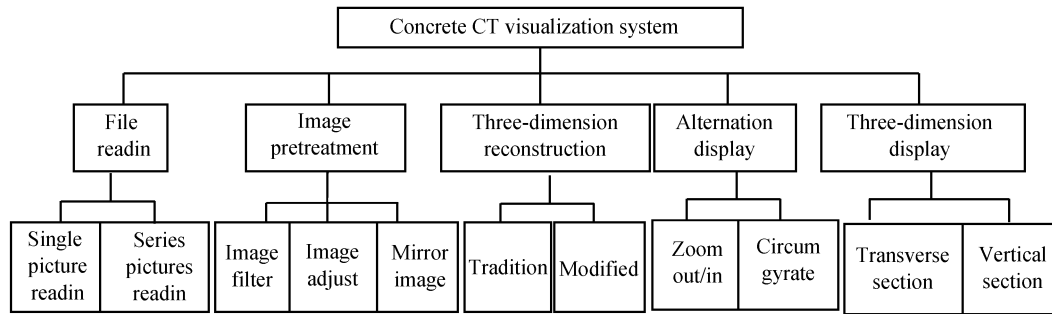


图 8 混凝土图像可视化系统结构框架

Fig. 8 Visualization system structure figure of concrete image

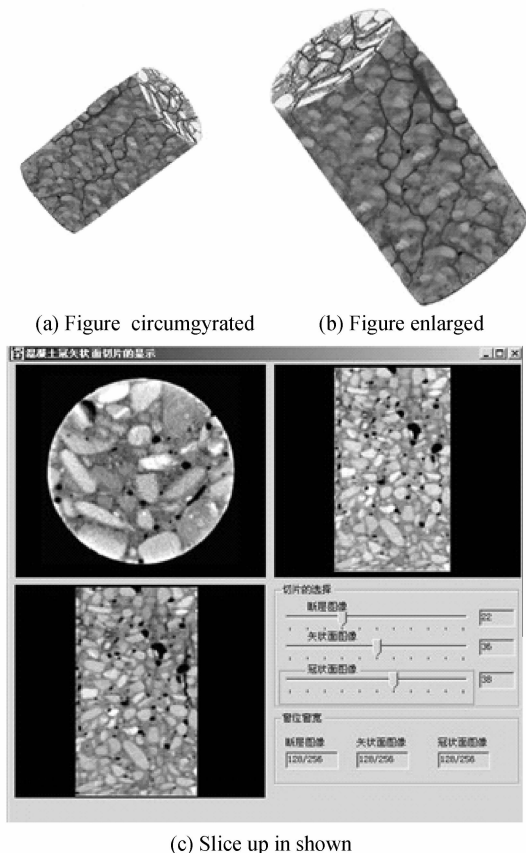


图 9 运行效果图

Fig. 9 Effect of visualization system

## 4 结论

为了对非均质复合材料混凝土进行准确的力学特性研究,很多人已经建立了随机骨料的数学模型,用于对混凝土的细观破坏机理进行研究和分析,虽然用这种方法建立起来的模型中骨料的形状和分布与混凝土的真实结构越来越接近,但是这些混凝土中骨料的形状和分布毕竟是虚拟的,与真实混凝土试件仍有非常大的差别.本文采用改进的光线投射法对混凝土 CT 进行了三维重构研究,结果表明文中重构结果比采用 MATLAB 等软件对混凝土 CT 图像三维重建结果更真实,为建立准确的混凝土材料有限元数值细观模型提供了一种有效辅助方法.

## 参考文献

- [1] JIANG Yuan, BAI Wei, PENG Gang. Edge detection of concrete mesostructure with CT image [J]. *Engineering Journal of Wuhan University*, 2008, **1**(41): 77-80.  
姜袁,柏巍,彭刚. 基于图像的混凝土细观结构边缘检测技术[J]. *武汉大学学报(工学版)*, 2008, **1**(41): 77-80.
- [2] TIAN Wei, DANG Fa-ning, LIANG Xin-yu. CT image analysis of meso fracture process of concrete[J]. *Engineering Journal of Wuhan University*, 2008, **41**(2): 69-72.  
田威,党发宁,梁昕宇. 混凝土细观破裂过程的 CT 图像分析[J]. *武汉大学学报(工学版)*, 2008, **41**(2): 69-72.
- [3] TIAN Wei. CT study on the concrete-damage evolution and its application in numerical stimulation [D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2010.  
田威. 混凝土损伤演化的 CT 研究及其在细观数值模拟中的应用[D]. 西安:西安理工大学, 2010.
- [4] TIAN Wei, DANG Fa-ning, CHEN Hou-qun. Research on three-dimension reconstruction technology of concrete based on CT images [J]. *Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition)*, 2010, **46**(6): 12-16.  
田威,党发宁,陈厚群. 混凝土 CT 图像的 3 维重建技术[J]. *四川大学学报(工程科学版)*, 2010, **46**(6): 12-16.
- [5] MIAO Hui, WANG Qiu-yin, ZHAO Hui-juan, et al. Investigation and validation of the reconstruction algorithm for small animal cone-beam CT imaging [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2010, **39**(9): 1588-1593.  
缪辉,王秋殷,赵会娟,等. 针对小动物的锥束 CT 重建的研究及验证[J]. *光子学报*, 2010, **39**(9): 1588-1593.
- [6] TAO Ling, QIAN Zhi-yu, CHEN Chun-xiao. Volume rendering acceleration technology of medical images based on the ray casting[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2008, **35**(1): 89-93.  
陶玲,钱志余,陈春晓. 基于光线投影的医学影像体绘制加速技术[J]. *光电工程*, 2008, **35**(1): 89-93.
- [7] RAJON D A, BOLCH W E. Marching cube algorithm: review and trilinear interpolation adaptation for image-based dosimetric models[J]. *Computerized Medical Imaging and Graphics*, 2003, **27**(4): 411-435.
- [8] WEISKOPF D, NGEK EL, ERTL T. Interactive clipping techniques for texture-based volume visualization and volume shading[J]. *In IEEE TVCG*, 2003, **9**(11): 298-312.
- [9] SCHROEDER W J, AVILA L S, HOFFMAN W. Visualizing with VTK: a tutorial [J]. *IEEE Computer Graphics and Applications*, 2000, **27**(9): 20-27.
- [10] WILLIAM J. Schroeder the VTK User's guide [M]. Kitware, Inc, 2001.

## Three-dimension Reconstruction Technique of Concrete CT Images Based on Modified Ray-casting

ZHAO Liang<sup>1</sup>, LI Chang-hua<sup>1</sup>, CHEN Deng-feng<sup>1</sup>, DANG Fa-ning<sup>2</sup>, WANG Li-li<sup>1</sup>

(1 *Department of Information and Automation, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China*)

(2 *Institute of Geotechnical Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China*)

**Abstract:** The study of concrete based on CT Images has been a heated issue in recent years. Normally the study focuses on 2-D meso-concrete image, but study on the construction of 3-D meso-concrete are not paid much attention to which limits the scope of the research and intervene with the overall analysis of calculation on the forces in any circumstances. Owing to this point, The author offers a new tech-VTK system based on the ray-casting which also can achieve visualization. After tests, the new method is obviously more accurate and effective in guidance to build concrete material numerical model. In short, it is instructive and significant to solve the problems in this field.

**Key words:** Concrete CT image; Three-dimension reconstruction; Modified ray-casting; VTK