

基于小波的网络多分辨率体绘制

张尤赛^{1),2)} 陈福民¹⁾

¹⁾(同济大学计算中心, 上海 200092) ²⁾(华东船舶工业学院电子与信息系, 江苏镇江 212003)

摘要 为了能在网络环境下, 快速地进行三维绘制, 提出了一种网络环境下的基于小波的体数据多分辨率体绘制方法, 该方法采取基于客户端的三维重建方案, 首先利用三维小波的多分辨率分析方法, 将体数据分解为不同分辨率下的离散逼近信号与高频细节信号; 然后按先离散逼近信号, 后高频细节信号的次序将数据传输到客户端; 最后在客户端实现由粗及精的、渐进式的三维绘制。在这个过程中, 一种3D的Mallat滤波器组被用来加速体数据的3D小波分解与重构, 一种离散的简化小波域体绘制方程被用来满足体绘制的实时性。实验结果表明, 由于该方法仅需要12.5%或更低的数据量, 即可以绘制出品质良好的图像或图像的概貌, 所以非常适宜于需要频繁选择、交互的三维图像网络系统。

关键词 体数据 体绘制 小波 多分辨率

中图法分类号: TP391 P445-39 文献标识码: A 文章编号: 1006-8961(2004)01-0069-05

Wavelet-based Multiresolution Volume Rendering in Network

ZHANG You-sai^{1),2)}, CHEN Fu-min¹⁾

¹⁾(Center of Computer, Tongji University, Shanghai 200092)

²⁾(Dept. of Electronic Information, East China Shipbuilding Institute, Zhenjiang Jiangsu 212003)

Abstract A method of wavelet-based multiresolution volume rendering is presented for accelerating 3D reconstruction and interaction of volume data set in network. The scheme is adopted that the volume rendering takes place on client's workstation, in which volume data set on net server is first decomposed into the discrete approximation and detail coefficients by wavelet multi-resolution analyzing, and then these coefficients are orderly transmitted to client's workstation on which the low resolution image is first rendered by using approximation coefficients and successively refined by using detail coefficients as they are arriving. In this process a group of 3D Mallat filters is employed to speed up 3D wavelet decomposition and reconstruction of volume data set, and a discrete and predigested optical model for wavelet domain rendering is brought forward to satisfy real time request of volume rendering. The experiment results show that the method in this paper is highly propitious to the network for frequently selecting and interacting images, because high-quality images and/or outlines can be produced in 12.5 percent and/or much less of volume data set.

Keywords Volume data, Volume rendering, Wavelet, Multiresolution

1 引言

体数据的三维可视化在医学、天文学、计算物理和化学、流体动力学、地震学及分子、原子结构分析等方面得到了广泛的应用。随着因特网的普及和各种计算机网络系统投入使用, 如 PACS 系统

(Picture Archiving and Communication System) 等, 图像信息的网络交互需求日益增长, 特别是面对海量体数据的三维可视化, 就需要一种基于网络环境的快速高效的数据传输和三维绘制方法。为了减轻服务器的负担, 并保证客户端三维绘制操作的灵活性, 通常是采取基于客户端的三维重建方案, 即服务器仅负责向客户端发送体数据, 而在客户端来实

现体数据的三维可视化。由于在网络上传输海量的体数据相当耗时(如一组常见的 $512 \times 512 \times 110$ 像素的双字节型体数据即占用 55M Bytes),因此为了达到合理的三维绘制的响应速度,需要随着网络传输体数据的陆续到达来实现渐进式的三维绘制。

为此,本文提出了一种网络环境下基于小波的体数据多分辨率体绘制方法,该方法利用三维小波的多分辨率分析,首先将体数据逐级分解为不同分辨率上的离散平滑逼近和离散细节信号,然后按先传输低分辨率上的平滑逼近信号,再逐级传输细节信号的次序向客户端传输数据,而在客户端则按照同样的次序首先用平滑逼近信号重建出低分辨率级上的三维图像,然后通过逐级增加细节信号,以便在细节上逐次逼近地绘制出完整的三维图像。

2 体绘制的光学方程

体绘制的基本原理是考虑体数据中每一个体素的光强和透明度,直接将所有体素的光强信息融合投射到像平面上。如图 1 所示,假设 t 为表示视线方向的视矢量, u, v 为与之正交的像平面内的两个正交矢量,则体绘制的光学模型^[1]可以用沿视线方向的曲线积分来表示。

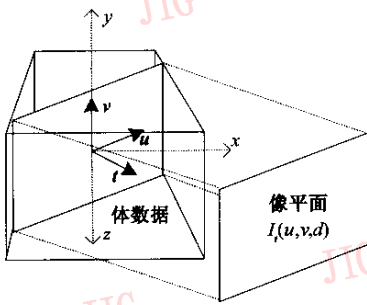


图 1 体绘制原理

$$I_t(u, v, d) = I_{\text{back}} \exp \left[- \int_{t(0, d)} \tau(s) dt \right] + \int_{t(0, d)} I(s) \exp \left[- \int_{t(t, d)} \tau(s) dt \right] dt \quad (1)$$

$$s = uu + vv + tt \quad (2)$$

$$T(t_1, t_2) = \exp \left[- \int_{t(t_1, t_2)} \tau(s) dt \right] \quad (3)$$

$$a(t_1, t_2) = 1 - T(t_1, t_2) \quad (4)$$

式中, $I_t(u, v, d)$ 表示沿矢量 t 方向融合投射到像平面上的综合光强, d 为像平面与背景的正交距离, I_{back} 为背景光强, $\tau(s)$ 为 s 处体素的光吸收系数,

$I(s)$ 为 s 处体素的光强度, $T(t_1, t_2)$ 为视线方向 t 上 t_1 到 t_2 处的综合透明度, $a(t_1, t_2)$ 则为对应的不透明度, 符号 $t(t_1, t_2)$ 表示沿矢量 t 方向从 t_1 到 t_2 的积分路径。

3 体数据的三维小波多分辨率描述

为了用正交小波的多分辨分析来描述三维体数据 $f(x, y, z)$, 可以在一维正交小波的基础上, 利用 3 个 $L^2(\mathbf{R})$ 一维子空间的张量积来构造出三维正交小波^[2,3]。

即满足二剖分性的 $L^2(\mathbf{R})$ 三维空间 $V_j^{(3)}(x, y, z)$ 可表示为两个空间 $V_j^{(3)}(x, y, z)$ 和 $W_j^{(3)}(x, y, z)$ 之和

$$V_j^{(3)}(x, y, z) = V_{j-1}^{(3)}(x, y, z) \oplus W_{j-1}^{(3)}(x, y, z) \quad (5)$$

且 $V_j^{(3)}(x, y, z)$ 和 $W_j^{(3)}(x, y, z)$ 正交, 即

$$V_j^{(3)}(x, y, z) = [W_j^{(3)}(x, y, z)]^\perp \quad (6)$$

则 $V_j^{(3)}(x, y, z)$ 上的正交归一基是

$$\Phi_{j,k,l,m}(x, y, z) = \varphi_{j,k}(x) \varphi_{j,l}(y) \varphi_{j,m}(z) \quad (7)$$

尺度函数 $\{\varphi_{j,k}(x) = 2^{-j/2} \varphi(2^{-j/2}x - k), k \in \mathbf{Z}\}$ 是一维实空间 $V_j^{(1)}$ 的正交归一基, 其对应的小波函数 $\{\psi_{j,k}(x) = 2^{-j/2} \psi(2^{-j/2}x - k), k \in \mathbf{Z}\}$ 是空间 $W_j^{(1)}$ 的正交归一基, $V_j^{(1)}(x) = [W_j^{(1)}(x)]^\perp$ 。由于 $\varphi_{j,k}(x)$ 、 $\varphi_{j,l}(y)$ 和 $\varphi_{j,m}(z)$ 都是低通的尺度函数, 因此 $V_j^{(3)}(x, y, z)$ 是平滑的低频空间。

其中补空间 $W_j^{(3)}(x, y, z)$ 由 7 个子空间组成, 即

$$W_j^{(3)}(x, y, z) = W_{j_1}^{(3)} \oplus W_{j_2}^{(3)} \oplus W_{j_3}^{(3)} \oplus W_{j_4}^{(3)} \oplus W_{j_5}^{(3)} \oplus W_{j_6}^{(3)} \oplus W_{j_7}^{(3)} \quad (8)$$

而下列 7 个小波函数构成了它们的正交归一基

$$\Psi_{j,k,l,m}^{(1)}(x, y, z) = \varphi_{j,k}(x) \varphi_{j,l}(y) \psi_{j,m}(z)$$

$$\Psi_{j,k,l,m}^{(2)}(x, y, z) = \varphi_{j,k}(x) \psi_{j,l}(y) \varphi_{j,m}(z)$$

$$\Psi_{j,k,l,m}^{(3)}(x, y, z) = \varphi_{j,k}(x) \varphi_{j,l}(y) \psi_{j,m}(z)$$

$$\Psi_{j,k,l,m}^{(4)}(x, y, z) = \psi_{j,k}(x) \varphi_{j,l}(y) \varphi_{j,m}(z) \quad (9)$$

$$\Psi_{j,k,l,m}^{(5)}(x, y, z) = \psi_{j,k}(x) \varphi_{j,l}(y) \psi_{j,m}(z)$$

$$\Psi_{j,k,l,m}^{(6)}(x, y, z) = \psi_{j,k}(x) \psi_{j,l}(y) \varphi_{j,m}(z)$$

$$\Psi_{j,k,l,m}^{(7)}(x, y, z) = \psi_{j,k}(x) \psi_{j,l}(y) \psi_{j,m}(z)$$

由于这 7 个正交归一基都至少包含一个带通的小波函数, 因此它们都是带通的, 即 $W_j^{(3)}(x, y, z)$ 是由 7 个高频细节子空间组成, 如图 2 所示。

因此, 三维体数据 $f(x, y, z)$ 的小波域多分辨率描述可表示为

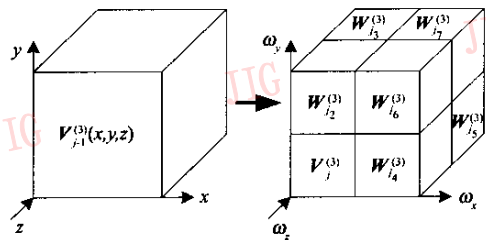


图 2 三维小波变换的空间分布

$$f(x, y, z) = \sum_{k, l, m \in \mathbf{Z}} A_{j, k, l, m} \Phi_{j, k, l, m}(x, y, z) + \sum_{j=1}^J \sum_{i=1}^7 \sum_{k, l, m \in \mathbf{Z}} D_{j, k, l, m}^{(i)} \Psi_{j, k, l, m}^{(i)}(x, y, z) \quad (10)$$

式中, 整数 J 是小波多分辨率分析的级数, 系数 $A_{j, k, l, m} = \langle f, \Phi_{j, k, l, m} \rangle$ 是体数据在第 J 级分辨率下的离散平滑逼近, 系数 $D_{j, k, l, m}^{(i)} = \langle f, \Psi_{j, k, l, m}^{(i)} \rangle$ 是体数据在第 j 级分辨率下的离散细节信号, 这里符号 $\langle \cdot, \cdot \rangle$ 代表 $L^2(\mathbf{R}^3)$ 三维空间上的内积。 $A_{j, k, l, m}$ 、 $D_{j, k, l, m}^{(i)}$ 可以采用如图 3 所示的三维小波的 Mallat 多分辨率滤波器组求得, 而重复利用该滤波器组, 则可以得到体数据的多分辨率描述。

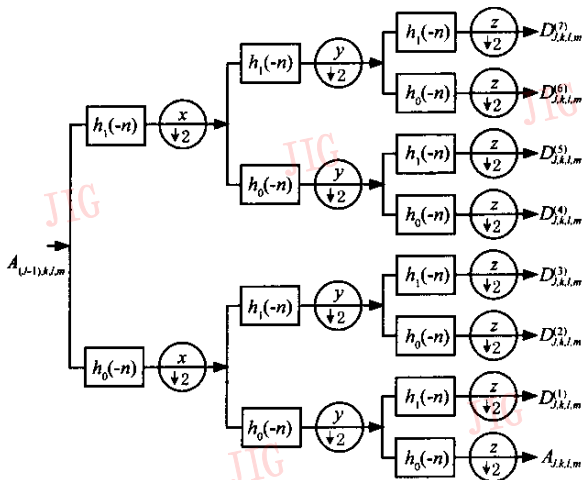


图 3 三维小波的 Mallat 多分辨率滤波器组

图中符号“ $\downarrow 2$ ”表示沿 x, y, z 某方向作“2 抽取”, 符号 $h_0(-n)$ 和 $h_1(-n)$ 代表离散滤波器, 可由下式计算:

$$h_0(n) = \langle \varphi_{1,0}(t), \varphi_{0,n}(t) \rangle \quad (11)$$

$$h_1(n) = \langle \psi_{1,0}(t), \varphi_{0,n}(t) \rangle \quad (12)$$

4 小波域的体绘制方程

将体数据 $f(x, y, z)$ 的小波域多分辨率表达式

代入式(1), 即可得到如下小波域的体绘制方程^[4,5], 为简化起见, 这里假设背景光强 $I_{\text{back}} = 0$ 。

$$I_t(u, v, d) = \sum_{k, l, m \in \mathbf{Z}} A_{j, k, l, m} \int_{t(0, d)} \Phi_{j, k, l, m}(s) \times \exp\left[-\int_{t(0, d)} \tau(s) dt\right] dt + \sum_{j=1}^J \sum_{i=1}^7 \sum_{k, l, m \in \mathbf{Z}} D_{j, k, l, m}^{(i)} \int_{t(0, d)} \Psi_{j, k, l, m}^{(i)}(s) \times \exp\left[-\int_{t(0, d)} \tau(s) dt\right] dt \quad (13)$$

由上式可见, 小波域的体绘制可分成如下两个步骤: (1) 由等式右边的第 1 项绘制出体数据第 J 分辨率下的三维图像(平滑逼近); (2) 由等式右边的第 2 项按分辨率 $(J, J-1, \dots, 2, 1)$ 逐级增添图像的细节, 以实现由粗及精的三维绘制。

5 小波域体绘制方程的离散简化

利用小波域体绘制方程式(13), 虽可以绘制出高品质的三维图像, 但是计算量是相当大的, 为加快体绘制的速度, 本文提出了一种基于小波体绘制方程的离散简化方法。

从严格的理论意义上来说, 由于体数据本身就是三维物体的一种数据矩阵形式的离散近似, 因此, 可以将体数据 $f(x, y, z)$ 理解为第 0 级分辨率下的平滑逼近 ($A_{j, k, l, m}, j=0, k=x, l=y, m=z$), 这样就可以直接利用图 3 所示的 Mallat 多分辨率滤波器组来得到其各分辨率下的平滑逼近和细节信号。由此可见, 体数据的多分辨率描述可以改写成下列离散形式

$$f(k, l, m) = A_j(k, l, m) + \sum_{j=1}^J \sum_{i=1}^7 D_j^{(i)}(k, l, m) \quad (14)$$

$$A_j(k, l, m) = A_{j, k, l, m}, D_j^{(i)}(k, l, m) = D_{j, k, l, m}^{(i)} \quad k, l, m \in \mathbf{Z}$$

这样, 小波域的体绘制方程式(13)可以简化为

$$I_t(u, v, d) = \int_{t(0, d)} A_j(s) \exp\left[-\int_{t(0, d)} \tau(s) dt\right] dt + \sum_{j=1}^J \sum_{i=1}^7 \int_{t(0, d)} D_j^{(i)}(s) \exp\left[-\int_{t(0, d)} \tau(s) dt\right] dt \quad (15)$$

6 基于网络环境的小波域体绘制算法

基于网络环境的小波域体绘制算法主要包含下列 4 个步骤:

(1) 数据预处理 体数据的三维小波多分辨率分析;

(2) 多分辨率数据的网络传输 先传输体数据第 J 分辨率下的离散逼近信号 $A_{j,k,l,m}$, 再按分辨率 $j=J, J-1, \dots, 2, 1$ 的次序逐级传输体数据的细节信号 $D_{j,k,l,m}^{(i)} (i=1, 2, \dots, 6, 7)$;

(3) 体绘制 根据视线方向矢量 t , 按照多分辨率数据到达的先后次序, 利用式(13)或式(15)对体数据进行由粗及精的三维绘制, 这包含下列两个步骤:

① 在正交于视矢量 t 的像平面上, 用第 J 分辨率下的离散逼近信号 $A_{j,k,l,m}$ 绘制出低分辨率的三维图像;

② 应用图 4 所示的三维小波 Mallat 重建滤波器组, 用细节信号 $D_{j,k,l,m}^{(i)}$ 按分辨率 $j=J, J-1, \dots, 1$ (网络数据到达的次序) 逐步细化图像, 依次生成分辨率 $j=J-1, J-2, \dots, 1, 0$ 的三维图像(平滑逼近 $A_{j,k,l,m}$);

(4) 改变视线方向时, 重复步骤(3);

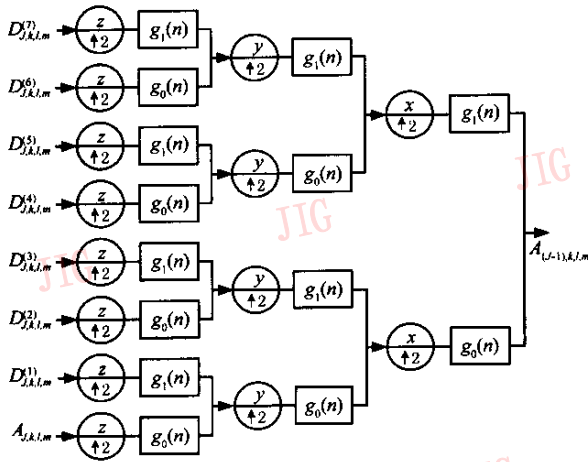


图 4 三维小波 Mallat 重建滤波器组

图中符号 $\uparrow 2$ 表示沿 x, y 或 z 方向作“2 插补”, $g_0(n)=h_0(-n), g_1(n)=h_1(-n)$ 。

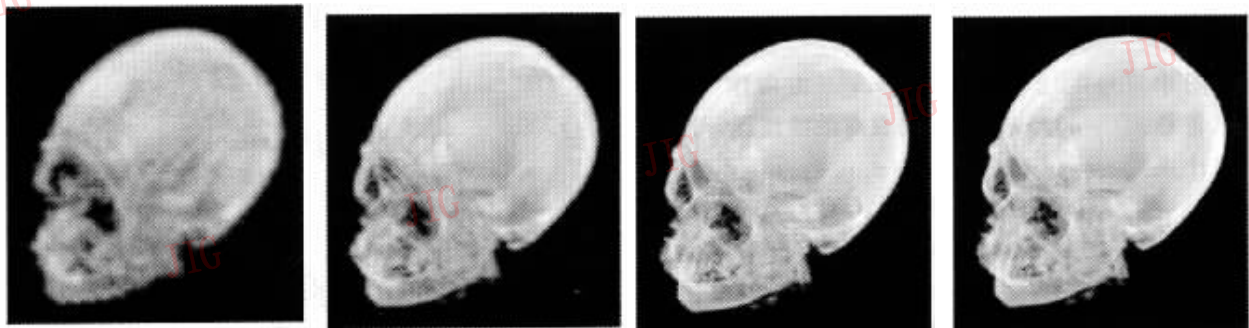
在实际的体绘制过程中, 为了产生各种光照或半透明的视觉效果, 在算法的第 3 步骤中, 还可以应用各种光照模型及分类算子来产生体素的明暗效果和不透明度。

7 体绘制实例分析

为验证本文算法效果, 应用人体头部的 CT 影像序列生成的体数据 ($256 \times 256 \times 109$ 体素, 数值范围: $4 \sim 1457$) 进行了绘制实验。实验中, 考虑到人类视觉对相位失真比较敏感, 因此选择了具有线性相位特性的 Haar 和 Battle-Lemarie 小波双线性正交滤波器组。图 5 是利用 Battle-Lemarie 小波重建出的具有 X 光透视效果的半透明三维图像, 图 6 是利用 Haar 小波重建的具有 Phong 明暗效果的三维图像, 该两图中的图(a)是利用体数据多分辨率为 3 级的平滑逼近得到的, 图(b)、(c)、(d)则是在逐级增加细节信号后得到的多分辨率为 2、1、0 级的三维图像。在实际体绘制中, 本文采用了基于纹理映射硬件加速的体绘制技术^[6]。

实验表明, 运用本算法在体数据的三维小波多分辨率的 1 级平滑逼近上, 可以绘制出相当满意的三维图像, 而在 2 级及以下的多分辨率上, 绘制的三维图像质量则有不同级别的下降。此外, 只要保证小波相位的线性特性, 则选择不同小波重建出的图像质量并不存在明显的差异。

从图 2 所示的小波多分辨率分析的空间分布图和图 3 所示的三维小波的 Mallat 多分辨率滤波器组可以看出, 尽管小波分解并没有减少体数据量, 但沿 x, y, z 方向的“2 抽取”操作却使每一级的平滑逼



(a) 3 级平滑逼近

(b) 2 级平滑逼近

(c) 1 级平滑逼近

(d) 0 级平滑逼近

图 5 利用 Battle-Lemarie 小波绘制的半透明三维图像

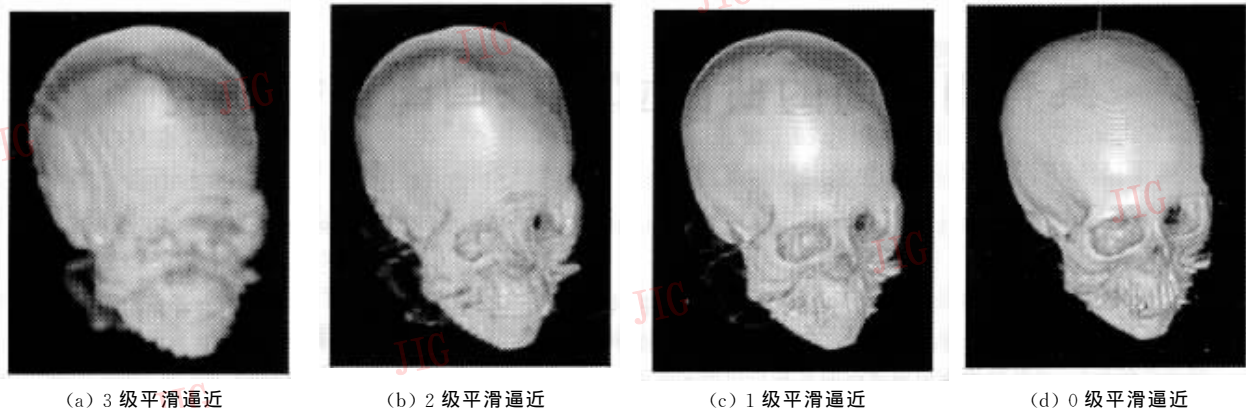


图 6 利用 Haar 小波绘制的具有 Phong 明暗效果的三维图像

近信号数据量相应减少了 87.5%，因此，使用小波 1 级分辨率下的平滑逼近，只需使用相当于体数据 12.5% 的数据量即可重建出质量相当满意的三维图像；而用小波的 2、3 级平滑逼近，则仅需要相当于体数据的 1.56%、0.195% 的数据量即可重建出不同等级质量的三维图像。可见，这种算法对于网络的数据传输或图像压缩来说都是比较有价值的。

8 结 论

本文研究了网络环境下的基于三维小波多分辨率分析的体数据的体绘制技术，且用本文提出的算法实现了网络环境下体数据的渐进式的三维重建，由于仅需 12.5% 或更低的数据量即可重建出质量良好的三维图像或其概貌，因此非常适用于需要频繁选择、交互图像的网络环境，如 PACS 系统等。可以预见，随着计算机网络的广泛普及，该技术的应用前景是非常广阔的。

另外，由于本文的研究范围并未涉及到图像压缩的内容，因此如果能在本文研究的基础上，采用合适的压缩技术对体数据三维小波的离散逼近及细节信号再作压缩处理，则可以进一步提高本方法的性能，但该问题需作进一步的研究。

参 考 文 献

1 Max N. Optical models for direct volume rendering[J]. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 1995, 1(2):99~108.

2 Mallat S G. A theory for multiresolution signal decomposition: The wavelet representation[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1989, 11(7): 674~693.

3 Shigeru Muraki. Volume data and wavelet transforms[J]. IEEE Computer Graphics & Applications, 1993, 13(4): 50~56.

4 Westermann R. A multiresolution framework for volume rendering[A]. In: Proceedings of ACM Workshop on Volume Visualization[C], 1994:51~57.

5 Roerdink J B T M, Westenberg M A. Wavelet-based volume visualization[J]. Nieuw Archief voor Wiskunde, 1999, 17(2): 149~159.

6 Dachille F, Kreeger K, Chen B *et al.* High quality volume rendering using texture mapping hardware[A]. In: Proceedings of 1998 Eurographics/SIGGRAPH Workshop on Graphics Hardware[C], Lisbon, Portugal, 1998: 69~76.



张尤赛 1959 年生,1991 年获东南大学信号、电路与系统专业硕士学位,现为华东船舶工业学院电子与信息系副教授,硕士生导师,同济大学计算机应用技术专业在职博士生。主要研究方向为计算机图像处理与三维可视化。



陈福民 1944 年生,同济大学计算机系教授,博士生导师,上海市多媒体行业协会会长。主要研究方向为虚拟现实、网络多媒体、计算机图像处理与三维可视化。