

Journal of Image
and Graphics

中国图象图形学报



ISSN1006-8961
CN11-3758/TB

2012 7
Vol.17 No.

中国科学院遥感应用研究所
中国图象图形学学会主办
北京应用物理与计算数学研究所

中国图象图形学报

Zhongguo Tuxiang Tuxing Xuebao

2012年7月 第17卷 第7期(总第195期)

目次

综述

中国多媒体技术研究: 2011 史元春, 徐光祐, 高原(741)

图像处理和编码

图像引导滤波的局部多尺度 Retinex 算法 方帅, 杨静荣, 曹洋, 武鹏飞, 饶瑞中(748)

基于第一主成分方向稳定性的图像零水印 付剑晶, 王珂(756)

小波变换估计非线性扩散最优停止时间 蒋平, 张建州(770)

图像分析和识别

改进的 Beamlet 与 Canny 相结合提取复杂图像线特征 曾接贤, 周沥沥, 符祥(775)

动静态信息融合及动态贝叶斯网络的步态识别 杨旗, 薛定宇(783)

融合音频单词与视觉特征的成人视频检测 刘毅志, 唐胜, 王向东, 林守勋, 张勇东(791)

基于平面区域跟踪的目标位姿参数自动测量 回丙伟, 文贡坚, 赵竹新, 钟金荣(798)

3 维图像中边界曲面的分类追踪及抽取 丁德福, 程柳航, 王利生(806)

局部时空域模型的核密度估计目标检测方法 王兴宝, 刘纯平, 费兰英, 王朝晖, 季怡(813)

基于相位谱和调谐幅度谱的显著性检测方法 李崇飞, 高颖慧, 卢凯, 曲智国(821)

图像理解和计算机视觉

“目标-场景”语境关联的生成图模型分析 谢昭, 李姍琦, 高隼(828)

融合上下文信息的场景结构恢复 武晖, 于昕, 隋尧, 张利(839)

带有局部控制因子的图割光流估计 路子赟, 唐土生, 高隼, 沈琳, 刘伟(846)

改进的 Harris 亚像素角点快速定位 何海清, 黄声享(853)

计算机图形学

应用最小生成树实现点云分割 孙金虎, 周来水, 安鲁陵(858)

医学图像处理

病毒进化的离散差分进化超声图像特征选择 张巧荣, 朱长明, 倪军, 刘海波(866)

分水岭优化的 Snake 模型肝脏图像分割 兰红, 张璐(873)

遥感图像处理

Normalized Cut 与分水岭变换在高光谱影像混合像元端元提取中的应用 许菡, 李小娟(880)

改进非局部均值滤波的 SAR 图像降噪方法 郑永恒, 程建, 曹宗杰(886)

~~~~~  
第四届国际遥感考古会议 ..... (892)

**中国图象图形学报**

刊名题字: 宋 健

月刊(1996 年创刊)

第 17 卷 第 7 期

2012 年 7 月 16 日出版

**主管单位** 中国科学院

**主 办** 中国科学院遥感应用研究所  
中国图象图形学学会  
北京应用物理与计算数学研究所

**主 编** 李小文

**编辑出版** 《中国图象图形学报》编辑出版委员会  
北京 9718 信箱 邮编 100101  
电子信箱:jig@irsa.ac.cn  
电话:010-64807995 010-82614429  
网 址:www.cjig.cn

**印刷装订** 北京北林印刷厂

**广告经营许可证** 京朝工商广字第 0346 号

**总 发 行** 北京报刊发行局

**订 购** 全国各地邮局

**国外发行** 中国国际图书贸易总公司  
(中国国际书店)  
(北京 399 信箱 邮编 100044)

**Superintended by** Chinese Academy of Sciences

**Sponsored by** Institute of Remote Sensing Application,  
CAS China Society of Image and Graphics  
Institute of Applied Physics and Computational  
Mathematics

**Chief editor** LI Xiaowen

**Editor, Publisher** Editorial and Publishing Board  
of Journal of Image and Graphics  
(P. O. Box 9718, Beijing 100101, China)  
E-mail:jig@irsa.ac.cn

**Distributed by** Beijing Bureau for Distribution of Newspapers  
and Journals

**Domestic** All Local Post Offices in China

**Foreign** China International Book Trading Corporation  
(P. O. Box 399, Beijing 100044, China)

**Printed by** Beijing Beilin Printing House

ISSN 1006-8961 CN11-3758/TB CODE ZTTFXZ 国内邮发代号: 82-831 国外发行代号: M1406 国内定价: 45.00 元

# Journal of Image and Graphics

( Monthly , Started in 1996 )

Vol. 17 No. 7 July 2012

## Contents

### Review

Researches on multimedia technology in China, 2011 ..... Shi Yuanchun, Xu Guangyou, Gao Yuan (741)

### Image Processing and Coding

Local multi-scale Retinex algorithm based on guided image filtering  
..... Fang Shuai, Yang Jingrong, Cao Yang, Wu Pengfei, Rao Ruizhong (748)

Image zero-watermark based on direction stability of first principal component vector ..... Fu Jianjing, Wang Ke (756)

Stopping-time estimation for anisotropic diffusion using discrete wavelet transform ..... Jiang Ping, Zhang Jianzhou (770)

### Image Analysis and Recognition

Complex image line feature extraction based on improved Beamlet transform and the Canny operator  
..... Zeng Jiexian, Zhou Lili, Fu Xiang (775)

Gait recognition based on dynamic & static information fusion and dynamic bayesian network ..... Yang Qi, Xue Dingyu (783)

Fusing audio-words with visual features for adult video detection  
..... Liu Yizhi, Tang Sheng, Wang Xiangdong, Lin Shouxun, Zhang Yongdong (791)

Automatic measurement for an object's position and attitude via tracking planar regions  
..... Hui Bingwei, Wen Gongjian, Zhao Zhuxin, Zhong Jinrong (798)

Detection and extraction of boundary surface patches within 3D images ..... Ding Defu, Cheng Liuhang, Wang Lisheng (806)

Foreground object detection method using kernel density estimation of a local spatio-temporal model  
..... Wang Xingbao, Liu Chunping, Fei Lanying, Wang Zhaohui, Ji Yi (813)

Saliency detection method based on phase spectrum and amplitude spectrum tuning  
..... Li Chongfei, Gao Yinghui, Lu Kai, Qu Zhiguo (821)

### Image Understanding and Computer Vision

"Object-Scene" contextual associated generative graph model analysis ..... Xie Zhao, Li Shanqi, Gao Jun (828)

Structure recovery algorithm using contextual information ..... Wu Hui, Yu Xin, Sui Yao, Zhang Li (839)

Graph cut optical flow estimation with a local control factor ..... Lu Ziyun, Tang Tusheng, Gao Jun, Shen Lin, Liu Wei (846)

Improved algorithm for Harris rapid sub-pixel corners detection ..... He Haiqing, Huang Shengxiang (853)

### Computer Graphics

Research on point cloud segmentation using a minimum spanning tree ..... Sun Jinhu, Zhou Laishui, An Luling (858)

### Medical Image Processing

Virus-evolutionary discrete differential evolution algorithm for feature selection of cervical lymph nodes in ultrasound images  
..... Zhang Qiaorong, Zhu Changming, Ni Jun, Liu Haibo (866)

Liver image segmentation algorithm based on the Snake model And optimized by watershed transformation  
..... Lan Hong, Zhang Lu (873)

### Remote Sensing Image Processing

Endmember extraction for hyperspectral image based on normalized cut and watershed transformation  
..... Xu Han, Li Xiaojuan (880)

SAR image denoising via improved non-local means filter ..... Zheng Yongheng, Cheng Jian, Cao Zongjie (886)

中图法分类号: TP391 文献标识码: A 文章编号: 1006-8961(2012)07-0806-07

论文引用格式: 丁德福,程柳航,王利生. 3维图像中边界曲面的分类追踪及抽取[J]. 中国图象图形学报, 2012, 17(7): 806-812.

## 3 维图像中边界曲面的分类追踪及抽取

丁德福, 程柳航, 王利生

上海交通大学自动化系, 系统控制与信息处理教育部重点实验室, 上海 200240

**摘要:** 3维图像分析中,边界曲面的检测与重构是一个非常重要的问题。已有的连续隐边界曲面的抽取及逼近计算技术存在着把某些零交叉曲面片错误地识别为边界曲面片的缺陷。为此,提出一个新的边界曲面的追踪及抽取的方法。该方法首先将包含边界曲面的全部立方体分为两类:包含一个连通零交叉曲面片的立方体叫第1类边缘立方体,包含两个及其以上不连通零交叉曲面片的立方体叫第2类边缘立方体;然后根据边界曲面的连续性连通性,便可追踪出两类边缘立方体;对于追踪出的第1类边缘立方体直接提取边界曲面片,对于追踪出的第2类边缘立方体的边界曲面片通过其相邻的第1类边缘立方体来提取。实验结果表明本文方法是可行有效的,而且可以有效地克服已有技术的缺陷。

**关键词:** 3维图像分析; 边界曲面检测; 零交叉曲面片; 边界曲面追踪

### Detection and extraction of boundary surface patches within 3D images

Ding Defu, Cheng Liuhan, Wang Lisheng

Department of Automation, Shanghai Jiao Tong University, and Key Laboratory of System Control and Information Processing, Ministry of Education of China, Shanghai 200240, China

**Abstract:** In 3D image analysis, detection and reconstruction of boundary surfaces is a very important problem. Some methods have been developed for extracting or approximately computing continuous implicit boundary surfaces from 3D images. However, they have the drawback of incorrectly classifying some zero-crossing surface patches as boundary surface patches. In this paper, we present a new method to detect and trace boundary surfaces from 3D images. First, all cubes containing boundary surface patches are divided into two categories: cubes containing one connected boundary surface patch, called and first class of edge cubes, and cubes containing two or more disconnected boundary surface patches, called the second class of edge cubes. Then, according to the continuity and the connectivity of the boundary surface, we can track all the edge cubes from both classes. Finally, the boundary surface patches contained in the first class of edge cubes can be extracted directly, and the boundary surface patches contained in the second class of edge cubes are extracted based on the adjacent first class of edge cubes. Experimental results show that the proposed technique is feasible and effective, and can effectively overcome the shortcomings of existing methods.

**Key words:** 3D image analysis; edge detection; zero-crossing surface; edge surface tracing

## 0 引言

感兴趣结构的边界曲面的检测与抽取是3维图

像分析中非常重要的研究问题之一<sup>[1]</sup>。在过去的二十多年中,作为2维边缘检测思想在3维的直接推广,已经有各种类型的3维边缘检测算子被提出,包括基于梯度的3维边缘检测算子,基于零交叉的

收稿日期:2011-09-25;修回日期:2011-12-19

基金项目:国家重点基础研究发展计划(973)基金项目(2010CB732506)

第一作者简介:丁德福(1983—),男,现为上海交通大学电子信息与电气工程学院硕士研究生,主要研究方向为3维医学图像可视化、模式识别。E-mail: defuding@163.com

3维边缘检测算子,基于矩或局部能量的3维边缘检测算子等<sup>[2-10]</sup>。在这些3维边缘检测算法中,3维图像被看作由一个个的离散体素(voxel)组成。3维边缘检测算子直接从3维图像中检测出边缘体素,并且由这些离散的边缘体素构成具有厚度的离散边界曲面。

在可视化技术中,3维图像可以被看作是连续的3维函数在3维规则网格的网格顶点进行离散采样的结果。在规则网格中,相邻的8个网格点构成一个立方体,而所有的立方体构成3维图像的连续采样区域。相应地,3维图像中的边界曲面可以被看作是包含在3维图像的连续采样区域中的一类连续隐曲面<sup>[11]</sup>。每个连续隐边界曲面包含在部分立方体中,这些立方体称作边缘立方体。容易看到,文献[2-10]中的3维边缘检测算子不能用于从3维图像中直接检测与重构这类连续隐边界曲面的多边形曲面模型。为此,文献[11-17]讨论了3维图像中连续隐边界曲面的多边形曲面模型的重构以及逼近计算问题。文献[12-14]首先从3维图像中检测或者追踪包含连续隐边界曲面的边缘立方体;然后,通过在每一个边缘立方体中剖分所包含的零交叉曲面片(即包含在边缘立方体中的3维图像的Laplacian函数的零值等值面片)而得到连续隐边界曲面的高精度多边形曲面模型。文献[15-16]首先从3维图像中检测包含连续隐边界曲面的边缘立方体。其次,在每一个边缘立方体中计算12条边与零交叉曲面的交点。最后,根据这些交点(被视作边界曲面的离散采样点)的灰度值及梯度值推导出一个合适的简单曲面(一个合适的等值面或者一个合适的自适应曲面(由不同的等值面片构成))去近似表示连续隐边界曲面。可以看到,在文献[11-16]中,有一个假定,即包含在每个边缘立方体中的零交叉曲面片被直接视作边界曲面片。尽管这一假定对大多数边缘立方体成立,但是我们注意到,在少数边缘立方体中该假定并不正确。结果导致文献[12-14]中抽取得到的边界曲面模型可能包含有许多小的碎片(见图1)、文献[13]中追踪到少量的错误的边缘立方体,以及文献[15-16]中计算得到小部分不正确的边界曲面离散采样点。本文试图改进文献[11-16]中的缺陷。

通过分析边缘立方体中的零交叉曲面片的特性,本文将全部边缘立方体分为两类:第1类边缘立方体中包含的零交叉曲面片正好是边界曲面片,而

第2类边缘立方体中包含的零交叉曲面片只有部分是边界曲面片。对于两类不同的边缘立方体,本文设计了不同的检测、追踪策略,而且边界曲面片的识别策略也不同。这一分别处理方式可以使得人们更加正确地检测与追踪边缘立方体,以及正确地识别边缘立方体中的边界曲面片,进而改进文献[12-14]中重构得到边界曲面模型的质量以及改进文献[15-16]中计算得到的边界曲面离散采样点的质量。本文所提出的方法已经应用于大量3维图像,实验结果表明所提方法的有效性。

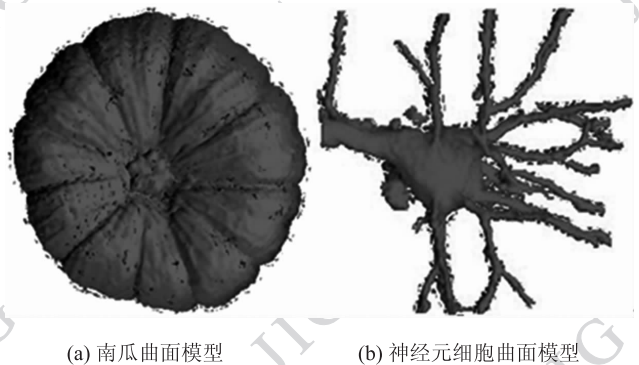


图1 文献[12-14]算法提取边界曲面模型

Fig. 1 Algorithm in reference[12-14] to extract the boundary surface model

## 1 本文算法

### 1.1 边缘立方体的分类

令 $I(x, y, z)$ 表示3维图像的3维连续采样函数, $f(x, y, z) = I(x, y, z) * G(x, y, z, \sigma)$ 表示利用高斯函数 $G(x, y, z, \sigma)$ 对 $I(x, y, z)$ 进行平滑后得到的3维图像。根据文献[2, 15],3维图像中阶梯型边界曲面是具有高的梯度值的零交叉曲面,亦即,满足条件

$$\begin{cases} \nabla^2 f(x, y, z) = 0 \\ |\nabla f(x, y, z)| \geq T \end{cases} \quad (1)$$

式中, $\nabla^2 f(x, y, z)$ 及 $|\nabla f(x, y, z)|$ 分别表示 $f(x, y, z)$ 的Laplacian函数及梯度函数<sup>[15]</sup>, $T$ 是用以区分边界曲面和图像背景的梯度阈值,可以交互选择或者根据一定规则进行选择<sup>[17]</sup>。

一个连续隐边界曲面是包含在边缘立方体集合中的一个连续的、连通的曲面。由式(1)可知,包含在每个边缘立方体中的边界曲面片是一个零交叉曲面片(亦即,3维Laplacian图像 $\nabla^2 f(x, y, z)$ 的零值等

值面片)。但是,反之并不一定成立。例如,在某些包含多个不连通的零交叉曲面片的边缘立方体中,部分零交叉曲面片是边界曲面片,但另外的部分不是。这部分非边界曲面片的零交叉曲面片可能由图像细节、噪声,或者图像灰度的模糊变化所产生。如果把边缘立方体中不是边界曲面片的零交叉曲面片错误地识别为边界曲面片,则会导致追踪出错误的边缘立方体和抽取得到的边界曲面模型包含有许多小的碎片,以及计算得到部分不正确的边界曲面离散采样点。

由于包含在每个边缘立方体中的边界曲面片是 3 维 Laplacian 图像  $\nabla^2 f(x, y, z)$  的零值等值面片,因此,可以利用 Marching-Cubes 算法从每个边缘立方体中抽取边界曲面片。这里,关键是要知道从每个边缘立方体中抽取得到的  $\nabla^2 f(x, y, z)$  的零值等值面片中,哪些属于边界曲面片,哪些不是。

根据 Marching-Cubes 算法,在一个边缘立方体中,零交叉曲面片与 12 条边的相交情形可总结为图 2 所示的 15 种类型。其中,类型 1、2、5、8、9、11、14 中仅包含一个连通的零交叉曲面片。其他的类型 3、4、6、7、10、12、13 中包含至少两个不连通的零交叉曲面片。基于这种观察,我们把边缘立方体分为两类。所包含的零交叉曲面片类型属于 1、2、5、8、9、11、14 中某一种类型的边缘立方体称为第 1 类边缘立方体,所包含的零交叉曲面片类型属于 3、4、6、7、10、12、13 中某一种类型的边缘立方体称为第 2

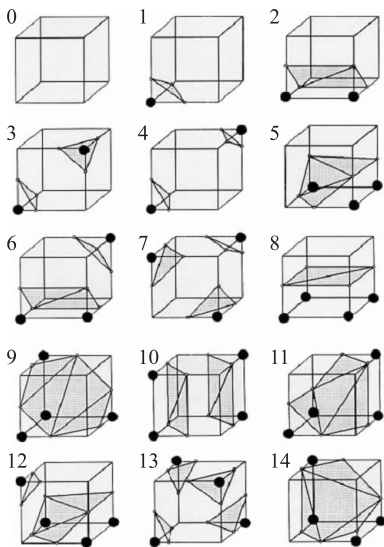


图 2 Marching-cube 算法的 15 种不同拓扑结构<sup>[18]</sup>

Fig. 2 Fifteen cube models in Marching-cube algorithm<sup>[18]</sup>

类边缘立方体。容易知道,第 1 类边缘立方体中所包含的零交叉曲面片必然为边界曲面片。但是,第 2 类边缘立方体中所包含的零交叉曲面片未必都是边界曲面片。在文献[11-16]中,两类边缘立方体不加区分地采用同样的方法进行检测与追踪以及边界曲面片的计算,因此会带来一些缺陷。本文将根据两类边缘立方体,设计不同的边缘立方体的检测、追踪策略以及边界曲面片的识别方法。

## 1.2 边缘立方体的追踪策略

边界曲面是包含在 3 维图像中的连续隐曲面,具有连通性及连续性。一个立方体有 12 条边、6 个面及 6 个相邻的立方体。如果在一个边缘立方体中能确定被边界曲面相交的所有边,则被边界曲面相交的所有面也可以确定。根据曲面连通特性,与边缘立方体共享某一相交面的相邻立方体必然是边缘立方体。基于此,可以从 6 个相邻的立方体中检测出所有的边缘立方体。采用类似策略对每一个新确定的边缘立方体的边、面及相邻的立方体进行处理。最终可以从 3 维图像中追踪出所有的连通的边缘立方体<sup>[14]</sup>。基于这一观察可知,在知道一个边缘立方体后,根据边界曲面的连通特性可以从 3 维图像中追踪出所有边缘立方体。

根据边界曲面的连通特性及边缘立方体的分类,设计新追踪策略,从 3 维图像中正确地追踪与重构边界曲面以及计算边界曲面的离散采样点。该追踪策略可以归结如下:

1) 选定一个第 1 类边缘立方体作为种子立方体。

2) 从种子立方体开始从其相邻的 6 个立方体中追踪连通的边缘立方体。如果新检测得到的边缘立方体属于第 1 类边缘立方体,则继续从它的相邻的 6 个立方体中追踪边缘立方体。如果新检测得到的边缘立方体属于第 2 类边缘立方体,则对该边缘立方体进行标记并停止沿着该立方体追踪。当追踪出所有连通的第 1 类边缘立方体后停止。

3) 对于每一个标记过的第 2 类边缘立方体,确定其属于边界曲面片的零交叉曲面片以及标记其被边界曲面相交的边。通过考察一个第 2 类边缘立方体相邻的所有第 1 类边缘立方体中的被边界曲面相交的边,可以确定该立方体中被边界曲面相交的边。基于这些相交边,可以进一步确定该第 2 类边缘立方体中哪些零交叉曲面片是边界曲面片。基于相交边,考察该第 2 类边缘立方体相邻的 6 个立方体,并

采用上述的各类规则从该边缘立方体的相邻立方体中追踪新的边缘立方体。

4)在追踪出的所有第1类边缘立方体中直接计算所包含的边界曲面片。在追踪出的第2类边缘立方体中按照先前的判定可以知道哪些零交叉曲面片是边界曲面片。两类边缘立方体中的边界曲面片构成了边界曲面的多边形曲面模型。同理,边界曲面片与两类边缘立方体中边的所有交点构成了边界曲面的离散采样点。

利用上述追踪策略,可以避免在第2类边缘立方体中错误地识别边界曲面片及错误地计算边界曲面的离散采样点。此外,也可以避免从第2类边缘立方体中错误地追踪非边界曲面的零交叉曲面片。从而改进文献[11-16]中算法的缺陷。

### 1.2.1 种子立方体的确定

浏览3维图像的2维系列断层图像。如果某一编号为 $n$ 的断层图像中包含有感兴趣结构的明显的边界曲线,则用鼠标绘制一个白色的小长方形区域(如图3所示)使得该区域中只有感兴趣结构的明显的边界曲线从中穿过。在标号为 $n-2, n-1, n, n+1, n+2$ 的5个连续分布的系列断层图像中考虑同样位置的长方形区域。这5个长方形区域构成一个感兴趣结构的边界曲面穿过的小长方体区域(记之为 $\Omega$ )。在区域 $\Omega$ 中检测被边界曲面所穿过的边缘立方体。

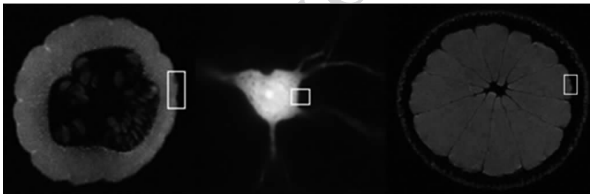


图3 感兴趣区域选择

Fig.3 Region of interesting selection

若立方体的一条边与边界曲面相交,则该条边的两个端点分别具有高的梯度值。由于两个端点的梯度值并不相同,该特性用条件 $\|\nabla f(P_1)\| + \|\nabla f(P_2)\| \geq 2T$ 近似地刻画。由于边界曲面是3维Laplacian图像 $\nabla^2 f(x, y, z)$ 的满足特定条件的零值等值面,因此,根据中值定理,被边界曲面相交的每一条边的两个端点的Laplacian值具有不同的符号。基于这些事实,一个端点为 $P_1$ 及 $P_2$ 的边被标记为被边界曲面相交,如果它满足如下的两个条件<sup>[11-12]</sup>:

1)  $P_1$ 与 $P_2$ 是一对零交叉点,即

$$\nabla^2 f(P_1) \cdot \nabla^2 f(P_2) < 0;$$

$$2) \|\nabla f(P_1)\| + \|\nabla f(P_2)\| \geq 2T。$$

进一步,如果一个立方体中有3条边被边界曲面相交,则该立方体被标记为边缘立方体。在从 $\Omega$ 中检测得到的边缘立方体中,选择某一个第1类型的边缘立方体作为种子立方体。

### 1.2.2 追踪边缘立方体

在种子立方体中确定被边界曲面相交的所有的边及所有的面。则6个相邻立方体中这些相交面的立方体必然为边缘立方体。对其中属于第2类边缘立方体进行标记。同时从其中属于第1类边缘立方体出发,采用相同的方式在其6个相邻立方体中继续检测边缘立方体。利用这种方式不断地在每一个新确定的属于第1类边缘立方体的6邻域中追踪新的边缘立方体,则可以追踪得到包含边界曲面的连通的边缘立方体集合。

在追踪算法实现过程中,建立一个队列,指针pHead指向该队列的头,指针pTail指向该队列的尾。种子立方体首先进入队列。然后,边缘立方体的追踪过程可以描述如下:

While (pHead != pTail)

```

{
    从 pHead 中取出一个第1类型的边缘立方体
    voxel[j];
    pHead ++;
    在 voxel[j] 中标记被边界曲面相交的边,相交
    的面;
    for(考察与 voxel[j] 共面的6个相邻立方体中未被访问
    过的立方体)
    {
        标记这些立方体为 visited。
        if(相邻立方体 voxel[k] 与 voxel[j] 共享
        一个被边界曲面相交的面)
        {
            if(voxel[k] 属于第1类边缘立方体)
                将 voxel[k] 保存在 pTail 中, pTail ++;
            else
                将 voxel[k] 标记为第2类边缘立方体;
        }
    }
}

```

### 1.2.3 计算边界曲面片

在每一个第1类边缘立方体中,边界曲面片可以直接利用Marching-Cubes算法计算零交叉曲面片得到。第2类边缘立方体是在追踪第1类边缘立方

体时出现的,所以第 2 类边缘立方体的相邻立方体中一定存在第 1 类边缘立方体。对于给定的第 2 类边缘立方体,在其所有相邻的第 1 类边缘立方体中标记被边界曲面相交的边。某些相交边事实上也是属于第 2 类边缘立方体。基于这些相交边及 Marching-Cubes 算法,可以知道第 2 类边缘立方体中那些零交叉曲面片属于边界曲面片。例如图 4 左边立方体为第 1 类边缘立方体,右边立方体为第 2 类边缘立方体,根据边界曲面连通性可以由左边的第 1 类边缘立方体确定相邻第 2 类边缘立方体左下角的三角片属于边界曲面片,但右上角的不属于。

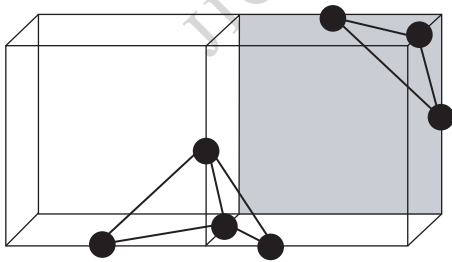


图 4 解决第 2 类边缘立方体误抽取示意图

Fig. 4 Solve the second edge cube wrong extraction

在所有边缘立方体中,边界曲面片与立方体的边的交点构成了边界曲面的离散采样点集合。这些离散采样可以进一步用于边界曲面的简单逼近曲面的计算<sup>[11,15]</sup>。

如果直接对第 2 类边缘立方体按处理第 1 类边缘立方体的方法计算与边界曲面片相交的边、计算与边界曲面片相交的点(边界曲面离散采样点)、计算边界曲面片,则可能错误地把某些零交叉曲面片识别为边界曲面片(导致出现图 1 的一些孤立细小不连通的碎片)及错误地计算边界曲面的某些离散采样点。

## 2 实验结果与讨论

本文所提出的方法已经应用于大量 3 维图像,实验结果表明所提方法是有效的。这里我们提供其中的一些实验结果。图 5 是利用本文算法分别从腿骨的 3 维 CT 断层图像、引擎的 3 维 CT 断层图像、脑血管的 3 维 MRI 图像、脊柱的 3 维 CT 断层图像、管道的 3 维 CT 图像以及头部 3 维 CT 断层图像中提取出的边界曲面。图 5 表明,本文提出的算法能将不同 3 维图像中所包含感兴趣目标的边界曲面很好地提取出来。

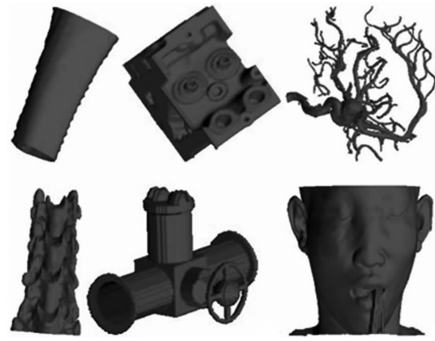
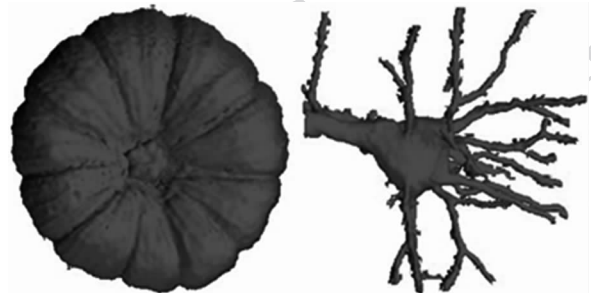


图 5 本文方法 3 维重建部分实验结果

Fig. 5 Some 3D reconstruction experimental results of the method

在图 1 中显示的边界曲面是利用文献[12-14]算法从一个 3 维 MRI 图像中重构得到的南瓜的边界曲面模型,以及从一个 3 维光学共焦显微图像中重构得到的神经元细胞的边界曲面。其中包含了许多碎片。作为对比,利用本文算法也从这两个 3 维图像中抽取边界曲面,结果如图 6 所示。小的碎片几乎全部消除。



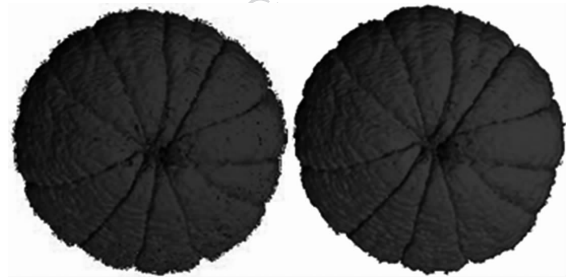
(a) 南瓜曲面模型

(b) 神经元细胞曲面模型

图 6 本文算法提取边界曲面模型

Fig. 6 Algorithm to extract the boundary surface model

显然,与文献[12-14]中的算法相比,本文的算法可以明显地改善抽取的边界曲面模型的质量。我们也用文献[14]中的算法及本文算法从一个橘子的 3 维 MRI 扫描图像中抽取内部桔子瓣的边界曲面,实验结果如图 7 所示。可以看到本文算法抽取



(a) 文献[12, 14]算法提取结果

(b) 本文算法提取边界曲面模型

图 7 橘子 3 维重建

Fig. 7 Three-dimensional reconstruction of orange

得到的边界曲面明显地减少了孤立的小碎片。

表1给出在提取图6和图7中边界曲面时统计的一些更详细的实验数据。从表1可知,第2类边缘立方体的个数以及错误地识别为边界曲面片的零交叉曲面片的个数的比例有时比较大,因此需要正确地处理它们。从表1给出的本文算法比文献[14]的算法少提取的三角片数即减少的碎片数 $N$ 的统计,可以看出本文算法提取得到的边界曲面明显地减少了孤立的小碎片。因此,通过本文正确地处理第2类边缘立方体及其包含的零交叉曲面片,不仅可以减少文献[12-14]中抽取出的边界曲面中的孤立的小碎片,而且可以保证[15-16]中使用的边界曲面离散采样点的计算更为准确。

表1 边界曲面实验数据统计

Table 1 Statistics the experimental data of boundary surface

| 图像        | 边缘立方体总数 | 第2类边缘立方体数 | 三角片总数     | $N$     | 梯度  |
|-----------|---------|-----------|-----------|---------|-----|
| pumpkin   | 335 457 | 86 993    | 1 003 067 | 207 100 | 50  |
| Nerve     | 23 342  | 2 278     | 51 959    | 3 479   | 100 |
| orange    | 213 261 | 32 711    | 528 671   | 81 425  | 200 |
| dry skull | 86 749  | 5 163     | 180 446   | 6 225   | 200 |

在 Intel(R) Core(TM) i5 CPU 760 2.80 GHz, 4 G内存的 PC 机上各种算法计算时间值及其比较值具体见表2。从表2文献[14]的计算时间减去本文的计算时间的统计,可以看出本文算法的计算时间比文献[14]的计算时间少。从表2文献[18]的计算时间减去本文算法的计算时间的统计,可以看出本文算法的计算时间比文献[18]的计算时间少。因此本文算法的计算时间比文献[14]和文献[18]的都少。

表2 计算时间比较

Table 2 The computation time comparison

| 图像        | 本文算法 $t_1$ | 文献[14]算法 $t_2$ | Marching-Cubes 算法 <sup>[18]</sup> $t_3$ | /ms         |             |
|-----------|------------|----------------|-----------------------------------------|-------------|-------------|
|           |            |                |                                         | $t_2 - t_1$ | $t_3 - t_1$ |
| pumpkin   | 1 594      | 1 953          | 2 547                                   | 359         | 953         |
| Nerve     | 234        | 250            | 594                                     | 16          | 360         |
| orange    | 500        | 844            | 1 109                                   | 344         | 609         |
| dry skull | 409        | 609            | 1 281                                   | 200         | 872         |

### 3 结 论

根据边界曲面的连通特性设计了更为合适的边界曲面追踪策略。根据该策略,在追踪边缘立方体时采用分类追踪的方式解决边缘立方体的误追踪问题,在边缘立方体内提取三角片逼近边界曲面片时采用分类计算的方法解决边界曲面片的误提取问题。大量实验结果表明该算法是可行有效的。与文献[12-14]中的边界曲面抽取算法以及文献[15-16]中的边界曲面离散采样点计算算法相比,本文算法有很好的改进。

### 参考文献(References)

- [1] Goshtasby A A, Sonka M, Udupa J K. Analysis of volumetric image [J]. Computer Vision & Image Understanding, 2000, 77: 79-83.
- [2] Bomans M, Hohne K H, Tiede U, et al. 3D segmentation of MR images of the head for 3D display [J]. IEEE Transactions on Medical Imaging, 1990, 9(2): 177-183.
- [3] Luo L M, Hamitouche C, Dillenseger J L, et al. A moment based three dimensional edge operator [J]. IEEE Transactions on Biomedical Engineering, 1993, 40(3): 693-703.
- [4] Zhan S. A zero-crossing based optimal three-dimensional edge detector [J]. CVGIP: Image Understanding, 1994, 59(2): 242-253.
- [5] Pudney, Robins M, Robbins B, et al. Surface detection in 3D confocal microscope image via local energy and ridge tracing [J]. Journal of Computer-Assisted Microscopy, 1996, 8(1): 5-20.
- [6] Li B, Liang X D, Liu S Q. Feature visualization of 3D rectilinear datafield [J]. CHINESE J. COMPUTERS, 1997, 20(7): 585-591. [李斌,梁训东,刘慎权.一种3维规则数据场的特征可视化方法[J].计算机学报,1997,20(7):585-591.]
- [7] Brejl M, Sonka M. Directional 3D edge detection in anisotropic data: detector design and performance assessment [J]. Computer Vision & Image Understanding, 2000, 77: 84-110.
- [8] Zhang H, Su H Z, Dillenseger J L, et al. A legendre orthogonal moment based 3D edge operator [J]. SCIENCE IN CHINA: Series G, 2003, 33(2): 148-157. [张惠,舒华忠, Dillenseger J L,等.基于Legendre正交矩的3维边界检测算子[J].中国科学:G辑,2003,33(2):148-157.]
- [9] Bouma H, Vilanova A, Vlietvan L J, et al. Correction for the dislocation of curved surfaces caused by the PSF in 2D and 3D CT images [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis & Machine Intelligence, 2005, 27(9): 1501-1507.
- [10] Wang K, Zhang D H, Liu K, et al. Surface detection with sub-voxel accuracy using 3D gaussian facet model [J]. Journal of

- Computer-Aided Design & Computer Graphics, 2007, 19(9): 1100-1106. [王凯,张定华,刘昆,等.采用3D Gaussian Facet模型的亚体素表面检测[J].计算机辅助设计与图形学学报,2007,19(9):1100-1106.]
- [11] Wang L, Bai J, et al. A computational framework for approximating boundary surfaces in 3D biomedical images [J]. IEEE Transactions on Information Technology in Biomedicine, 2007, 11(6): 668-682.
- [12] Heng P A, Wang L, Wong T T, et al. Edge surfaces extraction from 3D images [C]// Proceedings of SPIE. Washington DC, USA: SPIE Press, 2001, 4322: 407-416.
- [13] Cheng L, Wang L, Ma Y. A new strategy for boundary surface detection in 3D biomedical images[C] // Proceedings of the 3rd International Conference on Biomedical Engineering and Informatics. New York, USA: IEEE Press, 2010, 1: 51-55.
- [14] Ma Y, Wang L S, Tang Y Y. A novel algorithm for tracking step-like edge surfaces within 3D images [J]. Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics, 2007, 19(3): 329-333. [马瑜,王利生,唐渊圆.3维图像中阶梯型边界曲面的追踪算法[J].计算机辅助设计与图形学学报,2007,19(3):329-333.]
- [15] Wang L, Bai J, Ying K. Adaptive approximation of the boundary surface of a neuron in confocal microscopy volumetric images [J]. Medical & Biological Engineering & Computing, 2003, 41(4): 601-607.
- [16] Wang L, Bai J, Heng P A, et al. Isosurface computation for approximating boundary surfaces in 3D images [J]. Journal of Electronic Imaging, 2007, 16(1): 1-12.
- [17] Rakesh R R, Chaudhuri P, Murthy C A. Thresholding in edge detection: a statistical approach [J]. IEEE Transactions on Image Process, 2004, 13(7): 927-936.
- [18] Lorensen W E, Cline H E. Marching cubes: a high resolution 3D surface construction algorithm [J]. Computer Graphics, 1987, 21(4): 163-169.