

# 体数据的多精度等值面抽取\*

薛强 蔡文立 石教英

(浙江大学 CAD&CG 国家重点实验室, 杭州 310027)

**摘要** Marching Cubes(MC)算法是一个被广泛应用的体数据等值面抽取算法。本文提出的 Marching Boxes(MB)算法结合显示所需精度,对 MC 算法作了优化,减少了由 MC 算法生成的三角面片数,使实时观察体数据成为可能。在保留图象细节的前提下,MB 算法输出的三角面片数比 MC 算法减少了一半以上,从而加快了体数据的面绘制速度。

**关键词** 等值面,体数据,可视化 Marching Cubes 算法(MC),Marching Boxes 算法(MB)

## 1 背景介绍

科学技术的发展为人们带来了越来越多的体数据,这些数据有两种来源:一种是科学计算得到的三维数据场,如有限元分析或数值模拟得到的体数据;另一种是通过实验设备获得的数据,如通过 CT 扫描或核磁共振(MRI)得到的反映人体器官的医学数据集。为了帮助研究者有效地理解这些数据,人们提出了许多体数据可视化算法。面绘制是其中主要的一种,一般可分为:数据采集、图象处理、表面重建、视见变换和显示等几个步骤。其中表面重建是面绘制算法的核心,主要是通过抽取等值面来实现的。

Lorenson 和 Cline 于 1987 年提出了 Marching Cubes(MC)等值面抽取算法<sup>[1]</sup>。MC 算法的基本假设是:体数据是局部线性连续的。根据这个假设,它认为,如果两个相邻采样点位于域值的两侧,则它们连成的边上一定存在一个等值点  $p/f(p)=c$ 。MC 算法以 Cube 为抽取单位,每个 Cube 包含空间上相邻的 8 个数据点。MC 算法把数据空间分成许多 Cube,用插值方法获得 Cube 各边上的等值点,然后以这些点作为顶点,用三角形拟合该 Cube 中的等值面,从而获得整个体数据中的等值面。

由于 MC 算法结构简单,易于实现,对物体细节的表现较好,因此许多面绘制算法都把它作为抽取等值面的基本算法。MC 算法存在二义性,对此人们已经作了许多探讨<sup>[2]</sup>;但对它的另一个问题,即生成的三角面片太多,以至于无法对绘制出来的图象进行各种旋转、平移、缩放等实时交互,人们却涉之甚少。图 2.1 是用 MC 算法生成的人体大脑皮层的等值面图,它由 47 万多个三角面片构成,即使用最简单的 Phong 光照模型来绘制也需要 10 秒以上(HP720 上运行)的时间。因此有必要减少生成的三角面片数,以提高交互绘制速度。

压缩原始数据可以减少输出的面片数,但这是以丢失图象细节为代价的,而用户往往需要观察图象的局部细节;Schroeder 的 Decimation 算法<sup>[3]</sup>优化比很高,可以达到 10%,但它是个最优化过程,执行时间较长,即使是对一万个面片进行优化,也需要分钟数量级的执行时间。因此,需要对 MC 算法进行优化,减少直接由 MC 输出的面片,而不是依赖后续处理来优化。据此,本文提出了 Marching Boxes(MB)算法,它是 MC 算法的一个优化算法。在保留图象细节的前提下,MB 算法输出的三角面片数比 MC 算法减少了一半以上。

\* 国家自然科学基金(69303008)资助。

收稿日期:1996年10月;收到修改稿日期:1997年1月。

## 2 MB 算法原理

用户以两种方式交互观察体数据:改变抽取参数和改变视见参数。通常用户更着重于后者的实时响应,这就要求以较少的三角面片绘制出等值面图象,从而提高交互速度。另一方面,用户也需要观察图象细节,而减少三角面片数会降低图象精度。可见,面片数和图象质量是一对矛盾。考虑到实际应用中,用户观察三维体数据的步骤往往是先进行三维平移、旋转等交互,选取最佳观察角度,然后进行局部放大,观察图象细节。高精度显示与快速交互并不需要同时满足。因此本文提出的 MB 算法把显示所需精度与输出面片数结合起来,用显示精度参数控制输出的面片数,它可以满足用户不同时刻的要求。与压缩方法不同的是,MB 算法是按一定的规则将 MC 算法产生的面片加以归并来实现减少三角面片的目的。它在有效地减少三角面片数目的同时,还有选择地保留了图象的细节。在选取精度控制参数为 0.5pixel 的情况下,MB 生成的三角面片数比 MC 要少一半以上,而所得的图象看不出明显的失真(图 2A)。

MB 是一个递归算法,它把 MC 算法中的 Cube 概念加以拓广,用 Box 取而代之。所谓 Box 实际上是由若干个 Cube 构成的空间六面体区域。MB 算法把原始体数据看作一个 Box,从这个 Box 开始进行以下操作:

- (1)把 Box 分成 Box1 和 Box2;
- (2)对 Box1 和 Box2 分别用 MC 算法抽取出其中的等值面 CF1 和 CF2;
- (3)判断 CF1 和 CF2 能否用 Box 中的等值面 CF 代替:如果  $CF1+CF2=CF$ ,就以 CF 代替 CF1 和 CF2,实现归并;
- (4)对 Box1 和 Box2 递归进行上述步骤,直至不能归并为止;
- (5)输出达到最大归并程度的 Box 中的等值面。

### 2.1 Box 的剖分

本文采用沿 Box 的最长边剖分的方法,以使得到的子 Box 尽可能接近正方体。由此带来的一个好处是生成的三角面片的形状较规整,中心差分计算得到的面片法向量不至产生突变,还可以较容易地制定剖分终止条件。

### 2.2 剖分终止条件

规定当 Box 最长边不大于 1 时终止剖分。为了提高速度,剖分始终沿数据点进行。因此,当 Box 被剖分成 Cube 时将终止剖分。

### 2.3 面片的生成

MB 算法把 Box 看成一个 Cube,用 MC 算法抽取其中的等值面。根据 MC 算法的假设,Box 的一条边上可能存在多个等值点,在这种情况下是无法用 MC 算法抽取 Box 中的等值面的。为此,本文规定:对于 Box 的一条边,用扫描得到的第一对正负相邻点计算该边上的等值点。作了这种规定后,就能用 MC 算法中的三角形构造表生成任意 Box 中的等值面了。请注意,这样生成的等值面在单个 Box 中是不一定正确的。由于剖分将一直进行到 Cube 大小,无论在 Box 中是否正确地产生了等值面,最终整个数据的归并结果在精度范围内都是正确的。为了归并判断方便,我们以多边形(等值链)方式保存生成的等值面。这样,一个 Box 可以产生 0—4 条等值链。

### 2.4 面片的归并

MB 算法把一个 Box 分成两个子 Box,用 MC 算法分别计算出它们中的等值面,然后判断父子 Box 中的等值面是否相同,若是,则以父 Box 中的等值面代替子 Box 中的等值面;否则,就使用子 Box 中的等值面。等值面的等同性是用等值链是否相等来判断的。由于一个 Box 中可能存在多条等值链,如果对任意 Box 都进行归并判断,将导致程序复杂度增大,执行速度降低。对几个医学图象的统计分析结果表明等值链数少于 2 的 Box 占了 99% 以上。因此,本文只对等值链数为 1 的 Box 进行归并判断。

### 2.5 等值链相等的判断规则

如果两条等值链顶点数相同,并且对应顶点之间的距离在精度控制范围内,就认为这两条等值链是相等的。一个特例是对应顶点之间的距离为零时才认为两条等值链相等,这时 MB 算法和 MC 算法等效。等值链相等的判断还可以与等值面的法向量是否相等结合起来进行。

要把等值面用局部面光照模型绘制出来,还需要计算构成等值面的各个面片的法向量。为了使绘

制出来的图象更光滑,MB 算法采用梯度向量来代替法向量。运用插值方法可以得到三角形各顶点处的梯度,三角形法向量可以用其各顶点处的梯度中心差分计算得到。

### 3 算法中存在的问题及解决

MB 算法一个难以解决的问题是拓扑一致性问题。用上述 MB 算法生成的等值面,其中会有裂缝存在,这种裂缝是由于归并程度不一致引起的(图 1)。

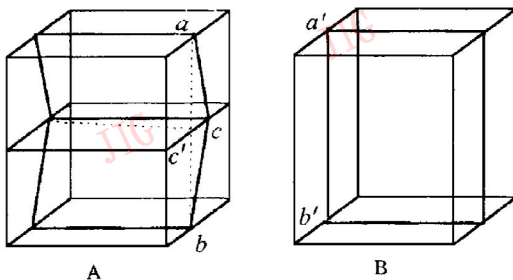


图 1 由于 A、B 两个相邻的 Box 归并程度不一致导致了裂缝  $abc$  的产生(B 中的等值面已被归并成一个,而 A 中的等值面仍用其子 Box 中的等值面表示),若用  $c'$  点代替  $c$  点就能消除裂缝

Fig. 1 The cause of generating small gaps in the resulting isosurface.

裂缝存在的一个直接后果是生成的图象会有许多小黑点。这些黑点可以用图象滤波的方法加以去除,但这不能根治问题,当图象进行局部放大时,裂缝将很明显。为了解决这个问题,本文修改了 MC 算法中确定等值点的方法。指定一致的扫描顺序可以保证相邻两个 Box 公共边上的等值点是重合的,例如扫描总是沿坐标递增的方向进行。这样,图 1 中的  $a$  和  $a'$ ,  $b$  和  $b'$  就重合了。由于所有 Box 都要被剖分到 Cube 大小,因此图 1 中右边的 Box 和左边的一样,也进行过剖分及归并判断。可以断定,  $c$  和  $c'$  之间的距离是在精度控制范围内的( $c'$  是 Box 中的等值面与其剖分面的交点),不然,右边的 Box 中将无法归并出图示的等值面。因此,本文用  $c'$  替代  $c$  实现了裂缝的消除,这种作法仍符合前面提出的精度控制要求,从而是合理的。

为了提高 MB 的执行速度,本文采用 Wilhelm J. Van Gelder A 的八叉树方法,将原始体数据用八叉树表达出来<sup>[4]</sup>。八叉树的每一结点对应一个立方体区域,结点存有该区域中样点的取值范围。当要抽

取的等值面的面检测参数不在此范围内时,就免去了对该节点对应区域的等值面抽取,从而省却了许多不必要的搜索、检查,大大提高了执行速度(表 1)。

### 4 结果分析与问题讨论

图 2-4 是运用 MC 和 MB 算法得到的等值面的绘制结果(表 1)。放宽精度控制可以进一步减少三角面片,例如在精度参数为 1pixel 时,用 MB 算法提取大脑皮层的等值面可以得到 25% 的优化效果(119772 个面片)。

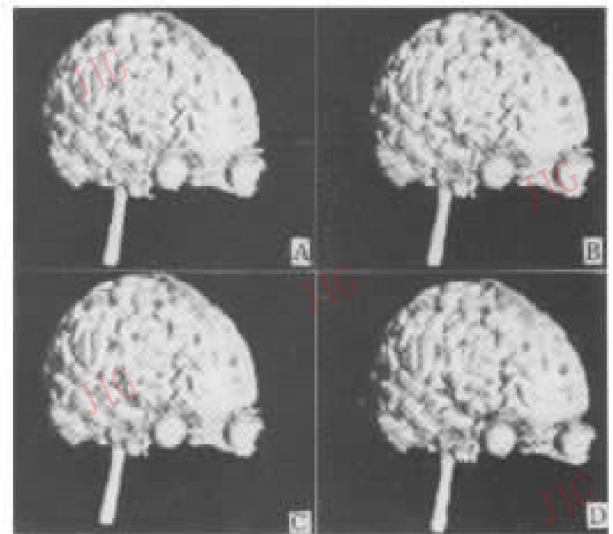


图 2 大脑皮层等值面图,数据大小为  $150 \times 200 \times 192$   
A MC 抽取结果,477084 面片; B MB(最长边  $\leq 1$ ,精度 0.5pixel)抽取结果,共 229726 面片; C MB(最长边  $\leq 1$ ,精度 1.0pixel)抽取结果,共 119772 面片; D MB(最长边  $\leq 2$ ,精度 9.5pixel)抽取结果,共 106324 面片

Fig. 2 The constructing result from cerebral cortex data.

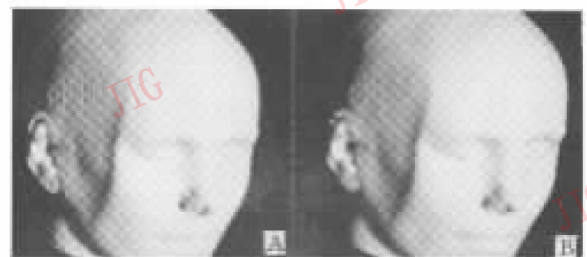


图 3 人体头部等值面图,数据大小为  $150 \times 200 \times 192$   
A MC 抽取结果,855580 面片; B MB(最长边  $\leq 1$ ,精度 0.5pixel)抽取结果,共 398054 面片

Fig. 3 The result from other volume data.

表 1 MB 算法与 MC 算法的比较结果( $\text{prec}=0.5$ , 在 HP720 上运行)

Table 1 The Copmarison between MB and MC

体数据	MC 算法		原始 MB 算法		八叉树 MB 算法	面片数比 (MB/MC)
	抽取时间 (s)	面片数	抽取时间 (s)	面片数	抽取时间 (s)	
大脑皮层(150×200×192)	35	477084	135	229726	45	48.1%
头 像(150×200×192)	62	855580	273	398054	107	46.5%
树 獭(128×128×197)	10	166616	35	75468	19	45.3%

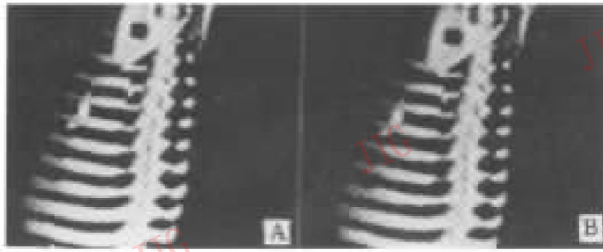


图 4 树獭胸部等值面图,数据大小为  $128 \times 128 \times 197$   
A MC 抽取结果,166616 面片; B MB(最长边 $\leq 1$ ,精  
度 0.5pixel)抽取结果,共 75486 面片

Fig. 4 The constructing result from chest of sloth.

为了用 MB 算法实现一个多精度体数据绘制环境,还需要对它作些修改。我们把显示所需精度与 MB 的剖分终止条件结合起来,例如当 Box 最长边不大

于 2 时停止剖分。经过修改,MB 算法可以实现更大程度的面片数减少(如图 2D,小于 25%),当然,显示精度也相应降低了。今后,我们将利用 MB 的多精度控制特性,在 PVM 平台上开发一个体数据的交互显示环境,让用户更好、更快地理解和掌握他们的数据。

#### 参考文献

- 1 Lorensen W E, Cline H E. Marching cubes: A High Resolution 3D surface construction algorithm. *Computer Graphics*, 1987, 21(3):163~169.
- 2 Ning P, Bloomenthal J. An Evaluation of implicit surface tilers. *IEEE CG & A*, 1993, 13(6):33~41.
- 3 Schroeder, William J, Jonathan A, et at. Decimation of triangle meshes. *Computer Graphics, SIGGRAPH 1992*, 65~75.
- 4 Wilhems J, Van Gelder A. Octrees for faster isosurface generation. *Trans. Graphics*, 1992, 11(3):201~227.



薛 强 浙江大学计算机系硕士研究生,主要研究方向科学计算可视化及神经网络。

## Multiresolutional Isosurface Constructing from Volume Data

Xue Qiang Cai Wenli Shi Jiaoying

(State Key Lab. of CAD & CG, Zhejiang University, Hangzhou 310027)

**Abstract** A widely used isosurface construction algorithm is called Marching Cubes Algorithm (MC), which produces triangle-represented isosurface from volume data. The algorithm given in this article solves a problem in MC and gives half-cut triangles in a volume data with no obvious quality deduction. The algorithm is called Marching Boxes Algorithm.

**Keywords** Isosurface, Volume data, Visualization, Marching cubes algorithm, Marching boxes algorithm