

CT 成象中目标边界线复原的一种方法

郭钧锋¹ 蔡元龙² 李介谷¹ 施鹏飞¹

(1. 上海交通大学图象处理与模式识别研究所, 上海 200030)

(2. 西安交通大学图象处理与识别研究所, 西安 710049)

摘要 三维目标的构造是三维数据可视化的基础, 此文首次将 CT 成象机理引入三维目标重构, 提出了断层积分逆问题, 并对其可解条件进行了深入的研究。在此基础上形成了一种全新的三维数据构造方法。新方法明显地优于传统的三维重建方法, 可以在较厚的断层条件下实现三维目标的准确复原, 具有重要的理论和应用价值。

关键词 逆问题, 断层积分, 三维目标构造, 空间插值, CT 成象机理

1 引言

三维数据的构造是三维可视化的基础和关键。现有的数据构造方法分为三类: 表面数据的构造方法^[1]、多目标体数据的构造方法^[2]和灰度体数据的构造方法^[3], 其中前两类方法俗称三维重建。典型的三维重建方法通常由层内数据分割和层间数据插值等两个主要步骤组成。尽管人们在这些方面的研究已经取得了许多成果^[4~6], 但传统方法中所存在的一些本质上的缺陷却严重阻碍了该项研究工作的进一步发展。

首先, 现有图象分割方法在分割 CT 断层图象方面存在理论缺陷。与普通图象不同, CT 断层图象是有厚度的, 而且通常比断层内象素的尺寸大得多^[7,8](见图 1)。这种断层厚度的存在, 使得不同组织的交界面通常会沿着断层方向经过若干体素(图中体素 1~5), 造成这些体素的灰度值介于两种组织的密度之间。显然, 过渡区域内任一像素都与组织交界面相交于不同的轴向位置。目前的 CT 图象分割方法都是将 CT 断层图象作为平面图象来处理, 将密度过渡区域作为一种噪声影响看待, 不同的分割方法采用不同的手段将这一过渡区域一分为

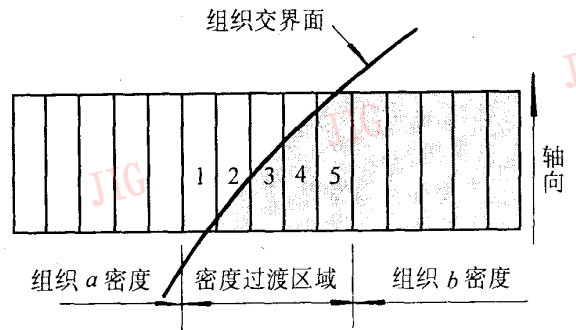


图 1 断层厚度引起的过渡带效应

Fig. 1 Density transitional zone caused by the thickness of slice

二, 分别划归不同的组织区域, 从而不可避免地造成不在同一轴向位置的交界点被错误地合并到同一张分割结果图中。在这种情况下, 分割结果的正确性从理论上是无法解释的。并且, 事实上, 将这种过渡带效应简单地作为一种噪声看待, 是造成 CT 图象分割困难的一个重要原因。

其次, 层间插值也存在本质缺陷, 因为该方法人为地放弃了断层厚度方向的大量有用信息, 因此它事实上是在创造中间断层, 而不是在恢复中间断层。人们在从理论上评价插值质量时, 主要是看它的区域匹配是否合理, 形变过程是否符合逻辑, 形

• 国家自然科学基金资助项目(39070305)。

收稿日期: 1996-12-18; 收到修改稿日期: 1997-10-02。

变进行得是否均匀等等。而这些设计插值算法的依据同所要重建的具体生物组织之间并无必然的相关性。因此我们通常难以从理论上去评价某一插值算法的正确性和可靠性。

2 CT 成象的断层积分逆问题

一幅 CT 图象实际上相当于一个有一定厚度的物理断层沿厚度方向所作的密度积分。由于组织结构和密度变化的复杂性，这一积分显然是不可逆的。但是，如果把这些组织各自的密度均假设为均匀的(实际上，对于每张切片，在组织交界面附近的小区域内，这一假设是可以得到满足的)，那么就有可能从 CT 图象中将交界面走向信息提取出来。

2.1 断层积分逆问题的表述

把一幅 $N \times N$ 的二维 CT 断层图象沿某一坐标方向分解，形成 N 个尺寸为 $N \times 1$ 的一维断层图象。这样，在同一分解位置处取自不同断层图象的一维数据就构成了沿厚度方向排列的一个一维断层序列(见图 2)。显然，如果三维组织在该截面中的结构位置能够准确恢复，那么，将不同分解位置上确定的组织截面组合起来，就得到了整个组织的三维复原结构。

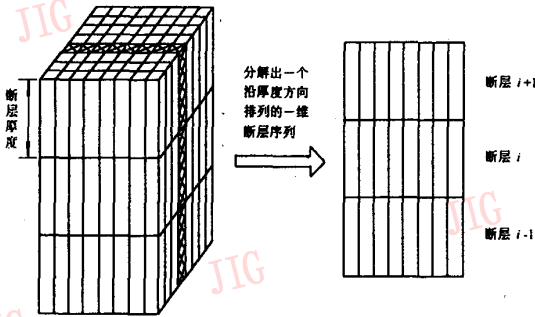


图 2 $N \times N$ 二维断层序列分解为 N 个 $N \times 1$ 一维断层序列

Fig. 2 Decomposing a $N \times N$ two-dimension slice series into N pieces of $N \times 1$ one dimension slice series

本文将该问题理想化，假设断层图象为连续图象，即体素沿断层方向尺寸无限小，而沿垂直于断层方向尺寸等于断层厚度。显然，理想化的体素是一根定长的线段，体素的亮度正比于三维

组织在该线段上的密度线积分。在该理想化体素模型下，断层积分逆问题可以表述为：

问题 1

在图 3 所示矩形区域 ω 中，曲线 $x = c(y)$ 将整个区域分成左右两部分，且 $0 \leq c(y) \leq x_{\max}$, $y \in [0, y_{\max}]$ 。 $g(x, y)$ 为定义在区域 ω 上的密度函数，且 $g(x, y) \geq 0$, $(x, y) \in \omega$ 。设左右两边区域的密度分别为 a 和 b ，且 $a \geq 0, b \geq 0, a \neq b$ 。于是

$$g(x, y) = \begin{cases} a, & x < c(y) \\ b, & x > c(y) \end{cases}$$

沿 y 轴方向，将 ω 等分为 n 个切片，切片厚度为 Δ ，第 i 个切片用 ω_i 表示

$$\omega_i = \{(x, y) | 0 \leq x \leq x_{\max}, y_i \leq y < y_{i+1}\}$$

在 $[y_i, y_{i+1}]$ 范围内对 $g(x, y)$ 沿 y 方向求积分，得第 i 个切片的密度函数

$$\bar{g}_i(x) = \frac{1}{y_{i+1} - y_i} \int_{y_i}^{y_{i+1}} g(x, y) dy = \frac{1}{\Delta} \int_{y_i}^{y_{i+1}} g(x, y) dy \quad (1)$$

关于该积分的可逆性问题，我们可得出如下结论：

结论 1 若两种不同密度组织的交界线 $c(y)$ 位于任一切片内的片段均为基本过渡带类型，且满足过渡带可接续条件，则交界线 $c(y)$ 可由所有各层的切片密度函数确定。下面我们将针对该结论所涉及的概念和命题进行详细解释。限于篇幅，本文只给出各命题的结论，详细证明请见文献[9]。

2.2 组织交界线片段的描述

过渡带： 在一个切片(或称切片密度函数)中，位于两个不同密度的均匀区域之间的渐变过渡区间。

过渡带类型： 对于过渡带内组织交界线走向情况的一种定性描述，它是切片内交界线两端点的相对位置、单调情况等综合指示。其中可以用不超过 3 次的多项式表达的过渡带类型称为**基本过渡带类型**，共 41 种，示于图 4 中。

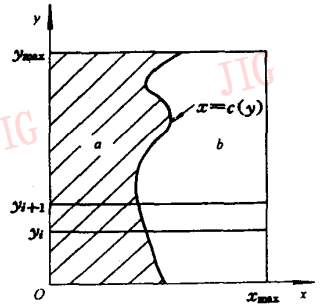


图 3 断层积分逆问题示意图
Fig. 3 Diagrammatic sketch about the inverse problem of slice-integral

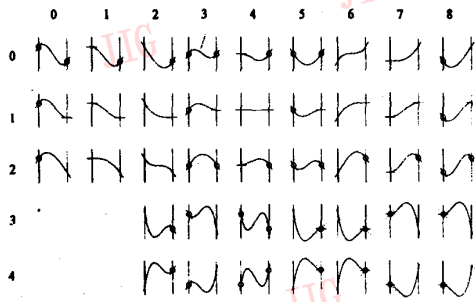


图 4 全部 41 种基本过渡带类型
(类型号用两位十进制数表示)

Fig. 4 Total 41 types of basic density transitional zone
(Indicated by two decimal numbers)

过渡带接续类型: 两相邻切片中,组织交界线是相互接续的,这两段交界线将在各自的切片内形成过渡带,这两个过渡带之间位置上的接续关系形成了 18 种过渡带接续类型,见图 5。

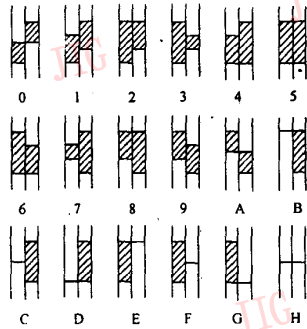


图 5 全部 18 种过渡带接续类型
(类型号用 ASCII 字符表示)

Fig. 5 Total 18 types to continue two adjacent transitional zones
(Indicated by an ASCII char)

2.3 过渡带可接续条件

命题 1 在问题 I

中,若边界线 $c(y)$ 在某切片中的片段 $c_i(y)$ 可以表示为不超过 3 次的多项式,则 $c_i(y)$ 可由 $c(y)$ 同切片两端线 $y = y_i, y = y_{i+1}$ 的交点的位置,及交点处的曲线切向值唯一确定。

命题 2 在问题 I 中,对于连续可导曲线段 $c_i(y)$ 的某一端点 m ,若存在一个 δ 半邻域 ($\delta > 0$),使得

$$\begin{cases} c_i(y) > c_i(y_{m\delta}), & y \in [y_i, y_{m\delta}) \\ c_i(y) < c_i(y_{m\delta}), & y \in [y_{m\delta}, y_{i+1}) \end{cases} \quad (2)$$

或

$$\begin{cases} c_i(y) < c_i(y_{m\delta}), & y \in [y_i, y_{m\delta}) \\ c_i(y) > c_i(y_{m\delta}), & y \in [y_{m\delta}, y_{i+1}) \end{cases} \quad (3)$$

成立(其中 $y_{m\delta} = y_m \pm \delta$, \pm 号的选择应使得 $y_{m\delta}$ 落在切片内,若 $y_m = y_i$,取加号,否则取减号),并且

$c_i(y)$ 位于 δ 半邻域中的部分为单调函数(增减性已知),则 m 点的水平位置 x_m 及 $c_i(y)$ 在 m 点的切线方向可由切片密度函数 $\bar{g}_i(x)$ 唯一确定。并且,若 m 点为左端点,则 x_m 由下面的隐式确定:

$$\bar{g}_i(x) = \begin{cases} = a, & x < x_m \\ \neq a, & x_m \leq x < c_i(y_{m\delta}) \end{cases} \quad (4)$$

若 m 点为右端点,则隐式变为:

$$\bar{g}_i(x) = \begin{cases} = b, & x_m < x \\ \neq b, & c_i(y_{m\delta}) < x \leq x_m \end{cases} \quad (5)$$

曲线 $c_i(y)$ 在 m 点处的导数的绝对值为

$$\left| \frac{dc_i(y)}{dy} \Big|_{y=y_m} \right| = \left| -1 / \left(\frac{\Delta}{a-b} \cdot \frac{d\bar{g}_i(x)}{dx} \Big|_{x=x_m} \right) \right| \quad (6)$$

导数符号可由 m 点的位置及 $c_i(y)$ 在 δ 半邻域中的单调增减性判定。

注:这里导数 $\frac{dc_i(y)}{dy}$ 定义在半邻域中,且允许为 $\pm\infty$ 。

命题 3 在问题 I 中,对于每一个切片分界线,如果至少在其一侧满足命题 2 的条件,并且 $c(y)$ 在每层切片中的片段满足命题 1 的条件,则边界线 $c(y)$ 可以由所有的切片密度函数唯一确定。

命题 2 给出了当切片中交界线片段的类型已知时,由切片密度函数确定交界线端点信息的充分条件。将这一条件应用于图 4 所示的基本过渡带类型图中,如果某一端点处的信息(位置和导数)不能完全由相应的切片密度函数确定,则在该端点处标上一个圆圈;如果能够完全确定,则不作标记。根据命题 3 的要求,当两个相邻切片中的交界线相连时,为了保证断层积分的可逆性,图中标有圆圈的两个端点不应相接。这一要求称作**过渡带可接续条件**。

2.4 基本过渡带类型的确定

命题 4 在问题 I 中,如果两种不同密度组织的交界线位于三个连续切片内的过渡带均为基本过渡带且满足过渡带可接续条件,则中间切片的过渡带类型可由该切片与上、下层切片的过渡带接续类型以及上层或下层切片中过渡带类型来确定。并且所得到的中间层的过渡带类型不会超过 4 种可能情况。

如何从命题 4 所确定出的多种可能的过渡带类型中选出正确的那种呢?这需要进一步引入切片密

度函数这一灰度信息。我们采用模型匹配,并利用最小均方误差判据来确定正确的过渡带类型。具体步骤如下:

- (1) 对于每种可能类型,求出端点位置和导数,采用 Hermite 插值得出本层内的组织交界线;
- (2) 模拟 CT 成像过程,对恢复出的切片做断层积分得模型切片密度函数;
- (3) 在过渡带范围内,计算原始 CT 切片密度函数同模型切片密度函数之间的均方误差;
- (4) 在各种可能类型中,均方误差最小的作为当前层的过渡带类型。

3 实验结果

实验的原始数据取自 X 线 CT 的人体头部断层扫描结果,断面尺寸 256×256 , 象素灰度等级 4 096,几何分辨率 $1 \text{ mm} \times 1 \text{ mm}$,层厚 5 mm ,共有 41 张切片。从每张切片中取出相同的一行,构造一个 256×41 的二维数组,代表着一块 $256 \text{ mm} \times 205 \text{ mm}$ 的矩形区域。实验的目的是由这 41 行一维数据完全地恢复出整个矩形区域内的骨骼结构。

为了比较不同方法的重建效果,首先依据 CT

成像机理,将两张相邻切片合为一层,得到 20 层 10 mm 厚的切片(略去无骨骼组织的第一层原始切片),然后用 10 mm 层厚的切片复原骨骼结构,再同 5 mm 原始断层中的骨骼结构进行比较。

本文将同时给出基于灰度插值的三维重建方法和基于形状插值的三维重建方法所构造的骨骼结构。为了合理起见,采用交互式方法精心确定了这两类方法中二值化阈值的最佳位置。这里的最佳是指,如果阈值再低一些

的话,被选择的骨骼区域将变得太粗而严重失实;如果阈值调高又会引起骨骼较薄处发生明显的断裂。这里选择的阈值是两方面因素的折衷。

图 6 是 5 mm 层厚的原始灰度图象,所有的重建和复原结果都将与之比较以确定方法的准确性。图 7 分别给出了 10 mm 层厚下,三类目标构造方



图 6 原始灰度图
Fig. 6 Original grey scale image

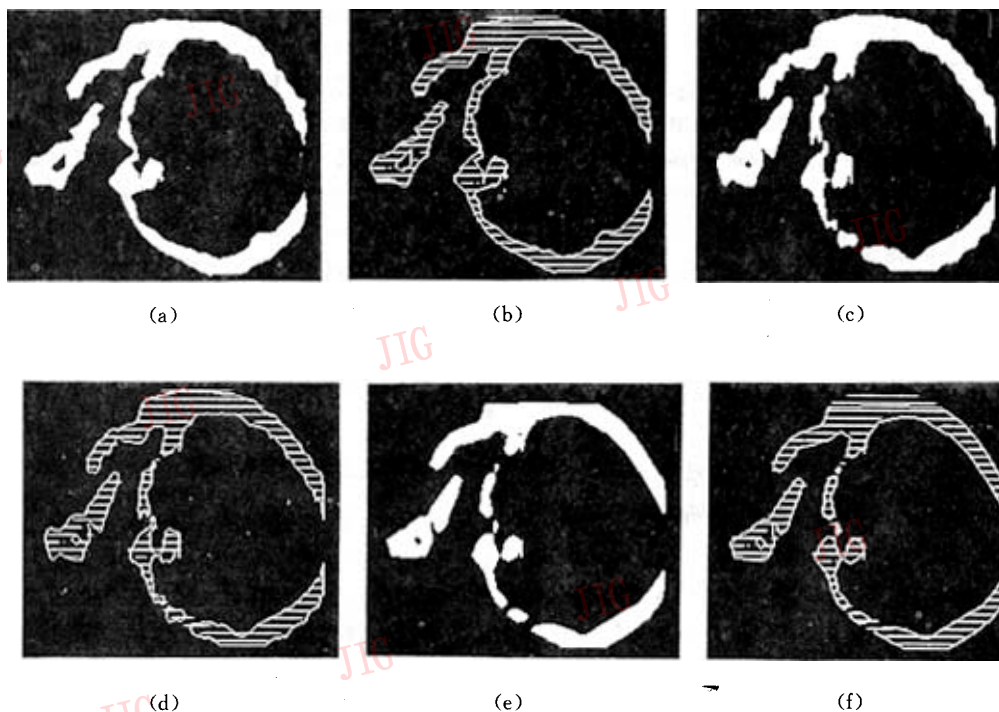


图 7 三类目标构造方法的实验结果及其轮廓与原始目标灰度图的比较

(a)(b)基于断层积分求逆的复原方法;(c)(d)基于灰度插值的三维重建方法;(e)(f)基于形状插值的三维重建方法

Fig. 7 Experimental results and the comparisons of their contours with the original grey scale image.

法的实验结果。注意在目标左下方和中间部位的薄目标处,另两种重建结果均存在断裂现象,而本文提出的目标复原方法则给出了令人满意的复原结果。

4 结 论

本文一改传统的三维重建模式,将CT成象机理引入目标重构,取消了分割和插值的区分,而代之以整个目标的三维复原。既保证了总体结构的准确,又实现了对细节的恢复,并且既使在较厚的断层条件下仍能实现对目标结构的准确复原。理论依据和真实CT数据实验结果均表明该方法明显地优于传统的两类三维重建方法。

参 考 文 献

- 1 Chang L W, Chen H W, Ho J R. Reconstruction of 3D Medical images: a nonlinear interpolation technique for reconstruction of 3D medical images. *CVGIP: Graphical Models and Image Processing*, 1991, 53(4): 382~391.
- 2 Levin D. Multidimensional reconstruction by set-valued approximations. *IMA Journal of Numerical Analysis*, 1986, 6: 173~184.
- 3 Keys R G. Cubic convolution interpolation for digital image processing. *IEEE Trans. Acoust., Speech, Signal Processing*, 1981, ASSP~29: 1153~1160.
- 4 Lin W C, Liang C C, Chen C T. Dynamic elastic interpolation for 3-D medical image reconstruction from serial cross sections. *IEEE Trans on Medical Imaging*, 1988, 7(3): 225~232.
- 5 Raya S P, Udupa J K. Shape-based interpolation of multidimensional objects. *IEEE Trans on Medical Imaging*, 1990, 9(1): 32~42.
- 6 Guo J F, Cai Y L, Wang Y P. Morphology-based interpolation for 3D medical image reconstruction. *Computerized Medical Imaging and Graphics*, 1995, 19(3): 267~279.
- 7 Styzt M, Frieder O. Three-dimensional medical imaging modalities: an overview. *CRC Critical Reviews in Biomedical Engineering*, 1990, 18(1): 27~54.
- 8 杰·亚历山大等.《CT技术及其临床应用》.北京:中国医药科技出版社出版,1988.
- 9 郭钧锋.医学CT图象三维可视化技术研究:[博士学位论文].西安:西安交通大学,1995.



郭钧锋,1988年毕业于西安交通大学无线电技术专业,1991年和1995年分别获西安交通大学通信与电子系统专业的硕士和博士学位,1995年进入上海交通大学图象处理与模式识别研究所从事博士后研究工作,1997年出站后留所任教。主要研究领域:医学图象三维可视化,图象处理,计算机图形学。

A New Method for Constructing Object from CT Images

Guo Junfeng¹, Cai Yuanlong², Li Jiegu¹, Shi Pengfei¹

(1. Institute of Image Processing and Pattern Recognition, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200030)

(2. Institute of Image Processing and Recognition, Xi'an Jiao Tong University, Xi'an 710049)

Abstract 3D object construction is the foundation of 3D data visualization. In this paper, for the first time, the CT imaging mechanism is introduced into 3D object construction. The inverse problem of the slice-integral has been studied and a theory and implementation of 3D object restoration has been proposed. The proposed method has great advantage over the traditional 3D reconstruction theory. It can restore the 3D objects accurately even for the thicker slices. The proposed method is a totally new method and of great theorial and practical significance.

Keywords Inverse problem, Slice-integral, 3D object construction, Interpolation, CT imaging mechanism