

基于形状的 CT 图像断层间数据插值算法

雷印胜^{1,2} 王明时¹ 秦 然²

(1. 天津大学精密仪器与光电子工程学院, 天津 300072;

2. 山东青年管理干部学院, 济南 250014)

摘 要: CT 脑血管三维重建图像都是源自二维断层扫描, 由于二维断层扫描图像是对一定厚度的三维物体在二维平面上的断层投影, 在目前的技术水平下, 相邻两断层图像间的扫描距离要大于同一断层中解剖组织相邻像素间的图像显示距离。为保证三维重建图像的质量, 在研究了 CT 脑血管二维图像特征后, 提出了一种新的基于形状和基于灰度的图像断层间数据插值算法, 并取得了较理想的实验效果。

关键词: CT 脑血管图像, 形状和灰度, 层间插值

中图分类号: TP399 **文献标识码:** A

Data Interpolation Algorithm between the Slices of CT Image Based on Shape

Lei Yinsheng^{1,2} Wang Mingshi¹ Qin Ran²

(1. School of Precision Instrument and opto-electronics Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China;

2. Shandong Youth College, Jinan 250014, China)

Abstract: The source data of 3-dimension CT cerebrovascular image reconstruction come from 2D tomography slices. Because 2-dimension CT cerebrovascular medical slice images are the projection of certain thickness 3D internal tissue on a 2D plane, the distance between two contiguity medical image slices is greater than the display distance of contiguity graphic display pixels of internal tissue in same medical image slice under current scan technical condition. In order to ensure the quality of 3D image reconstruction, after studying the features of 2-dimension CT cerebrovascular image and data interpolation between the slices in the process of data extraction of 2-dimension CT cerebrovascular for 3D-reconstruction, a novel interpolation algorithm based on grey-level and shape is presented, and better experimental results are obtained.

Keyword: CT cerebrovascular image, grey-level and shape, interpolation between slices.

在 CT 脑血管图像的三维重建的过程中, 不可避免的要遇到另外一个技术问题, 即如何将二维断层扫描得到的脑血管数字图像基本无失真的重建成三维脑血管数字图像。由于二维断层扫描图像是对一定厚度的三维物体在二维平面上的断层投影, 在目前的技术水平下, 相邻两断层图像间的扫描距离要大于同一断层中解剖组织相邻像素间的距离。在多数情况下, 这些离散的图像数据是非等分辨率的。然而三维重建是一个逆过程, 如果只是将不同层面的同一类型组织结构简单的叠加起来, 必然出现失真现象, 更严重者会出现锯齿状重建结果, 给医生进

行正确分析和诊断病情带来困难, 甚至会影响临床诊断结果。为解决这个问题, 人们提出了断层间图像插值的方法, 来将这些非等分辨率的断层图像转变成等分辨率的图像^[1,2], 以便对它们进行后续处理和分析。因此插值算法的研究仍然是三维重建领域的一个热点问题。

1 常见算法描述

一般来说, 图像插值大体可分为基于灰度的插值和基于形状的插值。直接的灰度插值, 包括线性

本文于 2006 年 7 月收到。雷印胜: 博士研究生, 教授; 王明时: 教授, 博士生导师; 秦然: 副教授。

插值,三次样条插值^[3]等,会造成较严重的轮廓模糊。A. Goshtasby 等人的算法^[4]相对于上述的灰度插值算法能得到较好的结果,但仍有轮廓模糊的问题。而早期基于形状的插值仅适用于二值图像,如罗立民等人的基于形状的插值算法^[5],W. E. Higgins 等人的算法^[7]。近来人们将基于灰度的插值和基于形状的插值两者被有效地结合起来,并得到了较好的插值结果。其中较典型的有 G. J. Grevera 和 J. K. Udupa 提出的算法^[6],W. E. Higgins 等人的算法^[7],以及 K. S. Chuang 等人的插值方法^[8]等等。G. J. Grevera 和 G. J. Udupa^[3,9,10]曾将一些常用的基于形状的插值算法和灰度插值算法做了比较,并证明了前者要优于后者。本文提出了一种新的基于形状和基于灰度的断层图像插值算法。

2 基于形状的灰度图像层间插值算法

用集合 $U = \{V, f\}$ 来表示已知的所有断层图像。 V 为所有点的集合。函数 $f: V \rightarrow Y$ 定义了任一点的灰度值。如果 Y 只有 0 和 1 两个值,则 U 为二值图像。如果 Y 所有的元素值都在 $[0 \sim 255]$ 之间,则 U 为灰度图像。将第 i 层断层图像定义为 $U_i = \{K, f\}$, 其中 $V_i = \{(x, y, z) | z = i\}$, x, y, z 分别表示点在三维空间的坐标。

给定 2 幅断层图像 U_{k-1} 和 U_{k+1} , 为了通过插值构造出它们之间的断层图像 U_k , 首先依据数学形态学的知识分别对 U_{k-1} 和 U_{k+1} 进行膨胀和腐蚀,从而确定出 U_k 的边界 L_k 。对求出所有位于 L_k 内的点在 U_{k-1} 和 U_{k+1} 上的对应点。最后求得这些点的灰度,进而得到最终的插值图像 U_k 。

2.1 确定 U_k 的边界 L_k

首先通过图像分割提取出灰度图像 U_{k-1} 和 U_{k+1} 的边界 L_{k-1} 和 L_{k+1} , 将物体置为黑色,背景设为白色,从而构造出 2 幅二值图像。分别用 X_{k-1} 和 X_{k+1} 表示 2 幅二值图像的物体, X_{k-1}^c 和 X_{k+1}^c 为它们的补集,表示背景。如果 X_{k-1} 和 X_{k+1} 的中心点相距较远,则可通过平移的方法使它们处在同一位置,插值后再向相反的方向平移即可。此时,对任意位于 X_{k-1} 边界上的点 $X_{k-1,m}$, 即 $X_{k-1,m} \in L_{k-1}$ 来说,对应的 $X_{k+1,m}$ 只可能有下面 3 种情况:

(1) $X_{k+1,m} \in X_{k+1}$ 且 $X_{k+1,m} \notin L_{k+1}$, 即点 $X_{k+1,m}$

位于 X_{k+1} 的内部,但不在边界上。此时执行此时执行 $X_{k-1,m} \oplus B$, 其中 \oplus 表示膨胀; B 为结构算子。

(2) $X_{k+1,m} \in X_{k+1}^c$ 且 $X_{k+1,m} \notin L_{k+1}$, 即点 $X_{k+1,m}$ 处在背景区域。此时执行 $X_{k-1,m} \ominus B$, 其中 \ominus 表示腐蚀。

(3) $X_{k+1,m} \in L_{k+1}$, 即点 $X_{k+1,m}$ 处在置 X_{k+1} 的边界上。此时无需进行任何操作。

综合上述 3 种情况,可以表示为:

$$F(X_{k-1} | X_{k+1}) = ((X_{k-1} \ominus B) \cup ((X_{k-1} \cap X_{k+1}) \oplus B)) \cup (X_{k-1} \cup X_{k+1}) \quad (1)$$

类似的,定义:

$$F(X_{k+1} | X_{k-1}) = ((X_{k+1} \ominus B) \cup (X_{k+1} \cap X_{k-1}) \oplus B) \cup (X_{k+1} \cup X_{k-1}) \quad (2)$$

可证明,对任意 2 幅二值图像,重复运用式(1)和(2),最终均能得到 2 幅完全一样的插值图像。因此,要得到插值图像 U_k 的轮廓,只需对 X_{k-1}, X_{k+1} 重复采用式(1)和(2),直到出现 2 幅完全一样的图像。此时,在 X_{k-1}, X_{k+1} 之间已产生了一系列新的二值图像。找到与 U_k 位置对应的新图像,提取出它的边界 L_k , 它即为 U_k 的边界。

2.2 找出 U_k 上所有点在 U_{k-1}, U_{k+1} 上的对应点

文献[8]中提出的方法是较典型的一种找对应点的算法。算法首先用多边形逼近图像的轮廓,通过点和多边形各条边的位置关系来求对应点。但其存在缺陷,如图 1 所示^[8]。

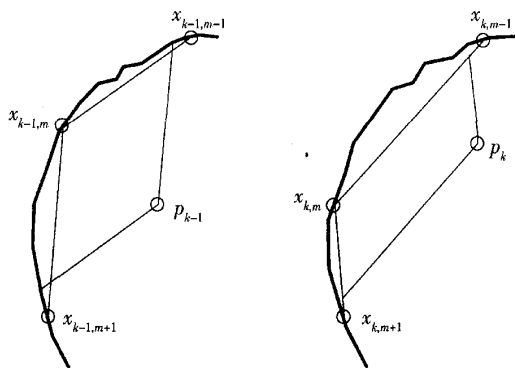


图 1 文献[8]算法求对应点误差示意图

当线段 $x_{k,m-1}x_{k,m}$ 和 $x_{k-1,m-1}x_{k-1,m}$, 或是线段 $x_{k,m}x_{k,m+1}$ 和 $x_{k-1,m}x_{k-1,m+1}$ 的斜率相差较大时,所求得的对对应点就会产生偏差,从而影响最终的插值结果。笔者曾经通过构造相似的多边形来减少这种误差,并得到了较好的插值结果。本文提出了另一种求对应点的方法。它利用了断层图像间的相似性,

根据点和图像中心的位置关系来求对应点,如图2所示。

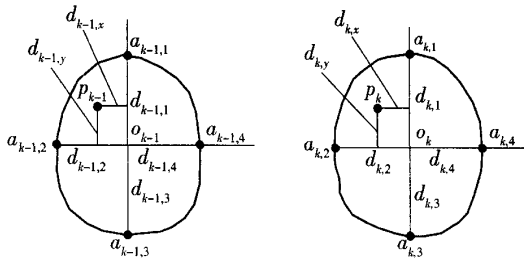


图2 求 p_k 的对应点 p_{k-1}

找到轮廓 L_k' 的中心 O_k ,令其在 x 轴和 y 轴上的坐标为 $(O_{k,x}, O_{k,y})$,过此点分别做平行于 x 轴和 y 轴的直线并分别与 L_k' 相交于点 $a_{k,1}, a_{k,2}, a_{k,3}, a_{k,4}$,依次求出此4点与 O_k 的距离 $d_{k,1}, d_{k,2}, d_{k,3}, d_{k,4}$ 。对位于 L_k' 内部的任意一点 p_k ,令其坐标为 $(p_{k,x}, p_{k,y})$,分别求出它到线段 $a_{k,1}, a_{k,3}$ 及 $a_{k,2}, a_{k,4}$ 距离,设为 $d_{k,x}$ 和 $d_{k,y}$,则:

$$\begin{aligned} \text{当 } p_{k,x} < O_{k,x} \text{ 时 } r_{k,x} &= \frac{d_{k,x}}{d_{k,2}}, \\ \text{其他 } r_{k,x} &= \frac{d_{k,x}}{d_{k,4}} \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \text{当 } p_{k,y} < O_{k,y} \text{ 时 } r_{k,y} &= \frac{d_{k,y}}{d_{k,1}}, \\ \text{其他 } r_{k,y} &= \frac{d_{k,y}}{d_{k,3}} \end{aligned} \quad (4)$$

即为 p_k 相对于中 O_k 的位置关系。

为求 p_k 在图像 U_{k-1} 上的对应点 $p_{k-1}(p_{k-1,x}, p_{k-1,y})$,同样首先求出 U_{k-1} 的中心点 O_{k-1} ,令其坐标为 $(O_{k-1,x}, O_{k-1,y})$,并过此点做平行于 X 轴和 Y 轴的平行线并与图像相交于点 $a_{k-1,1}, a_{k-1,2}, a_{k-1,3}, a_{k-1,4}$,求出它们与 O_{k-1} 的距离 $d_{k-1,1}, d_{k-1,2}, d_{k-1,3}, d_{k-1,4}$ 则:

$$\begin{aligned} \text{当 } p_{k,x} < O_{k,x} \text{ 时 } p_{k-1,x} &= O_{k-1,x} - r_{k,x} d_{k-1,2}, \\ \text{其他 } p_{k-1,x} &= O_{k-1,x} + r_{k,x} d_{k-1,4} \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \text{当 } p_{k,y} < O_{k,y} \text{ 时 } p_{k-1,y} &= O_{k-1,y} - r_{k,y} d_{k-1,1}, \\ \text{其他 } p_{k-1,y} &= O_{k-1,y} + r_{k,y} d_{k-1,3} \end{aligned} \quad (6)$$

运用式(3)~(6)即可由点 p_k 求得它在 U_{k-1} 上的对应点 p_{k-1} ,在图像 U_{k+1} 上的对应点 p_{k+1} 可用同样的方法得到。

2.3 求出 p_k 的灰度

得到 p_{k-1} 和 p_{k+1} ,即可通过源图像 U_{k-1} 和 U_{k+1} 求出其灰度 $f_{k-1}(p_{k-1}), f_{k+1}(p_{k+1})$ 。此时只需采用

线性插值便可求得点 p_k 的灰度。令 U_{k-1} 和 U_{k+1} 之间的距离为 d , U_{k-1} 和 U_k 的距离为 d_1 , 则 U_k, U_{k+1} 之间的距离为 $d - d_1$, 有:

$$f_k(p_k) = \frac{d - d_1}{d} f_{k-1}(p_{k-1}) + \frac{d_1}{d} f_{k+1}(p_{k+1}) \quad (7)$$

用此插值算法求点 p_k 的灰度,对位于 L_k' 内部的绝大部分点均较为准确,然而在某些情况下会产生偏差。比较典型的情况如图3所示,点 p_k 的对应点 p_{k-1} 位于源图像 U_{k-1} 的阴影部分内,而对应点 p_{k+1} 位于源图像 U_{k+1} 的阴影部分外。如点 p_{k-1} 和点 p_{k+1} 的灰度值差别较大,那么通过线性插值求出的 p_k 的灰度值就会有较大误差。在此情况下,可采用如下的算法求点 p_k 的灰度:

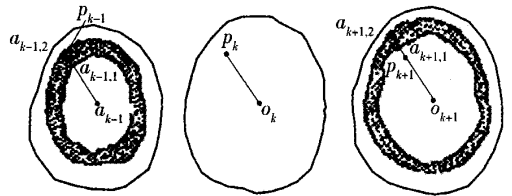


图3 对应点 p_{k-1} 和点 p_{k+1} 偏差示意图

(1)提取出图像 U_{k-1} 和 U_{k+1} 内部灰度值与其他像素相差较大的那部分的轮廓,亦即图3中阴影部分的轮廓,令其为 t_{k-1} 和 t_{k+1} 。

(2)过点 O_{k-1} 做平行于向量 $O_k p_k$ 且与其方向一致的射线,并与轮廓 t_{k-1} 相交于点 $a_{k-1,1}$ 和 $a_{k-1,2}$ 分别计算出它们与点 O_{k-1} 的距离 $d_{k-1,1}$ 和 $d_{k-1,2}$ 。同理,计算出距离 $d_{k+1,1}$ 和 $d_{k+1,2}$ 。

(3)用线性插值计算出 $d_{k,1}$ 和 $d_{k,2}$, 即:

$$d_{k,1} = \frac{d - d_1}{d} d_{k-1,1} + \frac{d_1}{d} d_{k+1,1} \quad (8)$$

$$d_{k,2} = \frac{d - d_1}{d} d_{k-1,2} + \frac{d_1}{d} d_{k+1,2} \quad (9)$$

(4)此时 $d_{k,1}$ 和 $d_{k,2}$ 可看作是一个范围,求点 p_k 和 O_k 之间的距离,令其为 d_k , 则:

$$\text{当 } d_{k,1} \leq d_k \leq d_{k,2} \text{ 时 } f_k(p_k) = f_{k-1}(p_{k-1}) \quad (10)$$

否则 $f_k(p_k) = f_{k+1}(p_{k+1})$ 。

如果 p_k 的2个对应点的灰度值较接近,则可直接采用线性插值求得它的灰度;反之,如2个对应点的灰度值相差很大,则可用上述的算法来求它的灰度。对于轮廓外的点可直接将其置为黑色。由此即得到了最终的插值图像 U_k' 。

3 基于形状和灰度图像层间插值算法实验结果

从 SDHP 的 CT 断层图像序列中取 3 幅图像,用本文算法进行插值,其结果如图 4 所示。其中,图 4(a)为源图像 U_{k-1} ;图 4(b)为源图像 U_{k+1} ;图 4(c)为实际位于 U_{k-1} 和 U_{k+1} 之间的图像 U_k ;图 4(d)为求出对应点后直接采用线性插值算法得到的插值图像;图 4(e)为求得对应点后用本文的灰度插值算法求得的插值图像。对比这 2 种插值结果,可见本文的算法较好地解决了文中提到的问题。

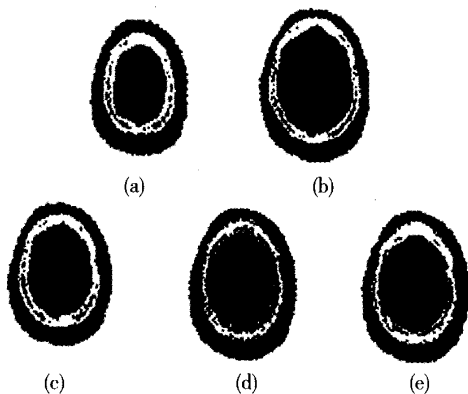


图 4 不同灰度插值算法结果示意图

可将本文的算法与线性灰度插值算法以及文献[10]算法作比较。为叙述方便,设定本文的算法为算法 1,线性插值算法为算法 2,文献[10]算法为算法 3。取一组断层图像,分别用算法 1,2,3 进行插值,得到的结果如图 5 所示。其中,(a)、(b)、(c)依次为源图像 U_{k-1} , U_k , U_{k+1} ; (d)、(e)、(f)依次为用算法 2、算法 1、算法 3 得到的插值结果 U_k' 。

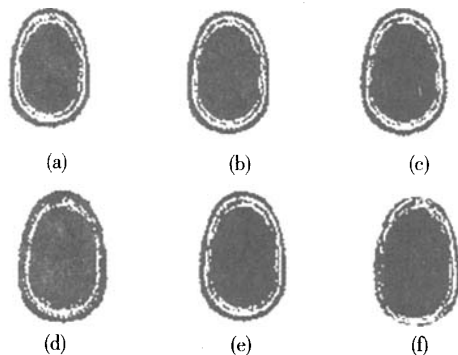


图 5 CT 图像不同插值结果示意图

引入以下 3 种判别法则,来评判这 3 种插值结果的优劣:

(1)均方差 $\sigma(U_k)$ 为:

$$\sigma(U_k) = \frac{1}{M} \sum_{v \in U_k} |f_k(v) - f_k'(v)|^2 \quad (11)$$

式中, M 为 U_k 中点的总数。

(2)灰度值不等的点的总数 $\beta(U_k)$ 为:

$$\beta(U_k) = \sum_{v \in U_k} \tau(f_k(v) - f_k'(v)) \quad (12)$$

当 $x=0$ 时 $\tau(x)=1$, 否则 $\tau(x)=0$ 。

(3)所有点的灰度差的绝对值之和 $\lambda(U_k)$ 为:

$$\lambda(U_k) = \sum_{v \in U_k} |f_k(v) - f_k'(v)| \quad (13)$$

相对于图 5 中的 3 种插值图像,用这 3 种评判标准得到的结果如表 1 所示。

表 1 3 种插值算法结果比较

评价标准	算法 1	算法 2	算法 3
$\sigma(S_k)$	154.38	401.89	403.71
$\beta(S_k)$	39 008	49 985	46 979
$\lambda(S_k)$	980 102	1 765 891	1 701 002

由表 1 可明显看出本文的算法在任一标准上均强于线性灰度插值和文献[10]的算法。

4 实验结果

对 212 幅连续无创 CT 脑血管二维断层扫描图像选取其中 30 幅进行 Gabor 虚部算法边缘特征提取后,使用文中提出的断层间数字插值同时再行图形配准和层间对齐等一系列技术处理,得到 CT 脑血管医学图像的三维重建所必需的基础数据,利用 SSD(Shaded Surface Display)表面遮盖算法技术,为利用 VC++ 并辅以 Matlab 6.5 编写算法程序,实现 CT 脑血管医学图像的三维重建效果其结果如图 6 和图 7 所示(连续无创 CT 脑血管二维断层扫描图像来源于山东大学齐鲁医院影像中心)。

5 结 论

本文提出了一种新基于形状和基于灰度的图像断层间数据插值算法,用于 CT 脑血管断层扫描医学图像的三维重建层间数据插值。通过 2 幅已知的灰度图像,用数学形态学的方法确定出插值图像的轮廓。通过求出轮廓内任意插值点与中心点的位置

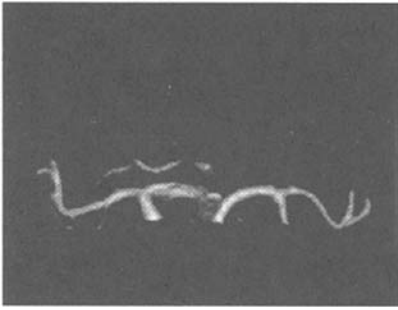


图6 CT 脑血管三维重建图像

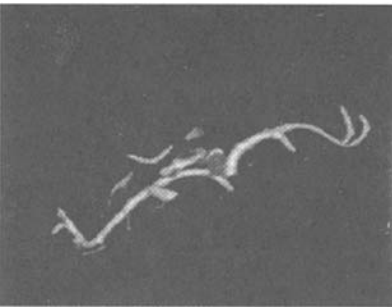


图7 经旋转一定角度后 CT 脑血管三维重建图像

关系,分别找出其在2幅源图像上的对应点。如果2个对应点的灰度值较为接近,可通过线性插值直接求出此插值点的灰度;如2个对应点的灰度值相差较大,则判断插值点的相对位置与哪个对应点的相对位置接近,并认定插值点的灰度值即为此对应点的灰度值。对轮廓内所有的点采用上述算法,即可求得最终的插值图像。算法将图像的形状信息和灰度信息较好地结合起来,有效的解决了不同断层切片的插值问题。实验结果表明此算法要优于线性插值算法和文献[10]提出的算法,其结果是有效的。

参考文献:

- [1] Higgins W E, Morice C, Ritman E L. New shape-based interpolation technique for three-dimensional Images [J]. 1990 International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing of IEEE. 1999, 4: 1841 - 1844.
- [2] Bors A G, Kechagias L, Pitas I. Binary surface morphological shape-based interpolation applied to 3 - D tooth reconstruction [J]. IEEE Trans Med Imaging. 2002, 21 (2): 108 - 118.
- [3] J Grevera G J, Udupa J K, An objective comparison of 3-D image-Interpolation methods[J]. IEEE Trans Med Imaging. 1998, 17(4): 642 - 652.
- [4] Goshtasby A, Turner D A, Aekerman L V. Matching tomographic slices for interpolation[J]. IEEE Trans Med Imaging. 1992, 11(4): 507 - 516.
- [5] Luo Limin, Gu Zhaoming, A method of extreme concave surface interpolation for 3 - D medical image reconstruction [J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition). 2003, 23(1): 126 - 131.
- [6] Grevera G J, Udupa J K. Shaped-based interpolation of multidimensional grey-level images[J]. IEEE Trans Med Imaging. 2002, 15(6): 881 - 892.
- [7] Higgins W E, Morice C, Ritman E L. Shape-based interpolation of tree-like structures in three-dimensional images[J]. IEEE Trans Med Imaging. 2003, 12(3): 439 - 450.
- [8] Chuang K S, Chen C Y, Yuan L J, et al. Shape-based grey-level images interpolation [J]. Phus Med Bio. 1999, 44(6): 1565 - 1577.
- [9] Grevera G J, Udupa JK. A task-specific evaluation of three-dimensional images interpolation techniques [J]. IEEE Trans Med Imaging. 1999, 18(2): 137 - 143.
- [10] Chuang K S, Chen C Y, Yuan L J, et al. Shape-based grey-level images interpolation [J]. Phus Med Bio. 1999, 44(6): 1565 - 1577.

作者简介:

雷印胜:男,1961年出生,教授,博士研究生。1988年山东工业大学自动化系研究生毕业,供职于山东省青年管理干部学院,有10余年在浪潮集团从事医疗电子产品研究和开发的经验。现就读于天津大学精密仪器与光电子工程学院生物医学工程专业。主要研究方向为计算机技术、生物医学工程与计算机图像处理。

王明时:男,1960年毕业于北京航空航天大学,现供职于天津大学生物医学专业,从事生物医学领域理论及应用技术研究。