

doi: 10.11835/j.issn.1000-582X.2013.07.011

基于对应点匹配插值算法的电阻抗三维图像重建

何 为, 牛富丽, 李 冰, 徐 征

(重庆大学 电气工程学院; 输配电装备及系统安全与新技术国家重点实验室, 重庆 400044)

摘 要: 为了对电阻抗成像二维重构图像结果进行三维重建, 笔者使用对应点匹配插值算法对二维电阻抗图像进行插值, 形成三维重建模型。根据电阻抗成像重构数据的特点, 改进了插值算法的梯度和梯度方向角计算公式, 从而较好地重现层间数据, 最后由原始数据和插值数据形成三维体数据。实验的模型是浸泡在圆柱体水槽中电导率为 2.1 S/m 的圆柱体异物。将笔者所提算法与线性算法以及形状插值算法进行了对比。结果表明: 笔者算法能够在确保计算精度的同时, 兼顾计算效率, 满足电阻抗成像的实时监护要求。

关键词: 电阻抗成像; 图像重建; 匹配插值

中图分类号: TM153 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-582X(2013)07-061-05

Three-dimensional reconstruction of electrical impedance tomography based on corresponding points matching interpolation

HE Wei, NIU Fuli, LI Bing, XU Zheng

(State Key Laboratory of Power Transmission Equipment & System Security and New Technology, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

Abstract: An interpolation algorithm with corresponding point matching is presented for interpolating two-dimensional reconstructed images of electrical impedance tomography (EIT) to realize three-dimensional reconstruction. The calculation methods of the gradient and its orientation angle have been adjusted according to the characteristic of the EIT data, and the interpolated slice shows good quality. The experimental model is a 2.1 S/m cylinder agar block immersed in a cylindrical water tank. The comparisons of the presented algorithm to the linear interpolation and the shape-based interpolation are made. The results show that corresponding point matching algorithm can ensure both accuracy and computational efficiency, thus the algorithm satisfies the requirements of the real-time EIT monitoring.

Key words: electrical impedance imaging; image reconstruction; matching interpolation

电阻抗成像 (Electrical Impedance Tomography, EIT) 是一种描述生物组织电阻抗特性的医学成像技术。电阻抗成像二维重构算法是假设流入被测物体的电流只流经电流注入点的平面, 通过静态^[1-2]或动态^[3-4]的重构方法得到电导率分布。因而降低算法

复杂性, 减少计算时间。电阻抗成像三维重构算法^[5-6]将注入被测物体的电流形成的电流场视为三维场实现重构。三维重构算法可以得到物体完整的电导率分布, 但计算时间相对二维算法较长。临床 EIT 监护成像需要图像实时更新, 三维重构算法会

收稿日期: 2013-02-15

基金项目: 中央高校基本科研业务经费资助项目 (CDJZR10150021)

作者简介: 何为 (1957-), 男, 重庆大学教授, 博士生导师, 主要从事电磁场理论在生物医学中的应用研究, (E-mail) hewei@cqu.edu.cn.

影响图像更新速度,从而影响监护质量。为满足 EIT 监护需求,笔者对二维重构图像进行三维重建。由于二维图像层间距大,重建三维的数据少,图像层间插值是必需的。Zimmermann^[7]在提出的电阻抗成像测量系统中通过提取等值面得到了圆柱容器中聚氯乙烯圆柱体和马铃薯模型,但具体细节并未阐述。

图像间插值主要分为基于灰度^[8]、基于形状^[9]和基于小波^[10]的插值方法。近年来的发展主要有:1)根据分割区域的不同密度对对应点匹配灰度插值的改进^[11];2)形状插值前对初始轮廓的位置校准和插值后对轮廓的光滑处理^[12-13];3)利用数学形态学对起始边界膨胀和腐蚀使其逐渐向目标边界逼近的形态插值^[14];4)形状与灰度结合插值;5)基于小波的插值等。

匹配插值算法在插值效果上优于线性插值,而小波插值算法复杂,插值时间长,不利于实时成像。因此笔者采用匹配点灰度插值算法对二维重构图像插值,并根据电阻抗成像重构数据的特点对梯度和梯度方向角计算公式进行修改。插值得到图像间的新图像,并对插值后的体数据重建成三维图像。

1 匹配点插值算法原理

匹配点插值算法主要分为下列步骤:1)对二维电阻抗重构数据进行预处理,以便于插值使用;2)确定最佳匹配点对,笔者结合电阻抗重构图像数据的特点,对最佳匹配点算法中的梯度和梯度方向角计算公式作了改进;3)利用找到的最佳匹配点对待插值点线性插值。

1.1 插值前数据预处理

电阻抗成像重构二维图像时使用了有限元剖分,得到的重构数据是剖分后的三角形单元顶点坐标及三角形的电导率值。为便于插值,将共用一个顶点的所有三角形电导率的平均值赋给该顶点,遍历所有三角形单元得到所有顶点的电导率值。再将三角形单元网格化,判断网格点所在的三角形单元,并用该三角形顶点的电导率值插值得到网格点的电导率值。图像插值时,网格化后的网格点对应于传统匹配插值算法^[8]中的像素,网格点的电导率值对应于传统匹配插值算法^[8]中的灰度值。

1.2 确定最佳匹配点对

图 1 中 S_k 和 S_{k+1} 是相邻两幅图像切片,即第 k 层图像和第 $k+1$ 层图像。在 S_k 和 S_{k+1} 中分别选取宽度为 $W \times W$ 的窗口,其中 a 和 a' , b 和 b' , c 和 c' 是匹配点对。

一般最佳匹配点对的要求如文献^[11]所述,由此构造匹配度计算函数如下:

$$R_{m,n} = (v(x_m, y_n, z_k) - v(x'_m, y'_n, z_{k+1}))^2 + (D_{m,n,k}(x_m, y_n, z_k) - D_{m,n,k+1}(x'_m, y'_n, z_{k+1}))^2 + (\theta_{m,n,k}(x_m, y_n, z_k) - \theta_{m,n,k+1}(x'_m, y'_n, z_{k+1}))^2 + [\sqrt{(x_m - x'_m)^2 + (y_n - y'_n)^2}]^2 \quad (1)$$

上式计算匹配点对 $P_k(x_m, y_n, z_k)$ 和 $P_{k+1}(x'_m, y'_n, z_{k+1})$ 间的匹配程度。 $P_k(x_m, y_n, z_k)$ 是根据传统匹配算法^[8]中的匹配点选取公式获得, $P_{k+1}(x'_m, y'_n, z_{k+1})$ 是依据文献^[15]中计算匹配点位置公式得到。 $v(\cdot)$ 是网格点的电导率值, $D_{m,n,k}$ 是网格点的电导率梯度值, $\theta_{m,n,k}$ 是网格点的电导率梯度方向, $\sqrt{(x_m - x'_m)^2 + (y_n - y'_n)^2}$ 是匹配点对 $P_k(x_m, y_n, z_k)$ 和 $P_{k+1}(x'_m, y'_n, z_{k+1})$ 在 xy 平面上的投影距离。

1.2.1 对梯度计算公式的改进

传统的灰度梯度计算公式^[11]如下:

$$D(x, y, z) = \sqrt{\left[\frac{v(x+1, y, z) - v(x-1, y, z)}{2}\right]^2 + \left[\frac{v(x, y+1, z) - v(x, y-1, z)}{2}\right]^2 + \left[\frac{v(x, y, z+1) - v(x, y, z-1)}{2}\right]^2} \quad (2)$$

式(2)中 $v(\cdot)$ 为点的灰度值,对应于网格点的电导率值,该式计算 x 方向的梯度变化和 y 方向的梯度变化时,分别使用待计算点相邻两侧沿 x 方向和 y 方向的点。如图 1 中计算 b 点梯度值时使用 x 方向的 c 点和 d 点, y 方向的 e 点和 f 点。

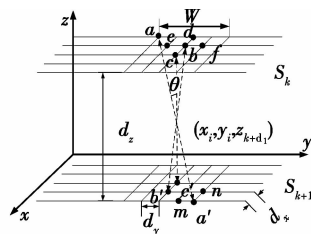


图 1 匹配点示意图

如果待计算点相邻两侧中的一侧在 x 方向或者 y 方向上没有相邻点则视为边界点,当待插值点在上下两层对应的窗口中存在边界点时,该边界点的梯度将无法计算,同时也无法计算匹配函数值,该插值方法就不能插值此待插值点。电阻抗成像重构数据网格化后的网格点数据有限,如果继续使用式(2)则会减少真正用于插值的数据,不利于后续的三维重建。因此,再结合网格点 x, y, z 方向的间距将式

(2)修改如下:

$$D = \sqrt{\left[\frac{v(x+1,y,z) - v(x,y,z)}{d_x}\right]^2 + \left[\frac{v(x,y+1,z) - v(x,y,z)}{d_y}\right]^2 + \left[\frac{v(x,y,z+1) - v(x,y,z)}{d_z}\right]^2} \quad (3)$$

如图 1 所示, d_x, d_y 分别是两个邻近网格点间 x 和 y 方向的距离, d_z 是图像层间距离。当待插值点对应的上下两层窗口中有边界点时,只利用边界点和边界内与其相邻的点计算梯度值。当窗口中的点落在右边界或下边界时,用该边界点以及其相邻左边或上边的点计算梯度值。如计算图 1 中点 a' 的梯度值时,使用点 m 和点 n 。窗口中的点落在左边界或上边界也做同样的处理。当待插值点为边界点时,使用其在上下层中沿 z 轴的直接对应点线性插值得到。

1.2.2 梯度方向角计算公式的改进

$\theta_{m,n,k}$ 是网格点的电导率梯度方向角,如图 1 中的 θ 角,点 a 和点 a' 是一对匹配点。文献[15]使用反正切函数求得,并没有考虑 z 轴的影响,笔者是计算匹配点对的连线与 z 轴的夹角,公式如下:

$$\theta_{m,n,k} = \arccos\left(\frac{|v(x_m, y_n, z_k) - v(x'_m, y'_n, z_{k+1})|}{d_z D_{m,n,k}}\right) \quad (4)$$

其中 $D_{m,n,k}$ 是式(3)得到的电导率梯度值,点 (x_m, y_n, z_k) 和点 (x'_m, y'_n, z_{k+1}) 是一对匹配点。当电导率梯度值为 0 时,电导率梯度方向角设为 0。

得到每对匹配点的匹配度函数值后,选取匹配度函数值最小的一一对应点作为最佳匹配点对。

1.3 插值待插值点

找到最佳匹配点对后,利用线性插值对待插值点插值得到其电导率值,从而插值出整幅图像。

$$v(x_i, y_j, z_{k+d_1}) = \frac{d_2}{d} v(x_m, y_n, z_k) + \frac{d_1}{d} v(x'_m, y'_n, z_{k+1}) \quad (5)$$

其中 $P_k(x_m, y_n, z_k)$ 和 $P_{k+1}(x'_m, y'_n, z_{k+1})$ 为最佳匹配点对; d_1 为待插值图像到上层图像的距离; d_2 为待插值图像到下层图像的距离。

2 插值结果及算法验证

2.1 插值结果

实验开发环境为 Visual C++6.0,实验模型是浸泡在圆柱体水槽中电导率为 2.1 S/m 的圆柱体异物,如图 2 所示,圆柱形水槽的上表面是电极阵列,底部是背电极。图 3 是圆柱体异物在圆柱形水槽中的位

置和尺寸,圆柱体上表面距水槽上表面 0.5 mm,圆柱体异物的半径为 0.8 mm,高度为 0.68 mm。沿圆柱体直径方向在每排电极阵列正下方获得 8 片切片,由一步牛顿法重构得到二维图像。插值后共有 15 片切片数据,即每相邻两层之间插值出一层新图像。

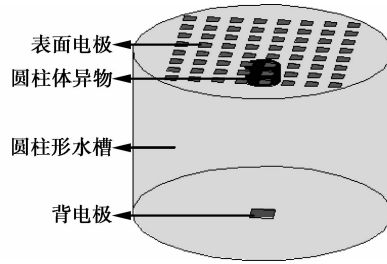


图 2 原模型

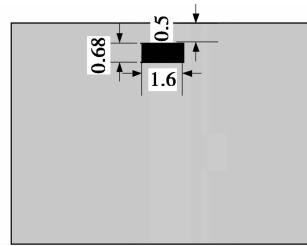


图 3 圆柱体异物的位置及尺寸

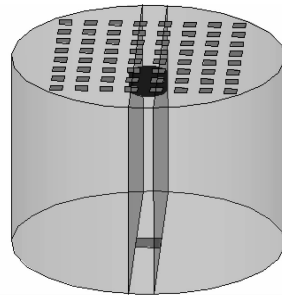


图 4 用于插值算法的两相邻切片模型

图 5(a)、(c)是图 4 所示模型中的两相邻原始切片,(b)是对(a)和(c)应用笔者所述插值算法插值得到的新图像。其中黑色部分是原模型中的圆柱体异物,图像的灰度值对应网格点的电导率值。可以看出,从形状轮廓上新图像(b)呈现出(a)到(c)的过渡,基本无变形,而且也保持了电导率值。

2.2 插值算法验证

为验证匹配点灰度插值算法的有效性,取连续的 3 幅原始图像记为 I_1, I_2, I_3 。由两幅原始图像 I_1 和 I_3 插值出新的第 2 幅图像,并以原图 I_2 为标准 and 线性插值方法及文献[16]中提到的形状插值得到的结果进行比较。

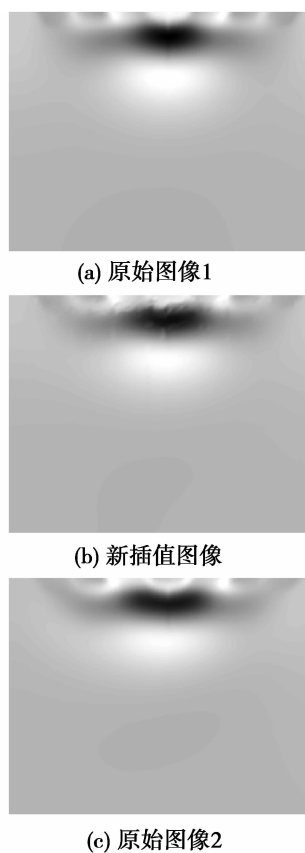


图 5 插值结果

笔者采用均方差和算法的运行时间^[17]来评判

算法,均方差由 $\sigma = \frac{1}{N} \sum (v(x,y,z) - v'(x,y,z))^2$

得到,其中 N 是图像中的点数, $v(x,y,z)$ 是插值后图像中点的电导率值, $v'(x,y,z)$ 是原图像中点的电导率值。算法的比较结果见表 1。

表 1 插值算法比较

| 比较项目 | 线性插值 | 笔者算法 | 文献[16] 形状插值 |
|------------------------------|-----------|-----------|----------------|
| 均方差/ ($S \cdot m^{-1}$) | 0.003 265 | 0.002 351 | 0.001 956 |
| 相对计算时间 | 1 | 253.12 | 1 020.23 |

由表 1 可知,笔者算法明显优于线性算法,而文献[16]中形状插值算法的均方差比笔者算法好,但耗时长。所以笔者用到的基于匹配点的插值算法兼顾插值精度和计算效率,符合电阻抗成像监护要求。

3 三维重建

对原始的 8 幅电阻抗图像插值,每两层插值出一层新图像,得到的插值后的 15 幅大小为 81×86 的电阻抗成像仿真重构切片作为三维重建的数据来

源。在 MATLAB R2008a 环境下,调用 `isosurface` ($x,y,z,D,isovalue$) 函数^[18]提取等值面绘制得到,其中 x,y,z 分别是体数据的 x,y,z 坐标值,大小为 $81 \times 86 \times 15$ 的矩阵, D 是体数据中点的电导率值,大小为 $81 \times 86 \times 15$ 的矩阵, $isovalue$ 是根据电导率值设置的所要提取的等值面值,三维图像如图 6,7 所示。

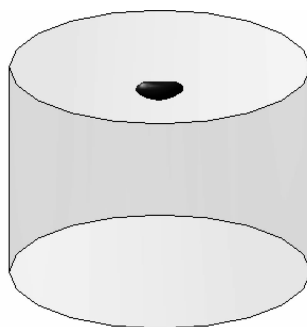


图 6 三维重建结果

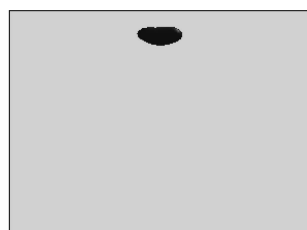


图 7 三维重建物体的位置及尺寸

图 6 是三维重建后得到的三维模型,由图 7 可知重建结果很好地反映了原物体的位置特点,这对诊断病变位置有极大意义。但在模型形状上,原模型中是圆柱体,三维重建的结果却是稍微扁圆的物体。主要是以下原因造成的,在图 2 的模型中,沿上表面电极注入电流,由背电极接收,由于上表面电极和背电极的位置关系,流经圆柱体异物的电流并非垂直于圆柱底面,而是倾斜的。二维重构的图像是与圆柱底面垂直的,忽略了这一倾斜角度,因而造成二维重构图像与原模型的圆柱体切面有差异,三维重建后的物体也与原模型的圆柱体异物有差异。

4 结 语

笔者对电阻抗成像的二维重构断层图像序列进行图像间插值,并对插值后的体数据进行三维重建。结合了电阻抗二维重构计算时间短和三维重构可以得到体素电导率的优点,同时便于临床 EIT 监护。针对电阻抗重构数据的特点对插值算法的梯度和梯度方向角计算公式作了改进。插值出的新图像体现

了图像层间缺失的信息,在电导率数值信息和形状上都有体现。并通过与线性插值和文献[17]中形状插值算法的对比可知,笔者算法可以兼顾插值精度和时间的要求,适合 EIT 图像插值。三维重建结果可以较好地反映原模型中圆柱体异物的位置特点。为提高精度,呈现更多的图像层间信息,笔者还可以在相邻图像间多插值几幅图像。

参考文献:

- [1] Yorkey T J. Comparing reconstruction methods for electrical impedance tomography [M]. Wisconsin: University of Wisconsin; Madison, 1986.
- [2] Chen S J, Kou G, Jiang A X. Calculation and simulation of the Jacobian matrix in electrical impedance tomography [J]. Proceedings of SPIE, 2008,10:35-40.
- [3] Choi M H, Kao T J, Isaacson D, et al. A reconstruction algorithm for breast cancer imaging with electrical impedance tomography in mammography geometry [J]. IEEE Transactions on Bio-medical Engineering, 2007, 54(4):700-710.
- [4] Boverman G, Kao T J, Kulkarni R, et al. Robust linearized image reconstruction for multifrequency EIT of the breast [J]. IEEE Transactions on Medical Imaging, 2008,27(10):1439-1448.
- [5] 李久平, 袁益让. 三维电阻抗成像的体积元方法的数值模拟和分析[J]. 计算数学, 2008,30(1):59-74.
LI Jiuping, YUAN Yirang. Simulation and analysis of finite volume method for 3-dimensional electrical impedance tomography [J]. Mathematica Numerica Sinica, 2008,30(1):59-74.
- [6] 吴焕丽, 徐桂芝, 张帅, 等. 基于圆柱模型的三维电阻抗成像问题研究[J]. 山东大学学报:理学版, 2009, 44(5): 45-48.
WU Huanli, XU Guizhi, ZHANG Shuai, et al. Research of the three-dimensional electrical impedance tomography based on the cylinder model[J]. Journal of Shandong University: Natural Science, 2009, 44(5): 45-48.
- [7] Zimmermann E, Kemna A, Berwix J, et al. EIT measurement system with high phase accuracy for the imaging of spectral induced polarization properties of soils and sediments [J]. Measurement Science and Technology, 2008,19(9):1-9.
- [8] 缪斌和, 邓元木, 黄斐增, 等. 基于对应点匹配的断层图像三维插值方法[J]. 中国医学物理学杂志, 2000, 17(1):14-16.
MIAO Binhe, DENG Yuanmu, HUANG Feizeng, et al. Interpolation of 3-D images based on point matching [J]. Chinese Journal of Medical Physics, 2000,17(1): 14-16.
- [9] Zhang Q L, Shen W, Sun Q, et al. Shape-based interpolation of CT image with window technology[C]// Proceedings of the 2010 International Conference on Computer Application and System Modeling, October 22-24, 2010, Taiyuan, China. Piscataway: IEEE Press, 2010, 4: 536-538.
- [10] Su C Y, Lin Y S. Colour interpolation using wavelet-based classifiers[J]. Electronics Letters, 2007,43(12):667-669.
- [11] 邹鹏程, 尹学松. 基于断层图像分割的三维匹配插值[J]. 计算机工程与应用, 2004, 40(24):80-82.
ZOU Pengcheng, YIN Xuesong. 3-D matching interpolation based on images segmentation [J]. Computer Engineering and Applications, 2004, 40(24):80-82.
- [12] Kalar D J, Garrigan P, Wickens T D, et al. A unified model of illusory and occluded contour interpolation [J]. Vision Research, 2010,50(3):284-299.
- [13] Hadad B S, Maurer D, Lewis T L. The development of contour interpolation: evidence from subjective contours [J]. Journal of Experimental Child Psychology, 2010,106(2): 163-176.
- [14] Albu A B, Beugeling T, Laurendeau D. A morphology-based approach for interslice interpolation of anatomical slices from volumetric images [J]. IEEE Transactions on Bio-medical Engineering, 2008,55(8): 2022-2038.
- [15] 吴健, 崔志明, 叶峰, 等. 基于轮廓形状的 CT 断层图像插值[J]. 计算机应用与软件, 2008,25(11):63-65.
WU Jian, CUI Zhiming, YE Feng, et al. Interpolation based on contour shape for CT faulted images [J]. Computer Applications and Software, 2008,25(11):63-65.
- [16] 钱进. 一种新的基于形状的灰度图像插值方法[D]. 吉林: 吉林大学, 2007.
- [17] 马建林, 崔志明, 龚声蓉, 等. 一种基于 ROI 的自适应 3 维医学图像插值方法[J]. 中国图象图形学报, 2008, 13(8):1525-1531.
MA Jianlin, CUI Zhiming, GONG Shengrong, et al. A novel adaptive 3D medical image interpolation method using ROI [J]. Journal of Image and Graphics, 2008, 13(8): 1525-1531.
- [18] 徐飞翔, 吴秀清, 胡拥军. 在 Matlab 环境下实现体绘制法的生物切片图象的三维重建[J]. 计算机工程, 2001,27(12):114-115.
XU Yunxiang, WU Xiuqing, HU Yongjun. 3D rebuilding of biology slice image by volume rendering in matlab [J]. Computer Engineering, 2001,27(12):114-115.