

电阻抗断层 成像中图像重建的研究

作者：侯卫东
专业：通信与信息系统
导师：莫玉龙



上海大学出版社

N533
Y302
2002

论文

电阻抗断层成像中图像重建的研究

作 者： 侯卫东

专 业： 通信与信息系统

导 师： 莫玉龙

上海大学出版社

· 上海 ·

N533
Z302
2002

Shanghai University Doctoral Dissertation (2002)

Study on Image Reconstruction in Electrical Impedance Tomography

Candidate: Hou Weidong

Major: Communication and Information System

Supervisor: Prof. Mo Yulong

Shanghai University Press

• Shanghai •

上海大学

本论文经答辩委员会全体委员审查，确认符合上海大学博士学位论文质量要求。

答辩委员会名单：

主任：何永保	教授，复旦大学	200433
委员：许鹤群	教授，东华大学	200051
王成道	教授，华东师范大学	200062
王汝竺	研究员，中科院上海技物所	200083
张兆扬	教授，上海大学	200072
导师：莫玉龙	教授，上海大学	200072

评阅人名单:

张立明	教授, 复旦大学	200433
汪源源	教授, 复旦大学	200433
施鹏飞	教授, 上海交通大学	200030

评议人名单:

王汝荃	研究员, 中科院上海技物所	200083
王朔中	教授, 上海大学	200072
王成道	教授, 华东师范大学	200062
严壮志	教授, 上海大学	200072

答辩委员会对论文的评语

电阻抗断层成像 (EIT) 技术能充分利用人体阻抗所携带的丰富的生理和病理信息实现功能性成像,它是近年来发展迅速的医学影像诊断技术之一。EIT 图像重建方法涉及数学、电子技术、计算机和医学成像等多种学科,论文选题在前沿性、创新性、跨学科性等方面具有重要的学术意义和应用价值。

论文以乳腺肿瘤检测应用为背景,从提高 EIT 成像精度和空间分辨率的目标出发,重点研究了 EIT 图像重建方法。在深入分析有限元法 (FEM) 解 EIT 正问题的基础上,提出了一种能提高局部成像分辨率的自动生成非均匀离散网格的算法,以及利用人工神经网络的非线性映照功能、正则化技术以及遗传算法的优化功能,创造性地提出了四种新的动、静态 EIT 图像重建方法:

(1) 基于改进 BP 算法的神经网络重建动态 EIT 图像的方法;

(2) 基于空间滤波理论的正则化静态 EIT 图像重建方法;

(3) 基于神经网络的静态 EIT 图像迭代重建方法;

(4) 基于遗传算法的静态 EIT 图像重建方法。在 EIT 数据采集系统的实验平台验证了以上方法能有效地提高成像精度。

论文立论正确、论证充分,内容详实、条理清晰、文笔流畅,学风严谨,实验数据可靠。表明侯卫东同学具有扎实的理论基础和系统的专业知识,独立科研工作能力强。在答辩中能正确地回答问题,答辩委员会认为该论文达到博士学位论文水平。

答辩委员会表决结果

通过无记名投票表决，一致同意通过侯卫东同学的论文答辩，并建议校学位委员会授予工学博士学位。

答辩委员会主席：**何永保**

2002年3月20日

摘 要

电阻抗断层成像 (EIT) 技术能充分利用人体阻抗所携带的丰富的生理和病理信息实现功能成像, 它具有对人体检测无创无害, 成像设备成本低廉等优点, 使得 EIT 已成为当今医学成像研究的热点. EIT 图像重建是一个严重病态的非线性的逆问题, 它是 EIT 技术的关键和难点. 本文首先探讨了 EIT 图像重建的数理模型, 研究了基于有限元法 (FEM) 的 EIT 正问题分析, 提出了自动生成离散网格的算法; 然后我们设计了一套 EIT 数据采集实验系统, 并对此实验系统的数据采集精度做了实验分析; 最后分别提出了四种全新的动态和静态 EIT 图像重建方法, 理论分析和实验结果都显示了四种方法在 EIT 图像重建中所表现的优越性能.

论文的主要成果包括:

(1) 在基于 FEM 的 EIT 正问题分析中, 提出了一种自动生成离散网格的算法, 此算法不仅能对圆形区域的内外层实现非均匀剖分, 而且能实现对任意单元进行一分为四的细分, 基于 FEM 的 EIT 正问题的高效解决为后续逆问题的解决打下了坚实的基础, 特别是对成像局分辨率的提高提供了保证.

(2) 由于传统的等位线逆投影法和敏感系数法在重建动态 EIT 图像时采用的是近似的线性重建模型, 导致重建误差很大, 本文提出一种基于改进 BP 算法的神经网络重建动态 EIT 图像的新方法, 它的核心内容就是用 BP 神经网络来表征区域内部阻抗变化位置与外围电压变化大小的非线性关系, 从而可以根据对边界电极测量电压变化数据准确定位阻抗变化位置, 再利用线性近

似法重建出较为精确的阻抗变化图像. 实验结果表明利用此新方法重建的动态 EIT 图像的精度和局部空间分辨率高于传统方法.

(3) 本论文提出一种基于空间滤波理论的正则化静态 EIT 图像重建方法, 它利用阻抗分布图像的空间相关特性, 设计一种低通滤波算子, 再根据低通滤波算子计算出正则化算子, 对于一个给定的 FEM 离散模型, 只需计算正则化算子一次, 其实现复杂度低于最大后验 (MAP) 正则化方法, 重建误差比基于奇异值分解 (SVD) 的正则化方法和标准的 Tikhonov 正则化方法要小. 实验结果也显示了基于空间滤波理论的正则化静态 EIT 图像重建方法的良好性能.

(4) 本文提出一种基于神经网络的迭代方法重建静态 EIT 图像, 它无需建立区域阻抗变化大小与外围电压变化大小之间的非线性关系的数学解析式模型, 从而避免了求解病态条件方程和正则化处理, 它用 BP 神经网络来近似描述这种非线性关系, 神经网络的训练集从 FEM 正问题对应解中选取, 为了使网络能快速收敛, 加入一些先验已知条件是必要的, 实验结果表明在加入先验条件下, 应用基于神经网络的迭代重建法比正则化的 Newton-Raphson 重建法重建的静态 EIT 图像精度要高.

(5) 本文提出一种基于遗传算法的静态 EIT 图像重建方法 (GA-EIT), 它完全不同于传统的基于目标函数梯度或高阶导数信息的 Modified Newton-Raphson (MNR) 优化迭代算法. 因为遗传算法是在保持一个潜在解的种群中进行多方向搜索, 而且对解的更新采用概率的转移规则, 搜索过程不依赖问题本身, 因此它更有能力搜索出问题的全局最优解. 实验结果表明, 在一般抗噪要求下, 应用 GA-EIT 重建算法重建的静态 EIT 图像精度和空间分辨率都大大好于传统的 MNR 算法.

(6) 应用我们设计的 EIT 数据采集硬件实验系统, 实现了全部的动态 EIT 和静态 EIT 图像重建算法, 通过与传统重建方法进行实验比较, 验证了本文提出的四种重建方法的优越性能, 而且通过与模拟测量数据实验进行比较, 也验证了硬件系统设计的正确性。

关键词 电阻抗断层成像, 图像重建, 有限元法, 神经网络, 遗传算法, 正则化

Abstract

Electrical impedance tomography (EIT) is a functional imaging technique, which may reveal the physiological and pathological information by human body's impedance properties. The advantages such as the non-invasive modality and the relative low cost make EIT become a research hot in medical imaging. However, the image reconstruction in EIT is a high ill-posed, non-linear, inverse problem, and it becomes a key and difficult point in EIT. In the dissertation, the mathematical and physical models of the image reconstruction in EIT is firstly discussed, meanwhile, the analysis of the forward problem of EIT based on the finite element method (FEM) is studied, and then we provide an algorithm for automatic mesh generation. Later, we design a data collection experimental system of EIT, and analyze its measurement precision by experiments. Finally, the four novel image reconstruction methods for the dynamic and static EIT are proposed, and their good performances are testified by the theory analysis and the experimental results.

The achievements of the dissertation include:

(1) In the analysis of the forward problem of EIT based on FEM, an algorithm for automatic mesh generation is provided. It can not only discrete a round area into numbers of triangle elements non-uniformly, but also further fine-mesh any element into 4 triangle parts. The algorithm implementation provides a foundation for

solving the inverse problem of EIT, and a guarantee for increasing the local spatial resolution of the image reconstruction in EIT.

(2) Due to their linear reconstruction models, the reconstruction error is very large when the back-projection method between equipotential lines and the sensitivity method are used in the image reconstruction in EIT. A new image reconstruction method for dynamic EIT based on the improved BP neural network is proposed in this dissertation. In the new method a neural network based on the improved BP algorithm is used to express the non-linear relation between the impedance change position and the voltage variation measured at the object's boundary. When our new method used in dynamic EIT, the impedance change position can be determined by the measured data at the electrodes and then the dynamic image can be reconstructed precisely with the linear approximation method. The experimental results indicate that our new method is better than the traditional method in increasing the precision and local spatial resolution of dynamic EIT.

(3) A regularized image reconstruction method for static EIT based on the spatial filtering theory is proposed. In the new method, the low-pass filtering operator is designed according to the spatial correlation character of the impedance distribution images, and then the regularization operator is computed by the low-pass filtering operator. In our regularization method, the regularization operator is needed to compute only once, as to one reconstruction model of the EIT problem, so it achieves a lower implementation complexity than maximum a posteriori (MAP) regularization method. The

reconstruction error with our regularization method is smaller than with the method based on the truncated singular value decomposition (SVD) and the standard Tikhonov regularization method. The good performance of our regularization method is also testified by the experimental results.

(4) An iterative image reconstruction method for static EIT based on neural network is presented in this dissertation, in which it need not make a mathematical expression for the non-linear relation between the impedance changes inside the object and the voltage changes at the boundary of the object. The BP neural network is used to express the non-linear relation in our new method. The training set of the neural network is chosen from the solutions of the forward problem of EIT. In order to make the neural network converge quickly, we need to add a priori knowledge to the training process. The experimental results indicate that the precision of the reconstructed images in static EIT with our new method is much higher than with the regularized Newton-Raphson method with a priori knowledge.

(5) A new static image reconstruction method for EIT based on genetic algorithm (GA-EIT) is proposed in this dissertation. It is quite different from the traditional modified Newton-Raphson (MNR) iterative method based on minimizing the object function. The global optimized solution will be converged with high possibility, because genetic algorithm searches the solution among the population of the possible solutions in multi-directions and refreshes the possible solution by the probability rule independent on the

problem. The experimental results also indicate that the precision and the spatial resolution in reconstructing images of static EIT with the GA-EIT method are higher than with the MNR method.

(6) We implement the total image reconstruction algorithms for dynamic and static EIT in our data collection experimental platform. The good performances of our four image reconstruction methods for EIT are verified by experiments in our hardware system, when they are compared with the other traditional methods. Furthermore, the reliability of our hardware system is validated by the comparing experiments with the computer simulation results.

Key words electrical impedance tomography, image reconstruction, finite element method, neural network, genetic algorithm, regularization

目 录

第一章 绪 论	1
1.1 电阻抗断层成像研究的意义	1
1.2 EIT 的研究动态	3
1.3 论文研究内容及编排	8
第二章 EIT 图像重建的数理模型	13
2.1 生物组织的阻抗特性分析	13
2.2 EIT 图像重建的数理模型	14
2.3 EIT 图像重建的正问题分析	17
2.4 EIT 图像重建的逆问题分析	26
2.5 小 结	26
第三章 EIT 数据采集系统	28
3.1 数据采集方式	28
3.2 系统设计	31
3.3 数据采集结果分析	35
3.4 小 结	37
第四章 动态 EIT 图像重建	38
4.1 动态 EIT 图像重建原理	38
4.2 基于 BP 神经网络的动态 EIT 图像重建方法	41
4.3 实验结果	48
4.4 神经网络在动态 EIT 中的应用分析	54
4.5 小 结	57

第五章 正则化的静态 EIT 图像重建	59
5.1 引 言	59
5.2 静态 EIT 图像重建原理	59
5.3 静态 EIT 图像重建的病态特性分析	61
5.4 基于空间滤波理论的正则化重建法	62
5.5 实验结果	65
5.6 小 结	71
第六章 基于神经网络的静态 EIT 图像重建	72
6.1 神经网络在静态 EIT 图像重建中的应用	72
6.2 基于 BP 神经网络的迭代重建算法	73
6.3 实验结果	75
6.4 小 结	81
第七章 基于遗传算法的静态 EIT 图像重建	82
7.1 引言	82
7.2 遗传算法	83
7.3 基于遗传算法的静态 EIT 图像重建方法	85
7.4 实验结果	87
7.5 GA-EIT 重建方法小结	94
7.6 静态 EIT 图像重建方法的比较	94
第八章 总结与展望	96
8.1 论文工作的回顾	96
8.2 尚需解决的问题和对未来的展望	98
参考文献	101
致 谢	121

第一章 绪 论

1.1 电阻抗断层成像研究的意义

电阻抗断层成像(Electrical Impedance Tomography – EIT)是通过对生物体表面的电测量来重建反映生物体内结构及组织器官功能的新颖医学影像技术. 自从 1976 年美国学者 Swanson 首先提出电阻抗成像方法以来, EIT 技术引起了生物医学界极大的关注^[1-8].

基于对生物组织电性能的研究^[9,10], 人们发现人体不同器官组织的阻抗分布不同, 下表为人体部分器官组织在 20 ~ 100 kHz 频率下表现的阻抗分布值^[11]:

表 1.1 20 ~ 100 kHz 频率下人体部分器官组织的阻抗分布值

组织	阻抗($\Omega \cdot \text{cm}$)
脑髓	65
淋巴液	66
血液	150
肝脏	350
心肌	410~750
神经组织	580
脂肪	2060
骨骼	16600