

电阻抗成像正则化算法的优化

李冬晔¹, 康彬²

(1. 南京邮电大学 电子科学与工程学院, 江苏 南京 210003;

2. 南京邮电大学 信号处理与传输研究院, 江苏 南京 210003)

摘要:电阻抗成像技术是一种以人体内部电导率分布为成像目标的医学成像技术。该技术具有非入侵、无损伤、实时成像、系统结构简单、设备价格较低等优点。但其成像反问题的求解中存在严重的不适定性,和主流医学成像技术相比,其成像分辨率不高。针对电阻抗成像中传统 Tikhonov 正则化分辨率低及边界模糊的问题,文中将归一化测量电压的总变差作为正则化函数,根据电阻抗图像中非均匀的电导率具有稀疏性的特点,提出一种新颖的电阻抗成像的正则化优化算法。电导率分布的求解是通过两步迭代阈值算法(TwIST)完成。通过对模拟域的不同部位及域内数量不等的成像目标进行仿真,测试了该算法的性能。计算机仿真结果表明,所研究的正则化优化算法适用于生物医学成像应用,它可显著改善成像质量和边界分辨率。

关键词:电阻抗成像;正则化;反问题;两步迭代阈值算法

中图分类号:TP301.6

文献标识码:A

文章编号:1673-629X(2016)05-0188-03

doi:10.3969/j.issn.1673-629X.2016.05.041

Optimization of Electrical Impedance Tomography Regularization Algorithm

LI Dong-ye¹, KANG Bin²

(1. Institute of Electronic Science and Engineering, Nanjing University of Posts & Telecommunications,
Nanjing 210003, China;

2. Institute of Signal Processing and Transmission, Nanjing University of Posts & Telecommunications,
Nanjing 210003, China)

Abstract:Electrical Impedance Technology (EIT) is a kind of medical imaging technology taking the human's conductivity distribution as the target. There are lots of advantages belonged to this technique such as non-invasive, no damage, real-time imaging, simple system structure and lower price. But there are still serious ill-posed in solving its inverse problem. So compared with the mainstream medical imaging technology, its imaging resolution is not good. Aiming at solving the low resolution and blurry boundaries in electrical impedance tomography where the traditional Tikhonov regularization is used, a new optimization regularization algorithm is proposed in this paper. It takes the total variation of the normalized measured voltage as the regularization function and takes account of the inhomogeneous conductivity's sparse characteristics in electrical impedance image. The Two-step Iterative Shrinkage/Threshold (TwIST) algorithm is considered to solve the conductivity distribution. The performance of this new algorithm is tested through the different parts and different numbers of imaging targets in the analog domain. The simulation shows that the studied regularization algorithm for biomedical imaging application can significantly improve the image quality and boundary resolution.

Key words:electrical impedance tomography; regularization; inverse problem; two-step iterative shrinkage/thresholding algorithms

0 引言

电阻抗成像技术(Electrical Impedance Tomography, EIT)是一种以人体内部电导率分布为成像目标的医学成像技术^[1-2]。通过附着在皮肤表面的电极

将较小的安全交流电流注入人体,并测量电极上的对应电压,利用相应的算法得到人体内部电阻率的分布。EIT技术能在病理变化的初期和恢复期检测到身体组织的阻抗分布变化,这有助于提早发现疾病,且对人体

收稿日期:2015-06-18

修回日期:2015-09-23

网络出版时间:2016-04-04

基金项目:国家自然科学基金资助项目(60671065)

作者简介:李冬晔(1991-),女,硕士研究生,研究方向为电磁计算、生物电阻抗成像。

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1450.TP.20160505.0815.034.html>

无害,可反复使用。但和主流医学成像技术相比,电阻抗成像技术的图像分辨率较低^[3-4]。

理论分析和实践计算表明,EIT 图像重建问题是一个非线性病态问题,解存在严重不稳定性(微小误差即能引发解的大幅波动)^[5]。为了解决此病态性问题,在 EIT 图像重构中要采用正则化算法来改善其病态性,以得到稳定的解。目前广泛使用的是 Tikhonov 正则化算法,该算法通过构造 2 范数形式的正则函数来实现图像重构,其作用机理相当于空间滤波器^[6],通过对所重构的图像进行一定程度的平滑而使重构过程趋于稳定。此方法的不足在于图像重构过程会丧失一定的边界信息,使图像的目标区域与背景区域之间的边界难以准确区分。

随着压缩传感理论的发展,稀疏重建在信号恢复及图像重构领域受到了很大程度的关注。Tropp 等将稀疏解引入到线性反问题的求解中^[7],Bredies 等利用稀疏性求解阈值迭代中的最小化问题^[8]。受此启发,文中针对传统 Tikhonov 正则化图像分辨率低及边界模糊的问题,提出一种基于全变差的正则化优化模型。此算法能充分利用电导率分布具有稀疏先验性这一特征。所提出的优化模型可通过两步迭代阈值算法(TwIST),进行求解,实现图像重构。

1 EIT 系统基本工作原理

EIT 场域内的电位分布 φ 与电导率分布 σ 满足拉普拉斯方程^[9]。如果将场域剖分成有限个离散单元,且认为每个单元上的电导率是常数,则每个单元上的灵敏度方程都为线性方程,用矩阵表示如下:

$$\mathbf{g} = \mathbf{S}\mathbf{c} \quad (1)$$

其中: \mathbf{g} 为边界电压变化向量; \mathbf{c} 为离散的电导率向量; \mathbf{S} 为灵敏度矩阵(即雅可比矩阵)。

这样非线性问题就被简化成为线性问题,满足了大多数电导率变化不大的场合。由于实际每个剖分单元的电导率分布并不均匀,且式(1)待求解的方程中未知量个数远大于方程的个数,导致问题欠定,再则测量误差所引起的微小扰动将导致图像的解产生很大变化。所以求解过程不稳定,解析解难以直接得到。一般根据测量电极电压和用有限元模型正向计算得到的电压构造一个平方误差泛函,利用最小二乘法构造一系列方程组,从而得到反问题的解。

2 正则化算法

传统消除解不定性的方法是采用 Tikhonov 正则化。此方法的原理是寻找一个由先验信息约束的稳定的解集,然后在从中选择一个解,这是一种应用最普遍的解决病态反问题的方法,已广泛应用于 EIT 图像重

建^[6,10]。其基本思想即优化下述最小化目标函数:

$$f(c) = \frac{1}{2} \|\mathbf{g} - \mathbf{S}\mathbf{c}\|^2 + \mu\Phi(c) \quad (2)$$

式中: μ 为正则化因子; $\Phi(c)$ 为正则化函数,一般情况下 $\Phi(c)$ 采用 2 范数形式。

式(2)的意义在于求解的过程中使得偏差最小化的同时,又能使估计解与真实解保持足够的接近。该算法最大的不足为重构图像的边界模糊。

2.1 基于全变差的正则化优化模型

为了有效提高图像的重构精度,文中提出了一种基于全变差的正则化优化模型。全变差(TV)正则化法是 1992 年由 Rudin 等首次提出的一种正则化优化方法^[11]。由于这一方法能在图像重构时较完整保留图像的边界信息,因此它已广泛应用于图像去噪等领域^[11]。

将 TV 正则化方法应用于 EIT 图像重建^[12]是采用归一化测量电压的总变差作为正则化函数。其最小化目标函数表示为:

$$f(c) = \frac{1}{2} \|\mathbf{g} - \mathbf{S}\mathbf{c}\|^2 + \mu\Phi_{TV}(c) = \frac{1}{2} \|\mathbf{g} - \mathbf{S}\mathbf{c}\|^2 + \mu \sum_i \sqrt{(\Delta_i^1 c)^2 + (\Delta_i^2 c)^2} \quad (3)$$

其中, $\Delta_i^1 c$ 与 $\Delta_i^2 c$ 为电导率向量 $c = (c^1, c^2)$ 两个分量的差分运算^[13]:

$$\Delta_i^1 c = c_{i,j}^1 - c_{i-1,j}^1 \quad (4)$$

$$\Delta_i^2 c = c_{i,j}^2 - c_{i,j-1}^2 \quad (5)$$

式(3)的求解将直接关系到图像重构的精度。为了保证重构图像的鲁棒性,文中采用两步阈值迭代法求解式(3)的最小化问题。

2.2 两步迭代阈值法(TwIST)

两步迭代阈值算法^[14](Two-Step Iterative Shrinkage/Thresholding algorithm)结合了阈值迭代收缩算法(IST)和迭代加权收缩算法(IRS)的优点。根据 IST 算法,寻找最优化的 c_i 的表达式为:

$$c_{i+1} = (1 - \beta)c_i + \beta\Psi(c_i + S^T(\mathbf{g} - \mathbf{S}c_i)) \quad (6)$$

其中: \mathbf{S} 是灵敏系数矩阵(即雅可比矩阵); \mathbf{g} 是边界电压变化向量; c_i 为前一次迭代得到的离散电导率向量; Ψ 为去噪函数^[13]。

将 IRS 算法的迭代公式记为 $c_{i+1} = \text{solution} \{ \mathbf{A}_i \mathbf{c} = \mathbf{b} \}$, $\mathbf{A}_i = \lambda \mathbf{D}_i + S^T \mathbf{S}$, $\mathbf{b} = S^T \mathbf{g}$ 。 \mathbf{D}_i 由 c_i 和总变差函数 Φ 决定,是一个非负的对角阵。假设线性方程 $\mathbf{A}\mathbf{x} = \mathbf{b}$, \mathbf{A} 为非负矩阵,则 \mathbf{A} 可分解为 $\mathbf{A} = \mathbf{C} - \mathbf{R}$, \mathbf{C} 为易求逆的非负矩阵,则解可定义为:

$$\mathbf{x}_1 = \mathbf{x}_0 + \beta_0 \mathbf{C}^{-1}(\mathbf{b} - \mathbf{A}\mathbf{x}_0)$$

$$\mathbf{x}_{i+1} = (1 - \alpha)\mathbf{x}_{i-1} + \alpha\mathbf{x}_i + \beta\mathbf{C}^{-1}(\mathbf{b} - \mathbf{A}\mathbf{x}_i) \quad (7)$$

其中, α, β, β_0 都是算法的参数。

TwIST 算法结合了 IST 算法良好的去噪性能及 IRS 算法处理严重病态性矩阵的有效性。

令 $C = I + \lambda D_i, R = I - S^T S$, 则 $A = \lambda D_i + S^T S$ 。式 (8) 关于线性方程组 $A_i c = S^T g$ 的两步迭代解为:

$$c_{i+1} = (1 - \alpha)c_{i-1} + (\alpha - \beta)c_i + \beta C^{-1}(c_i + S^T(g - S c_i)) \tag{8}$$

将 α 置为 1, 用去噪函数 Ψ 代替矩阵 C^{-1} , 即可得到 TwIST 的解:

$$c_1 = \Gamma(0) \tag{9}$$

$$c_{i+1} = (1 - \alpha)c_{i-1} + (\alpha - \beta)c_i + \beta \Gamma(c_i) \tag{10}$$

$$\Gamma(c) = \Psi(c + S^T(g - S c)) \tag{11}$$

$$\Psi(c) = c - \frac{c + \nabla((\Delta_i^1 c + \Delta_i^2 c) - g)}{1 + |(\nabla((\Delta_i^1 c + \Delta_i^2 c) - g))|} \tag{12}$$

当 $0 < \alpha < 2, 0 < \beta < \frac{2\alpha}{\lambda_m}$ 时 (λ_m 是矩阵 $S^T S$ 的最大特征值), TwIST 算法收敛。

3 仿真对比实验

为了验证上述算法的有效性, 采用 Matlab 和 EIDORS 系统^[15-16] 建立如图 1 所示的模型。建立半径为 15 的圆形求解区域, 调用有限元剖分软件 QMG。考虑到计算精度及收敛时间, 在电流注入的边界, 这些场值较强的地方, 三角剖分比较密集, 而中间场值变化平缓的区域, 三角剖分相对稀疏。三角剖分得到 279 个节点, 492 个单元。

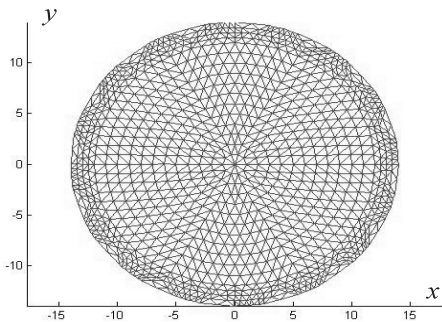


图 1 有限元剖分图

实验采用 16 电极, 全电极相邻激励模式。成像个数分别设置为一个、两个与三个, 成像位置分别设置在边界区域、中心区域。将成像目标的电导率设为 0.005 S/m, 圆域背景电导率设为 0.002 5 S/m, 给边界电压设置 40 dB 的噪声。详细的仿真结果如图 2 所示。

将两种正则化算法的重建图像与设定的电导率分布情况进行比较, 可以看出两种重建算法均能够对仿真模型设定的目标区域实现重建, 但重建的质量却不尽相同: TwIST 算法所得到的重建图像能够较好地确

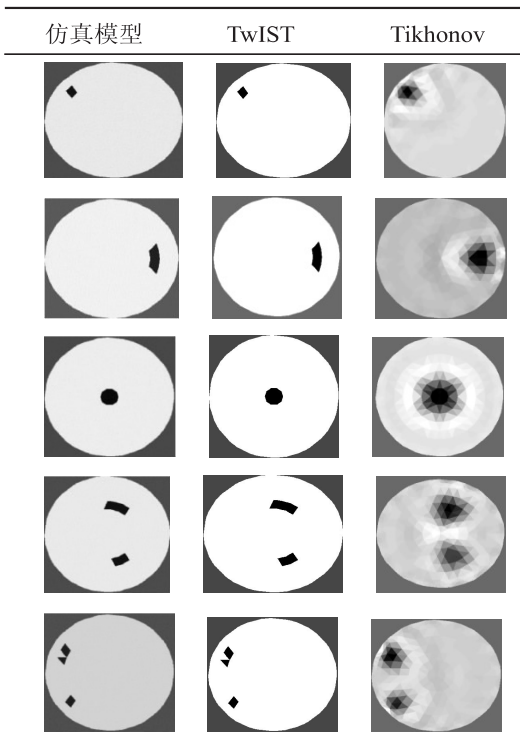


图 2 仿真模型及成像效果比较

定目标区域的位置、大小和形状, 且目标区域与背景的边界清晰, 图像分辨能力强; 而 Tikhonov 正则化算法得到的重建图像目标区域明显偏大, 边界模糊不清, 伪影较多。

上述对比说明, 采用 TwIST 算法后, 重建图像目标区域电阻率与背景区域的区别明显提高, 向目标区域的收敛集中程度进一步增强, 反映出了 TwIST 算法较常规的 Tikhonov 正则化技术有更佳的重建能力。

4 结束语

在生物医学应用中的电阻抗成像技术中, 由于其常规的 Tikhonov 正则化重建算法偏重于解决稳定性问题, 牺牲了成像边界的分辨率, 使得重建图像与真实情况有较大差别。文中运用了 TwIST 算法对 EIT 正则化问题进行优化, 重建结果表明该方法是有效的。与传统 Tikhonov 正则化算法相比, 该算法具有较好的分辨能力, 能有效地将目标区域的电导率与背景区域区分开, 所获得的重建图像质量有了一定的提高。利用稀疏性特征的两步迭代阈值算法 (TwIST) 对后续 EIT 技术的研究提供了一种新思路。

参考文献:

[1] 董秀珍. 生物电阻抗成像研究的现状与挑战[J]. 中国生物医学工程学报, 2008, 27(5): 641-643.
[2] 黄 嵩, 何 为. 电阻抗成像中混合罚函数正则化算法的仿真研究[J]. 计算机仿真, 2006, 23(4): 94-98.

向农业信息服务的单点登录系统性能更加优化。

参考文献:

- [1] 徐识溥,陈建林,程彬彬,等. 基于 HTTPS 协议的单点登录系统在农业技术综合知识库建设中的应用[J]. 农学学报, 2014,4(1):94-98.
- [2] 胡雅琴. 单点登录技术现状调查与分析[J]. 软件产业与工程, 2014(1):53-56.
- [3] 施正晔. SSO 单点登录模型的优化研究[J]. 计算机光盘软件与应用, 2012(7):191-191.
- [4] 王 娟,郑淑丽,方元康. 无证书隐式认证改进的 Kerberos 单点登录协议[J]. 计算机工程与应用, 2013,49(10):105-108.
- [5] 朱 青. 基于 CAS 的单点登录系统的设计与实现[D]. 北京:北京工业大学, 2014.
- [6] 龙毅宏,唐志红,王亚龙,等. 面向 HTTP 身份鉴别协议的单点登录透明集成技术研究[J]. 计算机应用研究, 2013, 30(9):2813-2818.
- [7] 吴贤平. 基于指纹识别和 CAS 的单点登录模型技术研究[J]. 计算机应用研究, 2012,29(4):1381-1383.
- [8] 骆嘉伟,唐国英. 区域卫生信息化中单点登录系统的设计

与实现[J]. 计算机应用, 2012,32(6):1782-1786.

- [9] 苏悦洪. 基于 CAS 协议的单点登录系统的研究与改进[D]. 广州:华南理工大学, 2014.
- [10] 李芳芳,王 帅,许舒人,等. 一种基于过滤器的遗留系统安全单点登录方案[J]. 计算机应用与软件, 2014,31(10):300-304.
- [11] 金伟祖,李平新. 基于 CAS 集群的单点失效问题解决方案[J]. 计算机工程, 2010,36(1):51-54.
- [12] Ordan Sissel. SSL handshake latency and HTTPS optimizations [EB/OL]. 2010. <http://www.semicomplete.com/blog/geekery/ssl-latency.html>.
- [13] Lewis K D,James E,Lewis J E. Web single sign-on authentication using SAML[J]. International Journal of Computer Science Issues, 2009,2:41-48.
- [14] Parker T A. Single sign-on systems the technologies and the products [C]//Proc of European convention on security and detection. [s. l.]:[s. n.], 1995:151-155.
- [15] Zhang Lei,Zhang Futai,Wu Qianhong,et al. Simulatable certificateless two-party authenticated key agreement protocol [J]. Information Sciences, 2010,180(2):1020-1030.

(上接第 190 页)

- [3] Boyle A J S,Adler A. The impact of electrode area,contact impedance and boundary shape on EIT images[J]. Physiological Measurement, 2011,32(7):745-754.
- [4] 常甜甜,魏雯婷,丛伟杰. 电阻抗成像的稀疏重建算法[J]. 西安邮电学院学报, 2013,18(2):92-96.
- [5] Saacson D,Isaacson E L. On an inverse boundary value problem[J]. Math Comput, 1989,52:553-559.
- [6] Vauhkonen M,Vadasz D. Tikhonov regularization and prior information in electrical impedance[J]. IEEE Transactions on Medical Imaging, 1998,17(2):285-293.
- [7] Tropp J A,Wright S J. Computational methods for sparse solution of linear inverse problems[J]. Proceedings of the IEEE, 2010,98(6):948-958.
- [8] Bredies K,Lorenz D A. Iterated hard shrinkage for minimization problems with sparsity constraints[J]. SIAM Journal on Scientific Computing, 2008,30(2):657-683.
- [9] 徐管鑫. 电阻抗成像技术理论及应用技术研究[D]. 重庆:重庆大学, 2004.
- [10] Sahinturk H. On the reconstruction of inhomogeneous surface

impedance of cylindrical bodies[J]. IEEE Transactions on Magnetism, 2004,40(2):1152-1155.

- [11] Rudin L I,Osher S,Fatemi E. Nonlinear total variation based noise removal algorithms[J]. Physical D, 1992,60:259-268.
- [12] 王化祥,唐 磊,闫 勇. 电容层析成像图像重建的总变差正则化算法[J]. 仪器仪表学报, 2007,28(11):2014-2018.
- [13] Chambolle A. An algorithm for total variation minimization and applications[J]. Journal of Mathematical Imaging and Vision, 2004,20:89-97.
- [14] Bioucas-Dias J M,Figueredio M A T. A new TwIST:two-step iterative shrinkage/thresholding algorithms for image restoration[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2007,16(12):2992-3004.
- [15] Vauhkonen M,Lionheart W R B,Heikkinen L M,et al. A MATLAB package for the EIDORS project to reconstruct two-dimensional EIT images[J]. Physiol Meas, 2001,22:107-114.
- [16] Field D A. Laplacian smoothing and Delaunay triangulations [J]. Commun Appl Numer Methods, 1998,4:709-712.