

RECONSTRUÇÃO DE IMAGENS DE TC DE IMPEDANCIA ELÉTRICA UTILIZANDO ALGORITMOS ITERATIVOS

M. P. V. Leão*, V. G. Macedo**

*Universidade Federal do Pará, Belém, Brasil
e-mail: maickson.leao@gmail.com

Resumo: Este trabalho explora os métodos iterativos de reconstrução em Tomografia Computadorizada (TC) *Algebraic Reconstruction Technique (ART)*, *Simultaneous Algebraic Reconstructive Technique (SART)* e o proposto por Cimmino, utilizando imagens de Tomografia por Impedância Elétrica (TIE), apenas para reconstrução, com auxílio do software Matlab. O objetivo é demonstrar e comparar os resultados das imagens reconstruídas pelos métodos, comprovando a melhora significativa da imagem final dos métodos SART e Cimmino em relação ao método ART. Os resultados apresentam imagens próximas das reais e em tempo hábil quando reconstruídas com os métodos SART e Cimmino, enquanto que as reconstruídas pelo método ART sofrem muito ruído.

Palavras-chave: Reconstrução, ART, SART, Cimmino, TC.

Abstract: *This paper explores the iterative methods of reconstructions in Computed Tomography (CT) Algebraic Reconstruction Technique (ART), Simultaneous Algebraic Reconstruction Technique (SART) and the proposed by Cimmino, utilizing images of Electrical Impedance Tomography (EIT), just to the reconstruction, with the assistance of Matlab software. In order to demonstrate and compare resulting images reconstructed by the methods, proving the significant improvement in the final image of the SART and Cimmino methods in relation to the ART method. The results presented images near of the real and on a few time when reconstructed with SART and Cimmino methods, while reconstructed by ART method suffer very noisy.*

Keywords: *Reconstruction, ART, SART, Cimmino, CT.*

Introdução

Dentre os métodos de reconstrução de imagens médicas, existem basicamente duas classificações, os métodos analíticos e os métodos iterativos. Os últimos são conhecidos por serem lentos em relação aos primeiros, porém é possível embutir nos métodos iterativos correções de atenuação [5], o que está diretamente relacionado com os métodos explorados deste trabalho.

O método ART é conhecido por sofrer os ruídos *salt* e *pepper* [1], e para minimizar estes ruídos são utilizados os métodos de SART e Cimmino em busca de uma melhor reconstrução. Sendo a precisão no

diagnóstico médico de grande importância na área de imagens médicas, este trabalho tem o objetivo de analisar de forma qualitativa e quantitativa os métodos simulados no software Matlab, encontrar a melhor solução dentre eles e assim contribuir para a extensa área de imagens médicas.

O caminho escolhido na modelagem dos métodos empregados levou em conta o modelo discreto que resultou num sistema linear. Assim, todos os métodos propostos resolvem o problema da reconstrução como um problema linear e por um sistema de equações lineares [2], [3], [6].

No desenvolvimento das seções a seguir, os métodos de reconstrução ART, SART e o proposto por Cimmino, serão apresentados matematicamente na seção Materiais e Métodos. Nesta seção também serão abordados os métodos métricos de avaliação de imagens *Peak Signal to Noise Ratio (PNSR)*, *Structural Similarity Index (SSIM)*, *Mean Square Error (MSE)* e uma estimativa básica do tempo de execução de cada algoritmo. Os correspondentes resultados das aplicações dos métodos descritos serão demonstrados na seção Resultados através de figuras e tabelas, e posteriormente serão explicados na seção discussão de forma crítica e conclusiva.

Materiais e métodos

Os métodos iterativos explorados neste trabalho consideram a resolução do problema da reconstrução de imagens médicas de forma linear. Por isso, as equações envolvidas se relacionam de forma que resolvam o seguinte problema:

$$b = Ax \quad (1)$$

ART - Os algoritmos de ART têm uma base simples e intuitiva. Cada densidade projetada é jogada para o outro lado do espaço de reconstrução onde as densidades são modificadas de forma iterativa para fazer cada projeção reconstruída de acordo com a projeção medida [7]. Considerando a imagem uma função $\hat{f}(x, y)$ discreta, haverá para cada pixel um valor constante a ser encontrado denotado como f_j , e M raios incidentes na seção transversal da imagem, sendo i o índice que representa cada raio, para $i = 1, 2, \dots, M$, e j o índice de cada pixel, para $j = 1, 2, \dots, N$. Ao iniciar o método é necessário um conjunto de valores estimados denotado por $\vec{f}^{(0)}$, com isso é possível calcular para

cada raio i o seu conjunto correspondente de resultados f_j . Assim, a equação básica deste método é da seguinte forma:

$$\vec{f}^{(i)} = \vec{f}^{(i-1)} - \frac{\vec{f}^{(i-1)} \cdot \vec{w}_i - p_i \vec{w}_i}{\vec{w}_i \cdot \vec{w}_i} \vec{w}_i \quad (2)$$

Onde cada $\vec{f}^{(i)}$ é um conjunto de valores de f_j para cada raio, e $\vec{w}_i = (w_{i1}, w_{i2}, w_{i3}, \dots, w_{iN})$, sendo w_{ij} o fator de ponderação que representa a contribuição de um pixel j para um raio i , e $\vec{w}_i \cdot \vec{w}_i$ denotado como produto pontual de \vec{w}_i por ele mesmo.

SART – O *Simultaneous Algebraic Reconstructive Technique* é um método iterativo de reconstrução dentre os vários métodos de reconstrução algébrica. Este método pode ser dividido em algumas características principais como, a redução do erro nas aproximações das integrais de linha de uma imagem suave por somas finitas, onde as bases de pixel tradicionais são substituídas por elementos bilineares. Para uma região de reconstrução circular, somente são atribuídos os pesos parciais para o primeiro e o último elemento da imagem nos raios individuais. A ocorrência de ruído na reconstrução das imagens por este método é inevitável, porém as inconsistências com os dados reais de projeção são consideravelmente menores [1]. Este método utiliza equações lineares para resolver o problema da reconstrução e é modelado da seguinte forma:

$$f(x, y) \cong \hat{f}(x, y) \equiv \sum_{j=1}^N g_j b_j(x, y) \quad (2)$$

Para cada pixel da imagem $f(x, y)$, existe um número real $g_1, g_2, g_3, \dots, g_N$. Uma adequada aproximação para a imagem contínua $f(x, y)$ é denotada por $\hat{f}(x, y)$ discreta, e os g_j 's formam um conjunto finito de números que descrevem a imagem em relação a base escolhida $\{b_j(x, y)\}$ [2]. No caso contínuo pode-se considerar a projeção de cada raio como p_i representado pela equação abaixo:

$$p_i = R_i f(x, y) \cong p_i = R_i \hat{f}(x, y) \quad (3)$$

$$p_i = \sum_{j=1}^N g_j R_i b_j(x, y) \quad (4)$$

Onde, R_i é o operador de projeção ao longo de cada raio, e g_j 's é também chamado de coeficiente de expansão. Para um maior desempenho computacional e melhor representação do sistema contínuo a equação (4) é atribuída como:

$$p_i = \sum_{j=1}^N g_j a_{ij} + e_i \quad (5)$$

$$\vec{p} = [A]^T \vec{g} + \vec{e} \quad (6)$$

O e_i na equação (5) está relacionado ao erro inerente à representação de dimensão finita e o a_{ij} é a substituição de $R_i b_j(x, y)$ por um valor aproximado para melhorar a computação. Além disso, a equação (6)

é a forma matricial da representação básica deste método [2].

Cimmino – Esse método iterativo de reconstrução de imagens, também denominado como protótipo de algoritmo simultâneo em [3] e de SIRT em [4], também classificado como algoritmo paralelo em [6], usa as seguintes equações em suas iterações:

$$x^{k+1,i} = P_i(x^k), \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (7)$$

$$x^{k+1} = x^k + \lambda_k (\sum_{i=1}^N w_i x^{k+1,i} - x^k) \quad (8)$$

Neste método, primeiramente é projetada a corrente de iteração x^k em todos os conjuntos para só então se obter os pontos intermediários pela equação (7), onde P_i é a projeção ortogonal para C_i . A próxima iteração ocorre na equação (8), onde w_i são os pesos fixos tal que $w_i > 0$, para todo i , o $\{\lambda_k\}_{k \geq 0}$ é o parâmetro de relaxação geralmente entre o intervalo $\epsilon \leq \lambda_k \leq 2 - \epsilon$, para $\epsilon > 0$ desde que seja um valor pequeno. Desta forma, este método está garantido de convergir para uma solução ponderada de mínimos quadrados que minimiza a soma ponderada dos quadrados das distâncias para os conjuntos C_i , $i = 1, 2, \dots, N$ [3].

MSE - É a média dos erros quadráticos (diferenças de pixel) das duas imagens e é calculado pela equação a seguir [10]:

$$mse = \frac{\sum_{M,N} [I_1(m,n) - I_2(m,n)]^2}{M \cdot N}, \quad (9)$$

onde M e N são o número de linhas e colunas da imagem, m e n são os índices da matriz que representa cada imagem e I_1 e I_2 são as imagens comparadas.

PSNR - Esta técnica é classificada como *full reference*, pois avalia a qualidade de certa imagem utilizando outra imagem como referência [9]. Depende diretamente do MSE pela seguinte equação:

$$psnr = 10 \log_{10} \left(\frac{R^2}{mse} \right), \quad (10)$$

Quanto maior for o erro menor será o PSNR, tomando valores negativos no caso de distorção da imagem, valor nulo quando $mse = R^2$ e valor infinito quando a imagem final é igual a imagem real, pois $mse = 0$ [10].

SSIM - Apesar das vantagens citadas, a metodologia de sensibilidade ao erro, ainda que seja coerente e simples, não é o método de avaliação ideal para reproduzir um índice de qualidade que se aproxime da qualidade visual percebida. Por isso criou-se o método SSIM. Neste método os *pixels* possuem forte dependência entre si e ela aumenta consideravelmente de acordo com a proximidade entre os *pixels*. Supõe-se que essa dependência carrega informações importantes sobre a estrutura dos objetos na imagem e que quantificar a mudança estrutural de uma imagem pode fornecer uma boa aproximação para a qualidade percebida [11]. Este método é expresso pela seguinte equação padrão:

$$ssim(f, h) = \frac{(2\mu_f\mu_h + C_1)(2\sigma_{fh} + C_2)}{(\mu_f^2 + \mu_h^2 + C_1)(\sigma_f^2 + \sigma_h^2 + C_2)} \quad (11)$$

Considerando a imagem final e a original como os sinais f e h , onde μ_f é a média do sinal f e μ_h é a média do sinal h , σ_{fh} é a covariância entre os sinais, σ^2 é o desvio padrão e C_1 e C_2 são constantes que evitam a instabilidade dos valores. Assim, os valores de SSIM indicam o quanto a imagem é similar a original [11].

Será utilizada a Tabela 1, de condutividade elétrica dos tecidos do corpo humano, para melhor interpretar a imagem de TIE que representa a seção transversal de um tórax masculino.

Uma das formas de comparar os métodos é saber quanto tempo o Matlab demora a executar cada algoritmo utilizando um processador de 2.5GHz, 3,41 de RAM disponível e SO 64bits.

Tabela 1: Medidas de condutividade elétrica do corpo humano [12].

Tecido	Condutividade ($10^{-1} \frac{S}{m}$)
Sangue	6,70
Fígado	2,80
Músculo – Longitudinal	8,00
Músculo – Transversal	0,60
Músculo Cardíaco-Longitudinal	6,30
Músculo Cardíaco-Transversal	2,3
Pulmão Expiração	1,00
Pulmão Inspiração	0,40
Gordura	0,36
Osso	0,06

Resultados

Tabela 2: Tempos estimados para simulação de cada método no Matlab de acordo com o número de iterações.

Iterações	Tempo ART (s)	Tempo SART (s)	Tempo Cimmino (s)
1	53,8	0,6	2,5
10	...	1,3	4,2
30	...	2,6	7,9
50	...	5,5	11,8

Na comparação dos tempos de reconstrução de cada método, é possível perceber a grande dificuldade que o computador tem para executar o método ART logo na primeira iteração, por isso não foi calculado o tempo de reconstrução nas demais iterações deste.

Para melhorar a análise e a comparação dos resultados, as imagens finais de cada método serão mostradas na figura 2 e 3, com suas respectivas iterações. A figura 1 é a imagem original, obtida em [8].

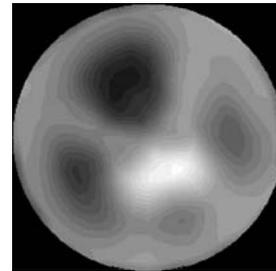


Figura 1: Esta é uma imagem estática TIE de tórax humano, obtida com injeção de corrente dipolo e a posição dos eletrodos ligeiramente deslocada. As estruturas anatômicas são visíveis. A coluna vertebral é a parte mais escura no topo da imagem, e o lado esquerdo do corpo está no lado direito da imagem. As duas áreas escuras na direita e na esquerda são os pulmões. Esta área clara na direita e abaixo do centro é o coração. A mancha cinzenta escura na parte inferior é o osso do peito. A medição foi realizada com o sistema TIE Moscow primeira geração [8].

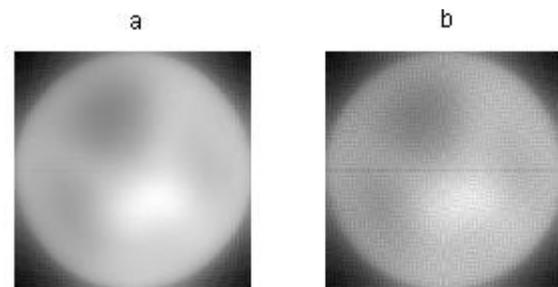


Figura 2: A figura (a) é resultado de uma iteração do método SART e a figura (b) é resultado de 1 iteração do método Cimmino.

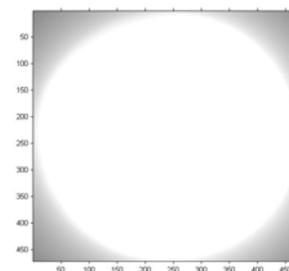


Figura 3: Imagem reconstruída com o método ART utilizando apenas uma iteração.

Além da análise visual dos resultados dos métodos de reconstrução, é possível fazer uma análise mais exata através de técnicas objetivas de avaliação da qualidade das imagens.

Tabela 3: Avaliação das imagens reconstruídas em relação a original (figura 1) através dos métodos MSE, PSNR, SSIM de acordo com o número de iterações na reconstrução.

Iterações	Imagem	MSE	PSNR	SSIM
	Original	0	Infinito	1
1	ART	0,6787	6,6416	0,4051
	SART	0,0319	9,3949	0,6301
	Cimmino	0,0320	9,9250	0,6226
10	ART	28,3789	4,5784	0,0394
	SART	0,0040	22,9717	0,7905
	Cimmino	0,0041	23,0722	0,7794
30	ART	42,4440	4,8625	0,0233
	SART	0,0018	27,2065	0,8156
	Cimmino	0,0020	27,0968	0,8052
50	ART	43,5174	4,8915	0,0224
	SART	0,0017	27,6589	0,8149
	Cimmino	0,0018	27,5350	0,8048

Discussão

É evidente diante do tempo empregado e das comparações entre as imagens, que o ART simples não é o melhor método para resolver o problema da reconstrução de imagens. Na simulação, o ART foi reconstruído com apenas uma iteração, pois para um número maior de iterações as imagens reconstruídas se tornam mais ruidosas.

Já na primeira iteração os métodos SART e Cimmino se destacam em relação ao ART por sua velocidade e melhor resolução, segundo as tabelas 1 e 2. Comparando visualmente os métodos de SART e Cimmino, o método de Cimmino parece ser mais ruidoso. Porém levando em consideração os métodos métricos, o método de Cimmino se destaca segundo o PSNR até 10 iterações, enquanto que o SART tem melhor desempenho segundo os métodos métricos MSE e SSIM desde 1 até 50 iterações, e a partir de 10 iterações segundo o método PSNR. Sendo a resolução e a rapidez, fundamentais para um bom diagnóstico médico, pode-se constatar, nestas condições, que o método SART apresenta melhor desempenho entre os dois métodos abordados.

Agradecimentos

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPQ) pelo apoio financeiro recebido em forma de bolsa de Iniciação Científica.

Referências

- [1] Kak, A. C. and Slaney, M. Principles of Computerized Tomographic Imaging. On: IEEE Press, 1988, Chap. 7.
- [2] Andersen A. H. and Kak, A. C. Simultaneous algebraic reconstruction technique (SART): A superior implementation of the ART algorithm, Ultrasonic Imaging, 6 (1984), pp. 81–94.

- [3] Nikazad, T. Algebraic Reconstruction Methods. [Dissertação]. Linköping Universitet Institute of Technology, 2008.
- [4] Engl, H. W., Hanke, M. and Neubauer, A. Regularization of Inverse Problems. Kluwer Academic Publishers. 2000.
- [5] Andrade, M. A. Desenvolvimento de um Plugin Java para Reconstrução Tomográfica em SPECT. Tese (Mestrado). Pontifícia Universidade do Rio Grande do Sul. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica. 2007.
- [6] Musial, J. E. Técnicas de Reconstrução Algébricas Aplicadas em Tomografia Computadorizada. [Dissertação]. Universidade Federal Do Paraná.
- [7] Raparia ,D., Alessi, J. and Kponou A. Algebraic Reconstruction Technique (ART). IEEE. 1998.
- [8] EIT Gallery [internet]. Available from: <http://www.cplire.ru/tserver/gallery/>- acessado em 20 de junho de 2014.
- [9] Barros, W. F. Estudos de Métodos para Avaliação Cega de Qualidade de Imagens. ForSci.: r. cient. IFMG campus Formiga, Formiga, v. 1, n. 1, p. 64-73, jul./dez. 2013.
- [10] Salomon, D. Data Compression: The Complete Reference. Published by Springer, 4th Edition. 2006.
- [11] Cardoso, J. V. M. Comparação das Métricas Objetivas de Qualidade de Vídeos Baseadas na Similaridade Estrutural e na Sensibilidade ao Erro. Revista de Tecnologia da Informação e Comunicação vol. 1, número 2, Abril 2012.
- [12] Barber, D. and Brown, B. Applied Potential Tomography. J. Phys. E: Sci.