

Manyetik Rezonans-Elektriksel Empedans Tomografisi (MR-EIT) İçin Geliştirilen Görüntüleme Algoritmasının Performansının Yön Bağımlı İletkenlik Durumu İçin İncelenmesi

Evren DEĞİRMENCİ ve B. Murat EYÜBOĞLU
Orta Doğu Teknik Üniversitesi
Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Bölümü
Balgat, Ankara
evren@eee.metu.edu.tr, mevub@metu.edu.tr

Özet: Manyetik Rezonans-Elektriksel Empedans Tomografi (MR-EIT) tekniği ile, iletken bir cisme dışarıdan akım uygulanmasıyla oluşturulan akım yoğunluğu dağılımı ve yüzey gerilimi ölçümleri kullanılarak cisim içindeki iletkenlik dağılımı görüntülenebilmektedir. Şimdiye kadar geliştirilen MR-EIT algoritmalarının tümünde ortamın iletkenliğinin yön bağımsız (isotropic) olduğu kabul edilmektedir, ancak insan vücudundaki birçok dokunun yön bağımlı (anisotropic) iletkenlik değerine sahip olduğu bilinmektedir. Bu çalışmada Zhang [1] tarafından önerilen Ohm yasası tabanlı MR-EIT algoritmasının yön bağımlı iletkenlik durumu için performansı incelenmiştir. Geliştirilen algoritma, Sonlu Elemanlar Yöntemi (SEY) kullanılarak geliştirilen ölçüm benzetimleri ile sınanmaktadır.

1. Giriş

Doku öziletkenlik dağılımının ve bu dağılımın fizyolojik aktivite ile değişiminin canlı organizma içinde ölçülebilmesi, patolojilerin belirlenmesinde ve fizyolojik aktivitenin görüntülenmesinde yararlı olmaktadır [2, 3]. Ayrıca, *in-vivo* doku öziletkenlik dağılımı bilgisi, biyoelektrik alan problemlerinin çözüm doğruluğunu belirleyici en önemli parametrelerden biridir [4].

Vücut içindeki iletkenlik dağılımı Manyetik Rezonans-Elektriksel Empedans Tomografisi (MR-EIT) tekniği ile yüksek çözünürlüklü olarak görüntülenebilmektedir, ancak şimdiye kadar geliştirilen MR-EIT algoritmalarının tümünde ortamın iletkenliğinin yön bağımsız olduğu kabul edilmektedir [5]. Diğer taraftan, insan vücudundaki birçok dokunun yön bağımlı iletkenlik değerine sahip olduğu bilinmektedir [6]. İletkenlik bilgisi belirlenirken bu durumun göz önüne alınmasının hem elde edilen bilginin doğruluğunu arttıracığı, hem de bu bilginin uygulama alanını genişleteceği açıktır.

Bu çalışmada, 1992 yılında Zhang [1] tarafından önerilen Ohm yasası tabanlı MR-EIT algoritmasının yön bağımlı iletkenlik durumu için performansı incelenmiştir. Geliştirilen MR-EIT görüntüleme algoritması Sonlu Elemanlar Yöntemi (SEY) kullanılarak geliştirilen modellerden elde edilen ölçüm benzetimleri ile sınanmış ve sınama sonuçları verilmiştir. Gerekli olan yön bağımlı iletkenliğe sahip sonlu eleman modeli FEMLAB® sonlu elemanlar çözümleyicisi kullanılarak oluşturulmuştur. MR-EIT ileri problemi de aynı çözümleyici kullanılarak çözülmüş ve akım yoğunluğu haritası ile yüzey gerilimleri elde edilmiştir.

2. Yöntem

2.1 İleri Problem

Bilinen bir iletkenlik dağılımı ve sınır koşulları için yüzey gerilim değerlerinin ve akım yoğunluğu dağılımının hesaplanması süreci ileri problem olarak tanımlanır. İletkenlik ve gerilim dağılımı arasındaki ilişki Neumann sınır koşulları ile birlikte Poisson denklemi ile aşağıdaki şekilde ifade edilir:

$$\nabla \cdot (\sigma(x, y) \nabla \phi) = 0 \quad (x, y) \in S; \quad \sigma \frac{\partial \phi}{\partial n} = \begin{cases} J & \text{pozitif elektrotta} \\ -J & \text{negatif elektrotta} \\ 0 & \text{diğer yerlerde} \end{cases} \quad (1)$$

Bu ifadede σ elektriksel iletkenliği, ϕ elektriksel gerilimi, S görüntülenecek cismin kesitini, n ise cisimden dışarı doğru olan birim normal vektörünü göstermektedir. Cisim içerisindeki gerilim dağılımı hesaplandıktan sonra, elektrik alan ve akım yoğunluğu sırasıyla

$$\vec{E} = -\nabla \phi; \quad \vec{J} = \sigma \vec{E} \quad (2)$$

formüllerini kullanarak bulunur.

Geliştirilen algoritmanın sınanması amacıyla kullanılacak akım yoğunluğu ve yüzey gerilimi ölçüm benzetimleri SEY modelleri aracılığıyla yukarıda (1) ile tanımlanan ileri problemin çözümü ile yaratılmaktadır. Bu çalışmada

kullanılan modellerin oluşturulması ve ileri problemin çözümü FEMLAB[®] sonlu elemanlar çözümleyicisi ile gerçekleştirilmiştir. Daha sonra cisim içerisinde elde edilen akım yoğunluğu ölçüm benzetimi enterpolasyon yöntemi ile 20*20 matris olarak tanımlanmıştır. Yüzey gerilimi ölçüm benzetimi de aynı şekilde 20*20 matrisin tüm kenar elemanları şeklinde tanımlanmıştır.

2.2 İletkenlik Dağılımının Oluşturulması

Yüzey noktaları arasındaki gerilim (potansiyel fark $\Delta\phi$), akım yoğunluğu (J) ve bilinmeyen iletkenlik (σ) aşağıdaki integral eşitliği ile ilişkilendirilmektedir:

$$\Delta\phi = \int_l \vec{E} \cdot d\vec{l} = \int_l \left(\frac{1}{\sigma} \right) \vec{J} \cdot d\vec{l} = \int_l \rho \vec{J} \cdot d\vec{l} \quad (3)$$

Burada “ l ”, tomografik düzlem içerisindeki $\Delta\phi$ potansiyel farka sahip iki yüzey noktasını birleştiren herhangi bir integral yoludur. Bu sayede problem matematiksel olarak doğrusal bir ters problem olmaktadır. Tomografik düzlem 20*20 bir matris olarak düşünülürse ve her bir elemanın $\rho_1, \dots, \rho_{400}$ şeklinde sabit bir resistiviteye sahip olduğu düşünülürse, (3)’deki çizgi integral 400 bilinmeyenli bir lineer eşitlik olarak yazılabilir. Aynı veya farklı yüzey nokta çiftlerini birleştiren N ($N \geq 400$) farklı yol seçerek, 400 bilinmeyenli N lineer eşitlik sisteminden ρ_i ($i = 1, \dots, 400$) değerleri bulunmaktadır.

3. Bulgular

Önceki bölümde anlatıldığı şekilde kullanılan iletkenlik dağılımı oluşturma yöntemi ilk olarak akım elektrotları karşılıklı konumlandırılmış şekilde sırasıyla $\rho = 5$ (yön bağımsız), $\rho_x/\rho_y = 5$ ve $\rho_x/\rho_y = 1/5$ olan cisimler için denenmiştir. Elde edilen sonuçlar Şekil 1’de verilmiştir. Aynı deney daha sonra komşu iki kenar üzerine konumlandırılmış akım elektrotları ile tekrarlanmıştır ve sonuçlar Şekil 2’de verilmiştir.

4. Tartışma ve Sonuç

Geliştirilen yöntem ile oluşturulan iletkenlik görüntülerinin nicel doğruluklarının sınanması amacıyla oransal hatalar yön bağımsız ve yön bağımlı durum için sırasıyla (4)’de verilmiştir:

$$\varepsilon_{\sigma} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{j=1}^N \frac{(\sigma_{jr} - \sigma_{jc})^2}{\sigma_{jr}^2}} \times 100, \quad \varepsilon_{\sigma_x} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{j=1}^N \frac{(\sigma_{jrx} - \sigma_{jc})^2}{\sigma_{jrx}^2}} \times 100, \quad \varepsilon_{\sigma_y} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{j=1}^N \frac{(\sigma_{jry} - \sigma_{jc})^2}{\sigma_{jry}^2}} \times 100 \quad (4)$$

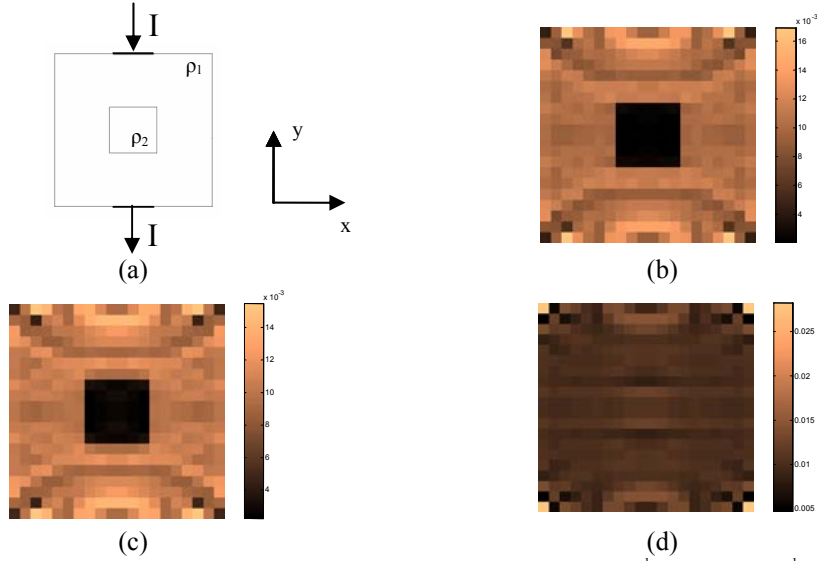
Bu ifadelerde N toplam eleman sayısını, σ_{jr} yön bağımsız iletkenlik durumu için gerçek iletkenlik değerini, σ_{jrx} ve σ_{jry} sırasıyla yön bağımlı iletkenlik için x ve y yönlerindeki gerçek iletkenlik değerlerini, σ_{jc} ise oluşturulan iletkenlik değerini göstermektedir. Bir önceki bölümde sunulmuş olan benzetimlere ait hatalar aşağıda verilmiştir:

		Cisim			Arka Plan
		ε_{σ} (%)	ε_{σ_x} (%)	ε_{σ_y} (%)	ε_{σ} (%)
Şekil 1	$\sigma_A=1, \sigma_C=5$ (Yön bağımsız durum)	17.29	-	-	19.27
	$\sigma_A=1, \sigma_{Cx}=1, \sigma_{Cy}=5$	-	268.01	28.77	20.40
	$\sigma_A=1, \sigma_{Cx}=5, \sigma_{Cy}=1$	-	80.90	12.82	18.88
Şekil 2	$\sigma_A=1, \sigma_C=5$ (Yön bağımsız durum)	19.56	-	-	32.91
	$\sigma_A=1, \sigma_{Cx}=1, \sigma_{Cy}=5$	-	1917	386.09	92.92
	$\sigma_A=1, \sigma_{Cx}=5, \sigma_{Cy}=1$	-	956.81	4822	90.07

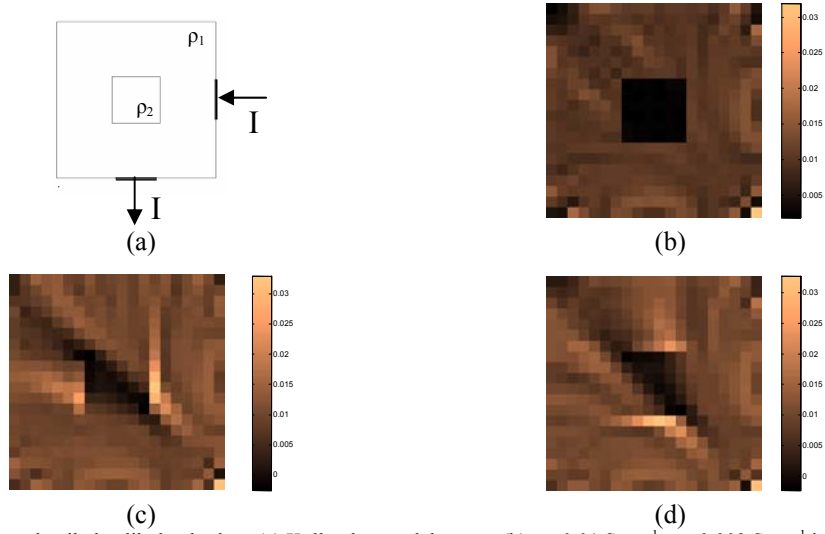
Tablo 1. Oluşturulan iletkenlik dağılımı hataları. σ_A arka plan iletkenliğini, σ_{Cx} cismin x yönündeki iletkenliğini, σ_{Cy} cismin y yönündeki iletkenliğini göstermektedir.

Geliştirilen algoritmada iletkenlik dağılımını yön bağımsız kabul edildiği için, yön bağımsız iletkenlik durumunda hem cismin hem de arka planın iletkenliğini yaklaşık %20’lik bir hata ile bulunabilmektedir. Ancak yön bağımlı iletkenlik durumunda algoritmanın performansı akım basma elektrotlarının ve cismin yerine göre farklılık göstermektedir. Elektrotlar karşılıklı konumlandırıldıkları durumda teknik, akım yönündeki iletkenlik bileşenini belirleyebilirken, akım yönüne dik olan iletkenlik bileşenini belirlemede başarısız olmaktadır. Arka plan iletkenliği ise yaklaşık %20 hata ile tespit edilebilmektedir. Elektrotlar iki komşu kenar üzerine yerleştirildiklerinde ise hem cismin hem de arka planın hesaplanan iletkenlik değerlerindeki hatalar artmaktadır.

Sonuç olarak bu algoritmanın, özellikle farklı yön bağımlı iletkenlik değerlerine sahip birden fazla cisim için, performansının düşük olacağını söylemek mümkündür. İnsan vücudundaki birçok dokunun yön bağımlı iletkenlik değerine sahip olduğu düşünülürse, MR-EIT' nin insana uygulanabilmesi için, yön bağımsız iletkenlik kabulü yapmayan algoritmaların geliştirilmesi gerekmektedir.



Şekil 1. Gerçek ve oluşturulan iletkenlik dağılımları: (a) Kullanılan model yapısı, (b) $\rho_1=0.01 \text{ S.cm}^{-1}$, $\rho_2=0.002 \text{ S.cm}^{-1}$ için (yön bağımsız durum), (c) $\rho_1=0.01 \text{ S.cm}^{-1}$, $\rho_{2x}=0.01 \text{ S.cm}^{-1}$, $\rho_{2y}=0.002 \text{ S.cm}^{-1}$ için, (d) $\rho_1=0.01 \text{ S.cm}^{-1}$, $\rho_{2x}=0.002 \text{ S.cm}^{-1}$, $\rho_{2y}=0.01 \text{ S.cm}^{-1}$ için oluşturulan iletkenlik dağılımları.



Şekil 2. Gerçek ve oluşturulan iletkenlik dağılımları: (a) Kullanılan model yapısı, (b) $\rho_1=0.01 \text{ S.cm}^{-1}$, $\rho_2=0.002 \text{ S.cm}^{-1}$ için (yön bağımsız durum), (c) $\rho_1=0.01 \text{ S.cm}^{-1}$, $\rho_{2x}=0.01 \text{ S.cm}^{-1}$, $\rho_{2y}=0.002 \text{ S.cm}^{-1}$ için, (d) $\rho_1=0.01 \text{ S.cm}^{-1}$, $\rho_{2x}=0.002 \text{ S.cm}^{-1}$, $\rho_{2y}=0.01 \text{ S.cm}^{-1}$ için oluşturulan iletkenlik dağılımları.

Kaynaklar

- [1] Zhang N., "Electrical impedance tomography based on current density imaging", Master Tezi, University of Toronto, 1992.
- [2] Boone K., Barber D. C. ve Brown B. H., "Imaging with electricity: Report of the European Concerted Action on Impedance Tomography", J. of Med. Eng. and Tech. of Biomed. Eng., Cilt 21, No:6, s.467-479, 1996.
- [3] Morucci J. P. ve Rigaud B., "Bioelectrical impedance techniques in Medicine Part III: Impedance Imaging, Medical Applications", Critical Reviews in Biomedical Engineering, s.622-677, 1996.
- [4] Gonçalves S., de Munck J. D., Heethaar R. M., Lopes da Silva F. H. ve van Dijk B. W., "The applications of electrical impedance tomography to reduce systematic errors in the EEG inverse problem-a simulation study", Physiol. Meas., Cilt 21, s.379-393, 2000.
- [5] Ö. Birgül, B. M. Eyüboğlu ve Y. Z. İder, "Current constrained voltage scaled reconstruction (CCVSR) algorithm for magnetic resonance-electrical impedance tomography and performance with different probing current patterns", Phys. Med. Biol, cilt 48, s 653-671, 2003.
- [6] W. Breckon, "The problem of anisotropy in electrical impedance tomography", Proc. of IEEE EMBS Conf., cilt 14, s.1734-1735, 1992.