Journal of KIIT. Vol. 15, No. 11, pp. 117-123, Nov. 30, 2017. pISSN 1598-8619, eISSN 2093-7571 117
http://dx.doi.org/10.14801/jkiit.2017.15.11.117

전기 커패시턴스 단층촬영법을 위한 동적 방향 대수적 영상복원기법

김지훈*, 김봉석**, 김경연***, 이인수****

Dynamic Directional Algebraic Reconstruction Technique for Electrical Capacitance Tomography

Ji-Hoon Kim*, Bong-Seok Kim**, Kyung-Youn Kim***, and In-Soo Lee****

요 약

전기 커패시턴스 단층촬영법(Electrical Capacitance Tomography)을 위해 개발된 대부분의 복원방법은 커패시턴스를 측정하는 동안 센서의 내부 분포가 변하지 않는(정적) 경우에 적합하다. 그러나 커패시턴스를 측정하는 동안에 내부 분포가 변하게 되면(동적), 기존 방법으로는 측정된 커패시턴스로부터 내부 분포를 복원하는데 어려움이 있다. 이 논문은 센서의 내부 분포가 지속적으로 변하는 경우에도 영상복원이 가능한 동적 방향 대수적 영상복원기법(DART, Directional Algebraic Reconstruction Technique)을 제안한다. 이 방법은 정적 DART를 기반으로, 하나의 소스전극에 의해 측정된 커패시턴스로부터 내부 유전율 분포를 추정하도록 수정하였다. 제안한 방법의 타당성을 확인하기 위해 컴퓨터 모의실험을 실시하였고 결과를 통해 센서 내부의 분포가 변할 때 제안한 방법의 성능이 기존의 방법들보다 나음을 확인하였다.

Abstract

Most reconstruction methods developed for electrical capacitance tomography (ECT) are appropriate for the sensor having the static internal permittivity during capacitance measurement. However, it is difficult for existing methods to restore internal distribution using measured capacitance data, if the inside of the sensor changes during capacitance measurement. This paper proposes the dynamic directional algebraic reconstruction technique (DART) to restore time-varying permittivity distribution in ECT. This method is revised based on conventional DART to assume the internal permittivity distribution using measured capacitance by each source-electrode. To prove the validity of the proposed method, we conducted the computer simulations and confirmed that proposed method's image reconstruction performance was better than existing methods when the distribution inside sensor changes.

Keywords
electrical capacitance tomography, time-varying imaging, dynamic, directional algebraic reconstruction technique

* 경북대학교 IT대학 전자공학부
- ORCID: http://orcid.org/0000-0002-4243-1998
** 한국승강기대학교, 승강기공학부
- ORCID: http://orcid.org/0000-0001-7123-9033
*** 제주대학교 전자공학과
- ORCID: http://orcid.org/0000-0002-1814-9546
**** 경북대학교 IT대학 전자공학부 교수(교신저자)
- ORCID: http://orcid.org/0000-0001-9773-4710

· Received: Aug. 10, 2017, Revised: Sep. 13, 2017, Accepted: Sep. 16, 2017
· Corresponding Author: In-Soo Lee
School of Electronics Engineering, Kyungpook National University,
80 Daehakro, Bukgu, Daegu, 702-701, Korea.
Tel.: +82-53-950-7843, Email: insoolee@knu.ac.kr

Ⅰ. 서 론

전기 커패시턴스 단층촬영법(ECT, Electrical Capacitance Tomography)은 도메인의 주위에 설치된 전극들 사이에서 측정된 커패시턴스와 복원 알고리즘을 이용하여 내부 유전물질들에 대한 분포를 영상화 하는 기술이다[1][2].

ECT의 영상복원은 정문제(Forward Problem)와 역문제(Inverse Problem)의 두 가지 계산과정으로 이루어진다. 정문제는 지배방정식인 Dirichlet 경계조건을 가지는 포아송(Poisson) 방정식을 풂으로써 알고 있는 유전율(Permittivity) 분포로부터 전극 사이의 커패시턴스를 찾는 것이다. 그리고 역문제는 관심영역 내부의 단층 영상을 얻기 위해 측정된 커패시턴스로부터 내부 유전율 분포를 추정하는 것이며 이 과정을 영상복원이라고 부른다.

그동안 ECT를 위한 많은 영상복원기법이 제안되었으며, 선형 역투영법(Linear Back-projection), Tikhonov 정규화기법(Tikhonov Regularization Method), 대수적 영상복원법(Algebraic Reconstruction Technique), Landweber 반복법 및 방향 대수적 영상복원법(DART, Directional Algebraic Reconstruction Technique) 등이 있다[1]-[6]. 이들 알고리즘은 전극 사이의 모든 커패시턴스를 측정하는 동안에 관심영역 내부의 유전율 분포가 변하지 않는, 즉 정적(Static)인 상태라고 가정하였다. 그러나 ECT를 사용하는 모든 경우를 정적인 상태로 가정할 수 없고, 만약 데이터를 취득하는 동안에 내부 유전율 분포가 변하면, 즉 동적인 상태가 되면 이들 알고리즘으로부터 만족할만한 결과를 얻을 수 없다.

관심영역 내부의 유전율 분포가 시간에 따라 변하는 경우에서 순간해상도(Temporal Resolution)를 향상시키기 위해, 동적 복원법이 개발되었다[7]. 이 방법에서 역문제는 칼만(Kalman) 필터를 사용하여 상태가 시간에 따라 변하는 비선형 상태 추정문제로 다루어진다. 이는 동적 알고리즘을 사용하는 경우에 각 전압의 여기마다 유전율 분포를 추정하는 것이 가능하여 측정된 커패시턴스로부터 전극의 개수만큼의 영상을 복원하는 것이 가능하다.

그러나 위의 동적 영상복원방법은 실제 적용에서 독립된 모든 데이터를 취득하여 오프라인으로 분석하기에는 적합하지만 온라인으로 사용하기에는 적합하지 않다. 이는 역문제에서 자코비안(Jacobian) 행렬 등을 포함하는 알고리즘의 계산시간이 데이터 취득시간보다 길어질 수 있기 때문이다.

이 논문에서는 내부 유전율 분포가 시간에 따라 변하는 상황에서 온라인으로 영상복원이 가능한 동적 영상복원방법을 제안한다. 이 방법은 모든 측정 커패시턴스를 사용하는 정적 DART[5]을 각 전압 여기마다 내부 유전율을 추정할 수 있도록 개선한 동적 DART이다. 제안한 방법의 성능을 확인하기 위하여 컴퓨터 모의실험을 수행하였다.

Ⅱ. Forward solver와 커패시턴스 획득 방법

ECT 문제는 센서 주변에 설치된 각 전극사이에서 측정된 커패시턴스로부터 내부 유전율 분포를 얻어내는 것이다. 이는 전극사이에서 측정된 커패시턴스는 센서 내부의 유전 물질의 분포에 의존하기 때문이다.

이론적으로 전극사이의 커패시턴스는 다음과 같은 Poisson 방정식으로부터 얻을 수 있다.

$$\nabla \cdot [\epsilon(x,y)\nabla\phi(x,y)] = -\rho(x,y) \tag{1}$$

여기서 $\epsilon(x,y)$은 센서 내부의 유전율 분포이다. $\phi(x,y)$는 전위 분포이고 $\rho(x,y)$는 전기장의 소스인 전하 분포이다. 센서의 내부에는 전기장의 소스인 전하가 없기 때문에, 식 (1)은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\nabla^2\phi(x,y) + \frac{1}{\epsilon(x,y)}\nabla\epsilon(x,y)\nabla\phi(x,y) = 0 \tag{2}$$

여기서 전기장은 $E(x,y) = -\nabla\phi(x,y)$ 이다. 일반적으로 비균질(Inhomogeneous) 유전율 분포에 대하여 식 (2)를 푸는 것은 불가능하다. 전위 $\phi(x,y)$는 유한요소법(Finite Element Method)을 적용하여 수치적으로 계산될 수 있다. 만약 전위 $\phi(x,y)$를 안다면, 전극의 전하 Q는 가우스 법칙을 사용하여 계산될 수 있다.

$$Q = \oint_{\Gamma} \epsilon(x,y)\nabla\phi(x,y)d\Gamma \tag{3}$$

여기서 Γ는 전극의 표면이다. 각 검출 전극에서 전하 Q를 사용하여 커패시턴스 C는 다음과 같이 계산될 수 있다.

$$C=\frac{Q}{V}=-\frac{1}{V}\oint_{\Gamma}\epsilon(x,y)\nabla\phi(x,y)d\Gamma \qquad (4)$$

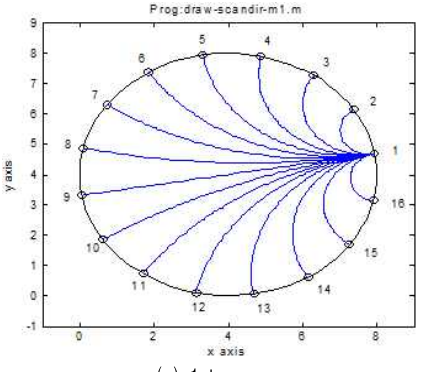
여기서 V 는 소스와 검출 전극 사이의 전위차이다 [1][3][8].

ECT에서 커패시턴스의 측정은 다중 송신 장치와 많은 수의 커패시턴스 검출기로부터 얻어진다. 16-전극 센서에 대하여, 1-15번 전극은 하나씩 소스 전극으로 사용된다. 1번 전극을 전압 신호로 여기시켰다면, 2-16번 전극은 검출 전극이 되며, 1번 전극과 다른 검출 전극 사이의 커패시턴스를 각각 검출하는데 사용된다. 그리고 2-15번 전극도 순서대로 여기되고, 결국 모든 전극 쌍에 대한 커패시턴스가 측정된다. 일반적으로 L-전극 센서에 대하여 $N=L(L-1)/2$개의 독립된 커패시턴스가 얻어지고 16-전극 센서에 대하여 총 120개의 독립된 커패시턴스가 얻어진다[3][9]. 이렇게 얻어진 커패시턴스는 유전율 분포를 복원하기 위한 복원 알고리즘의 입력으로 사용된다.

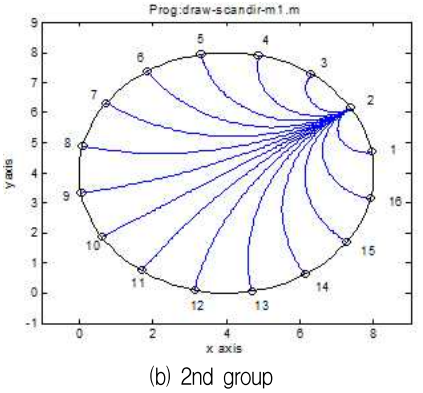
III. 전기장중심선과 수정된 가중행렬

3.1 전기장중심선

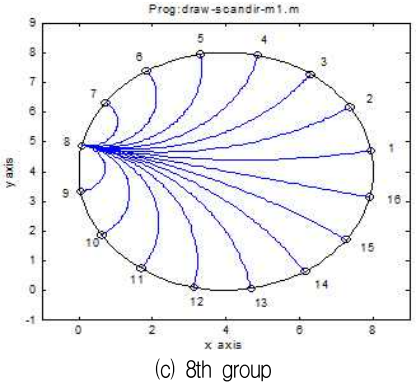
제안하는 알고리즘에서 각 전극사이의 선로(Ray Path)로써, 전극사이의 전기장중심선(EFCL, Electrical Field Centre Line)을 사용하였다. EFCL은 센서가 원형이고 내부가 동질이라는 가정 하에 존재하는 전기장 선의 중심선을 원의 일부로 근사화한 것이다 [5]. 그림 1은 동질인 내부 유전율 분포에 대한 몇몇 그룹의 EFCL을 나타낸 것으로 원형의 관심영역 내부의 선이 EFCL이고 경계부분의 작은 동그라미는 각 전극의 중심이다. 여기서 EFCL은 각 전극 쌍의 중점 사이를 원의 일부로 연결한다. EFCL의 수는 L-전극 센서에 대하여 독립된 측정의 수와 동일한 $N=L(L-1)/2$개이고 그룹의 수는 전극의 수와 같은 L개이다.



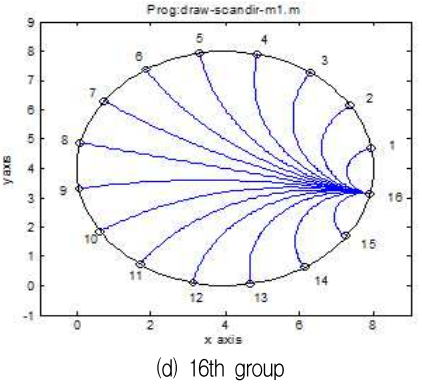
(a) 1st group



(b) 2nd group



(c) 8th group



(d) 16th group

그림 1. 그룹된 EFCLs
Fig. 1. Grouped EFCLs

3.2 수정된 커패시턴스 획득 방법

제안하는 동적 복원 알고리즘의 입력 데이터로 2장에서 언급한 커패시턴스 획득 방법을 통해 얻은 커패시턴스를 그대로 사용할 수 없다. 왜냐하면 측정된 커패시턴스에 대응되는 독립된 EFCL의 수는 $N=L(L-1)/2$개이지만, 각 그룹의 EFCL의 수는 $(L-1)$개씩이고 총 그룹의 수는 L이므로 필요한 커패시턴스의 수는 $L\times(L-1)$이 되고, 각 커패시턴스는 두 번씩 사용되어야 하기 때문이다. 따라서 측정된 커패시턴스를 동적 복원방법에 적용하기 위해서는, L전극 시스템에서 1에서 L번 전극 모두가 전원 전극으로 사용될 수 있어야 하고 전원 전극이 바뀔 때마다 측정된 $(L-1)$개의 커패시턴스를 데이터로 사용할 수 있도록 바꾸어야 한다. 결국 수정된 커패시턴스 획득방법으로 측정된 모든 커패시턴스 데이터의 수는 $L\times(L-1)$이다.

3.3 수정된 가중행렬

앞에서 정의한 그룹화 된 EFCL과 이에 대응하는 커패시턴스로부터 보간법(Interpolation)을 이용하면 EFCL과 관심영역 내부의 메시(Mesh)들 사이의 관계를 나타내는 수정된 가중행렬을 유도할 수 있다[5].

가중행렬 W_k는 k번째 그룹에서 두 이웃하는 EFCL L_j, L_{j+1}과 두 EFCL 사이에 위치한 i번째 메시의 무게중심 간의 가중계수로 다음과 같이 정의된다.

$$W_k(i,j)=\frac{d_2}{d_1+d_2},\ \ W_k(i,j+1)=\frac{d_1}{d_1+d_2} \qquad (5)$$
$$i=1,2,\cdots,M,\ j=1,2,\cdots,(L-1),\ k=1,2,\cdots,L$$

여기서 d_1과 d_2는 각각 이웃하는 EFCL L_j, L_{j+1}과 i번째 메시의 무게중심과의 거리이고, M은 메시의 수이다. 만약 $d_1=0$이면, 각각 $W_k(i,j)=1$과 $W_k(i,j+1)=0$이 된다. 또한, 메시가 L_1과 L_{L-1}의 경계 쪽에 위치하면, 가중계수는 1이 된다.

Ⅳ. ECT를 위한 동적 방향 대수적 영상복원법

ECT를 위한 동적 DART 알고리즘은 다음과 같고, 이를 통해 동적 유전율 분포에서 측정된 커패시턴스로부터 복원영상을 얻을 수 있다.

$$\epsilon_i=\epsilon_{i-1}+W_i\,(C_i-W_i^T\epsilon_{i-1}) \qquad (6)$$

여기서 $i=1,2,\cdots,L$, $\epsilon_i\in R^{M\times 1}$은 유전율 벡터, M은 메시의 수, W_i는 i번째 그룹에 대한 가중행렬, $C_i\in R^{(L-1)\times 1}$은 i번째 전극을 여기하였을 때 측정된 커패시턴스 벡터이고 T는 전치(Transpose)이다.

Ⅴ. 모의실험

동적 방향 대수적 영상복원법(dDART)의 성능을 확인하기 위하여 다양한 상황에 대한 컴퓨터 모의실험을 수행하였으며, 이를 정적 영상복원 알고리즘인 ART[2][10]와 DART(sDART)[5]와 비교하였다.

영상복원을 위하여 그림 2와 같이 1948개의 삼각형 메시를 가지는 ECT 센서를 사용하였다. 이 센서는 지름이 8cm이고 16개의 전극을 가진다. 배경(공기)과 표적(기름)의 유전율은 각각 1과 5로 가정하였고 초기값 벡터 ϵ_0는 영(Zero) 벡터를 사용하였다.

제안한 방법의 복원 성능을 확인하기 위해, 모든 커패시턴스를 측정하는 동안에 관심영역 내부의 유전율 분포가 변하지 않는 정적 영상과 모든 커패시턴스를 측정하는 동안에 관심영역 내부의 유전율 분포가 변하는 동적 영상에 대한 두 가지의 시나리오를 고려하였다.

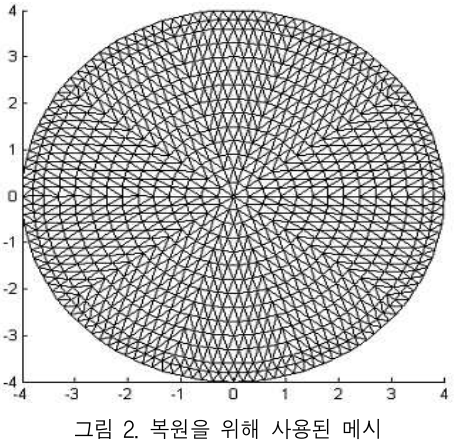


그림 2. 복원을 위해 사용된 메시
Fig. 2. Used mesh for reconstructions

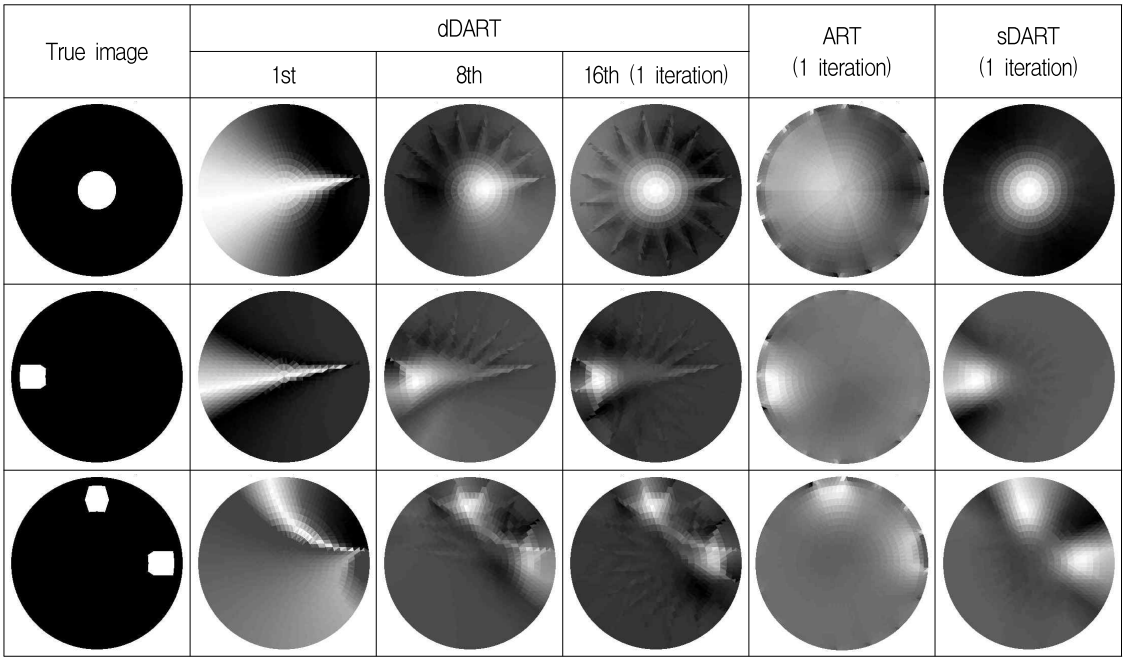


그림 3. 정적 영상에 대한 복원영상
Fig. 3. Reconstructed images in static image

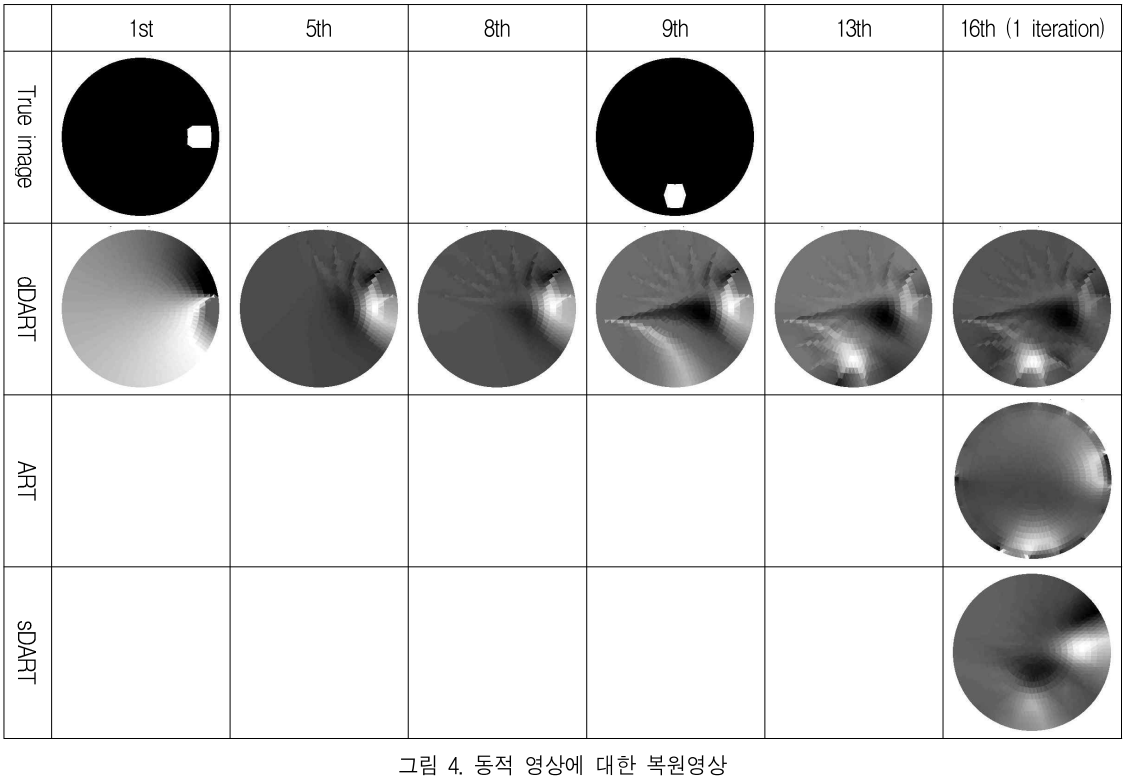


그림 4. 동적 영상에 대한 복원영상
Fig. 4. Reconstructed images in dynamic image

먼저 그림 3의 첫 번째 열의 세 가지 정적분포로부터 측정한 커패시턴스를 사용하여 ART, sDART와 dDART로 복원하였다. 그림 3의 2~4번째 열은 dDART로 복원한 결과로 각각 1, 8 및 16번째 업데이트된 결과를 나타내고, 그림 3의 5, 6번째 열은 각각 ART와 sDART로 복원한 결과이다. 여기서 dDART의 16번째 업데이트된 결과는 측정된 모든 데이터를 사용하여 얻어진 것으로 ART와 sDART의 첫 번째 반복과 같은 것으로 간주된다. ART, sDART 및 dDART 알고리즘의 결과는 모두 타겟의 위치를 양호하게 추정하고 있다. 그러나 측정된 모든 커패시턴스를 가지고 하나의 영상을 복원하는 기존의 방법과는 달리 dDART는 하나의 여기된 전극에 의해 측정된 커패시턴스로부터 복원 영상을 얻을 수 있으며, 모든 커패시턴스의 측정이 끝나기 전에 이미 타겟의 위치를 알 수 있다.

다음으로 그림 4의 첫 번째 행에 있는 두 개의 원래영상을 이용한 동적 영상에 대한 시나리오이다. 이 동적 영상은 1~8번째 전극까지의 전극 여기에서는 3시 방향에 타겟이 위치하다가, 9~16번째 전극까지의 전극 여기에서는 6시 방향에 타겟이 위치한다고 가정하였다.

그림 4는 동적 시나리오에 대한 ART, sDART와 dDART 알고리즘의 복원영상이다. 그림 4의 두 번째 행은 dDART의 복원영상이고, 세 번째와 네 번째 행은 각각 ART와 sDART의 복원영상이다. 그림 4에서, dDART의 복원영상은 복원된 16개의 영상 중에서 6개의 영상이고, ART와 sDART의 복원영상은 오직 하나이다.

그림 4로부터, 제안한 dDART 방법은 표적의 변화에 대해 변하는 타겟의 위치를 비교적 잘 추적하고 있지만, ART와 sDART 방법은 동적인 유전율 분포를 제대로 복원하지 못하여 3시와 6시에 타겟이 동시에 있는 것으로 복원하는 것을 확인 할 수 있다.

Ⅵ. 결 론

그동안 ECT에서는 정적 유전율 분포에 관한 많은 복원방법들이 연구되어왔다. 그러나 데이터를 얻는 동안에 내부 유전율 분포가 변하게 되면 이들 알고리즘으로부터 만족할만한 복원영상을 얻을 수 없었다. 이 논문은 관심영역 내부의 유전율 분포가 시간에 따라 변하는 경우에 대하여 추정하기 위한 방법으로 동적 방향 대수적 영상복원기법을 제안하였다. 이 방법은 정적 DART를 기반으로 전기장중심선과 수정된 가중행렬을 사용하여 각 전압 여기마다 내부 유전율을 추정할 수 있도록 개선하였다. 제안한 방법의 타당성을 확인하기 위하여 다양한 시나리오에 대하여 컴퓨터 모의실험을 수행하였다. 그 결과 제안한 방법은 정적 영상복원과 동적 영상복원에 모두 적합한 성능을 가짐을 확인할 수 있었다. 추후과제로는 영상복원에서 전극 여기의 순서와 추정성능과의 관계에 대한 연구이다.

References

[1] Ø. Isaksen, "A review of reconstruction techniques for capacitance tomography", Meas. Sci. Technol., Vol. 7, No. 3, pp. 325-337, Mar. 1996.

[2] W. Q. Yang and L. Peng, "Image reconstruction algorithms for electrical capacitance tomography", Meas. Sci. Technol., Vol. 14, No. 1, pp. R1-13, Jan. 2003.

[3] C. G. Xie, S. M. Huang, B. S. Hoyle, R. Thorn, C. Lenn, D. Snowden, and M. S. Beck, "Electrical capacitance tomography for flow imaging: system model for development of image reconstruction algorithms and design of primary sensors", IEE Proc.-G, Vol. 139, No. 1, pp. 89-98, Feb. 1992.

[4] W. Q. Yang, D. M. Spink, T. A. York, and H. McCann, "An image reconstruction algorithm based on Landweber's iteration method for electrical capacitance tomography", Meas. Sci. Technol., Vol. 10, No. 11, pp. 1065-1069, Nov. 1999.

[5] J. H. Kim, B. Y. Choi, and K. Y. Kim, "Novel iterative image reconstruction algorithm for electrical capacitance tomography: directional algebraic reconstruction technique", IEICE Trans. Fund., Vol. E89-A, No. 6, pp. 1578-1584, Jun.

2006.

[6] J. H. Kim, K. Y. Kim, and I. S. Lee, "Non-Iterative Directional Algebraic Reconstruction Technique to Improve the Reconstruction Time in Electrical Capacitance Tomography", Journal of KIIT, Vol. 14, No. 8, pp. 21-27, Aug. 2016.

[7] M. Soleimani, M. Vauhkonen, W. Yang, A. Peyton, B. S. Kim, and X. Ma, "Dynamic imaging in electrical capacitance tomography and electro-magnetic induction tomography using a Kalman filter", Meas. Sci. Technol., Vol. 18, No. 11, pp. 3287-3294, Sep. 2007.

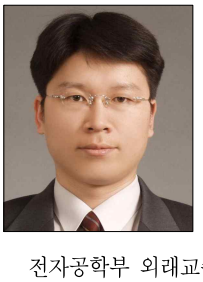
[8] N. Reinecke and D. Mewes, "Recent developments and industrial/research applications of capacitance tomography", Meas. Sci. Technol., Vol. 7, No. 3, pp. 233-246, Mar. 1996.

[9] W. Yang, "Design of electrical capacitance tomography sensors", Meas. Sci. Technol., Vol. 21, No. 4, pp. 1-13, Apr. 2010.

[10] R. Gordon, R. Bender, and G. T. Herman, "Algebraic reconstruction techniques (ART) for three-dimensional electron microscopy and x-ray photography", J. Theor. Biol., Vol. 29, No. 3, pp. 471-481, Dec. 1970.

저자소개

김 지 훈 (Ji-Hoon Kim)



2000년 2월 : 금오공과대학교 전자제어공학과(공학사)
2002년 2월 : 경북대학교 전자공학과(공학석사)
2007년 2월 : 경북대학교 전자공학과(공학박사)
2007년 ~ 2016년 2월 : 경북대학교 전자공학부 외래교수
2016년 3월 ~ 현재 : 경북대학교 IT대학 전자공학부 강의초빙교수
관심분야 : inverse problem, electrical tomography, 추정이론

김 봉 석 (Bong-Seok Kim)

1999년 : 제주대학교 전자공학과(공학사)
2001년 : 제주대학교 전기전자공학과(공학석사)
2006년 : 제주대학교 전기전자공학과(공학박사)
2016년 ~ 현재 : 한국승강기대학교 조교수.
관심분야 : electrical tomography, 추정이론, 영상처리, 승강기 안전관리

김 경 연 (Kyung-Youn Kim)

1983년 2월 : 경북대학교 전자공학과(공학사)
1986년 2월 : 경북대학교 전자공학과(공학석사)
1990년 2월 : 경북대학교 전자공학과(공학박사)
1994년 ~ 1995년 : Univ. of Maryland 박사후 연구원
1990년 ~ 현재 : 제주대학교 전자공학과 교수
관심분야 : inverse problem, electrical tomography, 추정이론

이 인 수 (In-Soo Lee)

1986년 : 경북대학교 전자공학과(공학사)
1989년 : 동대학원 졸업(공학석사)
1997년 : 동대학원 졸업(공학박사)
2005년 8월 ~ 2007년 1월 : 샌디에고 주립대학교 Research scholar
1997년 ~ 2008년 2월 : 상주대학교 전자전기공학부 교수
2008년 3월 ~ 2014년 10월 : 경북대학교 산업전자공학과 교수
2014년 11월 ~ 현재 : 경북대학교 IT대학 전자공학부 교수
관심분야 : 시스템 고장진단 및 고장허용제어, 지능제어 및 응용, 지능형센서시스템, electrical tomography