

자기 공명 영상을 이용한 불균일 자기 측정 알고리즘

김 휴 정*, 김 치 영, 한 수 영, 윤 종 호, 안 창 범
광운대학교 공과대학 전기공학과

Magnetic field inhomogeneity measurement algorithm using magnetic resonance

H. J. Kim, C. Y. Kim, S. Y. Han, J. H. Yoon and C. B. Ahn
Department of Electrical Engineering, Kwangwoon University

Abstract - In this paper, we develop an algorithm to calculate field inhomogeneity in MR imaging using a dual fast spin echo pulse sequence. Because phase modulation time can be easily modified with this pulse sequence, high resolution image can be obtained and acquisition time can be reduced compared to gradient echo technique. In the case of phase wrapping in field map, phase corrected using image processing technique. We assume the field pattern to be second order polynomial and apply Pseudo-Inverse equation to calculate second order polynomial coefficients. These coefficients can be used for the shimming of the magnetic field.

1. 서 론

Static magnetic field 특성에 있어서 가장 중요한 것 중의 하나가 magnetic field의 균일성이다. 이러한 특성은 magnet 고유의 homogeneity, 설치 조건, 그리고 개체 자체의 자화율에 의해 결정되는데, inhomogeneous static magnetic field는 영상의 왜곡, 신호의 손실, 위상 오차, 그리고 해상도를 떨어뜨리는 원인이 된다. 대부분의 MRI 시스템에서는 field distortion을 보정하기 위하여 shim coil이라는 coil을 사용한다. 이런 shim coil은 shim plate라는 철판을 이용하는 passive 방법과 magnetic field를 만드는 coil을 추가하는 active 방법이 있다. 일반적으로 passive shim을 이용하여 대략적으로 field를 보정한 후, active shim을 이용하여 정밀하게 field를 보정한다. 일반적으로 초고속 영상 기법으로 사용되는 Echo Planar Imaging(EPI)[1]이나 Spiral scan imaging[2]에서는 field inhomogeneity의 영향에 의하여 영상의 왜곡이 심하게 나타나기 때문에, field inhomogeneity를 측정하여 field map을 구함으로써 magnetic field의 패턴으로부터 active shim의 계수를 구할 수 있고, 이를 이용하여 영상의 왜곡을 보정할 수 있다[3,4].

본 논문에서는 dual fast spin echo pulse sequence를 이용하여 field map을 측정함으로써, gradient echo 기법에 비해 불균일 자기에 대한 위한 modulation 시간의 조절이 용이하여 high resolution 영상을 얻을 수 있고, 측정 시간을 대폭적으로 줄일 수 있다. 측정된 field data를 근사식으로 가정하여 pseudo-inverse 식을 적용하여 field pattern을 분석 [7]하였으며, 분석을 통해 얻어진 field의 각 성분을 이용, active shim power supply의 current 값을 조정함으로써, field inhomogeneity가 향상 되었다.

2. 본 론

Dual fast spin echo pulse sequence를 이용하여

2개의 영상을 동시에 얻게된다.(그림 1). 첫 번째 영상은 TE에서 얻게 되고, 두 번째 영상은 ΔT 만큼 뒤에서 얻

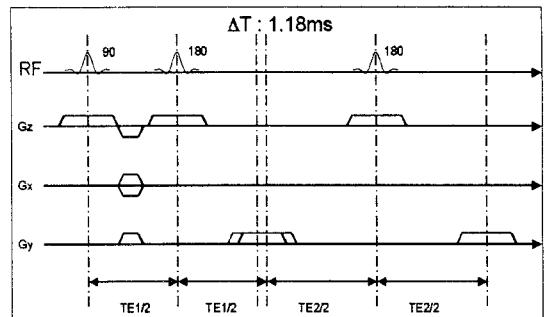


그림 1. Field mapping을 위한 dual fast spin pulse sequence

게 된다. 이 두 영상의 위상차를 계산하여 field map을 구하게 된다. Post processing을 용이하게 하기 위하여 raw 데이터를 받아서 재구성하였다.

2.1 Field map의 계산

Pulse sequence로부터 얻은 두 개의 데이터에서 위상의 차이로써 field map을 구한다. 여기서 위상과 field 사이의 관계에 의해 위상 데이터로부터 field 데이터를 얻는다. 이것을 수식으로 나타내면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} E_1(x, y, z) &= \frac{1}{\gamma \Delta T} \arctan \left[\frac{\text{IM}\{S(x, y, z)\}}{\text{Re}\{S(x, y, z)\}} \right] \\ E_2(x, y, z) &= \frac{1}{\gamma \Delta T} \arctan \left[\frac{\text{IM}\{S(x, y, z)\}}{\text{Re}\{S(x, y, z)\}} \right] \quad (\text{식 } 1) \\ \text{FieldData} &= E_2 - E_1 \end{aligned}$$

여기서, γ 는 gyromagnetic ratio이다.

2.2 Field Correction

Field inhomogeneity에 의한 영상에서의 artifact를 제거하기 위하여 주어진 field mapping pulse sequence를 이용하여 서로 다른 echo time에서 영상을 얻는다. 올바른 correction을 하기 위하여 먼저 얻은 데이터의 amplitude에서 threshold를 이용하여 object 주위의 background noise를 제거한다. 얻어진 두 개의 데이터를 이용하여 위상을 구하고, 이때 두 데이터의 위상 차이를 가지고 field map을 만든다. field 데이터의 위상이 $-\pi$ 에서 π 사이가 넘어가는 경우에는 위상에 대한 올바른 데이터를 얻을 수 없으므로 field 데이터를 보정해 주어야 한다. 두 개의 이웃한 pixel에서의 위상 차이가 π 보다 작은 경우를 unwrapping

condition으로 놓고 reference point를 얻기 위해 object 안에서 어떤 loop에서 loop 주위의 위상 차이의 합이 0이 아니면 flag를 사용해서 reference point에서 제외하여 보정에 사용하지 않았다. 이것을 수행하기 위하여 2×2 영역을 object 안의 모든 데이터에 대하여 수행하였다. 그 후 flag이 안된 데이터만으로 보정을 수행하였다.

2.3 Active shim coil hardware의 구성

본 논문에서 사용한 shim coil의 hardware는 표1과 같은 구성요소를 가지고 있다.

Order	Cartesian notation					
1차 성분	X Y Z					
2차 성분	$X^2 - Y^2$ Z ²					
교차 성분	XY YZ ZX					
상수 성분	Z0					

표1. Active shim coil hardware의 구성

위의 요소들 중 1차 성분인 X, Y, Z는 gradient offset 전류를 이용하여 보정하며, 나머지 성분들인 $X^2 - Y^2$, Z², XY, YZ, ZX, Z0은 active shim 장치를 이용하여 user가 hardware적으로 조작 가능한 성분들이다. 이 성분들에 대하여 field 패턴의 변화식을 세우고, 각 성분에 해당하는 shim power supply를 변화시켜 가면서, 변화식에 따르는 계수들을 계산하여, 계수 변화양상을 추이하였다.

2.4 Pseudo-Inverse를 이용한 inhomogeneity

Field 데이터를 $B_0(x, y)$ 라고 하면 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$B_0(x, y) = \Delta\phi(x, y) \frac{1}{\gamma\Delta T} \quad (\text{식 } 5)$$

$\Delta\phi(x, y)$: phase difference image [rad]

γ : gyromagnetic ratio [rad/gauss · sec]

ΔT : time difference [sec]

Field 패턴은 shim coil의 각 성분에 맞추어 phantom의 각 방향(axial, sagittal, coronal)에 대해 다음과 같은 식을 가정하였다.

Axial 방향

$$B_0(x, y) = a \cdot (x_2 - y_2) + b \cdot x + c \cdot y + d \cdot xy + e \quad (\text{식 } 6)$$

Sagittal 방향

$$B_0(y, z) = a \cdot (-y_2) + b \cdot z_2 + c \cdot y + d \cdot z + e \cdot yz + f \quad (\text{식 } 7)$$

Coronal 방향

$$B_0(z, x) = a \cdot z_2 + b \cdot x_2 + c \cdot z + d \cdot x + e \cdot zx + f \quad (\text{식 } 8)$$

위의 식을 이용하여, 방향별로 field pattern을 추정하였으며, 각 계수를 구하기 위하여 식을 matrix 형식으로 다음과 같이 표현하였다.

Coronal 방향에 대해 세운 식의 예를 들면 다음과 같다.

$$\begin{array}{l} A : M \times 6 \quad B : 6 \times 1 \quad C : M \times 1 \\ \left[\begin{array}{cccccc} 0^2 & 0^2 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 1^2 & 0^2 & 1 & 0 & 0 & 1 \\ 2^2 & 0^2 & 2 & 0 & 0 & 1 \\ 3^2 & 0^2 & 3 & 0 & 0 & 1 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ z^2 & x^2 & z & x & zx & 1 \end{array} \right] \begin{bmatrix} a \\ b \\ c \\ d \\ e \\ f \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} B_0(0, 0) \\ B_0(1, 0) \\ B_0(2, 0) \\ B_0(3, 0) \\ B_0(4, 0) \\ B_0(5, 0) \\ B_0(6, 0) \\ \dots \\ B_0(z, x) \end{bmatrix} \end{array} \quad (\text{식 } 9)$$

각각의 matrix를 위와 같이 A, B, C라 하고, matrix B를 구하기 위하여 matrix A의 pseudo-inverse를 취하면 준 식은 다음과 같이 된다.

$$B = \text{PINV}(A) * C \quad (\text{식 } 10)$$

이 식에서 matrix B가 결과로 주어지고, 아래와 같이 각 계수를 구할 수 있다.

PINV은 pseudo-inverse를 의미한다.

2.5 측정된 계수의 적용

본 논문에서 제안한 알고리즘을 이용하여 계산된 계수를 사용하여, 각 계수별 변화양상을 추이한 후, 이를 결과값을 이용하여 active shim power supply의 current를 조절하여, main magnetic field의 보정을 시도하였다.

3. 실험

Magnum 3T whole body 시스템에서 dual fast spin echo pulse sequence를 이용하여 실험을 수행하였다. 실험 파라미터에서 TR은 1000ms, TE는 96ms, ΔT 는

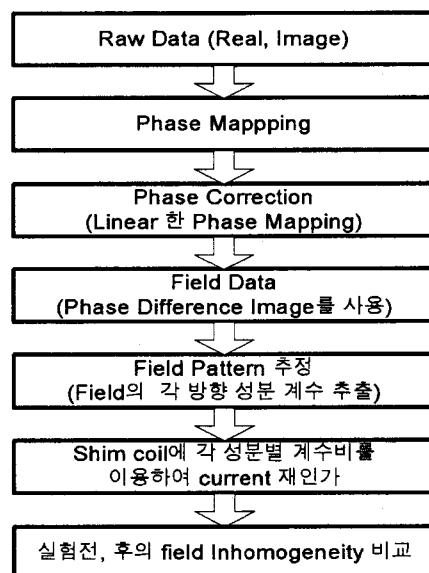
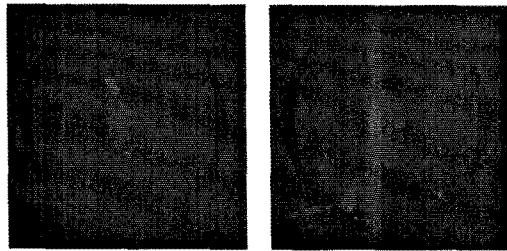


그림 2. Field map의 계산과 분석 개요도

1.18ms, matrix size는 256x256로 하여 field map 영상 획득 실험을 수행하였다. 실험에 사용된 phantom은 직경 20cm의 uniform phantom으로, 약간의 CuSO₄를 섞은 물을 채워 실험을 하였다. Post processing을 통하여 위상을 보정 하였으며, 각 균사식의 계수를 구하기 위하여 Matlab을 이용하였다.

그림 3은 dual fast spin echo pulse sequence로 받은 데이터를 post processing을 통하여 균사식으로 field 패턴을 구한 영상(a)과, 측정되어진 계수를 이용 shim power supply에 current 인가 후 보정된 영상을 보여주고 있다. 두 개의 영상에서 볼 수 있듯이 active shimming을 적용한 영상의 inhomogeneity가 향상되었음을 확인할 수 있다.



(a) (b)
 그림 3. Active shimming 적용 전후의 결과
 (a) 적용 전 영상 (b) 적용 후 영상

4. 결 론

본 연구에서는 dual fast spin echo pulse sequence를 이용하여 기존보다 신속하게 field map data를 얻을 수 있었다. 두 개의 획득 데이터에서 계산된 위상 데이터를 가지고 field map을 계산하고, 1차원, 0차원 위상 보정과 unwrapping 알고리즘을 이용하여 field unwrapping을 수행하였다. Field 패턴을 각 근사식을 사용하여 추정하였다. 근사식의 해를 구하는데 있어서, generalized-inverse인 pseudo-inverse를 사용하여 계산하였으며, 계산되어진 계수는 field의 각 차수 정보를 가지므로, active shimming에 쓰이는 계수로서 사용하였으며, field homogeneity가 향상되는 결과를 얻을 수 있었다.

(참 고 문 헌)

- [1] P. Mansfield, "Multi-planar image formation using NMR spin echoes," *J. Phys. C*, vol. 10, pp.155-158, 1977.
 - [2] C. B. Ahn, J. H. Kim, and Z. H. Cho, "High-speed spiral scan echo planar NMR imaging-I," *IEEE Trans. Med. Imag.*, vol. 5, pp.1-6, 1986.
 - [3] J. Michiels, H. Bosmans, P. Pelgrims, D. Vandermeulen, J. Gybels, G. Marchal, P. Suetens, "On the problem of geometric distortion in magnetic resonance images for stereotactic neurosurgery," *Magn. Reson. Imaging*, vol. 12, pp.749-765, 1994.
 - [4] E. Piovan, P. Zampieri, F. Alessandrini, M. Gerosa, A. Nicholato, A. Pasoli, R. Foroni, M. Giri, A. Bricolo, A. Benati, "Quality assessment of magnetic resonance stereotactic localization for gamma knife radiosurgery," *Stereotact. Funct. Neurosurg.*, 64(Suppl. 1), pp.228-232, 1995.
 - [5] S. Kanayarna, S. Kuhara, K. Satoh, "In vivo rapid magnetic field measurement and shimming using single scan differential phase mapping," *Magn. Reson. Med.*, vol. 36, pp.637-642, 1996.
 - [6] K. Sekihara, S. Matsui, and H. Kohno, "NMR imaging for magnets with large nonuniformities," *IEEE Trans. Med. Imag.*, vol. MI-4, pp.193-199
 - [7] C. B. Ahn, J. M. Jo, and Z. H. Cho, "Magnetic field homogeneity correction algorithm using pseudoinversion formula for NMR imaging," *Rev. Sci. Instrum.*, vol. 57, pp.1-6, 1986.