

활상단면에 있어서 MRI 체동 아티팩트의 제거

김 응 규

대전산업대학교 정보통신공학과
300-717 대전시 동구 삼성2동 305-3

E-mail: kimeung@hyunam.tnut.ac.kr

Cancellation of MRI Motion Artifact in Image Plane

Eung-Kyeu Kim*

Dept. of Information Communication Engineering,
Taejon National University of Technology
305-3 Samsung-2Dong, Tong-Gu, Taejon, 300-717
E-mail: kimeung@hyunam.tnut.ac.kr

요 약

MRI 활상내의 체동에 의해 화상위에 나타나는 아티팩트를 제거하는 알고리즘에 관해서 기술한다. 종래의 반복적인 위상탐색법에 의한 제거법과는 달리, 위상 인코딩 방향인 Y 방향의 체동에 대하여 MRI의 원리에 근거해서 체동과 화상의 위상공간에서의 대응관계를 해석해서 체동성분을 추출함으로써 아티팩트를 제거하는 새로운 알고리즘을 제안한다. 인체의 단층상에 있어서 피하지방 부위를 통과하는 Y 방향의 한 라인상의 밀도분포는 대칭성을 갖고 있어 밀도분포위상의 선형성을 체동과 화상성분을 분리하기 위한 구속조건으로 사용한다. MRI 신호에 대해서 X 방향의 1차원 푸리에 변환을 행한 후의 Y 방향의 스펙트럼 위상값은 화상자신의 성분과 체동성분의 합이 되고 있다. Y 방향의 한 라인에 따른 밀도분포가 대칭인 경우에는 화상의 위상성분이 그 위치에 대해서 선형함수가 되고 있다. 이러한 구속조건에 근거한 아티팩트의 제거방법을 정식화 하며, 시뮬레이션에 의해 본 방법의 유효성을 확인한다. 아울러, 체동 변동이 약간 큰 경우 및 Y 접선 영역의 대칭성이 무너진 경우에 대해서도 검토를 행한다.

1. 서 론

MRI는 인체단면의 수소원자핵의 밀도분포를 화상화하는 기술로서 그 활상과정에 있어서 읽어내는 방향인 X 방향의 푸르본 밀도정보를 주파수에, 위상 인코딩 방향인 Y 방향의 밀도정보를 위상에 첨가해 넣어서 2차원 신호를 수집한 후, 이 신호를 푸리에 변환함으로써 화상 재구성을 행한다. 이 때, Y 방향의 위상 인코딩은 보통 수십mm초로부터 수초간격으로 반복적으로 행하기 때문에^[1] 그동안의 환자체동이 위상변동을 일으켜 아티팩트로서 재구성 화상위에 나타나게 된다. 이러한 아티팩트는 임상진단과 MRI 응용에 큰 영향을 주게 된다. MRI 체동 아티팩트의 제거와 관련하여 본 연구에서는 보통 활상방식에서 얻어진 데이터로부터 후처리에 의해 화상을 복원하는 접근방법을 대상으로 한다.^[2,3] 몸의 각 부위에서의 체동에는 3차원적인 여러 가지의 체동이 있기에 이들 모두를 동시에 취급한다는 것은 곤란하여, 종래의 연구에서도 활상단면에 수직인 방향^[4,5]과 활상단면내의 강제운동으로 구별해서 취급되어 왔다. 여기에서도 활상단면내의 강제적인 체동을 가정해서 취급한다. 활상단면내의 강제운동적인 체동을 취급하는 연구로서 Hedley등은 물체의 운동이 임

의 강제운동이라는 가정하에 화상내의 대상물체의 존재범위를 이미 알고 있는 것으로 하여 아티팩트 제거 알고리즘을 개발하였다^[6]. 하지만, 이 알고리즘은 반복적인 위상탐색법이 되고 있어 그 수렴능력은 향상되고 있지만, 여전히 연산시간이 소요되고 반드시 수렴한다는 보장은 없다. 따라서 이번 연구에서는 반복법에 의하지 않고 단순한 대수연산에 의해 안정하게 체동을 제거하는 방법을 제안한다. 또한 활상단면내의 임의의 평행이동은 없고 Y 방향의 체동만을 취급한다. 아울러, 대상물의 존재범위를 이미 알고있다는 조건을 사용하지 않고 그 대신에 Y 방향에 따른 1차원 밀도분포가 대칭성을 갖는 것처럼 한 라인이 대상물 위에 존재한다는 조건을 가정하고 있다. 인체의 단층상에 있어서 피하지방 부위의 밀도는 거의 균일하다고 가정할 수 있다. 따라서 대상물 좌·우측단의 피하지방 부위를 통과하는 Y 방향의 한 라인의 밀도분포는 대칭으로 간주할 수 있다. MRI 신호에 대해서 X 방향의 1차원 푸리에 변환을 행한 후의 Y 방향의 스펙트럼 위상값은 화상자신의 성분과 체동성분의 합이 되고 있다. Y 방향의 한 라인에 따른 밀도분포가 대칭인 경우에는 화상자신의 위상성분이 그 위치에 대해서 선형함수가 되고 있다. 따라서 이 선형함수로부터 벗어난 성분을 체

동성분으로 분리할 수 있다.

이하, 2장에서는 MRI의 활상과정과 체동을 추정하는 구속조건의 도출에 관해서 기술하고, 이것을 이용한 아티팩트의 제거 알고리즘을 정식화 한다. 3장에서는 본 방법의 유효성을 확인하기 위한 시뮬레이션 및 체동의 변화가 약간 큰 경우와 Y 접선영역에서 밀도분포의 대칭성이 무너진 경우에 대해서도 시뮬레이션을 행한다. 4장에서는 본 연구의 결과와 향후의 과제에 관해서 기술한다.

2. MRI 원리와 체동 아티팩트

2.1 MRI 활상과정 및 체동 아티팩트의 제거

MRI는 수소 원자핵 프로톤의 밀도분포 $\rho(x, y)$ 를 화상화하는 기술로서 제n번째의 MRI 신호는 다음과 같이 표시된다.

$$f_n(t) = \frac{1}{N} \sum_x \sum_y \rho(x, y) e^{j\pi(G_x x + G_y y)} \quad (1)$$

그리고, MRI 신호 $f_n(t)$ 의 데이터 수집은 MRI 활상과정에서 매회 행해지며, 그 수집시간은 짧아 약 수십ms초 정도 소요된다. 한편, 인접한 2회재의 신호수집간격 T_R 은 보통 1초정도로 이 사이에서 체동이 발생한다. 체동은 주로 호흡에 의한 움직임이므로 Y 방향으로만 발생하는 강제운동으로 가정한다.



그림1 체동과 MRI 활상과정

체동이 없다고 할 때, 제 n번째에 있어서 얻어진 MRI 신호 $f_n(t)$ 는 다음식으로 나타낸다.

$$f_n(t) = \frac{1}{N} \sum_x \sum_y \rho(x, y) e^{j\pi G_y y n\tau} e^{j\pi G_x x} \quad (2)$$

이 동안에 Y 방향으로 체동 Δ_n 이 존재한다고 하면 얻게되는 MRI 신호 $f'_n(t)$ 는 아래와 같다.

$$\begin{aligned} f'_n(t) &= \frac{1}{N} \sum_x \sum_y \rho(x, y) e^{j\pi G_y (y + \Delta_n)n\tau} e^{j\pi G_x x} \\ &= \frac{1}{N} \sum_x \left(\sum_y \rho(x, y) e^{j\pi G_y (y + \Delta_n)n\tau} \right) e^{j\pi G_x x} \\ &= \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_x F'_{xn} e^{j\pi G_x x} \end{aligned} \quad (3)$$

체동이 존재할 때, F'_{xn} 은 $f'_n(t)$ 의 l에 관한 푸리에 변환에 의해 다음과 같이 표시된다.

$$\begin{aligned} F'_{xn} &= \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_l f'_n(t) e^{-j\pi G_x x l} \\ &= \frac{1}{\sqrt{N}} e^{j\pi k_x \Delta_n} \sum_y \rho(x, y) e^{j\pi k_x y n} \\ &\quad (k_x = \gamma G_x \tau) \end{aligned} \quad (4)$$

특히, 체동에 의한 위상변동을 교정치 않는 경우에 얻게되는 화상의 농도값은 다음식과 같이 된다.

$$\rho'(x, y) = \int_n [F'_{xn}]$$

$$= \frac{1}{N} \sum_n e^{-j\pi k_x (y - \Delta_n)n} \sum_y \rho'(x, y) e^{j\pi k_x y n} \quad (5)$$

그림 2는 MRI 신호 F'_{xn} 및 MRI의 화상관계를 나타내고 있다. 체동이 없는 경우, F_{xn} 은 MRI 데이터의 잃어내는 방향인 X 방향의 푸리에 변환후의 항은 (4)식에 의해 다음과 같이 된다.

$$\begin{aligned} F_{xn} &= \int_l [f_n(t)] \\ &= \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_y \rho(x, y) e^{j\pi k_x y n} \\ &= A e^{j\pi \phi_{xn}} \end{aligned} \quad (6)$$

ϕ_{xn} 은 화상자신의 Y 방향의 역푸리에 변환의 위상 분포로 "화상의 위상"이라고 한다.

체동이 존재할 때 MRI 신호 데이터로부터 구해진 F'_{xn} 과 F_{xn} 의 관계는 다음식으로 나타내어진다.

$$F'_{xn} = e^{j\pi k_x \Delta_n} \cdot F_{xn} = A e^{j\pi \phi'_{xn}} \quad (7)$$

ϕ'_{xn} 은 MRI 신호 데이터의 X 방향의 푸리에 변환의 위상분포로 "MRI의 위상"이라고 한다. 만약, 체동 Δ_n 을 알게되면 다음식과 같이 체동을 제거할 수 있다.

$$\begin{aligned} \rho''(x, y) &= \int_n [F'_{xn} e^{-j\pi k_x \Delta_n}] \\ &= \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_n F'_{xn} e^{-j\pi k_x \Delta_n} e^{-j\pi k_x y n} \\ &= \int_n [F_{xn}] \\ &= \rho(x, y) \end{aligned} \quad (8)$$

2.2 체동과 위상관계 및 체동성분추출 구속조건

각행의 체동이 화상내에 미치는 영향은 전체 화면 영역에 분산된 아티팩트로 나타나지만 F_{xn} 의 위상공간에서는 (7)식에 의해 "화상의 위상", "MRI의 위상" 및 "체동성분"간의 관계를 다음과 같이 대수적인 합으로 나타낼 수 있다.

$$\phi'_{xn} = k_x n \Delta_n + \phi_{xn} \quad (9)$$

한편, (x, n) 에 있어서 MRI 위상 ϕ'_{xn} 은 $F'_{x,n}$ 에 의해 다음과 같이 구해진다.

$$\phi'_{xn} = \tan^{-1} \frac{\text{Im}[F'_{x,n}]}{\text{Re}[F'_{x,n}]} + m\pi \quad (10)$$

(단, m은 정수)

이 MRI 위상내에서 체동성분과 화상의 위상성분을 어떻게 분리하느냐가 중요한 문제가 된다. 이러한 문제점을 해결하기 위해 다음과 같은 새로운 구속조건을 도입한다.

"화상에 있어서 Y 방향의 한 라인의 밀도분포가 대칭성을 갖는다면 이 한 라인에 따른 화상의 위상은 n에 대해서 선형함수가 된다"

일반적으로 인체의 단면화상에 있어서 주변의 피하지방 부위의 밀도분포는 균일하고 크다는 사실이 알려져 있으며, 이 피하지방 영역을 통과하는 Y 방향의 한 라인상의 밀도분포는 대칭으로 간주할 수 있어, 이 라인상의 화상의 위상은 선형함수가 된다. 이 선형함수로부터 벗어난 성분을 체동으로 간주해서 체동에 의한 아티팩트를 제거한다.

2.3 구속조건에 의한 아티팩트의 제거

그림 3(a)에 나타낸 바와 같이 어떤 Y 방향의 한 라인상의 1차원 밀도분포 ρ 가 원점에 관해서 대칭인 경우, 푸리에 변환의 성질로부터 Y 방향의 푸리에 스펙트럼의 허수부는 0이고, $\int_y [\rho]$ 의

위상도 0이 된다. 또한, $y = y_c$ 에 관해서 대칭인 밀도분포 ρ'_y 에 대해서는 변환의 이동정리로부터 다음과 같은 식이 성립한다.

$$\int_y [\rho'_y] = e^{jk_y y_c n} \cdot \int_y [\rho_y] \quad (11)$$

따라서, Y 방향의 한 라인의 밀도분포가 $y = y_c$ 에 관해서 대칭일 때의 화상의 위상 ϕ_n 은 다음과 같은 n의 선형함수로 나타낼 수 있다.

$$\phi_n = k_y y_c n \quad (12)$$

그림 3(b)에서 대칭분포인 Y 접선 영역상의 화상의 위상은 n에 대해서 선형함수임을 나타내고 있다. (12)식을 (10)식에 대입하여 $k_y n$ 으로 나누면 다음과 같은 관계가 얻어진다.

$$\frac{\phi'_n}{k_y n} = y_c + \Delta_n \quad (13)$$

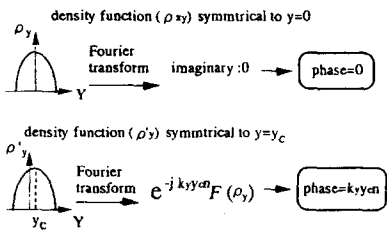


그림3. Y 방향의 한 라인상의 대칭적인 밀도분포

즉, MRI 위상을 $k_y n$ 으로 나눈 결과는 체동과 대칭축의 원점으로부터의 거리의 합이다. 원점으로부터의 거리는 재생화상의 평행이동량에만 관계하기 때문에 반드시 알 필요는 없다. 따라서, Y 방향의 체동에 의한 아티팩트의 제거순서는 다음과 같이 행할 수 있다.

첫째, MRI 신호 t 방향의 1차원 푸리에 변환 F'_{xn} 을 계산한다.

둘째, MRI 화상에서 밀도분포가 대칭이라고 간주할 수 있는 Y 방향의 한 라인을 선택해서 이것에 대응하는 F'_{xn} 에 있어서 한 라인의 위상 ϕ'_n 을 계산한다.

셋째, ϕ'_n 을 $k_y n$ 으로 나누어 체동 Δ_n 을 분리한다.

넷째, (8)식으로부터 아티팩트를 제거한 MRI 화상을 얻는다.

3. 시뮬레이션 및 알고리즘의 문제점

3.1 시뮬레이션 실험

제한한 방법의 유효성을 평가하기 위하여 그림 4(a)에 나타낸 바와 같이 256×256의 Sheep and Logan phantom 화상 데이터를 이용해서 시뮬레이션을 행하였으며, 이때 사용한 호흡에 의한 체동은 다음과 같은 주기함수를 이용했다^[7].

$$\Delta_n = 0.14 \cos(16n) + 0.20 \cos(32n) + 0.50 \cos(48n) + 0.10 \sin(16n) + 0.12 \sin(32n) + 0.20 \sin(48n) \quad (14)$$

3.2 MRI 위상의 다치성 문제

“MRI 위상”을 구할 때, (10)식의 m을 결정할 필요가 있다. m을 추정함에 있어서 실수부와 허수부의 부호를 고려함과 동시에 인접한 2점의 위상차가

작다는 가정하에 다음 조건식에 근거하여 행하였다.

$$|\phi'_n - \phi'_{n-1}| = |k_y n (\Delta_n - \Delta_{n-1}) + k_y \Delta_n + \phi_n - \phi_{n-1}| < \pi \quad (15)$$

그러나, |n| 및 체동의 변화 $|\Delta_n - \Delta_{n-1}|$ 이 큰 경우와 화상단면의 대칭성이 무너져 위상변화가 n에 관해서 선형이 되지 않아 $|\phi_n - \phi_{n-1}|$ 이 크게 된 경우에는 (15)식을 만족치 않는다. 한가지 예로 다음식으로 나타내는 Y 방향의 체동 Δ_n 을 고려해 본다.

$$\Delta_n = 2.0 \cos(20n) + 1.5 \sin(20n) \quad (16)$$

이 체동은 (14)식의 체동에 비해 20배 이상의 진폭을 갖고 있다. 이 체동에 의한 아티팩트가 존재하는 화상을 그림 5(a)에 나타낸다.

3.3 y 접선영역의 대칭성이 무너진 경우

y 접선영역에 있어서 밀도분포의 대칭성이 무너진 경우, “화상의 위상”에 대한 선형성이 무너지게 되어 “MRI의 위상”을 정확히 구할 수 없게 된다. 대칭성이 무너진 경우의 원화상(그림 6(a))과 아티팩트를 가진 MR 화상을 그림 6(b)에 나타낸다.

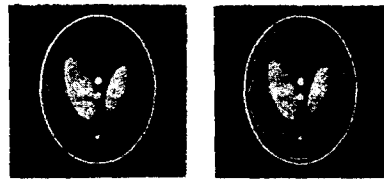


그림 6 원화상 및 아티팩트를 가진 MR 화상

4. 결론

위상 인코딩 방향인 Y 방향의 체동에 대하여 MRI 원리에 근거해서 체동과 화상의 위상공간에서의 대응관계를 해석해서 체동성분을 추출함으로써 아티팩트를 제거하는 새로운 알고리즘을 제안했다. 단층상의 피하지방 부위를 통과하는 한 라인상의 밀도분포는 근사적으로 균일한 것으로 알려져 있어 대칭성을 갖는 밀도분포 위상의 선형성을 체동과 화상성분을 분리하기 위한 구속조건으로 사용했다. 본 방법의 유효성을 나타내기 위하여 Sheep and Logan phantom 화상 데이터를 이용해서 시뮬레이션을 행하였으며, 체동 변동이 약간 큰 경우 및 y 접선 영역의 대칭성이 무너진 경우에 대해서도 검토를 행하였다. 또한 머리부위와 같은 강체 부위에 있어서 호흡에 따른 체동의 1차 근사인 Y 방향의 체동만을 취급했다.

금후의 과제로서, 체동을 화상단면내의 임의의 2차원적인 평행이동으로의 확장, 실제의 MRI 신호에 응용하기 위한 알고리즘의 실용성 및 극소 운동적인 체동에 따른 아티팩트를 제거하기 위한 알고리즘의 검토가 필요하다.

참고문헌

- [3] GH Glover and AT Lee, “Motion artifacts in fMRI: comparison of 2 DFT with PR and spiral scan methods”, Magnetic Resonance in Medicine, Vol.33, pp.624-635, 1995
- [7] 김용규, “MRI 체동 아티팩트의 제거”, '99 한국정보과학회 봄 학술발표논문집, pp.582-584, 1998