

# Spiral scan 초고속 자기공명영상 재구성 알고리즘

안창범, 김치영, 박대준, 김휴정, 유완석, 이윤\*, 오창현\*, 이흥규\*\*  
광운대학교 전기공학과, \*고려대학교 전자공학부, \*\*메디슨

## Reconstruction Algorithms for Spiral-scan Echo Planar Imaging

C.B. Ahn, C.Y. Kim, D.J. Park, H.J. Kim, Y.S. Ryu, Y. Yi\*, C.H. Oh\*, and H.K. Lee\*\*

Dept. Electrical Engineering, Kwangwoon University

\*Electronic Engineering, Korea University, \*\*Medison

### Abstract

In this paper, reconstruction algorithms of spiral scan imaging which has been used for ultra fast magnetic resonance imaging have been reviewed, and some simulation results using two different algorithms are reported. Since the trajectory of the spiral scan in k-space is the spiral, reconstruction of the spiral scan is not as straight forward as that used in Fourier imaging technique where the sampling points are usually on the rectangular grids. Originally the reconstruction of the spiral scan imaging was based on the convolution backprojection algorithm modified with a shift term, however, some other reconstruction techniques have also been tried by remapping sampling points from spiral trajectory to Cartesian grids. Some experimental aspects of MR spiral scan imaging will also be addressed.

### 서론

최근 들어 자기공명영상분야의 획기적인 발전은 구조영상단계를 뛰어넘어 기능영상을 위한 많은 연구가 진행되고 있다. 또한 수술실에서 실시간에 가까운 자기공명영상을 얻기 위한 연구에 많은 관심이 모아지고 있다. 이러한 실시간 자기공명영상이나 다이나믹한 기능영상을 위하여 선행되어야 할 것이 초고속 영상이다. 초고속영상은 보통 수분 내에서 10여분 이상이 소요되는 일반적인 자기공명영상을 약 100ms 이내에 얻는 기술로서, 심장영상 등 빨리 움직이는 장기의 영상에 필수적이라 할 수 있다. Echo planar imaging (EPI)과 함께 잘 알려진 Spiral scan imaging은 데이터를 얻는 k-스페이스에서의 스캔 궤적이 spiral 로 EPI의 지그재그 궤적에 비하여 eddy current의 영향이 작고, 균등한 방향의 T2 blurring으로 한 방향으로 blurring이 심각한 EPI에 비하여 많은 실험적인 장점을 가지고 있다 [1-3]. 또한 flow에 의한 영향도 spiral scan이 우수함이 보고되고 있다 [4]. 본 논문에서는 spiral scan 초고속 영상방법에 대하여 간단히 review한 후 대표적

인 두 가지 spiral scan 재구성방법을 비교 분석하였다. 또한 spiral scan 방법의 실험 파라미터 설정 방법에 대하여 소개하였다.

### Spiral scan 영상

편의상 이차원 자기공명영상에서 가해지는 경사자계를  $G_x$ ,  $G_y$ 라 할 때 아래와 같이  $k_x(t), k_y(t)$ 를 정의하면

$$\begin{aligned} k_x(t) &= \gamma \int_0^t G_x(t') dt' \\ k_y(t) &= \gamma \int_0^t G_y(t') dt' \end{aligned} \quad (1)$$

sampling 되는 데이터 점을  $s(k_x(t), k_y(t))$ 로 나타낼 수 있으며, 재구성 영상은 이들의 이차원 Fourier 변환을 통하여 얻어진다. Spiral scan 영상의 궤적은 아래의 식으로 주어진다.

$$\begin{aligned} k_x(t) &= \gamma \cdot a \cdot t \cos(b \cdot t) \\ k_y(t) &= \gamma \cdot a \cdot t \sin(b \cdot t) \end{aligned} \quad (2)$$

이러한 궤적을 얻기 위하여 가해주어야 하는 경사자계는 (1)식으로 부터

$$\begin{aligned} G_x(t) &= a \cos(bt) - abt \sin(bt) \\ G_y(t) &= a \sin(bt) + abt \cos(bt) \end{aligned} \quad (3)$$

Spiral scan 영상의 pulse sequence 및 k-space 궤적을 그림 1, 2에 나타내었다.

### Spiral scan 재구성 알고리즘

(1) Modified Convolution Backprojection (MCB)  
Spiral scan의 k-space 궤적에서 알 수 있듯이 sample된 데이터 위치는 극좌표  $(r, \theta)$ 에서 동심원에 가까우며, 한 사분면에서의  $r$  방향으로 sampling 위치는 등간격이고, 점대칭인 사분면의 sampling 위치 사이에 놓여 있다. 따라서 complex conjugate symmetric 성질을 이용하면  $r$  방향으로 등간격의 sampling 값을 얻을 수 있고 이것을 일차원 Fourier 변환을 하게 되면 projection data가 얻

어진다. 이때 spiral 궤적의 특성상  $\theta$  방향의 view 에 따라 shift term 이 생겨나는데 이것을 보정하기 위하여  $\exp(-j\omega\Delta_i)$  를 곱해주어야 한다. 여기에서  $\Delta_i$ 는

$$\Delta_i = \frac{i}{N_\theta} \Delta k_r, i=0, 1, \dots, N_\theta-1 \quad (4)$$

이며  $N_\theta$  는 rotation 당 sampling 개수를 나타낸다. 이러한 계산과정을 그림 3에 나타내었다.

(2) Interpolation to Cartesian Grid (ICG)  
 spiral 궤적 위의 데이터 값으로부터 rectangular grid 위의 데이터 값을 얻기 위해서는 interpolation 이 필요하다. 따라서 이 알고리즘의 정확도는 interpolation 의 정확도에 의존하게 된다. 본 연구에서는 interpolation 하고자하는 위치에서 가장 가까운 4곳의 데이터를 먼저 찾은 후 각 데이터 위치와 interpolation 하고자하는 위치와의 거리의 역에 비례하는 가중치로 bilinear interpolation 을 하였다. Spiral 궤적에서의 데이터 위치와 interpolation 하고자하는 Cartesian grid를 그림4에 함께 나타내었다. 가장 가까운 4곳의 데이터 위치와 가중치는 매번 재구성할 때마다 계산할 필요 없이 한 번만 계산하여 file에 보관하고 있으면 이후는 file에서 부터 읽어와 계속 사용할 수 있다.

알고리즘 비교 시뮬레이션

Spiral scan 영상의 두 가지 재구성 알고리즘을 비교하기 위하여 컴퓨터 시뮬레이션을 수행하였다. 시뮬레이션을 위한 phantom은 Fourier 변환식이 analytical 하게 알려져있는 이차원 사각형의 조합으로 구성하였으며 사각형의 위치와 가로, 세로 길이, intensity를 정해주면 원하는  $(k_x, k_y)$  에서의 데이터 값을 얻어낼 수 있도록 하였다. 비교분석을 위하여 두 가지 방법으로 영상을 재구성하여 target 영상과의 Mean Square Error (MSE), 평탄영역에서의 flatness, edge sharpness 등을 구하여 두 알고리즘 간의 성능을 비교 분석해 보았다.

Spiral scan 영상 파라미터 설정

Spiral 궤적에서 rotation 회수를  $N_r$  로 정의하고 시간영역에서의 sampling 구간을  $\Delta T$  라하면 Nyquist sampling 정리에 따라

$$\begin{aligned} \Delta k_r &= \gamma a N_\theta \Delta T = \frac{\pi}{N_r \Delta r} \\ \Delta k_\theta &= b \Delta T = \frac{2\pi}{N_\theta} \end{aligned} \quad (5)$$

여기에서  $\Delta r$  은 재구성 영상에서의 pixel size 를 나타낸다.

(5)식으로부터

$$\begin{aligned} a &= \frac{\pi}{\gamma N_\theta N_r \Delta T \Delta r} \\ b &= \frac{2\pi}{N_\theta \Delta T} \end{aligned} \quad (6)$$

따라서 spiral scan 영상에서의 실험 파라미터 결정은

1) 재구성하려는 영상의 matrix size 로부터  $N_r$  결정.

$$N_r = \frac{N}{4} \quad (7)$$

2) T2 로 부터 대략적인 데이터 수집시간 결정.

$$T_2 \approx T_D = N_r N_\theta \Delta T \quad (8)$$

3) (8)식으로부터  $N_\theta \Delta T$  결정.

$$N_\theta \Delta T = \frac{T_D}{N_r} \quad (9)$$

4) (6)식 및 (8)식, (9)식을 이용하여 a,b 결정.

$$\begin{aligned} a &= \frac{\pi}{\gamma N_\theta N_r \Delta T \Delta r} = \frac{\pi}{\gamma T_D \Delta r} \\ b &= \frac{2\pi}{N_\theta \Delta T} \end{aligned} \quad (10)$$

5)아래의 식으로 주어지는  $G_{max}$  를 계산하여 주어진 경사자계 증폭기에서 인가할 수 있는 최대경사자계 이하인지 확인.

$$G_{max} = abT_D \quad (11)$$

결론

본 논문에서는 최근 들어 자기공명영상의 가장 큰 관심분야인 초고속영상기법의 하나인 spiral scan 영상방법을 살펴보고 재구성방법으로 Modified Convolution Backprojection (MCB)과 Interpolation to Cartesian Grid (ICG) 를 컴퓨터 시뮬레이션을 통하여 비교 분석해보았다. 또한 spiral scan 영상 파라미터와 실험적 파라미터, 재구성 영상간의 관계를 설정하기 위한 프로시저를 유도하였다.

참고문헌

1. 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.
2. C.B. Ahn, C.Y. Rew, J.H. Kim, O. Nalcioglu, and Z.H. Cho, Proc. SMRM, pp.935-936, 1985.
3. P. Mansfield, "Multi-planar image formation using NMR spin echoes," J. Phys. C, vol. 10, pp.155-158, 1977.
4. C.H. Meyer, B.S. Hu, D.G. Nishimura, and A. Macovski, "Fast Spiral Coronary Artery Imaging," Magn. Reson. Med. vol.28, pp.202-213, 1992.

Spiral scan 초고속 자기공명상 재구성 알고리즘

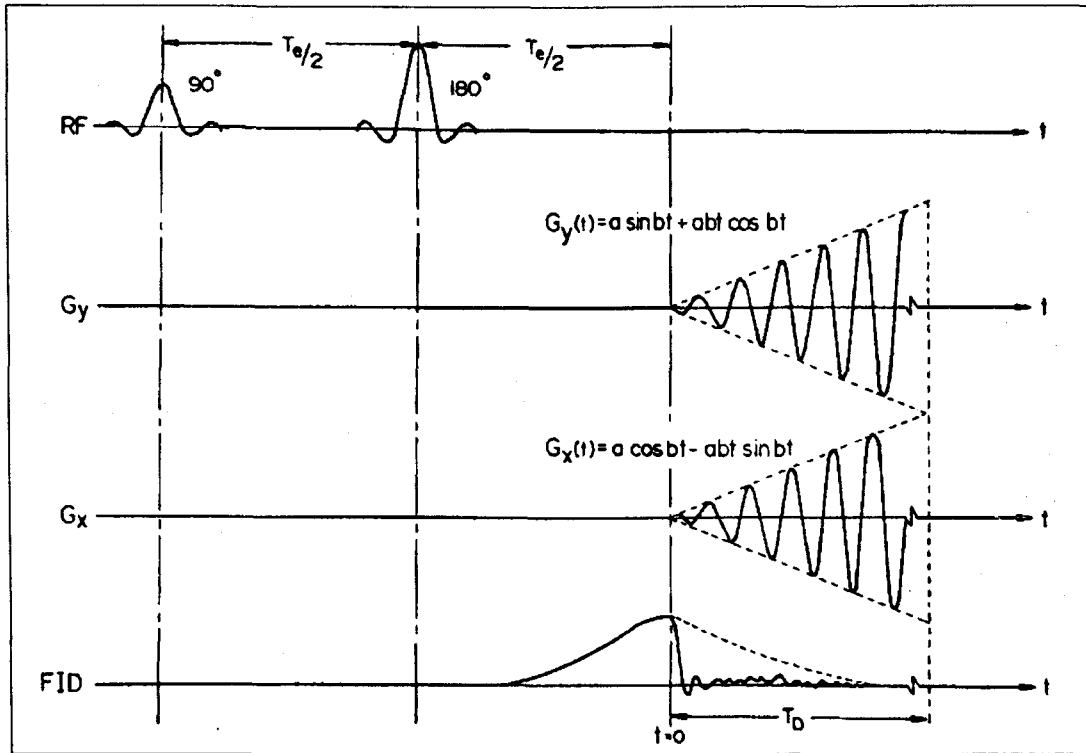


그림 1

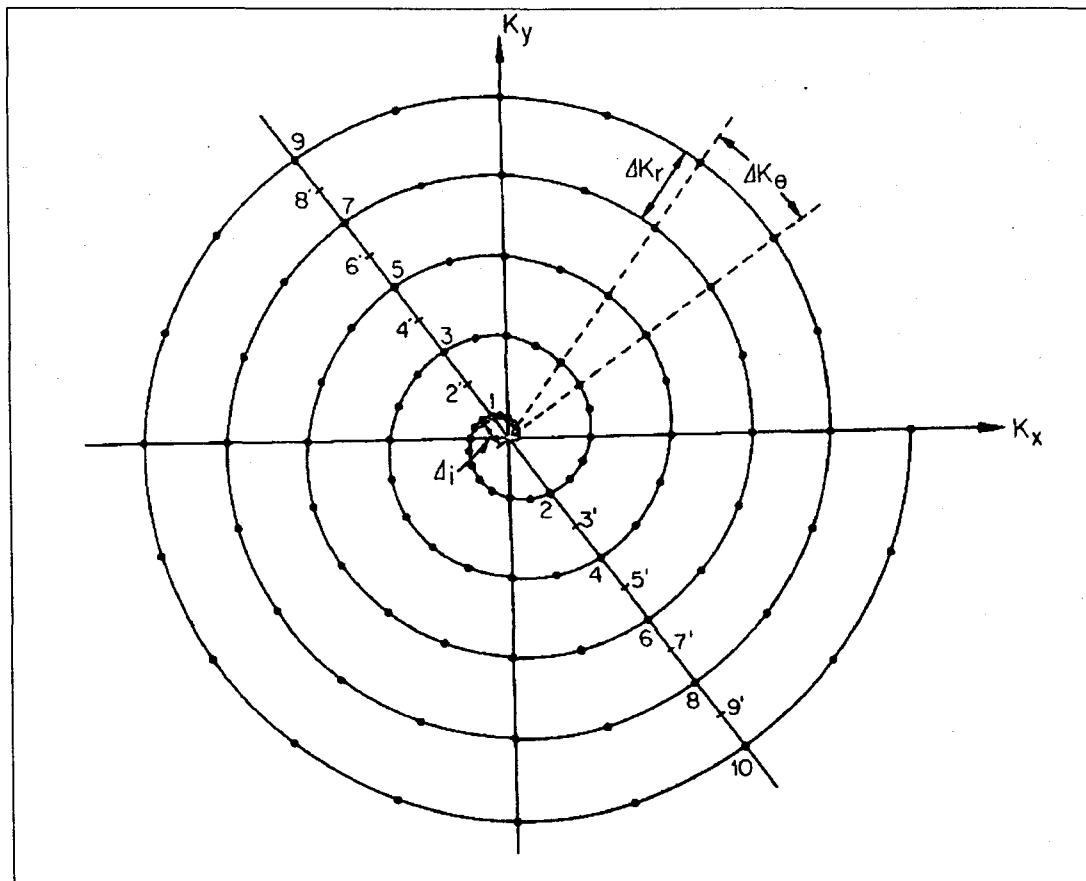


그림 2

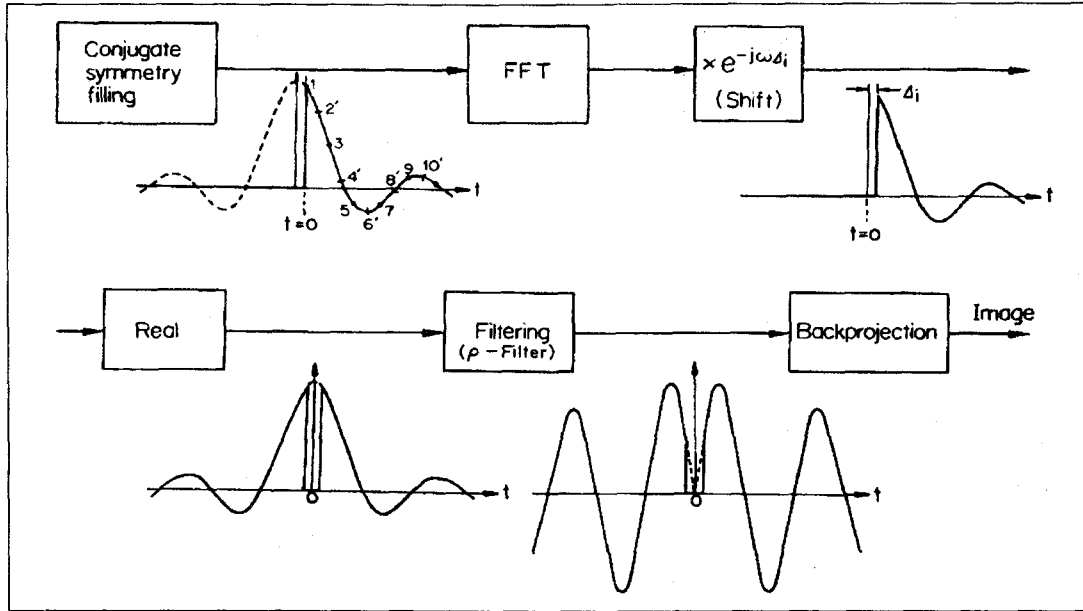


그림 3

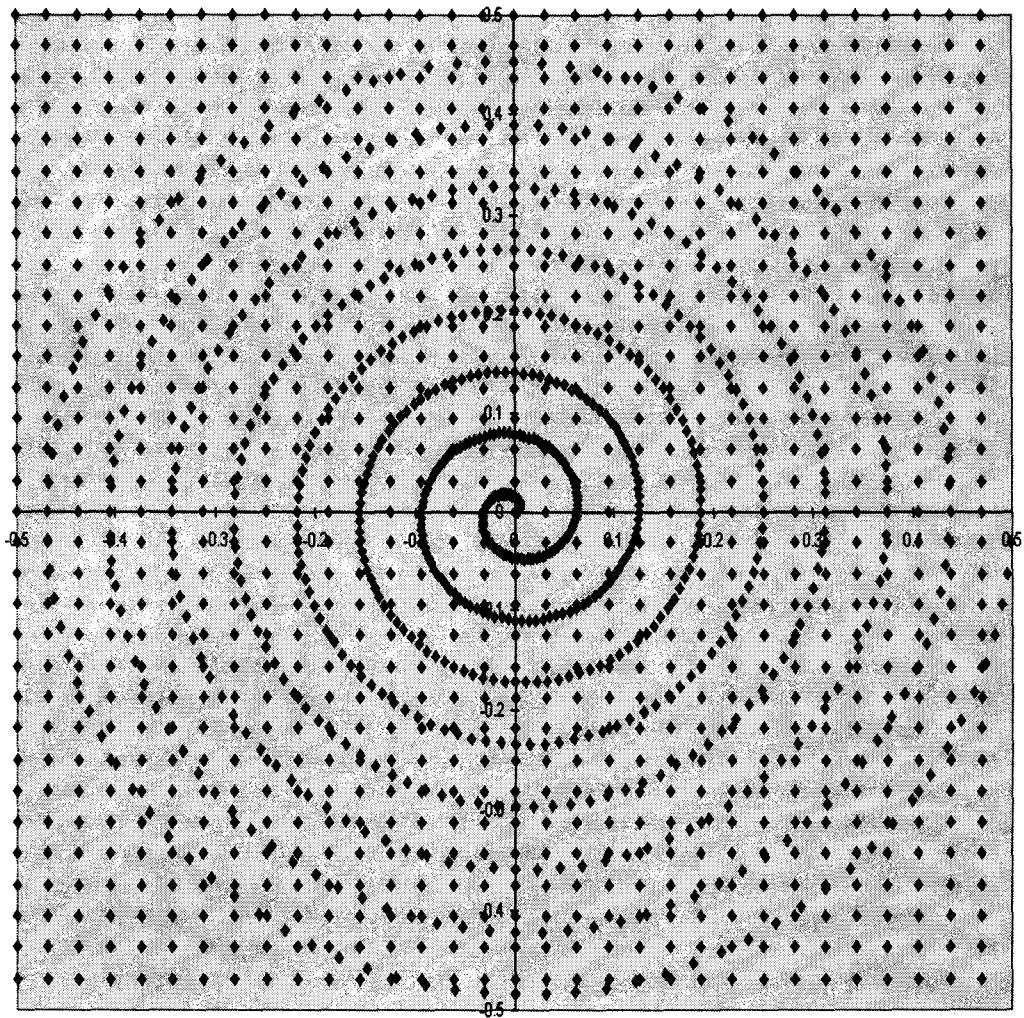


그림 4