

적응 템플릿 필터링에서 복셀의 부분 볼륨 효과로 인한 에지 아티팩트의 제거

안 창 범 · 송 영 철

최근에 해상도의 손실없이 신호대잡음비를 개선시킬 수 있는 적응 템플릿 필터링이 제안되었다. 적응 템플릿 필터링은 다중 템플릿들 중에서 현재 복셀의 주변 구조와 가장 잘 매칭이 되는 템플릿을 선택하여 적응필터링을 적용하는 방법이다. 적응 템플릿 필터링을 자기공명영상에 적용할때 기존의 필터링 방법들에 비하여 향상된 결과를 얻을 수 있으나, T_1 영상과 같이 비교적 작은 동적 범위를 가진 영상에서는 에지에서 계단모양의 artifact가 발견되곤 한다. 이것은 자기공명영상에서 복셀의 부분적인 볼륨 효과에 기인하는 것으로 여러 조직의 성분을 포함하고 있는 경계면의 복셀들에 적응 템플릿 필터링이 적용될 경우 다중성분을 가진 복셀들의 그레이레벨이 인접한 단일성분의 그레이레벨 값에 가까워져 에지가 강조되기 때문이다. 본 논문에서는 다중 성분을 갖는 복셀들을 선별하여 이들에 대해서는 가장 큰 크기의 템플릿을 할당함으로써 artifact를 제거하는 방법을 제안하였다. 제안한 방법을 T_1 자기공명영상과 팬텀 영상에 적용한 결과 에지 artifact가 사라지는 것을 확인할 수 있었으며, 최대 신호대잡음비 면에서도 향상된 결과를 얻을 수 있었다.

서 론

의학 영상에 있어서 신호대잡음비(SNR)와 해상도는 진단을 위한 영상의 질을 결정하는 중요한 파라미터들이다. 의학영상에서 신호대잡음비나 해상도는 여러 가지 물리적, 시간적, 또는 의학적인 원인으로 제한을 받게 된다. 예를 들면 자기공명영상에서 공간 해상도의 향상은 측정시간의 증가와 신호대잡음비의 저하를 가져온다. 최근에 발표된 적응 템플릿 필터링(adaptive template filtering)은 다중 템플릿을 정의하고, 각 복셀들에 대하여 주변구조와 가장 잘 매칭이 되는 템플릿을 선택하여 최소 제곱오차 알고리즘을 적용하는 방법으로 (1-2) 기존의 적응 필터링 방법들 (3-4)보다 해상도의 손실없이 높은 신호대잡음비를 얻을 수 있다. 에지 상의 복셀(voxel)들은 제한된 공간 해상도로 인하여 두 가지 이상의 여러 조직의 성분을 포함하는 경우가 많은데 이러한 다중 성분(multiple compound)을 포함하는 복셀들에 적응 템플릿 필터링이 적용될 경우 에지 경계선상에서 계단 모양의 artifact가 관찰되곤 한다. 이것은 다중 성분을 가진 복셀들의 그레이레벨이 주변의 주도적인 단일성분의 복셀들의

영향으로 단일성분의 그레이레벨에 가까워지기 때문이다. 이 논문에서는 이러한 적응 템플릿 필터링의 문제점을 해결하기 위한 새로운 방법을 제안하였다. 제안된 방법은 다중 성분을 포함하는 복셀들을 선별하여 이들 복셀들에 대해서는 가장 큰 템플릿을 할당함으로써 에지 경계선상에서 발생하는 artifact를 줄였다.

대상 및 방법

적응 템플릿 필터링

적응 템플릿 필터링에서는 다중 템플릿을 사용하여, 주어진 복셀에서 주변 구조와 가장 잘 매칭이 되는 템플릿을 선택한다 (1-2). 다중 템플릿들 중에서 주어진 복셀에 대한 최적의 템플릿은 아래 식의 국부 표준 편차를 이용하여 결정한다.

$$\sigma_j(k, l) = \sqrt{\frac{1}{N_j - 1} \sum_{(k', l') \in T_j} \{x_j(k', l') - \bar{x}_j(k, l)\}^2}$$
$$\bar{x}_j(k, l) = \frac{1}{N_j} \sum_{(k', l') \in T_j} x_j(k', l') \quad [1]$$

대한자기공명과학회지 4:120-127(2000)

¹광운대학교 전기공학과

접 수 : 2000년 11월 9일, 채 택 : 2000년 12월 15일

통신저자 : 안창범 (139-701) 서울시 노원구 월계동 447-1 광운대학교 전기공학과

Tel. 82-2-940-5148 Fax. 82-2-909-3159 E-mail: cbahn@daisy.kwangwoon.ac.kr

여기에서 x_j 는 입력 복셀 값이며, $\sigma_j(k, l)$ 는 템플릿 T_j 에서의 복셀 그레이레벨의 국부 표준 편차이며, (k, l) 은 현재 복셀의 좌표, 그리고 N_j 는 T_j 템플릿의 크기를 나타낸다.

주어진 복셀에 대한 최적화된 템플릿은 문턱값을 이용하여 다음과 같이 결정한다. (i) 모든 템플릿들에 대하여 [1]식으로 주어지는 국부 표준편차를 계산하여 문턱값보다 작은 표준편차를 갖는 평탄 템플릿과 문턱값 보다 큰 표준편차를 갖는 에지 템플릿으로 나눈다. 이때 문턱값은 배경의 잡음 표준편차를 이용하여 정의한다. (ii) 주어진 복셀에서 하나 이상의 평탄 템플릿이 존재할 경우 최적 템플릿은 평탄 템플릿 중 최대 크기를 갖는 템플릿으로 하며, 평탄 템플릿이 없을 경우, 최적 템플릿은 에지 템플릿 중에서 최소의 표준편차를 갖는 템플릿으로 한다.

최적화된 템플릿이 선택되면, 복셀의 필터링 값은 아래의 2-D 최소 제곱 오차식으로 아래와 같이 주어진다 (4).

$$y(k, l) = \frac{\sigma_y^2(k, l)x(k, l) + \sigma_n^2 \bar{x}(k, l)}{\sigma_y^2(k, l) + \sigma_n^2} \quad [2]$$

$$\sigma_y^2(k, l) = \max \{0, \sigma_x^2(k, l) - \sigma_n^2\}$$

여기에서 $y(k, l)$ 은 필터링된 출력, $\sigma_y^2(k, l)$ 과 σ_n^2 은 각각 (k, l) 에서 입력 영상의 국부 분산과 영상의 잡음 분산을 나타낸다. 식 [2]에서 보듯이, 만약 국부 분산이 잡음 분산 보다 충분히

작은 경우(예를 들어, 평탄 영역) 필터 출력은 템플릿상의 입력 그레이레벨들의 평균값에 가까워지며, 반대로 국부 분산이 잡음 분산 보다 매우 클 경우(예를 들어, 에지 영역) 필터 출력값은 입력 값에 접근하게 된다.

다중 성분을 포함하는 시험 영상

자기공명영상에서 복셀의 그레이레벨은 복셀 안의 스핀들의 신호의 합으로 나타난다. 서로 다른 조직의 경계면에 있는 복셀 들에는 여러 조직의 성분들이 함께 존재할 수 있는데 이들 복셀 의 그레이레벨은 각 성분들의 구성비에 의한 그레이레벨의 가중 합으로 주어진다. 이러한 복셀들에 적용 템플릿 필터링이 적용 될 경우 이들 복셀의 그레이레벨은 템플릿 상의 주도적인 단일 성분의 복셀들의 영향에 의하여 단일 성분의 그레이레벨로 접근 하게 된다. 이 경우 중간값들이 바뀌어 두 영역 간의 그레이레 벨 차이가 커져 Fig. 1에서 보듯이 계단모양의 artifact가 발 생할 수 있다. 특히 T₁ 자기공명영상과 같이 동적 범위가 상대 적으로 좁은 영상에서 이러한 artifact의 관측이 용이하다.

다중 성분을 가지는 복셀들에 대한 적용 템플릿 필터링의 성 능을 개선하기 위하여 먼저 다중 성분을 갖는 시험영상을 제작 하였다 (5). Fig. 2의 시험영상은 380×356 크기의 8 비트 그 레이레벨을 갖는 수학적인 영상으로 다양한 형태의 원소들을 포 함하고 있다. 먼저 상단은 다양한 폭의 종모양의 물체들로 sine 함수로 경계면을 정의하였다. 가운데 단에는 직선을 이용한 여

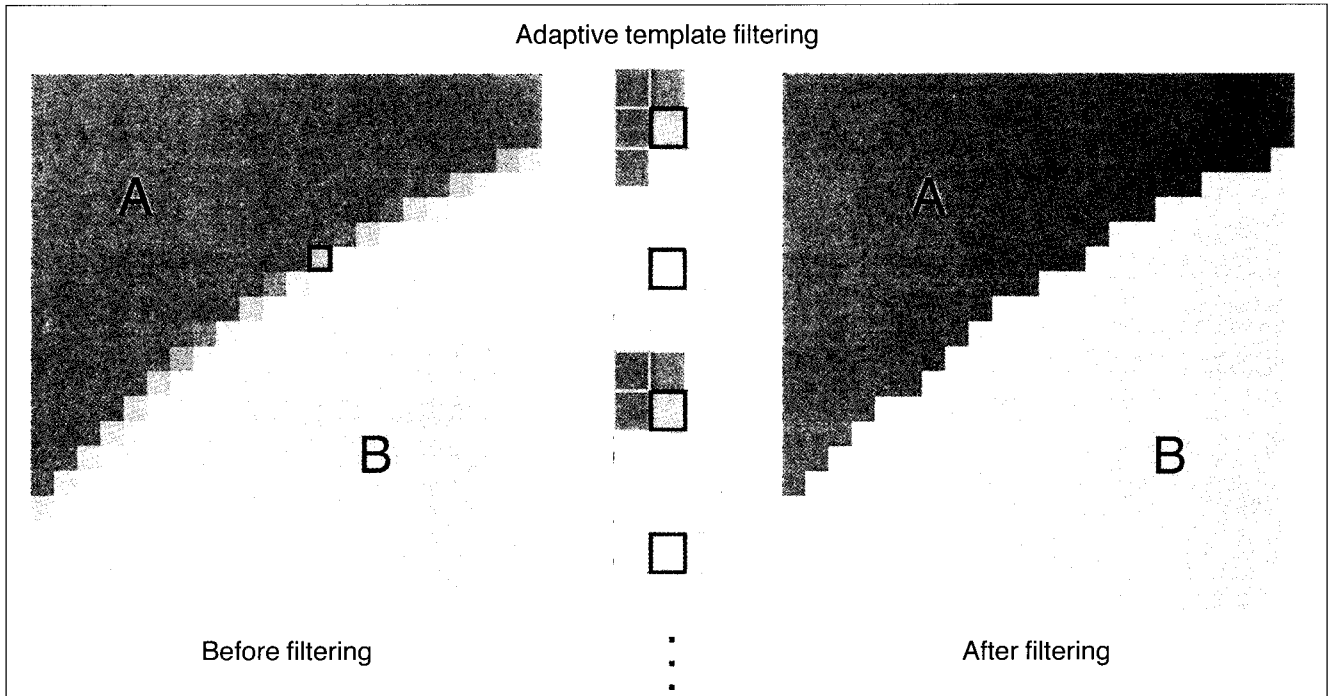


Fig. 1. Observation of stair-like edge artifact is schematically shown. Voxels having multiple compounds exist at near edges. The gray levels of these voxels are between the gray levels of voxels having single compound (A or B). By the adaptive template filtering, the gray level of the voxel having multiple compounds may become a similar gray level of the near dominant voxel having single compound (A or B). This modification of middle gray level results in a stair-like artifact as shown.

안정범 외

러 가지 삼각형과, 그레이레벨이 서서히 바뀌는 원들이 있다. 하단의 왼쪽은 내부 그레이레벨이 일정한 원이며, 이와 비교를 위하여 오른쪽에는 복셀의 부분 볼륨효과를 고려하지 않은 두

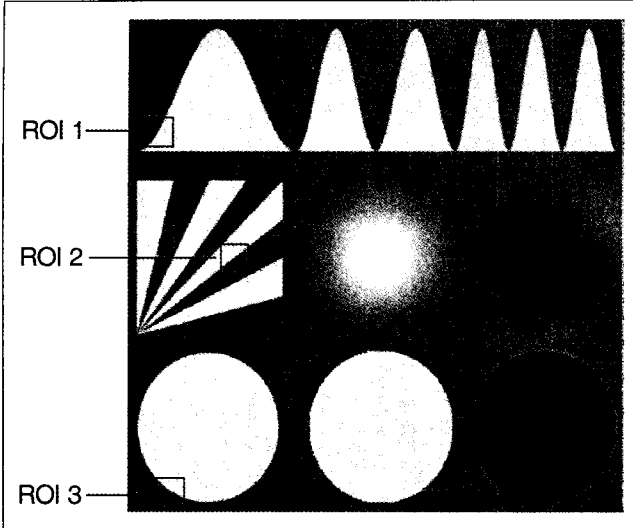


Fig. 2. Generated test image containing multiple compounds. For this purpose, some boundaries of the objects in the image are mathematically defined over pixel boundaries.

원(원에 가까운 두 물체)을 포함하였다. 가운데 단의 그레이레벨이 점진적으로 변하는 원을 제외한 나머지 물체들의 내부 그레이레벨은 동일하며, 물체의 경계면에 있는 복셀의 그레이레벨은 복셀 내에 존재하는 물체의 비율에 따라 아래와 같이 지정하였다.

$$I = \frac{I_\alpha \cdot V_\alpha + I_\beta \cdot V_\beta}{V_\alpha + V_\beta} \quad (3)$$

여기에서 I_α 와 I_β 는 α -object와 β -object의 그레이레벨이며, V_α 와 V_β 는 복셀 안에서 α -object와 β -object가 차지하는 부피를 나타낸다. Fig. 2에 표시된 ROI 영역들은 필터의 성능을 보다 자세히 평가하기 위하여 정의한 영역들이다.

다중 성분을 포함하는 복셀들의 선별 과정

다중 성분을 포함하고 있는 복셀들을 선별하기 위하여 다음과 같은 과정을 수행하였다. 먼저 다중 성분의 복셀들은 에지 근처에 있게 되므로 Sobel 연산을 적용하여 에지 또는 에지에 가까운 복셀들을 검출한다 (6). 이때 검출된 복셀들을 집합 S_M 으로 정의한다. 다음으로 S_M 에 포함된 복셀들에 대하여 thinning 알고리즘을 적용한다 (7). Thinning 과정으로 집합 S_M 의 복셀 수를 줄여 처리시간을 단축시키고, 또한 다중 성분의 복셀들의 과다한 검출을 방지하여 적응 템플릿 필터링의 성능이

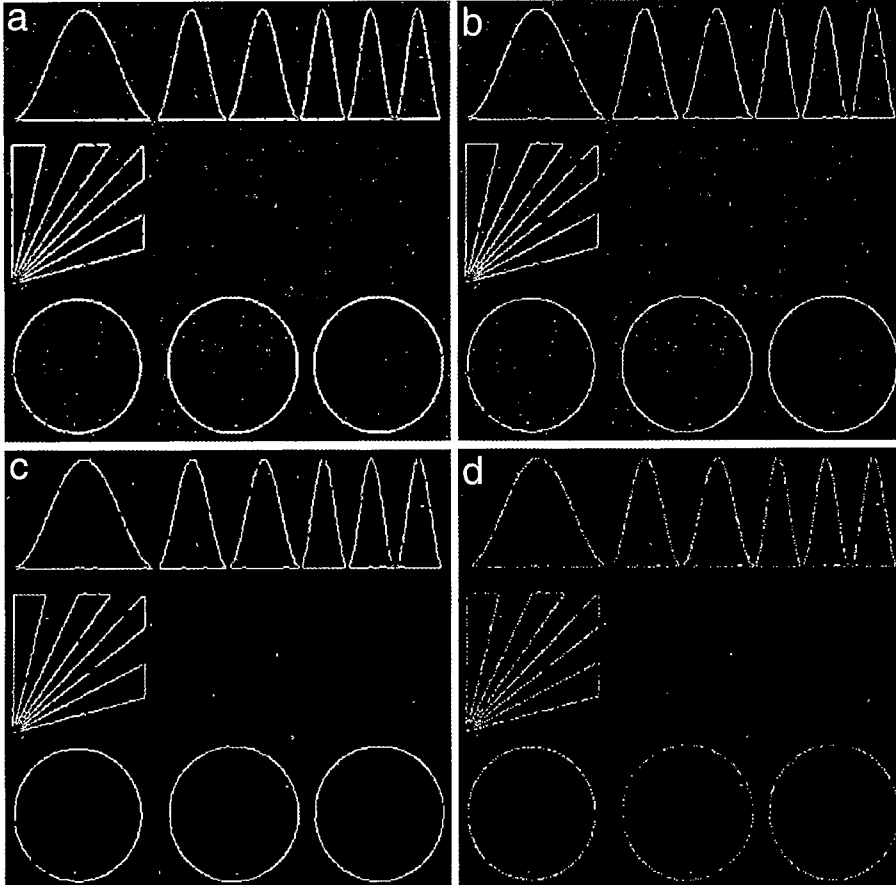


Fig. 3. Procedures to detect the voxels containing multiple compounds. The test image shown in Fig. 2 is used. (a) Edges detected by the Sobel operation, (b) result of the thinning edges, (c) edges after removal of the isolated voxels, and (d) detected voxels for the multiple compounds.

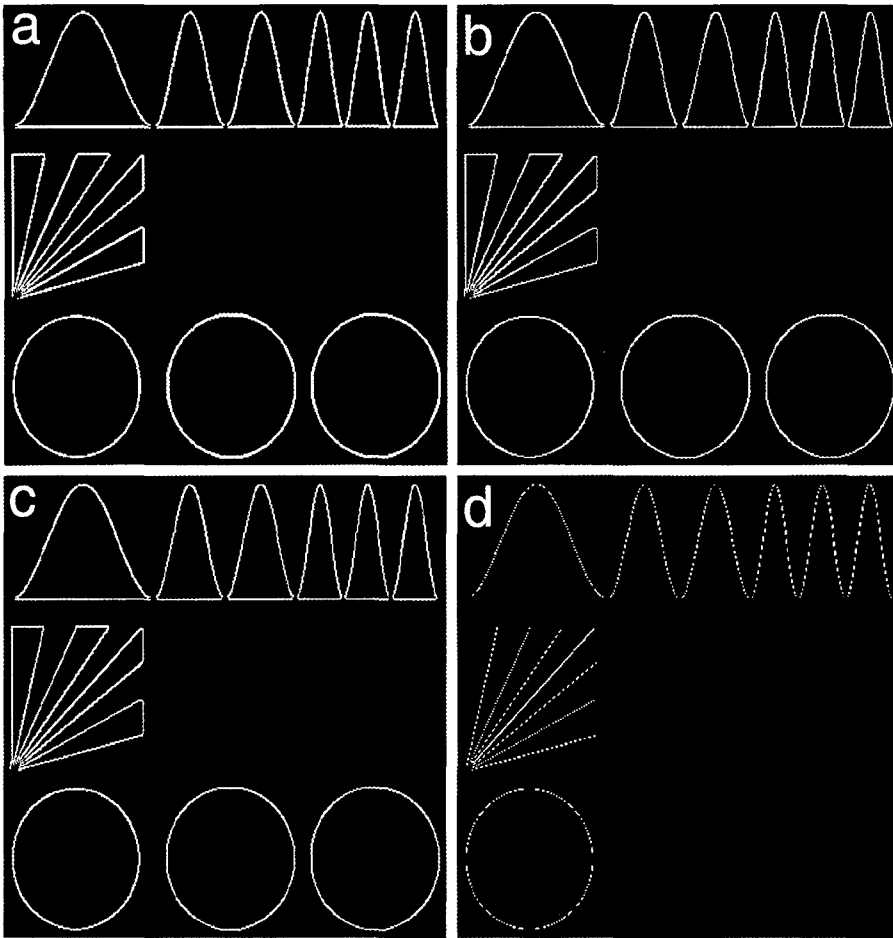


Fig. 4. Detection procedures for the voxels having multiple compounds when white gaussian noise is added. (a) Edges detected by the Sobel operation, (b) result of the thinning edges, (c) edges after removal of the isolated voxels, and (d) detected voxels for containing multiple compounds.

저하되는 것을 방지한다. 다음으로 잡음 성분들로 인하여 에지로 검출된 복셀들을 제거하기 위하여 자신의 주변 8 이웃들이 집합 S_M 에 포함되어 있지 않는 독립점들을 제거한다. 끝으로, 집합 S_M 의 각 복셀들에 대하여 45° , 90° , 135° 그리고 180° 방향으로 그레이레벨의 기울기를 구한 후 가장 큰 기울기를 갖는 방향을 찾는다. 가장 큰 기울기를 갖는 방향으로 집합 S_M 의 복셀의 그레이레벨(G_m)이 아래 식의 범위 내에 존재한다면, 그 복셀을 다중 성분을 가진 복셀로 판단한다.

$$\begin{aligned} \overline{G_m} - 0.25 \Delta < G_m < \overline{G_m} + 0.25 \Delta \\ \overline{G_m} &= (G_{m-1} + G_{m+1}) / 2 \\ \Delta &= |G_{m-1} - G_{m+1}| \end{aligned} \quad [4]$$

여기서 G_{m-1} 과 G_{m+1} 은 가장 큰 기울기를 갖는 방향으로 복셀 G_m 의 오른쪽과 왼쪽에 해당하는 복셀의 그레이레벨이다. 식 [4]에서 에지 상의 복셀에서 가장 급한 그레이레벨의 기울기를 갖는 방향에 있는 복셀 G_{m-1} 과 G_{m+1} 은 서로 다른 영역에 속한 (서로 다른 성분을 갖는) 복셀로 가정하였고, 만일 G_m 이 이들 복셀의 평균값에 가까운 값을 가질 경우(0.25 Δ 범위 내) 복셀 G_m 은 다중 성분을 가지고 있다고 판정하였다.

다중 성분들을 포함하는 복셀들이 검출되면 이들에 대해서는 주변의 구조와 무관하게 가장 큰 템플릿을 최적 템플릿으로 할당한다. 에지 근처에서 큰 템플릿을 적용할 경우 국소 표준편차가 상대적으로 크게 되어 식 [2]의 평균 항이 줄어들어 과도한 필터링이 방지되며 현재의 그레이레벨에 가까운 출력이 얻어지게 된다. 결론적으로 제안한 알고리즘은 주어진 영상에서 에지 근처의 복셀들에 대하여 단일성분으로 구성된 복셀들과 다중 성분을 포함하는 복셀들을 구분하여 단일성분을 가진 복셀의 경우 기존의 적응 템플릿 방식을 적용하고 다중성분을 포함하는 복셀의 경우 최대 크기의 템플릿을 적용함으로써 에지 근처의 중간 값들이 인접 영역의 단일성분의 그레이레벨로 바뀌는 것을 막아 에지에서 계단모양의 artifact의 발생을 방지하게 된다.

결과 및 고찰

다중성분을 포함하는 복셀들의 검출 능력을 확인하기 위하여 Fig. 2의 시험영상에 제안한 알고리즘을 적용하였다. Fig. 3은 다중 성분을 포함하고 있는 복셀들을 선별해 내는 과정을 단계적으로 나타낸 것으로 (a)는 시험 영상에 Sobel 연산을 취하여 에지를 검출한 영상이며, (b)는 thinning 알고리즘을 적용한

안장범 의

결과이다. Fig. 3(c)는 (b)의 영상에서 단일 점들을 제거한 영상이며, (d)는 식[4]를 이용하여 최종적으로 다중 성분을 포함하고 있다고 판정한 복셀들을 나타낸 것이다. 대부분의 다중 복셀들은 경계면에서 나타나게 되는데, Fig. 3(d)에서 보듯이 제안한 알고리즘은 이들 복셀들을 잘 찾아내고 있다. 예를 들면 상단의 종모양이나 가운데 원편의 삼각형, 하단 원편의 원 등에서 경계선을 따라 다중성분 복셀들이 검출되고 있는 반면, 가운데 그레이레벨이 점진적으로 바뀌는 원과 하단 가운데와 오른쪽의 부분 볼륨 효과를 고려하지 않은 원에서는 다중성분의 복셀들이 검출되지 않고 있다.

Fig. 4는 백색 가우스 잡음이 첨가되었을때의(PSNR=24dB) 결과로서, (a)는 Sobel 연산, (b)는 thinning 알고리즘, (c)는 단일 점들을 제거한 영상이며, (d)는 검출된 다중 성분 복셀들이다. Fig. 4(d)에서 보듯이 제안된 알고리즘은 잡음

환경에서도 다중성분을 포함하는 복셀들을 잘 찾아내고 있다. 배경이나 영상의 하단 오른쪽의 복셀 단위로 경계면이 정의된 원에서 다중성분으로 검출된 복셀들은 잡음에 기인한다 (Fig. 3과 비교). 참고로 Fig. 4에서 검출된 복셀들이 전체 영상에서 차지하는 비율을 Table 1에 나타내었다.

Table 1. Percentages of Detected Voxels during the Procedures to Identify Voxels Having Multiple Compounds.

Identification procedure Noise level (PSNR)	Sobel operation	Thinning	Isolated voxel removal	Graylevel checking
24dB	4.5%	2.9%	2.8%	1.3%
28dB	4.4%	2.9%	2.9%	1.1%

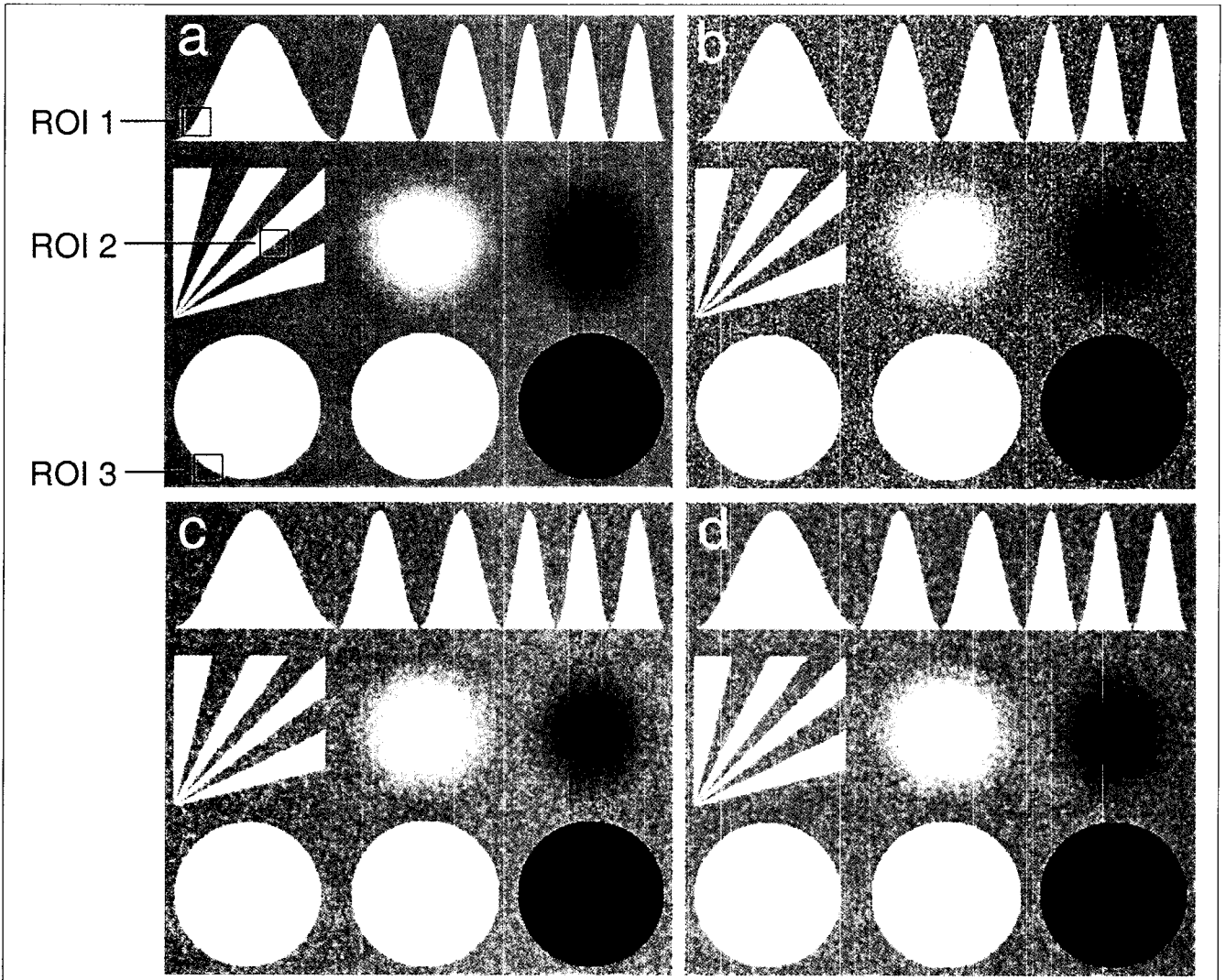


Fig. 5. Original and filtered images by the proposed algorithm. (a) Test image, (b) test image with white gaussian noise (PSNR = 24dB), (c) filtered image by the existing adaptive template filtering, and (d) filtered image by the proposed adaptive template filtering with consideration of the voxels having multiple compounds.

Fig. 5는 기존의 적응 템플릿 필터링과 제안한 알고리즘을 적용하여 얻은 영상이다. Fig. 5(a)는 원영상이며, (b)는 노이즈가 첨가된 필터링 되지 않은 영상이며, (c)는 기존의 적응 템

플릿 필터링을 사용하여 얻은 영상이고, (d)는 제안된 다중 성분을 고려한 적응 템플릿 필터링의 결과이다. 제안된 알고리즘의 성능을 보다 자세히 관찰하기 위하여 Fig. 5(a)의 ROI 영

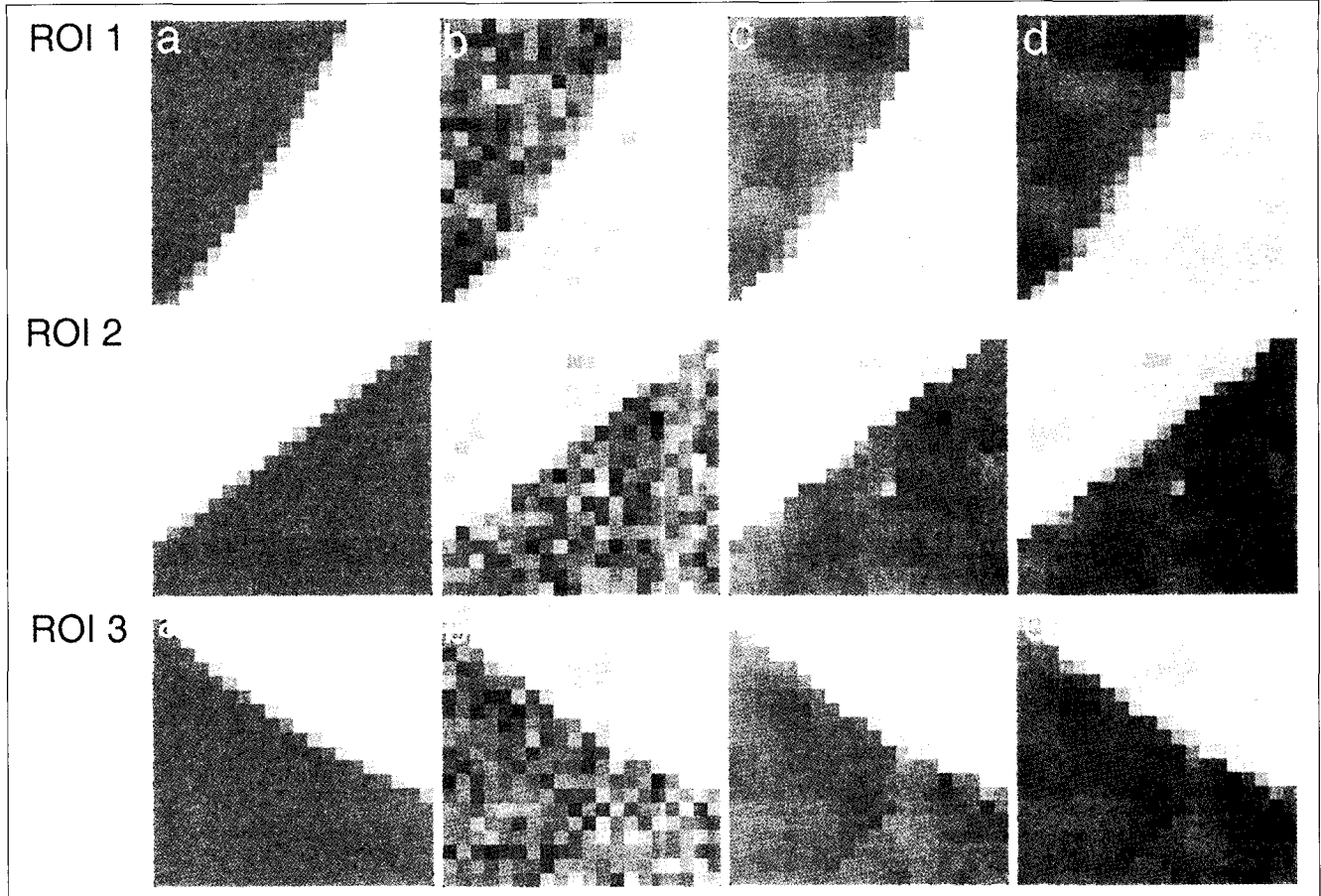


Fig. 6. Zoomed images (x10) for the three regions denoted by "ROI" in Fig.5 for a better comparison. They are displayed in the same order: (a) test image, (b) test image with white gaussian noise, (c) filtered image by the existing adaptive template filtering, and (d) filtered image by the proposed algorithm.

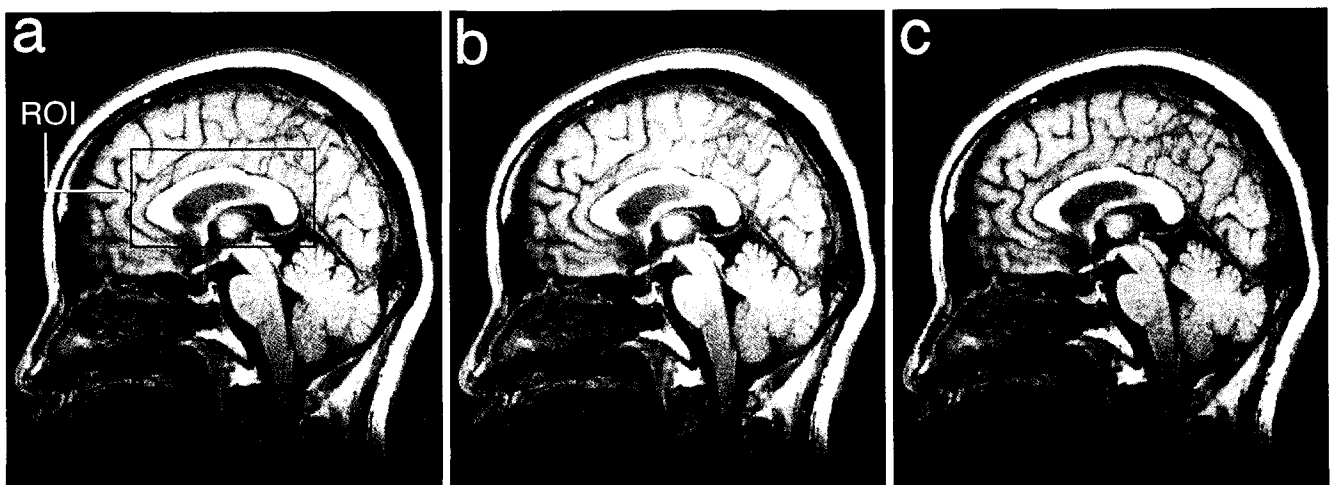


Fig. 7. Adaptive template filtering of T1-weighted head section of magnetic resonance (MR) image. (a) Unfiltered image, (b) filtered image by the existing adaptive template filtering, and (c) filtered image by the proposed algorithm.

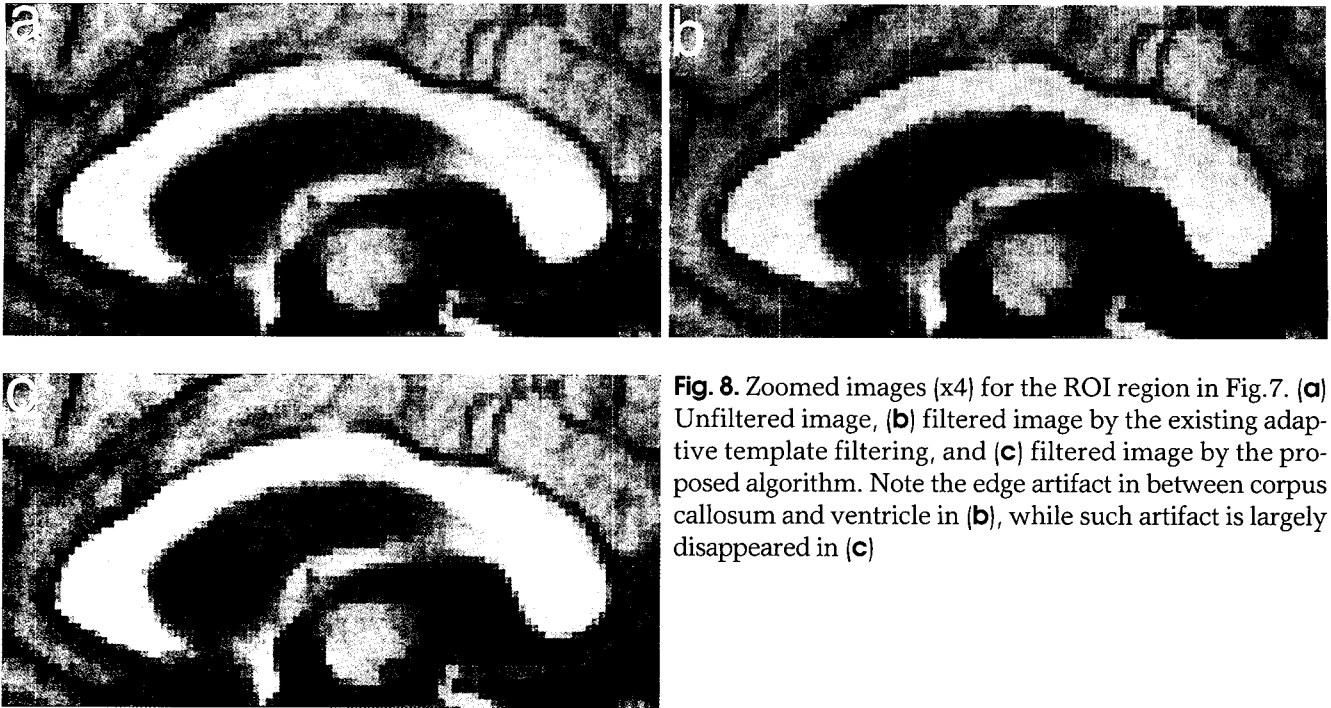


Fig. 8. Zoomed images (x4) for the ROI region in Fig. 7. (a) Unfiltered image, (b) filtered image by the existing adaptive template filtering, and (c) filtered image by the proposed algorithm. Note the edge artifact in between corpus callosum and ventricle in (b), while such artifact is largely disappeared in (c)

Table 2. Peak Signal-to-noise Ratios in the Filtered Images by the Existing Adaptive Template Filtering and the Proposed Filtering for the Computer Generated Phantom.

Filtering method Noise level(PSNR)	Existing adaptive template filtering	Proposed adaptive template filtering
24dB	31.4dB	31.4dB
28dB	35.3dB	35.5dB

역들을 10배 확대하여 Fig. 6에 나타내었다. Fig. 6에서 보듯이 원영상 (a)에는 에지 경계선상에서 다중 성분을 갖는 복셀들(그레이레벨이 두 영역의 사이값을 갖는 복셀들)이 다수 존재하는 것을 알 수 있다. 노이즈를 첨가한 (b)의 영상에 기존의 적응 템플릿 필터링을 사용하여 필터링한 영상 (c)의 경우 에지 경계선상에서 사이값의 그레이레벨들이 사라져 계단 모양의 artifact가 관찰된다. Fig. 6(d)는 다중 성분을 고려한 적응 템플릿 필터링의 결과로 잡음을 제거하면서도 과장된 계단모양의 에지를 막을 수 있어 원영상에 가까운 영상을 얻을 수 있다. Table 2는 적응 템플릿 필터링과 제안된 다중 성분을 고려한 적응 템플릿 필터링간의 정량적인 성능을 최대신호대잡음비 측면에서 비교한 것이다. Table 2에서 다중 성분을 고려한 경우가 고려하지 않은 경우에 비해 같거나 약간 향상된 성능을 보임을 확인할 수 있다. 결국 다중 성분을 고려한 적응 템플릿 필터링은 적응 템플릿 필터링의 고유한 신호대잡음비 성능을 저해하지 않고 에지 경계 부분에서 향상을 가져옴을 알 수 있다.

Fig. 7은 제안된 알고리즘을 전신 자기공명영상시스템(Magnum 1.0 Tesla, Medison)에서 얻은 T₁ 영상에 적용

한 결과이다. Fig. 7(a)는 필터링하기 전의 영상이고, (b)는 기존의 적응 템플릿 필터링을 사용하여 얻은 영상이며, (c)는 제안된 다중 성분을 가지는 복셀들을 고려하여 필터링한 영상이다. Fig. 8은 Fig. 7(a)의 ROI 영역을 4배 확대하여 나타낸 영상이다. Fig. 8(a)의 대뇌와 뇌량의 경계선상에 존재하는 다중 성분을 포함하는 복셀들이 기존의 적응 필터링에서는 인접한 영역의 단일 성분의 그레이레벨로 바뀌어 (b)의 영상에서는 계단 모양의 artifact가 발생하는 반면 제안된 적응 템플릿 필터링을 적용한 (c)의 경우에는 이러한 artifact가 나타나지 않음을 알 수 있다.

결론

최근에 발표된 적응 템플릿 필터링 수행 시 부분 볼륨 효과로 인하여 다중 성분을 포함하는 복셀들에서 관찰되는 계단 모양의 artifact를 제거하기 위한 방법을 제안하였다. 이를 위하여 에지 경계선상에서 다중 성분을 포함하는 복셀들을 선별해 내는 방법을 제시하였으며 선별된 복셀들에 대해서는 가장 큰 템플릿을 할당함으로써 이들 복셀의 그레이레벨이 인접한 단일성분들의 그레이레벨로 바뀌는 것을 방지하였다. 제안된 방법을 팬텀 영상과 1.0 Tesla 자기공명영상 시스템에서 얻어진 T₁ 영상들에 적용한 결과 기존의 적응 템플릿 필터링에서 다중 성분을 포함하는 에지 경계선 상의 복셀들에서 발생하던 계단 모양의 artifact가 발생하지 않음을 확인할 수 있었다. 또한 최대 신호대잡음비에서도 제안된 알고리즘의 성능이 기존의 적응 템플릿 필터링에 비하여 비슷하거나 다소 나은 것으로 나타났다.

참 고 문 헌

1. Ahn CB, Song YC, Park DJ. Adaptive template filtering for signal-to-noise ratio enhancement in magnetic resonance imaging. *IEEE Trans Med Imag* 1999; 18:549-556.
2. Ahn CB, Park DJ, Yi Y, Song YC, Local shape adaptive template filtering for signal-to-noise ratio enhancement in magnetic resonance imaging. *Proc SPIE Med Imag* 1998; 3338:884-892.
3. Chan P, Lim JS, One-dimensional processing for adaptive image restoration. *IEEE Trans ASSP* 1985; 33:117-126.
4. Rank K, Unbehauen R, An adaptive recursive 2-D filter for removal of Gaussian noise in images. *IEEE Trans Imag Proc* 1992; 1:431-436.
5. Song YC, Lee HK, Jung KJ, Oh CH, Ahn CB, Adaptive template filtering without boundary artifact. *Proc ISMRM 2000*; 1777.
6. Gonzalez RC, Woods RE, *Digital Image Processing*, New York: Addison-Wesley, 1992.
7. Sonka M, Hlavac V, Boyle R, *Image processing, analysis, and machine vision*. 2nd ed. New York: PWS Publishing, 1999.

J. Korean Soc. Magn. Reson. Med. 4: 120-127(2000)

Removal of Edge Artifact due to Partial Volume Effect in the Adaptive Template Filtering

C.B. Ahn, Y.C. Song

Department of Electrical Engineering Kwangwoon University

Adaptive template filtering has been proposed recently for enhancement of signal-to-noise ratio without loss of resolution. In the adaptive template filtering, an optimal template among multiple templates is selected, then linear least square error filtering based on the template is applied in voxel by voxel basis. In some magnetic resonance imaging, where the distribution of gray level has relatively small dynamic range, e.g., T1 imaging, however, artificial stair-like artifact is observed at near edges. This is partially due to the edge enhancement effect in such voxels that contain multiple compounds at the boundaries of tissues. The gray levels of these voxels become similar gray levels of near dominant voxels that contain single compound by the adaptive filtering, which enlarges edge discontinuities. In this paper, we propose a technique to eliminate such artifact by identifying those voxels that contain multiple compounds and assigning the largest template for them. Filtered images with the proposed technique show substantial visual enhancement at the edges without degradation of peak signal-to-noise ratio compared to the original adaptive template filtering for both magnetic resonance images and phantom images.

Index words : Adaptive template filtering
Multiple compounds
Partial volume effect
Magnetic resonance imaging

Address reprint requests to : Chang-Beom Ahn, Ph.D., Department of Electrical Engineering, Kwangwoon University
447-1 Wolgye-dong, Nowon-gu, Seoul 139-701, Korea.
Tel. 82-2-940-5148 Fax. 82-2-909-3159 E-mail:cbahn@daisy.kwangwoon.ac.kr