

전자적 장세척을 위한 부드러운 장표면 복원 방법 개발

김승환 · 김동성

승실대학교 정보통신전자공학부

Development of a Smooth Colon Surface Restoration Method for Electronic Colon Cleansing

Seunghwan Kim and Dongsung Kim

School of Electronic Engineering, Soongsil Univ., Seoul, Korea

(Received April 4, 2011. Accepted June 7, 2011)

Abstract: Virtual colonoscopy is favored over conventional colonoscopy because its non-invasive procedure can avoid complications that may happen in a conventional approach and because it can cleanse colon electronically instead of uncomfortable conventional colon cleansing. Electronic Colon Cleansing(ECC) has to deal with not only removing tagged fecal material but also recovering Partial Volume Effect(PVE) due to tagging material. This paper proposes an ECC method restoring inherent natural PVE while previous approaches focused only on reducing PVE due to tagged fecal material. The proposed method reduces PVE using 3-dimensional adaptive density correction and then replaces tagged fecal material into air. Next, it generates natural PVE for the replaced air adjacent to soft tissue and finally makes smooth transition of gray values for soft tissue adjacent to the replaced air. The proposed method applied to eleven patient data, and showed promising results.

251

Key words: electronic colon cleansing, virtual colonoscopy, partial volume effect, colon restoration

1. 서 론

보건복지부 암 등록 통계에 의하면 전체 등록된 암 중에서 대장암은 1999년 9.6%에서 2002년 11.2%, 2006년 12.8%로 꾸준히 증가하고 있고 전체 암중에서 세 번째로 많은 비율을 차지한다[1-3].

대장암의 진단은 항문을 통해 내시경을 직접 삽입하여 대장을 관찰하는 물리적 대장 내시경이 일반적으로 사용되어 왔다. 하지만 물리적 대장 내시경은 삽입된 대장 내시경에 의한 장 천공 등의 합병증이 발생할 수도 있고, 대장이 꼬여 있는 사람, 대장이 협착 되어 있는 사람, 전신질환이 있어 마취에 취약한 사람, 기력이 약한 노인이나 어린이 등에게 사용

하기에는 어려운 점도 있다. 또한 물리적 대장내시경을 하기 위해서는 환자들이 매우 고통스러워 꺼려하는 장세척을 수행해야 한다. 이러한 물리적 대장 내시경의 제약점 때문에 최근에는 가상 대장 내시경의 이용이 증가되고 있다. 가상 대장 내시경은 컴퓨터 단층촬영(Computed Tomography: CT) 대장조영술이라고도 불리며 촬영된 영상을 3차원으로 구성하여 장 내부를 관찰하는 검사 기법이다. 이러한 가상 대장 내시경은 비침습적 방법이기 때문에 환자에게 검사에 대한 부담을 훨씬 줄일 수 있고 검사 시에 내시경에 의한 합병증이 발생할 위험도 없다[4]. 또한 가상 대장 내시경을 할 때에 환자들이 꺼려하는 장세척 대신 전자적 장세척(Electronic Colon Cleansing: ECC)을 수행해서 장에 존재하는 잔변을 제거할 수 있다. 이를 위해서 장내에 잔존하는 변(fecal material)을 조영제를 이용하여 착색을 시킨후 밝기값을 올려서 장의 조직이나 공기와 쉽게 구별을 하게 하는데 이때 이 조영제와 인접하고 있는 공기와 조직의 밝기값이 함께 올라가게 되는 Partial Volume Effect(PVE)라는 현상이 발생한다[5]. 이런 밝기값의 변화는 착색된 물질의 양, 두께, 그리고 방사성밀도

Corresponding Author : 김동성
서울특별시 동작구 상도동 승실대학교 정보통신전자공학부
TEL: +82-2-822-8441 / Fax: +82-2-821-7653
E-mail : dongsung@ssu.ac.kr

이 연구는 서울시 산학연 의료허브 서울의 지능형 영상진단 지원 서비스 산업화 사업(10888)의 지원을 받아 수행하였음.

등에 따라 달라진다. 따라서 ECC에서는 조영제에 의해서 착색된 물질(tagged material)을 제거하는 장세척 뿐만 아니라 PVE를 고려하여 복원하는 것이 필요하다.

기존의 방법으로는 장세척에서 착색된 물질 만을 제거해주는 방법[6,7], Adaptive Density Correction(ADC) 방법을 이용하여 PVE의 영향력을 고려한 방법[8,9], maximum a posteriori expectation-maximization(MAP-EM) 을 이용하여 PVE를 복원하는 방법[10], 그리고 PVE를 제거하기 위해서 CT 밝기값의 profile 특성을 추출하여 장표면에 적용시켜주는 방법[11,12] 등이 있다. 자세한 것은 사전연구를 통해서 알아보겠다.

본 논문에서는 부드러운 장표면을 생성하기 위해서 Yoshida 가 제안한 2차원 ADC[8,9]를 확장한 3차원 ADC를 적용하여 PVE를 줄이고 착색된 물질을 제거한 다음 공기값으로 치환하였다. 기존의 방법들이 단순하게 PVE를 줄이는데 국한된 것에 반하여 제안하는 방법은 공기와 장표면에서 자연적으로 존재하는 PVE를 발생시키기 위해서 치환된 공기와 장표면 상의 경계에서 공기와 장표면 각각에서 자연스러운 밝기값의 전이 되도록 보정하는 방법을 제안하였다.

2장에서는 사전연구를 설명하고, 3장에서 제안하는 부드러운 장표면 복원방법(smooth colon restoration)을 설명한다. 4장에서 실험결과를 보여주고, 5장에서 결론을 도출한다.

252

II. 사전 연구

1. 착색된 물질 만을 제거해 주는 방법

전자적 장세척 방법 중에서 조영제에 의해서 착색된 물질 만의 제거에 국한한 방법들은 임계값을 이용한 영역확장법으로 착색된 물질을 분할하고 gradient 기반 방법을 이용하여 보다 정확한 경계를 획득하고자 했다[6,7]. 이 방법들은 PVE에 대해서는 복원을 시도하지 않았다.

2. Adaptive density correction를 이용한 전자적 장세척 방법

Adaptive Density Correction(ADC)방법은 Yoshida 교수팀이 고안한 방법으로 밝은 화소에 의해 발생하는 PVE를 가우시안 분포 특성을 이용하여 2차원 영상들에서 재귀적으로 줄여준다[8,9]. 이 방법에서는 밝은 화소가 주변 화소에게 가우시안 분포로 PVE영향을 준다고 가정한다. 각 화소는 서로간에 PVE영향을 주기도 하고 받기도 하기 때문에 재귀적 방법을 통해서 누적된 PVE를 줄여나간다. 몇 번 수행하는지에 따라 결과가 달라지는데 적합한 값이 되었다고 판단되면 반복 작업을 멈춘다. 여기에서는 ADC를 2회 수행한 것이 적합하다고 판단한다. 더 많은 횟수를 수행하면 장의 벽을 구성하는 조직(soft tissue)의 손실이 발생하기 때문이다. 이 방법으로 PVE가 줄어들긴 하지만 완벽하게 줄어들지 않을

뿐더러 공기와 착색된 물질 사이의 잔존하는 PVE에 의한 찌꺼기들이 남게 된다.

3. 확률모델을 이용한 전자적 장세척

장내에서 복셀(voxel)들을 공기, 장벽의 조직, 근육, 뼈들을 MAP-EM 방식을 이용해서 분류하고 공기와 착색된 물질 사이에서 발생하는 PVE 를 dilation-erosion 방법과 volume subtraction 방법으로 제거하고 착색된 물질과 장벽의 조직 사이의 PVE는 인접한 구성요소들에 의한 밝기값 보정으로 복원한다[10]. 이 방법은 원래 구성원소와 가급적이면 가깝게 밝기값을 보정하고자 하여 공기와 장벽의 조직에 자연적으로 발생되어 있는 PVE를 고려하지는 못했다.

4. 환자 CT 프로파일을 이용한 전자적 장세척 방법

이 방법들은 장세척으로 착색된 물질을 제거한 후 PVE를 복원하기 위해서, 공기와 장벽의 조직 경계면에서 각 환자별로 CT profile을 추출하여 평균을 구하고 그 값을 착색된 물질과 장벽의 조직 경계면에 적용시켜 장벽의 조직의 밝기값을 복원하는 방법이다[11,12]. Lakare 등은 segmentation rays라고 불리는 미리 정해놓은 profile을 이용하여 PVE를 제거했다[11]. 이 방법은 고정되어있는 profile을 모든 영상에 적용해서 매끄럽지 못한 결과를 제공할 수 있다. 이를 개선해서 각 환자의 매 영상에서 profile을 추출해서 이를 적용한 방법[12]은 보다 자연스럽게 PVE를 제거할 수 있지만 해당 영상에서 경계면 모두에 동일한 프로파일을 적용하므로 단조로워지고 부자연스러운 부분이 생기는 문제가 있다.

III. Smooth colon restoration

제안하는 Smooth Colon Restoration(SCR) 방법은 PVE를 고려하여 장표면을 복원해내는 ECC방법으로 시스템 블록도가 그림 1에 나타나있다. 3차원 ADC를 통하여 PVE를 최소화하고 장세척을 위해 착색된 물질을 제거하여 공기로 치환한다. 그리고 치환된 공기와 장벽의 조직 사이의 경계 부분

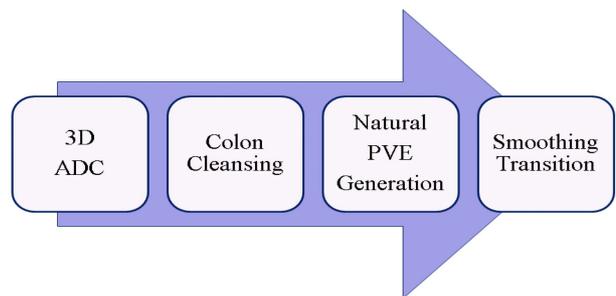


그림 1. SCR의 블록도
Fig. 1. Block diagram of SCR

에서 공기부분 쪽으로 자연스러운 PVE를 발생시켜주어 부드러운 장표면을 표현한다. 마지막으로 착색된 물질로 인해 변형되었던 장벽의 조직부분이 자연스러워지도록 보정을 한다.

1. 3차원 ADC

Yoshida 그룹의 ADC방법은 2차원 상에서의 화소간 PVE의 가우시안 영향력을 고려하여 이를 줄여주도록 개발되었다. 하지만 PVE는 x, y축으로만 영향을 주는 것이 아닌 z축으로의 영향도 존재하기 때문에 본 논문에서 제안하는 방법에서는 3차원 ADC를 개발했다. 영상에서 획득한 밝기값은 PVE가 없는 이상적인 밝기값에 주변에서 밝은 voxel에서 발생하는 PVE가 누적되어 얻어진 값이다. 따라서 ADC는 이렇게 PVE에서 얻어진 밝기값을 제거해서 원래의 이상적인 밝기값을 구하는 방법이다. PVE가 최소화된 이상적인 밝기값 I_{ideal} 을 식으로 표현하면 다음 식(1)과 같다.

$$I_{ideal} = I_{obtain} - \sum_{neighbor} I_{PVE} \quad (1)$$

I_{ideal} 은 PVE가 최소화된 이상적인 밝기값, I_{obtain} 은 CT에서 획득한 기존의 밝기값, I_{PVE} 는 기준점이 받는 PVE의 밝기값이다. 이것은 I_{obtain} 에서 주변 voxel들에서 발생하는 I_{PVE} 의 합을 제거해준다는 것을 의미한다. 기준점이 받는 PVE의 밝기값 I_{PVE} 는 다음 식(2)와 같다.

$$I_{PVE} = |I_{(x_i, y_i, z_i)} - I_{(x, y, z)}| \cdot \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} e^{-\frac{(x_i-x)^2 + (y_i-y)^2 + (z_i-z)^2}{2\sigma^2}} \quad (2)$$

$I_{(x, y, z)}$ 는 기준점에서의 밝기값, $I_{(x_i, y_i, z_i)}$ 는 기준점 이외의 위치에서의 기준점 보다 밝은 복셀(voxel)의 밝기값이다. CT원본영상과 3D ADC를 적용한 결과영상이 그림 2(a)와 (b)에 나타나 있다. PVE가 최소화되어(b) 그래프의 기울기가 급격해진 것을 볼 수 있는데 이것은 경계면의 밝기값 차가 커진 것으로 경계면이 뚜렷해지는 효과가 있다.

2. 장세척

ADC를 거쳐 PVE의 영향을 최소화하면 공기와 착색된 물질, 착색된 물질과 장벽의 조직 사이의 경계가 명확해진다. 경계가 명확해졌기 때문에 SRG를 수행하여 착색된 물질만을 추출해내는 것이 수월해진다. 착색된 물질을 추출해 낸 후 공기의 값으로 치환 시켜줌으로써 착색된 물질을 제거한다. 여기에서 사용하는 임계값은 영역확장법에 의한 장세척 방법에서 사용하였던 착색된 물질을 많이 포함하면서 최소한의 장벽의 조직을 포함하도록 결정하여 실험적으로 획득된 Hounsfield Unit(HU)으로 1200을 이용한다. 이 임계값의 변화는 착색된 물질의 경계를 변화시킬 수 있지만 제안하는 방법에서 gradient등을 이용해서 보다 정확한 임계값을 추

출하지 않는 이유는 ADC에서 이미 경계가 명확해졌고 이 다음 단계들에서 PVE를 복원하면서 경계를 보정하기 때문이다. 임계값을 초과한 착색된 물질부분에 대해서는 공기의 대표 밝기값인 100 HU로 치환한다. 이 값 역시 실험적으로 구한 값이지만 값의 변화가 시각적으로 주변 공기와 크게 차이가 나지 않는 이상 100 주변의 다른 값을 사용해도 결과에 변화가 없다. 이 과정을 식으로 나타내면 다음 식(3)과 같다.

$$I_{(x, y, z)} = I_{Air}, (I_{(x, y, z)} \geq Threshold_{TM}) \quad (3)$$

$I_{(x, y, z)}$ 은 착색된 물질이 제거될 부분의 밝기값, I_{Air} 은 공기의 밝기값, $Threshold_{TM}$ 는 착색된 물질을 결정짓는 임계값이다. 장세척이 적용된 영상의 결과가 그림 2(c)에 나타나 있다. CT영상에서 착색된 물질이 제거된 것을 볼 수 있고, 단면 그래프를 보면 착색된 물질 부분의 밝기값이 공기의 밝기값으로 치환된 것을 확인할 수 있다.

3. Natural PVE generation

그림 2(c)의 그래프에서 착색된 물질을 제거한 부분과 장벽의 조직 사이의 경계를 살펴보면 급격한 기울기 차이를 보

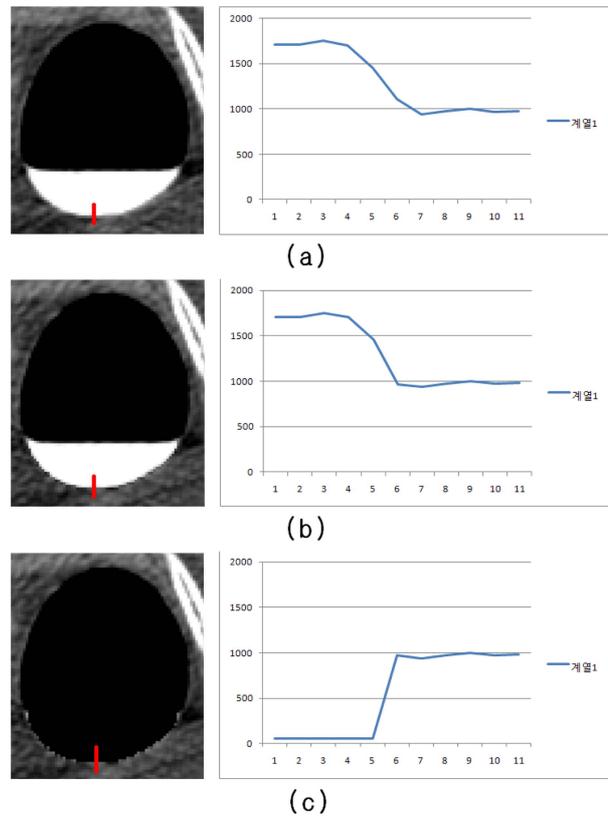


그림 2. 대장과 절단면의 그래프 (a) CT원본, (b) 3차원 ADC 적용, (c) 장세척 적용
Fig. 2. Colon and its profile (a) original CT image, (b) 3dimensional ADC, (c) colon cleansing

이는 것을 알 수 있다. 이 기술기 차이가 CT영상에서 착색된 물질이 제거된 경계면 부분이 눈에 띄게 거칠어져 보이게 한다. 이러한 부자연스러운 부분을 보정하려면 기존의 방법들처럼 단순히 PVE를 줄이는데 그치지 않고 제안하는 방법처럼 공기와 장벽의 조직 경계 면에 자연적으로 존재하는 PVE를 복원해주어야 한다. 그렇기 때문에 이 단계에서는 착색된 물질이 공기로 대체된 부분에 밝은 장벽의 조직이 공기 영역으로 발생하는 자연스러운 PVE를 추가해주는 작업을 한다. 자연스러운 PVE가 적용된 밝기 값은 이상적인 밝기 값에 주변 밝기 값에서 발생하는 PVE를 누적시키는 것과 같다. 이것을 식으로 나타내면 다음 식(4)와 같다.

$$I_{\text{natural}} = I_{\text{ideal}} - \sum_{\text{neighbor}} I_{\text{PVE}} \quad (4)$$

I_{natural} 은 자연스러운 PVE가 적용된 밝기값, I_{ideal} 은 앞서 구한 PVE가 최소화된 밝기값, I_{PVE} 는 기준점이 받는 PVE의 밝기값이다. 이것은 I_{ideal} 에서 주변 voxel들에서 발생하는 I_{PVE} 의 합을 누적시켜준다는 것을 의미한다. 기준점이 받는 PVE의 밝기값 I_{PVE} 는 앞선 Eq. (2)와 같다. 그림 3(a)는 C단계가 적용된 대장과 절단면의 그래프이다. 자연스러운 PVE를 만들어주어 그래프가 완만해지는 것을 확인할 수 있다. 그림 2(c)와 비교했을 때 경계면이 부드러워진 것을 확인할 수 있다.

4. Smooth transition

공기와 장벽의 조직 경계 면을 사이에 두고 공기 부분과 장벽의 조직 부분이 있다. 앞의 C단계에서는 공기 부분에 대해

장벽의 조직으로부터 발생하는 자연스러운 PVE를 적용해 주었다. 그 결과 그림 3(a)의 그래프에서 공기 부분은 완만한 형태를 보인다. 하지만 장벽의 조직 부분은 급격한 밝기 값 차이가 아직 남아있어 자연스럽지 못한 것을 확인할 수 있다. 그림 3(a)의 CT영상을 보면 경계면도 여전히 거친 것을 확인할 수 있다. 제안 하는 방법에서는 smooth transition 작업을 통해서 장 벽의 조직의 급격한 경사면을 매끄럽게 해주는 작업을 한다. 그 방법은 급격한 경사면 부분을 주변의 장벽의 조직에 해당되는 값들의 평균값으로 대체하는 것이다. 여기에서 장벽의 조직에 해당되는 값의 기준은 영역확장법에 의한 장세척 방법에서 사용하였던 공기와 장벽의 조직을 구분 짓는 $\text{threshold}_1(650)$, 장벽의 조직과 착색된 물질을 구분 짓는 $\text{threshold}_2(1200)$ 을 사용한다. 이것을 수식으로 나타내면 다음 식(5)와 같다.

$$I_{(x,y,z)} = \frac{1}{\text{hit}} \sum_{k=1}^n I_k \quad (5)$$

$(I_k \geq \text{Threshold}_1 \ \& \ I_k < \text{Threshold}_2)$

$I_{(x,y,z)}$ 는 보정이 필요한 장벽의 조직부분, hit은 mask 내의 조건에 맞는 부분의 개수, I_k 는 mask 내 해당 위치의 밝기 값이다. 그림 3(b)는 D단계가 적용된 대장과 절단면의 그래프이다. 급격한 차이를 보이는 장벽의 조직 부분을 평균 smoothing 작업을 거쳐 완만하게 만들어준다. 그림 3(b)의 CT영상을 보면 매끄러운 장표면을 구현해 낸 것을 확인할 수 있다.

IV. 연구 결과

SCR 방법을 11개 환자 CT영상 data set에 적용했다. 각 data set의 slice 1장은 512×512 크기로 구성되어 있고, 대장이 포함된 500장의 slice를 사용하였다. 사용된 CT영상은 2008년 12월부터 2009년 4월까지 서울대학병원에서 수집한 환자들의 데이터이고, 조영제를 이용한 잔변의 착색법을 사용하였다. SRG만을 이용하였을 때, ADC를 이용하였을 때, 환자 CT 프로파일을 이용하였을 때, 제안한 방법을 이용하였을 때의 착색된 물질 제거율을 비교한 것이 표 1에 나타났다.

SRG만을 이용한 방법은 84.51%, ADC를 이용한 방법은 86.15%, 환자 CT 프로파일을 이용한 방법은 91.23%의 착색된 물질제거율을 보였다. 반면에 제안한 방법을 이용한 결과 평균적으로 97.48%까지 착색된 물질을 제거해내는 것을 확인할 수 있다. 그림 4는 CT영상의 원본과 제안한 방법을 사용한 CT영상을 이용하여 가상 대장 내시경을 수행한 그림이다. (a)와 (c)는 착색된 물질이 차 있는 것에 반해 (b)와 (d)는 잘 제거되어 보이지 않던 부분까지 잘 보이는 것을 확인할 수 있다. 착색된 물질은 유체이기 때문에 표면장력이 발생하는데

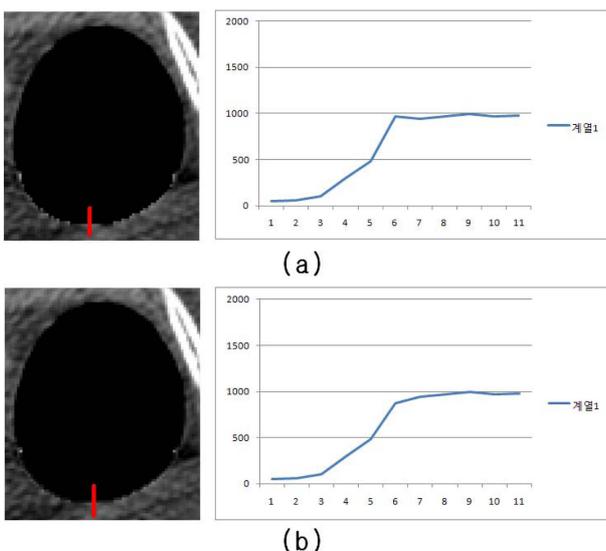


그림 3. 대장과 절단면의 그래프 (a)는 Natural PVE, (b)는 Smooth transition
 Fig. 3. Colon and its profile (a) Natural PVE, (b) Smooth transition

표 1. 착색된 물질(TM) 제거율 비교

Table 1. Comparison of TM removal rates

| Removed TM (pixels/%) | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | Average |
|-----------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|---------|
| TM | 889966 | 408934 | 816473 | 920980 | 338203 | 389809 | 250139 | 718345 | 700211 | 559130 | 343991 | 576016 |
| SRG (1200) | 785229 | 318027 | 744403 | 805521 | 269076 | 314903 | 201522 | 618620 | 610718 | 489100 | 286425 | 494868 |
| ADC (2times) | 849619 | 321950 | 748114 | 814559 | 271803 | 316252 | 201932 | 642576 | 611245 | 504516 | 289494 | 506551 |
| Patient profile | 848457 | 355638 | 791769 | 820227 | 302212 | 339472 | 237655 | 656630 | 629035 | 505888 | 316402 | 527580 |
| SCR method | 880314 | 397154 | 809693 | 912881 | 330316 | 371698 | 237991 | 705120 | 683763 | 541692 | 334023 | 564059 |
| | 98.92% | 97.12% | 99.17% | 99.12% | 97.67% | 95.35% | 95.14% | 98.16% | 97.65% | 96.88% | 97.10% | 97.48% |

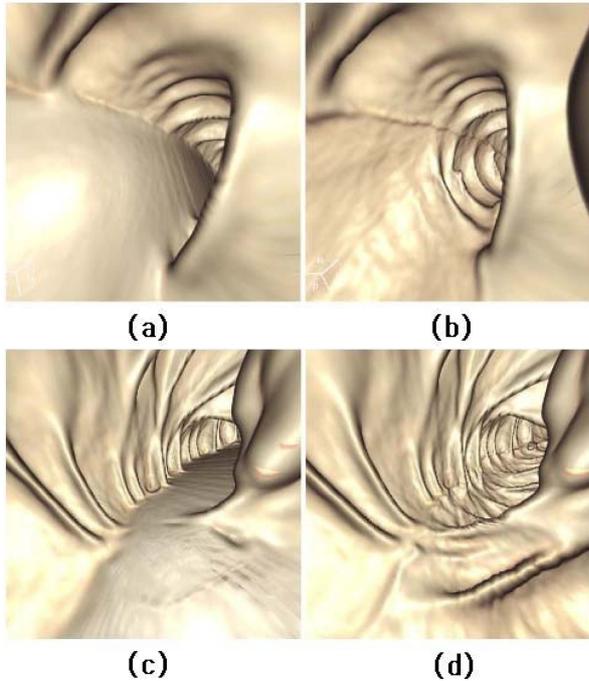


그림 4. 가상 대장 내시경 (a)와 (c)는 원본영상, (b)와 (d)는 SCR 방법
Fig. 4. Virtual colonoscopy (a) and (c) original image, (b) and (d) SCR method

이 표면장력에 의해 장벽의 조직과 접촉하는 가장자리 부분의 밝기값이 약간 올라가게 된다. 이러한 부분은 장벽의 조직과 구분 짓기가 매우 어렵기 때문에 완벽하게 제거하기가 어려워 띠와 같은 형태로 남아있는 것을 확인할 수 있다.

V. 결 론

본 논문에서는 가상내시경에서 필수적인 ECC 방법으로 매끄러운 장표면을 복원해내는 smooth colon restoration

방법을 제안하였다. 3차원 ADC를 적용하여 PVE를 줄여주고 착색된 물질을 제거하였다. 기존의 방법들이 PVE를 제거하는 것에 국한된 것에 반하여 제안한 방법은 착색된 물질을 제거 후에 치환된 공기와 장벽의 조직 사이에 자연적으로 발생하는 PVE를 추가하기 위해서 공기와 장벽의 조직 전이 부분에서 공기뿐만 아니라 장벽의 조직에서도 자연스러운 PVE를 추가하여 매끄러운 장표면을 복원했다. 제안된 방법으로 97.48%의 착색된 물질의 제거율을 보였고 진단에 사용되는 3차원 영상에서도 매끄러운 결과를 보였다. 향후 2.52%정도 남아있는 착색된 물질의 제거에 관한 연구가 필요하다.

참고문헌

- [1] 보건복지가족부 한국중앙암등록본부, “한국중앙암등록사업 연례보고서(1999.1~12),” 보건복지가족부 한국중앙암등록본부, 2001.
- [2] 보건복지가족부 한국중앙암등록본부, “한국중앙암등록사업 연례보고서(2002.1~12),” 보건복지가족부 한국중앙암등록본부, 2003.
- [3] 보건복지가족부 조사통계팀, “2006년도 보건복지통계연보,” 보건복지가족부 조사통계팀, 2007.
- [4] M.E. Zalis, J.J. Perumpillichira, C. Magee, G. Kohlberg and P.F. Hahn, “Tagging-based, electronically cleansed CT colonography: evaluation of patient comfort and image readability,” *RSNA*, vol. 239, no.1, pp. 149-159, 2006.
- [5] V. Frouin, C. Comtat, A. Reilhac and M.C. Gregoire, “Correction of partial-volume effect for PET striatal imaging: fast implementation and study of robustness,” *The Journal of Nuclear Medicine*, vol. 43, no. 12, pp. 1715-1726, Dec. 2002.
- [6] J.H. Bidgoli, A. Ahmadian, S. Akhlaghpor, N.R. Alam, and S.Z. Mahmodabadi, “An efficient colon segmentation method for oral contrast enhanced CT colonography,” *IEEE Engineering in Medicine and Biology*, pp. 3429-3432, Sep, 2005
- [7] M. Sato, S. Lakare, M. Wan, A. Kaufman, Z. Liang, and M.

- Wax, "An automatic colon segmentation for 3D virtual colonoscopy", *IEICE Trans. Information and Systems*, Vol. E84-D, No. 1, January 2001, pp. 201-208
- [8] J. Näppi and H. Yoshida, "Adaptive correction of the pseudo-enhancement of CT attenuation for fecal-tagging CT colonography," *Medical Image Analysis*, vol. 12, no.4, pp.413-426, 2008.
- [9] J. Näppi and H. Yoshida, "Fully automated three-dimensional detection of polyps in fecal-tagging CT colonography," *Academic Radiology*, vol. 14, no. 3, 2007.
- [10] Z. Wang, Z. Liang, X. Li, L. LI, B. Li, D. Eremina, and H. Lu, "An improved electronic colon cleansing method for detection of colonic polyps by virtual colonoscopy," *IEEE Trans. On Biomedical Engineering*, vol. 53, no. 8, Aug. 2006, pp 1635-1646
- [11] S. Lakare, D. Chen, L. Li, A. Kaufman, and Z. Liang, "Electronic colon cleansing using segmentation rays for virtual colonoscopy," *Proc. SPIE*, vol 4683, pp. 412-418, 2002
- [12] H.B. Kim, D.S. Kim, "An electronic colon cleansing method using a patient colon CT profile," *Journal of KIISE: Software and Applications*, vol. 35, no. 8, 2008.