

고속 초음파 태아영상 볼륨 가시화를 위한 공간도약 거리변환 비교

박혜진¹ · 송수민¹ · 김명희^{1,2*}

Comparison of Distance Transforms in Space-leaping for High Speed Fetal Ultrasound Volume Visualization

Hyejin Park · Soomin Song · Myounghee Kim

ABSTRACT

In real time rendering of fetus the empty space leaping while traversing a ray is most frequently used accelerating technique. The main idea is to skip empty voxel samples which do not contribute the result image and it speeds up the rendering time by avoiding sampling data while traversing a ray in the empty region, saving a substantial number of interpolations. Calculating the distance from the nearest object boundary for every voxel can reduce the sampling operation. Among widely-well-known distance maps, those estimates the true distance, such as euclidean distance, takes a long time to compute because of the complicated floating-point operations, and others which uses approximated distance functions, such as city-block and chessboard, provides faster computation time but sampling error may can occur. In this paper, therefore, we analyze the characteristics of several distance maps and compare the number of samples and rendering time. And we aim to suggest the most appropriate distance map for rendering of fetus in ultrasound image.

Key words : Distance map, Space-leaping, Ray casting, Volume rendering

요약

초음파 태아 영상의 실시간 입체 가시화를 위한 볼륨 렌더링 가속화 방법은 결과영상에 영향을 끼치지 않는 관심객체영역 외 빈공간을 샘플링 연산에서 제외시키는 공간도약 알고리즘이 일반적이다. 공간도약시 전처리과정에서 각 복셀에서 가장 가까이 있는 객체의 경계복셀까지의 거리를 미리 계산·저장한 거리지도를 이용하면, 반복적 샘플링 연산을 줄임으로써 렌더링 속도 효율을 높일 수 있다. 거리지도 생성에 사용되는 여러 거리계산변환법 중 거리계산이 정교할수록 실수계산으로 인한 전처리 시간이 소요되는 반면, 근사계산법을 이용하면 거리값 연산의 오차로 인한 샘플링의 횟수가 증가하는 단점이 있다. 본 논문에서는 전처리시간의 지연과 샘플링 횟수의 증가를 비교하여 초음파 태아 영상의 볼륨 렌더링에 가장 적합한 거리지도를 선택한다.

주요어 : 거리맵, 공간도약, 광선추적, 볼륨 렌더링

1. 서론

볼륨렌더링은 일련의 단면 영상 정보로 구성된 볼륨

데이터로부터 의미있는 정보를 추출하여 3차원 영상으로 가시화시켜 주는 방법으로 3차원 데이터에 대한 효과적인 분석과 통찰력을 제공한다¹⁾.

볼륨 렌더링은 매핑기법에 따라 후향매핑기법으로 최종영상을 구성하는 각 픽셀의 색을 하나씩 결정해 나가는 영상순서(image-order) 알고리즘과 전향매핑기법으로 볼륨 데이터를 구성하는 샘플 또는 복셀이 하나씩 영상에 매핑, 누적되어 최종영상을 생성해 나가는 객체순서(object-order) 알고리즘으로 분류된다¹⁾. 영상순서 알고리즘 중 하나인 광선 추적법은 다른 기법들에 비해 매우 우수하고 현실감 있는 결과 영상을 얻어내지만, 반복계산이 필요하

* 이 연구는 산업자원부, 교육인적자원부, 노동부 지원 최우수실험실지원사업과 과학기술부 지원 실시간분자영상기술개발사업에 의해 부분적으로 수행 되었음.

2007년 8월 3일 접수, 2007년 9월 5일 채택

¹⁾ 이화여자대학교 컴퓨터정보통신공학과

²⁾ 이화여자대학교 컴퓨터그래픽스/가상현실 연구센터

주 저 자: 박혜진

교신저자: 김명희

E-mail: mhkim@ewha.ac.kr

므로 속도가 대단히 느리다는 단점이 있다. 이러한 광선 추적법의 높은 계산비용을 줄이기 위한 가속화 기법이 꾸준히 연구되어 왔다²⁻⁴⁾.

가속화 기법은 객체영역과 배경영역을 구분하고, 볼륨 렌더링 결과영상에 영향을 끼치지 않는 배경영역(빈공간)을 광선추적에서 제외시켜 건너뛰는 것으로 크게 기존의 템플릿 기반 알고리즘⁶⁾, 쉬어-왓 렌더링⁶⁾, 거리 정보를 이용한 공간도약법⁷⁾ 등으로 나뉜다.

템플릿 기반 알고리즘은 광선의 진행 경로에 따른 샘플의 위치와 재샘플링 가중치를 미리 계산해 놓은 템플릿을 이용하여 샘플링과 주소 연산을 단축시킨 방법으로 렌더링 속도를 가속화하였으나, 원근 투영에는 사용할 수 없다는 단점이 있다. 쉬어-왓 렌더링은 시각 변환을 단순화하고 빈-공간을 쉽게 건너뛰고 조기광선종료를 수행하여 렌더링 속도를 빠르게 하지만, 광선 추적법에 비해 화질이 떨어지며 원근 투영시 영상에 심한 왜곡이 생길 수 있다는 단점이 있다. 거리지도를 이용한 공간도약법은 볼륨 내부의 각 지점에서 가장 가까운 불투명한 지점까지의 거리를 기억해 두었다가, 볼륨의 탐색시 그 거리만큼 공간 탐색의 보폭을 크게 하여 공간 탐색의 효율을 향상시키는 방법이다.

본 연구에서 사용한 태아초음파 영상의 볼륨렌더링에서 가장 요구되는 것은 실시간으로 획득하는 데이터의 빠른 영상처리와 잡음에 덜 민감한 고화질 입체정보의 생성이다. 화질이 가장 우선시되기 때문에 쌍선형보간의 사용으로 화질이 떨어지는 쉬어왓 볼륨 렌더링 보다는 3쌍선형보간을 사용하여 실제감을 살려주어 고화질의 결과영상을 제공하는 광선추적법이 적합하다. 그러나 고화질 정보를 제공해주는 대신 반복적인 계산으로 인해 많은 계산 시간이 필요하므로 광선추적법의 속도 개선이 요구된다.

공간도약법에서는 볼륨데이터가 물체를 표현하는 불투명 공간과 물체를 제외한 투명 공간(빈공간)으로 구분되며 빈공간에서 구한 샘플값은 최종영상에 기여하지 않는 볼륨 데이터의 빈공간을 건너뛰므로써 렌더링 속도를 가속화한다. 이때, 거리지도를 생성하여 객체표면(isosurface)으로부터의 거리값을 미리 저장해놓고 그 값을 이용하여 빈공간을 도약할 수 있게 되어 광선이 경계표면까지 찾아가는 샘플링 계산시간을 단축할 수 있다^{4,8,9,10)}.

샘플 지점간의 가장 이상적인 거리값 계산은 유클리드 거리(Euclidean distance) 계산법이지만 복잡한 실수 계산이 필요하기 때문에 처리시간이 길다. 거리 근사값을 이용하는 도시구획 거리와 체스판 거리는 도약 시 물체경계를 놓치는 경우가 발생할 수 있으므로 유클리드 거리기반 도약법에 비해 광선도약 횟수가 더 많아질 수 있다. 거

리지도 계산에 따른 시간비용과 샘플링 횟수 증가를 고려한 시간 비용 차이에 따른 속도개선 성능의 비교가 필요하다. Cohen과 Sheffer는 이를 위해 Proximity Clouds를 제안하고 유클리드 거리와 유사한 챔퍼 거리와 도시구획 거리를 이론적으로 비교하였다. 본 논문에서는 팬텀(phantom) 데이터와 태아 초음파영상에 각각의 거리함수를 이용한 거리지도를 구현, 적용해보고 일련의 실험을 통해 속도를 비교함으로써 태아 초음파 볼륨렌더링에 가장 적합한 거리지도를 제안한다.

2. 거리지도 정보를 이용한 공간도약

태아의 초음파 볼륨데이터의 경우 관찰하고자 하는 부위가 태아의 피부이다. 태아는 태반이나 자궁내벽으로부터 일정거리만큼 떨어져 있으며, 그 가운데는 양수로 채워져 있다. 이때 양수에 해당하는 영역은 상대적으로 낮은 명암도 값을 갖는데 최종영상의 픽셀 값을 결정하는데 기여하는 것이 없으므로 이를 빈공간으로 간주하여 샘플링을 할 필요가 없다.

하지만 광선추적법은 광선이 볼륨데이터에 진입하는 순간부터 샘플링을 시작하기 때문에 실제로 샘플링을 하기 전에는 광선이 경계의 표면에 도착했는지의 여부를 알 수 없다. 이러한 불필요한 샘플링을 제거하기 위하여 공간도약법을 사용하며, 전처리 과정에서 볼륨 내부의 각 복셀들과 가시화하려는 경계복셀까지의 최단거리를 계산하여 거리지도(Distance Map)와 같은 자료구조에 거리정보를 저장하고 볼륨 탐색 시 그 거리정보를 이용하여 빈공간을 도약함으로써 렌더링 속도를 향상시킨다.

2.1 거리변환 및 거리지도 생성

거리지도는 볼륨 내부의 각 복셀에서 가장 가까운 거리에 있는 경계복셀까지의 거리를 미리 계산하여 볼륨 데이터와 같은 해상도의 저장 공간에 그 값들을 저장한 자료구조를 말한다.

먼저, 잡음이 심한 초음파 영상의 역치값을 이용한 분류(Classification)를 하기 위해서는 경계치를 결정하기 전에 잡음을 제거해야한다. 본 연구에서는 평균값(Mean) 필터링을 이용하였다. 거리지도를 생성하기 전에 객체영역표면(isosurface)를 찾기 위해서 볼륨 데이터 내부의 태아영역(객체)과 양수영역(배경)을 영상의 히스토그램 분포를 이용하여 객체와 배경의 경계기준이 되는 역치값(T)을 결정하고, 이진화 작업을 수행한다.

역치값을 경계로 간주되는 복셀들의 불투명도를 높게 하고 그 외의 복셀들에는 불투명도를 낮게 지정함으로써

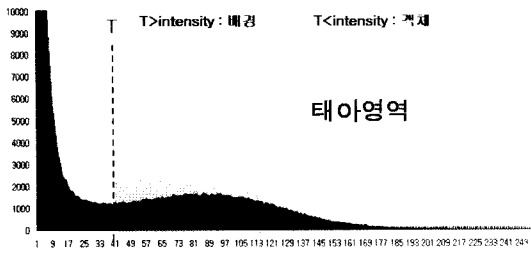


그림 1. 경계정의를 위한 볼륨 데이터의 히스토그램 분포

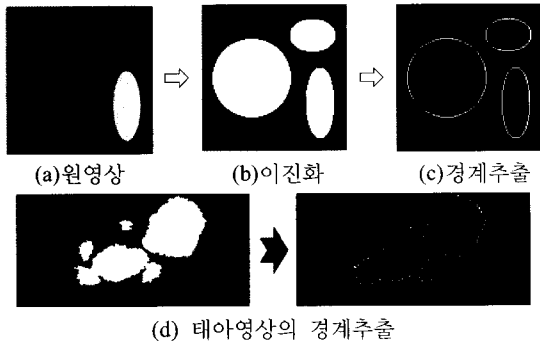


그림 2. 팬텀영상과 태아영상의 경계정의 결과

경계를 정의할 수 있다. 불투명도가 일정한 임계치(T)를 초과하는 경우를 물체의 경계로 정하면 임의의 복셀 V(x,y,z)을 다음과 같이 빈 복셀(empty voxel)과 경계 복셀로 분류할 수 있다.(그림 1)

$$\text{경계복셀} : \phi(x,y,z) \geq T \quad (1)$$

$$\text{빈 복셀} : \phi(x,y,z) < T \quad (2)$$

식(1)~(2)에서 정의한 것과 같이, 임계치(T) 보다 큰 값을 갖는 영역을 배경, 작은 값을 갖는 영역을 객체영역으로 분류할 수 있다.

태아영상에서 추출한 경계를 기준으로 볼륨렌더링 전 처리 과정에서 생성되는, 볼륨 데이터 V(x,y,z)에 대한 거리맵 D(x,y,z)은 다음과 같이 정의할 수 있다.

표 1. 거리맵 정의

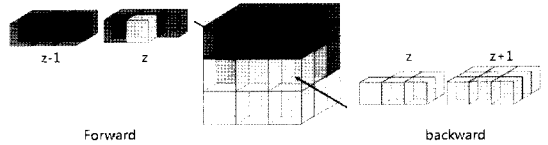
V(x,y,z)가 경계 복셀이면,
$D(x,y,z) = 0$
V(x,y,z)가 투명한 복셀이면,
$D(x,y,z) = \min(\bigcup_{i,j,k=0}^{L,M,N} \Psi(v(x,y,z), v(i,j,k)))$

* $\Psi(v_1, v_2)$ 는 두 복셀 간의 거리 함수

* $v(i,j,k)$ 는 경계복셀

2	1	2	1	0	1	2	1	2
1	0	1	0	X	0	1	0	1
2	1	2	1	0	1	2	1	2
	z-1			z				z+1

(a) 2차 거리변환 : (노)전진방향 (흰)후진방향



(b) 3차 거리변환

그림 3. 2차/3차 거리변환을 위한 행렬

거리지도에 저장되는 각 픽셀에서 경계픽셀까지의 거리 계산은 영상 내 두 개의 점 $p=(x,y,z)$ 와 $q=(i,j,k)$ 사이의 거리함수로 계산되며, 거리함수는 다음 식과 같이 정의된다. 식(3)~(5)은 가장 일반적으로 사용되는 유클리드, 도시구획, 체스판 거리 계산법이다.

도시구획 :

$$D_4(p,q) = |x-i| + |y-j| + |z-k| \quad (3)$$

체스판 :

$$D_8(p,q) = \max(|x-i|, |y-j|, |z-k|) \quad (4)$$

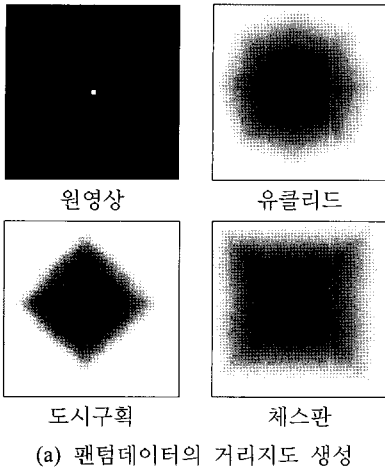
유클리드 :

$$D_e(p,q) = \sqrt{(x-i)^2 + (y-j)^2 + (z-k)^2} \quad (5)$$

거리 계산의 정확도에 있어서는 유클리드 거리변환 함수의 사용이 가장 적합하지만, 정수가 아닌 실수 계산을 필요로 하기 때문에 메모리 공간이나 계산속도 면에서 많은 비용을 필요로 한다. 그에 비해 정수계산이나 비교연산만을 이용하여 유클리드 거리와 근사한 값을 구할 수 있는 도시구획 거리와 체스판 거리는 유클리드 거리법에 비해 계산 시간이 적게 소요되어 많이 사용된다.

이때 데이터는 역치값을 기준으로 한 이진화 처리 후 모든 픽셀의 객체 픽셀은 255, 배경 픽셀은 0으로 레이블 되어 있다는 것을 전제로 한다. 3차원 영상의 거리지도를 생성의 경우, 그림 3과 같이 마스크를 이용하여 전진방향과 후진방향의 두 단계로 수행된다. 전진방향 마스크는 행우선 순서이며(row-major order) 위에서 아래로, 왼쪽에서 오른쪽으로 진행된다. 후진방향 마스크는 반대로 아래에서 위로, 오른쪽에서 왼쪽으로 (column-major order) 진행된다. 총 26개의 이웃하는 픽셀과의 거리값을 구하여

가장 최소값이 되는 값을 거리지도에 저장하게 된다. 이렇게 계산된 거리지도를 통해 거리값을 이용하여 공간도약 시에 광선의 진행방향을 따라 저장되어 있는 거리지도의 값만큼 도약하게 된다.



(a) 팬텀데이터의 거리지도 생성
(b) 초음파 태아데이터의 거리지도
그림 4. 거리지도 생성의 예

다음 그림 4는 각각의 거리지도 종류에 따른 간단한 입력영상과 초음파 태아영상의 거리변환결과를 나타낸 예이다.

2.2 공간도약법

광선추적법은 광선의 진행방향을 따라 가며 볼륨 데이터의 각 복셀의 컬러 값을 누적해서 결과 영상 픽셀의 값을 얻어내는 방법이다. 이 과정에서 각 복셀이 최종 결과 영상에 기여하는 정도는 각 복셀들의 컬러값에 의해 결정된다.

$$I \approx \sum_{i=0}^n \tilde{C}_i \prod_{j=0}^{i-1} (1 - a_j) \quad (2)$$

한 광선을 식(2)와 같이 등간격의 선분들로 나누어 선분 각각에 대한 색상(\tilde{C}_i)과 투명도(a_i)를 얻고 이들을 누적해 픽셀의 색상과 투명도를 얻는다. 미리 계산된 거리지도에 따라 광선추적 시 광선의 진행방향을 따라 광선이 도약한 위치와 같은 위치의 거리값을 참고하여 빈공간을 도약하여 빠르게 경계복셀을 찾아 샘플링을 시작하게 된다. 광선이 만난 위치의 거리지도에는 현재 복셀에서 가장 가까이에 있는 경계복셀까지의 거리가 저장되어 있기 때문에 볼륨 데이터와 같은 위치의 거리지도의 거리값을 참고하여, 샘플링을 하기 전에 현재 위치의 복셀이 경계복셀인지 빈공간인지 볼륨 내부인지를 확인한다. 거리값이 0이상이면 현재위치의 복셀이 빈공간임을 의미하므로 광선을 거리값 만큼 도약하고, 경계복셀을 만날 때까지 반복하여 광선을 추적한다.

광선 추적법은 위에서 언급한 것처럼 빈공간과 객체영역의 분류가 이루어지지 않은 상태에서 샘플링을 수행하기 때문에 볼륨 내부에 진입함과 동시에 경계표면을 만날 때 까지 일정간격으로 광선을 따라 샘플링 계산을 수행함으로써 경계를 찾게 된다.

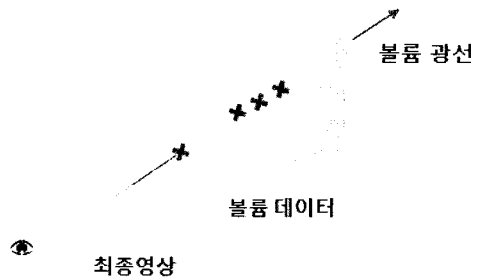
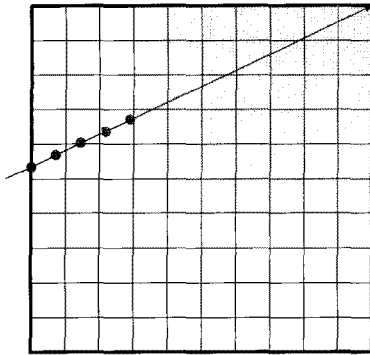
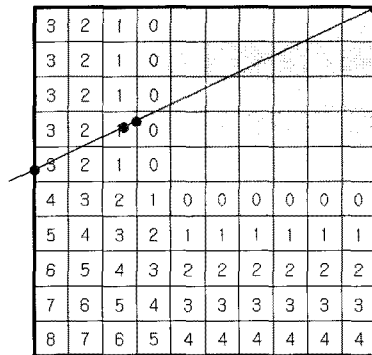


그림 5. 빈-공간도약 볼륨렌더링



(a) 광선추적



(b) 공간도약

그림 6. 광선도약 횟수 비교

반면, 공간도약법은 광선이 볼륨내부에 진입하여 진입한 복셀이 빈공간인지 아닌지를 확인한 후 빈공간일 경우 거리지도에 저장된 값을 참조하여 그 값만큼 빈공간을 도약하게 된다. 이렇게 빈공간을 도약함으로써 불필요한 샘플링의 횟수를 단축시켜 렌더링 속도를 향상시키는 결과를 얻게 된다(그림 5,6).

3. 거리지도에 따른 공간도약 성능비교

초음파 태아 영상의 렌더링에 적합한 거리지도 선택을 위해 거리변환법에 따른 렌더링 속도비교와 도약횟수 비교 실험을 수행하였다. 실험환경은 Pentium IV CPU 3.00GHz, 1.5GB RAM을 장착한 PC이며, Visual C++ 언어를 사용하여 구현하였다.

실험에 사용한 초음파 태아 영상 데이터는 양수로 여겨지는 부분인 빈공간의 비율이 전체 영상의 90%이상을 차지하였으며(표 2), 광선 샘플링 시 빈공간에서의 광선도약으로 인한 샘플링횟수와 태아영역 내 샘플링횟수를 비교한 결과는 아래 표 3과 같다.

실험 데이터의 관심영역내의 샘플링회수는 큰 차이가 없다는 것을 전제로 할 때에, 유클리드, 체스판 거리지도에 비해 가장 적은 도약횟수로 같은 크기의 빈공간을 도약하는 도시구획 거리지도가 가장 빠른 렌더링 속도를 보였다.

각 거리지도에 따라 공간도약의 샘플링 횟수에서는 차이를 보이지만 화질측면에서는 육안으로 구별되는 차이가 없음을 확인할 수 있었다.

표 2. 초음파 태아영상의 빈공간 비율

구분	양수영역	태아영역	해상도
1	92.5%	7.5%	200*95*107
2	96.5%	3.5%	200*111*179

표 3. 각 거리지도의 성능비교

no.	구분	샘플링 횟수	렌더링 시간
1	유클리드	33,142	2.250초
	도시구획	33,068	2.156초
	체스판	33,172	2.344초
2	유클리드	189,623	3.104초
	도시구획	189,665	2.911초
	체스판	189,565	2.964초



(a) 광선추적

(b) 유클리드



(c) 도시구획

(d) 체스판

그림 7. 각 거리지도별 렌더링 결과 영상

4. 결 론

영상의 볼륨 렌더링 연구는 일반적으로 화질개선 및 속도개선 두 가지 측면에서 활발히 진행되어 왔다. 본 논문에서는 실시간으로 획득되는 초음파 태아영상의 가시화 시 렌더링 속도를 개선하기 위한 가속화 방법에 대해 다루었다.

태아 초음파영상 볼륨렌더링은 그 활용용도가 태아의 선천적 기형진단, 발달과정 추적, 성장정도 측정 등 산부인과적 진단이므로 태아영역을 최대한 자세히, 사실적으로 관찰할 수 있어야 한다. 또한 초음파영상은 잡음, 특히 스펙클 노이즈가 심하고 명암도 변화구간이 좁아 선명한 화질을 제공하지 못하는 단점이 있다. 따라서 태아 초음파영상 렌더링 가속화에 있어 획득된 데이터를 빠른 속도로 가시화하는 것에 앞서 영상본연의 화질을 유지하는 것이 중요하다. 이를 위해 본 연구에서는 빠른 렌더링 속도를 제공하지만 화질보장이 안되고 원근투영 시 심각한 왜곡이 발생할 수 있는 쉬어-웍 볼륨렌더링 등의 기법 대신 상대적으로 느리지만 최대한 화질을 유지하며 가시화할 수 있는 일반 광선추적법을 사용하였으며, 광선 상의 복셀을 일정한 간격으로 샘플링하는 대신 태아영상의 양수 부분과 같이 렌더링 결과에 기여하는 바가 없는 복셀들을 계산에서 제외시키는 빈공간 도약기법을 사용하였다.

이때 빈공간과 객체표면까지의 거리를 계산함에 있어 최적의 거리함수를 선택하기 위해 거리지도간 성능비교 연구를 수행하였으며, 도시구획 거리지도가 화질의 큰 변화 없이 가장 적은 샘플링횟수를 보였으며, 불필요한 샘플링 연산을 줄임으로써 복셀값 계산 시 가장 많은 시간이 소요되는 보간연산이 줄어들었으므로 가장 빠른 렌더링 속도를 제공함을 결론내릴 수 있었다.

본 연구에서 사용한 거리지도기반 빈공간 도약법은 객체의 윤곽을 정확히 정의하는 것이 전제되어야하므로, 향후연구로는 잡음이 심한 초음파영상에서 보다 선명한 태아표면 경계를 결정하기 위한 개선된 세그멘테이션 기법을 제안한다.

참 고 문 헌

1. 김태영, 신병석 (2002), "3차원 의학영상 처리에서 사용되는 비균등 볼륨 데이터를 위한 효율적인 렌더링 방법," J.Biomed. Vol. 23, No. 6, pp. 491-498.
2. J. Danskin and P. Hanrahan (1992), "Fast algorithms for volume ray tracing," Workshop on Volume Visualization, pp. 91-98.
3. M. Meißner, M. Doggett, U. Kanus, and J. Hirche (2001), "Efficient Space Leaping for Ray casting Architectures," Proc. of the 2nd Workshop on Volume Graphics, pp. 149-161.
4. M. Sramek and A. Kaufman (2000), "Fast Ray-tracing of Rectilinear Volume Data Using Distance Transforms," IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, Vol. 3, No. 6, pp. 236-252.
5. Yagel, R and Kaufman, A. (1991), "Template-based volume viewing," Computer Graphics Forum (Eurographics 92 Proceedings), pp. 153-167.
6. Levoy, M. (1990), "Efficient ray casting of volume data," ACM Transactions on Graphics, pages 245-261.
7. Lacroute P. and Levoy, M. (1994), "Fast Volume Rendering Using a Shear-Warp Factorization of the Viewing Transformation," SIGGRAPH 94, pp. 451-458.
8. Zuiderveld, K., Koning, A. H. J., Viergever, M. A.(1992), "Acceleration of Ray Casting Using 3D Distance Transforms," Proceedings of Visualization in Biomedical Computing 1992, 1808, pp. 324-335.
9. D. Cohen and Z. Sheffer (1994), "Proximity Clouds - An Acceleration Technique for 3D Grid Traversal," The Visual Computer, Vol. 10, No. 11, pp. 27-38.
10. Yagel, R and Shi, Z. (1993), "Accelerating volume animation by space-leaping," Proceedings of IEEE Visualization '93, pp. 62-69.



박혜진 (clrra@ewhain.net)

2005년 성결대학교 멀티미디어학과 학사
2005년~현재 이화여자대학교 컴퓨터정보통신공학과 석사과정

관심분야 : 의료영상처리, 영상가시화, 컴퓨터 그래픽스, 시뮬레이션 등



송수민 (smsong@ewhain.net)

2002년 성신여자대학교 컴퓨터학과 학사
2004년 이화여자대학교 컴퓨터공학과 석사
2004년~현재 이화여자대학교 컴퓨터정보통신공학과 박사과정

관심분야 : 의료영상처리, 영상가시화, 컴퓨터 그래픽스, 시뮬레이션 등



김명희 (mhkim@ewha.ac.kr)

1979년 서울대학교 계산통계학과 석사
1986년 독일 괴팅겐대학교 전자계산학과 박사
1987년~현재 이화여자대학교 컴퓨터학과 교수
1999년~현재 이화여자대학교 컴퓨터그래픽스/가상현실 연구센터 센터장

관심분야 : 의료영상처리, 시뮬레이션, 혼합가상현실, 컴퓨터 그래픽스 등