

# 웨이블릿 변환을 이용한 볼륨데이터의 압축 및 가시화 실험

(An Experiment on Volume Data Compression and  
Visualization using Wavelet Transform)

최 임 석 <sup>†</sup> 권 오 봉 <sup>\*\*</sup> 송 주 환 <sup>\*\*\*</sup>

(Yeamseok Choe) (Oubong Gwon) (Juwhan Song)

**요 약** 웹환경에서 모든 클라이언트 컴퓨터에 방대한 볼륨데이터를 저장하여 놓고 이것을 인터랙티브하게 가시화하는 것은 쉽지 않다. 한 가지 해결 방법은 볼륨데이터를 압축하여 데이터베이스 서버에 보관하여 놓고 요구에 맞추어 네트워크를 통하여 클라이언트 컴퓨터에 전송하여 가시화하는 것이다. 이러한 경우 압축에 많이 사용하는 알고리즘이 웨이블릿 변환이다. 이 논문에서는 서버 컴퓨터에서 볼륨데이터를 웨이블릿 알고리즘을 이용하여 압축하여 놓고 클라이언트 컴퓨터로 전송하여 디렉트볼륨렌더링하는 패러다임에 적합한 웨이블릿과, 압축률을 구하기 위한 실험을 한다. Engine, CThead, Bentum 볼륨데이터를 Har, Daubechies4, 12, 20 웨이블릿을 이용하여 각각 전체 데이터의 50%, 10%, 5%, 1%, 0.1%, 0.03%로 압축하여 디렉트볼륨렌더링을 이용하여 가시화한 후 육안 및 영상평가지표를 이용하여 평가하였다. 성능은 압축률이 낮은 범위에서는 Harr 웨이블릿이 우수하였고 압축률이 높은 곳에서는 Daubechies4와 Daubechies12 웨이블릿이 우수하였다. 바람직한 압축률은 육안으로 평가한 경우는 전체 데이터의 약 1%이고 영상평가지표를 이용하여 평가한 경우는 전체 데이터의 약 5-10%이었다.

**키워드** : 웨이블릿 변환, 압축, 볼륨렌더링, 가시화, 다해상도, 웹기반계산환경

**Abstract** It is not easy that we visualize the large volume data stored in the every client computers of the web environment. One solution is as follows. First we compress volume data, second store that in the database server, third transfer that to client computer, fourth visualize that with direct-volume-rendering in the client computer. In this case, we usually use wavelet transform for compressing large data. This paper reports the experiments for acquiring the wavelet bases and the compression ratios fit for the above processing paradigm. In this experiments, we compress the volume data Engine, CThead, Bentum into 50%, 10%, 5%, 1%, 0.1%, 0.03% of the total data respectively using Harr, Daubechies4, Daubechies12 and Daubechies20 wavelets, then visualize that with direct-volume-rendering, afterwards evaluate the images with eyes and image comparison metrics. When compression ratio being low the performance of Harr wavelet is better than the performance of the other wavelets, when compression ratio being high the performance of Daubechies4 and Daubechies12 is better than the performance of the other wavelets. When measuring with eyes the good compression ratio is about 1% of all the data, when measuring with image comparison metrics, the good compression ratio is about 5-10% of all the data.

**Key words** : wavelet transform, compression, volume rendering, visualization, multiresolution, web based computation environment

<sup>†</sup> 비 회 원 : 교창북고등학교 교사  
yschoe@bcline.com  
<sup>\*\*</sup> 종신회원 : 전북대학교 전자정보공학부 교수  
obgwun@moak.chonbuk.ac.kr  
<sup>\*\*\*</sup> 비 회 원 : 전주대학교 교양학부 교수  
jwsong@jeonju.ac.kr  
논문접수 : 2003년 6월 18일  
심사완료 : 2003년 8월 30일

## 1. 서 론

볼륨렌더링은 컴퓨터 그래픽스의 한 분야로 1980년 이래로 의료 분야에 이용의 가능성이 제기되면서 주목을 받아 오고 있다. 그 후 많은 연구가 이루어져 작은 비용으로 고품질의 3차원 영상을 생성할 수 있는 볼륨 렌더링 알고리즘이 고안되었다. 그러나 이러한 알고리즘은 지역계산환경(local computation environment)에 맞

추어져 최근의 웹기반계산환경(web based computation environment)에서는 사용하기가 쉽지 않다[1]. 웹기반계산환경에서 볼륨렌더링 알고리즘을 사용하기 위해서는 이 환경에 적합하도록 알고리즘을 개선해야한다[2]. 서버클라이언트 환경에서는 방대한 볼륨데이터의 전송에 관한 문제가 발생하는데 이 문제를 해결할 수 있는 한 가지 방법은 볼륨데이터를 압축하여 데이터베이스 서버에 보관하여 놓고 클라이언트의 요구에 맞추어 네트워크를 통하여 클라이언트 컴퓨터에 전송한 후에 가시화하는 것이다[1]. 그리고, 전체 볼륨데이터를 이용하여 고품질의 영상을 인터랙티브하게 생성하는 것은 쉽지 않기 때문에 전체 영상을 개략적으로 생성하여 사용자가 이것을 보고 필요로 하는 부분을 선택하여 상세히 가시화하는 것도 효과적이다. 또 해상도는 사용자가 선택하는 데이터 품질 파라미터, 즉 영상의 균질성, 영역의 중요도에 따라 선택되어질 수 있다. 이러한 기능을 구현하는데 사용할 수 있는 것이 다해상도 웨이블릿 변환이다[3].

다해상도 웨이블릿 변환은 여러 세부 레벨로 데이터를 계층적으로 표현하여 요구에 맞추어 레벨을 선택하는 기법이다. Mallat는 2차원 영상의 재분할(decomposition)과 재구성(resonstruction)을 라플라시안 피라미드(Laplacian Pyramid) 형식으로 구성하기 위하여 다해상도 웨이블릿을 이용하였다[3]. 그는 오소노말(orthonomal)한 웨이블릿 기저에서 신호를 추출하고 재구성하여 해상도  $2^i$ 와  $2^{i+1}$ 의 정보 차이를 찾아냈다. 방대한 볼륨데이터의 저장과 가시화는 계산능력이 약하고 적은 기억 용량을 갖는 클라이언트 컴퓨터에서는 큰 부담이 된다. 비록 강력한 능력을 갖고 있는 서버가 방대한 볼륨데이터를 저장할 수 있다하더라도 데이터의 전송은 제한된 대역폭을 갖고 있는 네트워크에 큰 부담이 된다. 이때 웨이블릿 변환을 이용하여 데이터를 압축하여 전송하면 효과적이다. 웨이블릿 변환을 이용하여 전송된 데이터의 가시화 속도는 데이터의 압축률에 따라 좌우된다. 그리고 압축과정에서 일부의 데이터가 손실되는데 이러한 데이터를 이용하여 웨이블릿 역변환하여 가시화하면 영상에 왜곡이 발생함으로 압축률과 영상왜곡과의 관계를 조사할 필요가 있다.

볼륨렌더링과 관련된 웨이블릿에 관한 연구는 볼륨데이터를 웨이블릿으로 변환하여 표시하는 방법[4], 웨이블릿을 이용하여 볼륨렌더링을 고속화하는 방법[6,7], 웹기반계산환경에서 웨이블릿을 이용하여 볼륨데이터를 압축 전송하는 방법 등이 있다[1]. Muraki는 컴퓨터로 물체를 인식하기 위하여 볼륨데이터를 오소노말한 3차원 웨이블릿 기저를 이용하여 변환하여 해상도에 맞추어 가시화할 수 있도록 하였으나 렌더링 계산 시간이

너무 많이 걸리는 단점이 있었다[4]. Linsen등은 볼륨데이터를 비이스프라인(B-spline)데이터를 이용하여 변환하였고  $\sqrt{2}$  분할을 하였다. 이 방법의 장점은 쿼드트리와 옥트리에서 정점의 수가 앞 정점의 4 또는 8배로 증가하는데 비하여 2배로 증가하는 것이다[5]. Westermann은 광선의 진행 방향에 따라 해당 복셀에서 발생하는 빛의 세기를 계산하는 적분을 웨이블릿 변환을 이용하여 고속화하였다[6]. Holmström은 레이캐스팅 기반의 볼륨렌더링에서 볼륨데이터 공간에 방출하는 광선의 수를 웨이블릿 변환을 이용하여 제어함으로써 고속화하였다[7]. Yang은 웹기반계산환경에서 가시화를 위해서 서버에서 웨이블릿을 이용하여 볼륨데이터를 압축한 후에 클라이언트에 전송하여 가시화하는 방법을 취하였다. Yang은 Harr 웨이블릿 만을 사용하였으며 가시화된 영상을 영상평가지표를 이용하여 평가하지는 않았다[1].

일반적으로 영상에 대한 평가 방법은 가시화 기술로 생성한 영상이 실제영상과 얼마나 가까운가를 서로 비교하는 방법[7,8], 수치평가지표를 사용하는 방법[9], 가시화 알고리즘에 기인하는 오차를 특성화하는 방법[10] 등이 있다. 가시화 기술로 생성한 영상이 실제 영상과 얼마나 가까운가를 비교하는 방법에서는 다른 가시화과이프라인을 통하여 생성된 영상들이 실제 영상과 얼마나 가까운가가 비교된다. 예를 들면 물감, 연기 등이 확산하는 현상을 입자트레이싱 기법을 이용하여 가시화하였다면 이 영상과 실제 영상이 비교된다. 그러나 이 방법은 데이터의 내용보다는 가시화된 결과가 실제의 영상과 얼마나 차이가 있느냐에 초점이 있기 때문에 데이터 자체 분석에 중점을 두는 볼륨렌더링에는 적합하지 않다. 수치평가지표는 영상의 차이를 측정하는데 사용된다. 대표적인 전역수치평가지표로서는 평균절대값오차(Mean Absolute Error), 제곱평균제곱근오차(root mean square error) 등이 있다. 일반적으로 볼륨데이터를 가시화하는 사람들은 영상간의 공간적인 상관관계에 흥미를 갖는다. 예를 들어 두 영상간의 차이가 어떤 영역에 얼마나 집중되어 있는지 또는 오차가 고주파 영역에 집중되어 있는지 저주파 영역에 집중되어 있는지 알 필요가 있다. 이 논문에서는 볼륨데이터를 이용하여 생성한 영상에 대하여 이러한 평가지표를 이용하여 성능을 파악한다.

이 논문은 웹 환경에서 사용할 수 있는 볼륨렌더링 시스템을 구축하는데 필요한 기초 자료를 얻기 위한 연구이다. 흔히 사용하는 방법은 서버 컴퓨터에서 볼륨데이터를 웨이블릿 알고리즘을 이용하여 압축하고 클라이언트 컴퓨터로 전송한 후 해독하여 디렉트볼륨렌더링 알고리즘을 이용하여 가시화하는 것인데 이 논문에서는 이러한 계산 패러다임에 따라 여러 가지 웨이블릿에 대

하여 다른 비율로 압축한 블록데이터를 복원하여 디렉트블록렌더링을 이용하여 가시화 한 후에 육안 및 평가지표를 사용하여 평가하여 그 효과를 측정하였다. 실험에 사용한 웨이블릿 기저(basis)는 일반적으로 많이 사용되는 Harr, Daubechies4, 12, 20으로 하였다.

이 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 여러 가지 웨이블릿 변환에 대하여 조사하고 이어서 3장에서는 이 논문에서 블록데이터를 가시화하는데 사용한 디렉트블록렌더링 관하여 고찰한다. 그리고 4장에서는 여러 가지 평가지표에 대하여 알아본 후에 5장에서는 벤치마크 블록데이터에 대하여 여러 가지 웨이블릿으로 압축하여 가시화하여 평가하고 압축률과 성능과의 관계, 영상의 왜곡 등을 조사한다. 마지막으로 6장에서는 본 실험에 대하여 종합적으로 평가하고 결론을 내린다.

## 2. 여러 가지 웨이블릿 변환

### 2.1 웨이블릿의 기본 개념

웨이블릿 변환은 신호를 웨이블릿이라고 하는 원래 신호의 기저함수(basis function)와 다른 기저함수에 투사(project)하여 원래의 신호를 웨이블릿 계수로 표현한다. 웨이블릿 변환을 하는 중요한 이유는 신호를 압축하여 표현할 수 있기 때문이다. 신호의 웨이블릿 표현에서는 저주파영역(신호의 변화가 없는 곳)에서는 수 비트의 정보로 표현이 되고 고주파영역(신호의 변화가 심한 곳)에서는 부가적인 정보를 이용하여 표시한다[11].

웨이블릿의 기본 개념은 어떤 표준(canonical) 함수를 다일레이트(dilate, 확대 축소)하거나 트랜스레이트(translate, 이동)하여 새로운 함수를 만들어 이 함수를 결합하여 목적 함수로 표현하는 것이다. 어떤 함수  $v(x)$ 에 대해서  $v(ax)$ 를 계산하여 이 함수를  $a$ 만큼 다일레이트하고  $sv(x)$ 를 계산하여 이 함수의 값을  $s$ 만큼 확대하고  $v(x+b)$ 를 계산하여  $b$ 만큼 트랜스레이트할 수 있다. 다일레이션 계수를 2로 주고 위에서 설명한 것을 통합하면 다일레이션 방정식(dilation equation) 식 (1)을 만들 수 있다.

$$v(x) = \sum_{k=0}^{L-1} c_k v(2x-k) \quad (1)$$

신호를 다해상도(multiresolution)로 표현하기 위해서 다일레이션 방정식을 재귀적으로 표현하면 식 (2)가 생성된다.

$$v_j(x) = \sum_{k=0}^{L-1} c_k v_{j-1}(2x-k) \quad (2)$$

대상함수는 다일레이션 방정식으로 표현되는 스케일링 기저함수  $\phi(x)$ 와 웨이블릿 기저함수  $\psi(x)$ 로 주어진다. 유일한 스케일링 함수  $\phi(x)$ 는 벡터 공간  $V_j$ 에서 직교하는 함수들로 구성되는데 식 (3)으로 표시된다.

$$\phi_k^j(x) = \sqrt{2^j} \phi(2^j x - k), \quad k \in Z \quad (3)$$

어떤 해상도에서 스케일링 함수는 그 해상도 보다 한 단계 높은 스케일링 함수의 선형 결합으로 식 (4)와 같이 표시된다.

$$\phi(x) = 2 \sum_k h_k \phi(2x-k) \quad (4)$$

여기서  $h_k$ 는 저역필터열(low-pass filter sequence)이다.

만일  $\phi(x)$ 가 직교하는 스케일링 함수이고  $W_j$ 가 벡터 공간  $V_{j+1}$ 에 속하고  $V_j$ 와 직교하는 보함수(complement function)라고 하면 직교하는 웨이블릿  $\psi$ 는 식 (5)와 같이 표시되고 벡터 공간  $W_j$ 의 직교하는 기저를 생성한다.

$$\psi_k^j = \sqrt{2^j} \psi(2^j x - k), \quad k \in Z \quad (5)$$

웨이블릿 함수  $\psi(x)$ 는 스케일링 함수  $\phi(x)$ 와 고역필터열(high-pass filter sequence)  $g_k$ 를 이용하여 식 (6)과 같이 표시된다.

$$\psi(x) = 2 \sum_k g_k \phi(2x-k) \quad (6)$$

스케일링 함수와 이에 상당하는 웨이블릿 함수가 함께 직교하는 다해상도 해석을 정의한다. 다해상도 해석을 이용하면 대상함수  $f(x)$ 는 벡터 공간  $V_j$ 와  $W_j$  안에서 상당하는 해상도로 근사화할 수 있다. 대상함수를  $V_j$  또는  $W_j$ 로 투사하는 연산자는 식 (7) 및 식 (8)로 표시된다.

$$P^j f(x) = \sum_k S_k^j \phi_k^j(x) \quad (7)$$

$$Q^j f(x) = \sum_k D_k^j \psi_k^j(x) \quad (8)$$

여기서  $S_k^j = \langle f, \phi_k^j \rangle$ ,  $D_k^j = \langle f, \psi_k^j \rangle$  이고  $\langle f, u \rangle = \int_{-\infty}^{+\infty} f(u)g(u)du$ 이다.

$P^j f$ 는 해당 해상도에서 대상 함수의 유연한 정보(smooth information)를 표시하고  $Q^j f$ 는 이 해상도에서 이 보다 높은 해상도로 웨이블릿 계수를 변환하는데 필요한 상세정보(detail information)를 표시한다[6].

### 2.2 3차원 웨이블릿 기저

이 논문에서는 3차원 블록데이터를 웨이블릿 기저함수에 투사하기 때문에 3차원 웨이블릿 기저함수가 필요하다.  $R$ 을 실수의 집합,  $L^2(R)$ 을 측정가능(measurable)하고 적분(integration)이 가능한 1차원 함수라고 하고  $V_{2^j}$ 를  $L^2(R)$ 의 다해상도 근사 공간이라고 하면 식 (9)를  $L^2(R^3)$ 의 다해상도 근사 공간으로 사용할 수 있다.

$$V_{2^j} = V_{2^j}^1 \otimes V_{2^j}^2 \otimes V_{2^j}^3 \quad (9)$$

그리고  $V_{2^j, \dots}$ 은 식 (10)과 같이 기술된다.



$c_0, \dots, c_3$ 를 스프링 필터(H)가 되고  $c_3 - c_2, c_1 - c_0$ 가 차이 필터(G)가 된다. 이 두개의 필터 H, G를 함께 쿼드래처 밀러(quadrature mirror) 필터라고 한다. 계수  $c$ 는 대상 데이터 열에 대하여 G가 될 수록 많은 0을 생성하도록 선택된다. 이러한 성질을 갖게 하기 위해서는 계수들이 다음 조건을 만족해야 한다.

$$\begin{aligned} c_0^2 + c_1^2 + c_2^2 + c_3^2 &= 1 \\ c_2c_0 + c_3c_1 &= 0 \\ c_3 - c_2 + c_1 - c_0 &= 0 \\ 0c_3 - 1c_2 + 2c_1 - 3c_0 &= 0 \end{aligned} \tag{16}$$

식 (16)을 이용하여 4 개의 계수를 Daubechies는 식 (17)을 구하였다[11,12].

$$\begin{aligned} c_0 &= (1 + \sqrt{3})/4\sqrt{2} & c_1 &= (3 + \sqrt{3})/4\sqrt{2} \\ c_2 &= (3 - \sqrt{3})/4\sqrt{2} & c_3 &= (1 - \sqrt{3})/4\sqrt{2} \end{aligned} \tag{17}$$

이외에 Daubechies 웨이블릿에는 Daubechies12, Daubechies20이 있다.

### 3. 볼륨렌더링 알고리즘

레이크스팅 기반의 볼륨렌더링 알고리즘[16]의 개요를 의사코드로 표시하면 다음과 같다.

```
for (관측면에 있는 모든 픽셀에 대하여){
    해당 픽셀에 대하여 광선을 발사한다;
    광선의 진행 방향에 따라서 만나는 복셀에 대하여 빛의 세기를 샘플링하여 축적한다;
    해당 픽셀에 대하여 축적한 빛의 세기를 이용하여 해당 픽셀 값을 계산한다;
}
```

복셀에 대하여 빛의 세기(light intensity)를 샘플링하는데 사용하는 모델은 여러 가지가 있으나 Sabella는 볼륨데이터 공간을 밀도 방출자의 장(a field of density emitter)으로 가정하였다. 밀도 방출자는 빛을 방출하고 산란시키는 조그만 입자이다. 데이터 볼륨의 복셀 내부에서 밀도 방출자의 크기는 그 영역의 복셀값에 비례한다. 관측면 위의 하나의 픽셀에 해당하는 빛의 세기는 식 (18)과 같이 계산된다[14].

$$I(\vec{x}, \vec{d}) = \int_0^T e^{-\int_0^t \sigma(s) ds} I(t) dt \tag{18}$$

이 식에서  $\vec{x}, \vec{d}$ 는 각각 광선의 시작점 좌표, 광선의 단위 방향 벡터이고  $\sigma(s)$ 는  $\vec{x} + s\vec{d}$ 에서 광선의 미소감쇄량이다.  $I(t)$ 는  $\vec{x} + t\vec{d}$ 에서  $\vec{d}$ 방향으로 산란하는 미소 빛의 세기이다. 이와 같은 이론을 바탕으로 그림 3과 같이 볼륨렌더링 파이프라인을 이용하여 3차원 볼륨데이터를 가시화한다.

볼륨렌더링 파이프라인은 세그멘테이션(segmentation),

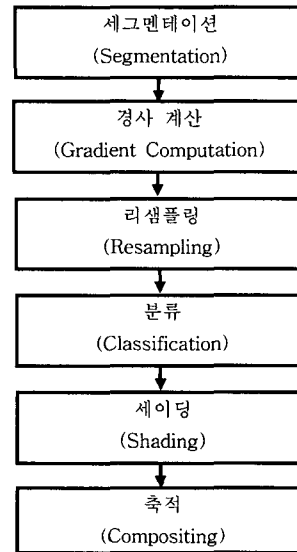
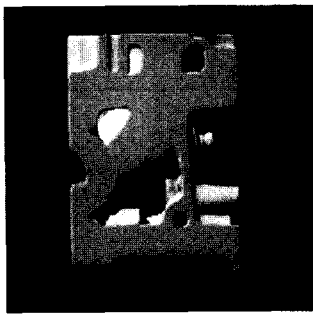
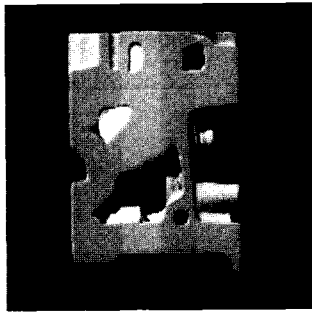


그림 3 볼륨렌더링 파이프라인

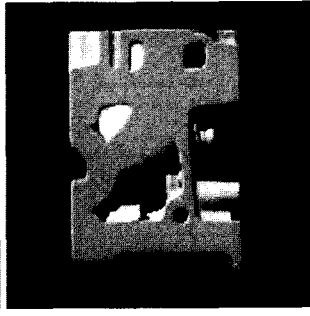
경사(gradient)계산, 리샘플링(resampling), 분류(classification), 셰이딩(shading), 축적(compositing) 단계로 그림 3과 같이 계산된다. 세그멘테이션은 전처리 단계에서 이루어지는 연산인데 복셀에 레이블을 주어 볼륨데이터를 구성단위로 분류한다. 예를 들어 인간의 두개골 MRI 데이터를 뼈, 두피, 뇌, 뇌척수액으로 분류하여 레이블링할 수 있다. 레이블은 분류 단계에서 불투명도와 칼라를 복셀에 할당하는데 사용한다. 경사계산 단계에서는 물질 사이의 경계 또는 물질의 모서리를 계산한다. 경사는 데이터가 변화하는 정도를 나타내는 양인데 볼륨데이터에서 구조를 보여준다. 경사는 두 물질사이의 경계에서 강하게 나타나고 경사의 방향을 알면 경사면의 방향을 알 수 있다. 경사를 구하는 방법은 중앙차분법(central difference gradient), 중간차분법(intermediate difference operation), 소벨연산자법(sobel operator) 등이 있다. 경사에 관한정보는 분류 단계와 셰이딩 단계에서 이용된다. 리샘플링 단계에서는 광선을 볼륨데이터 공간에 진행시키면서 해당 픽셀에 대한 빛의 세기를 축적한다. 샘플링 포인트의 위치는 항상 복셀 위치와 일치하지 않기 때문에 원래의 복셀을 이용하여 보간을 하는데 이것을 리샘플링 연산이라 한다. 분류(classification) 단계에서는 복셀을 세그멘테이션 처리에서 나누어진 클래스에 따라 다른 불투명도 또는 다른 색을 주어 분류한다. 예를 들어 뼈를 회색, 조직을 낮은 불투명도의 적색으로 주어 뼈가 조직 속에서 보이게 한다. 또 면을 분류하는 방법은 이진분류법(binary), 등치등고면분류법(iso-value contour surface), 영역경계면 분류법이 있다. 이진분류법은 데이터 값이 지정된 범위 안에 속하면



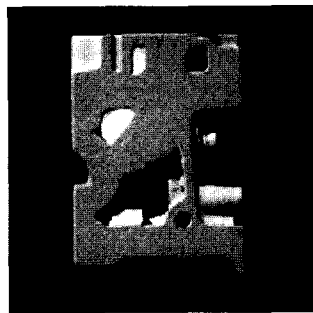
(a) Engine 원본



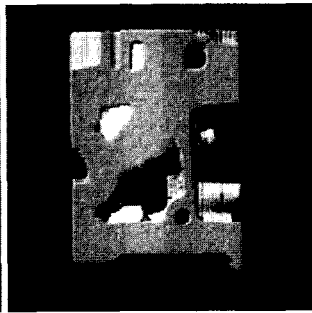
(a-1)Engine: Harr wavelet  
원래 데이터를 50%로 압축



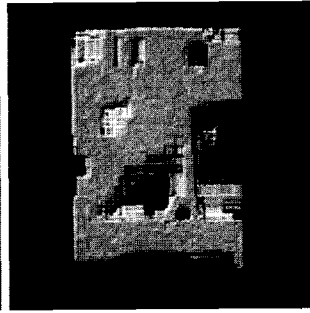
(a-2)Engine: Harr wavelet  
원래 데이터를 10%로 압축



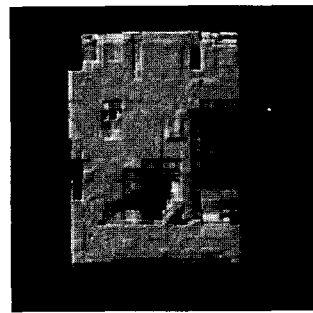
(a-3)Engine: Harr wavelet  
원래 데이터를 5%로 압축



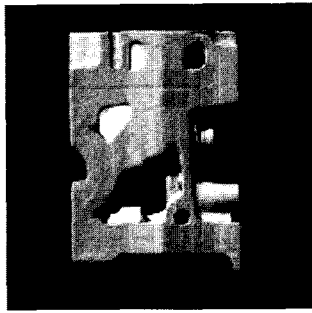
(a-4)Engine: Harr wavelet  
원래 데이터를 1%로 압축



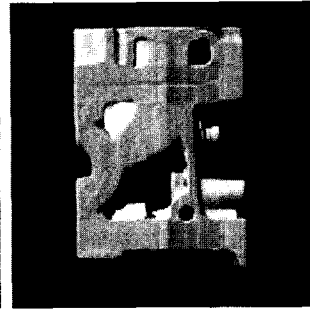
(a-5)Engine: Harr wavelet  
원래 데이터를 0.1%로 압축



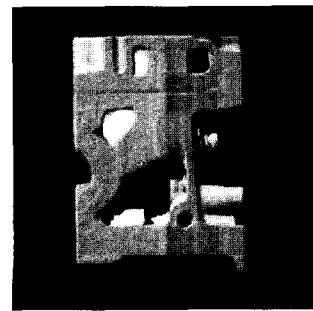
(a-6)Engine: Harr wavelet  
원래 데이터를 0.03%로 압축



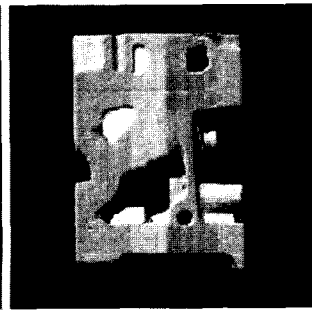
(a-7)Engine: Daubechies 4 wavelet  
원래 데이터를 50%로 압축



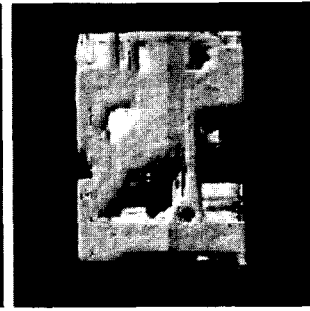
(a-8)Engine: Daubechies 4 wavelet  
원래 데이터를 10%로 압축



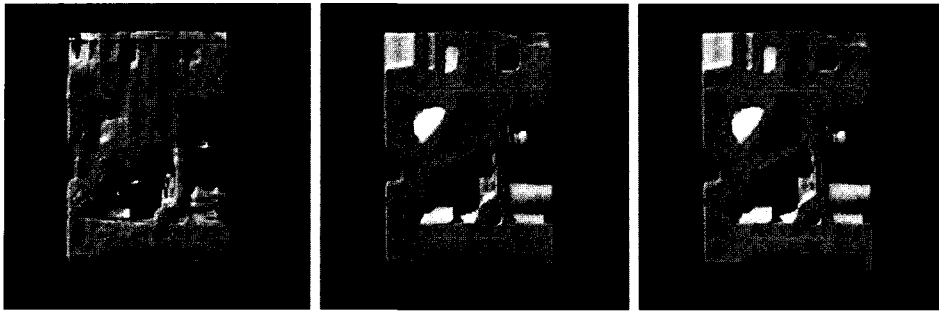
(a-9)Engine: Daubechies 4 wavelet  
원래 데이터를 5%로 압축



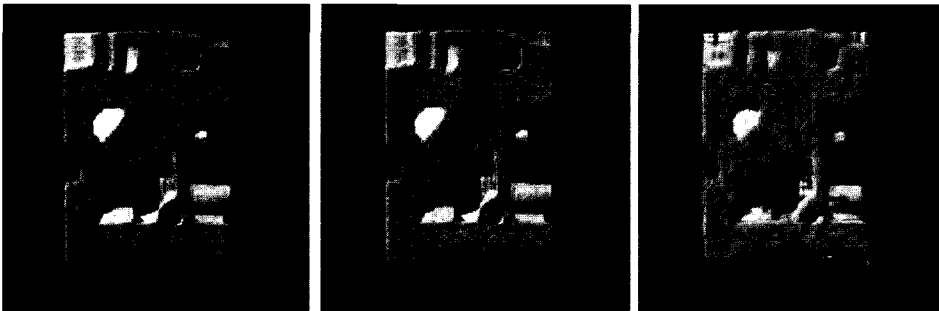
(a-10)Engine: Daubechies 4 wavelet  
원래 데이터를 1%로 압축



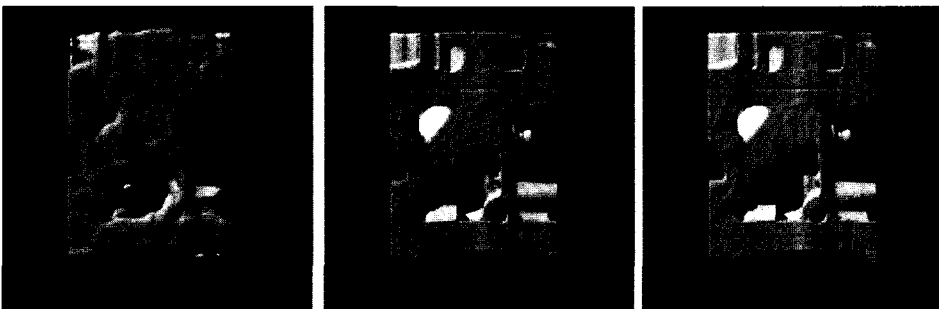
(a-11)Engine: Daubechies 4 wavelet  
원래 데이터를 0.1%로 압축



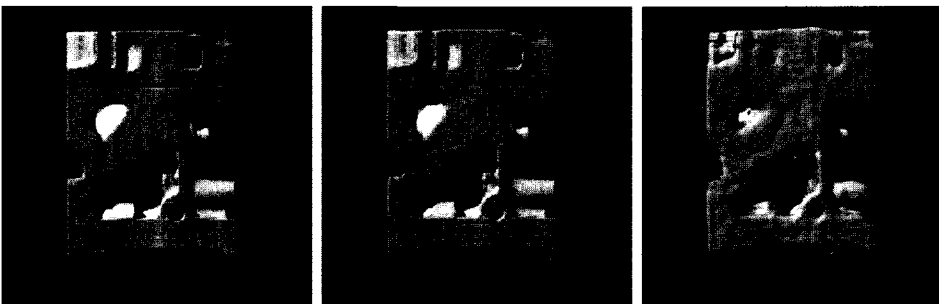
(a-12)Engine: Daubechies 4 wavelet 원래 데이터를 0.03%로 압축  
 (a-13)Engine:Daubechies 12 wavelet 원래 데이터를 50%로 압축  
 (a-14)Engine:Daubechi 12 wavelet 원래 데이터를 10%로 압축



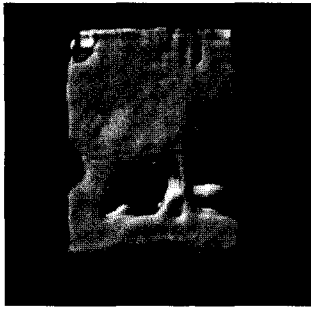
(a-15)Engine:Daubechies 12 wavelet 원래 데이터를 5%로 압축  
 (a-16)Engine:Daubechies 12 wavelet 원래 데이터를 1%로 압축  
 (a-17)Engine:Daubechies 12 wavelet 원래 데이터를 0.1%로 압축



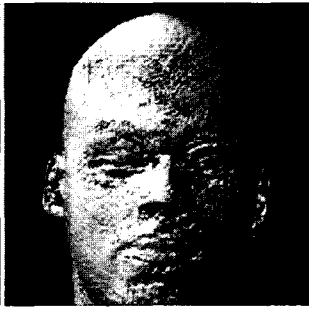
(a-18)Engine:Daubechies 12 Wavelet 원래의 데이터를 0.03%로 압축  
 (a-19)Engine:Daubechies 20 Wavelet 원래의 데이터를 50%로 압축  
 (a-20)Engine:Daubechies 20 Wavelet 원래의 데이터를 10%로 압축



(a-21)Engine:Daubechies 20 Wavelet 원래의 데이터를 5%로 압축  
 (a-22)Engine:Daubechies 20 Wavelet 원래의 데이터를 1%로 압축  
 (a-23)Engine:Daubechies 20 Wavelet 원래의 데이터를 0.1%로 압축



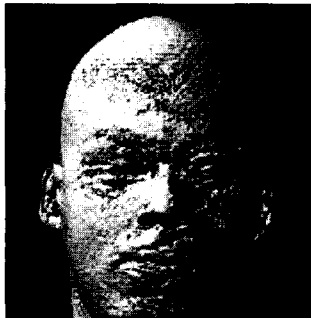
(a-24)Engine:Deaubechies20 Wavelet  
원래의 데이터를 0.03%로 압축



(b)Bentum 원본



(b-1)Bentum: Harr Wavelet  
원래의 데이터를 50%로 압축



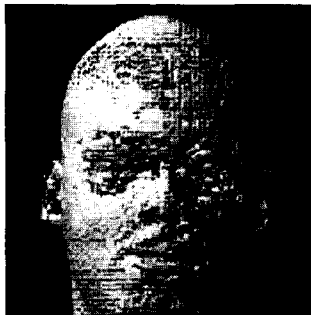
(b-2)Bentum: Harr Wavelet  
원래의 데이터를 10%로 압축



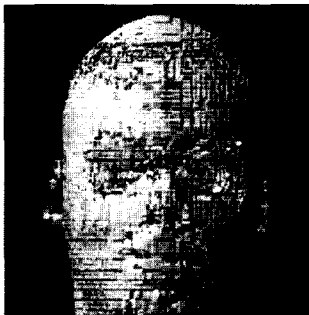
(b-3)Bentum: Harr Wavelet  
원래의 데이터를 5%로 압축



(b-4)Bentum: Harr Wavelet  
원래의 데이터를 1%로 압축



(b-5)Bentum: Harr Wavelet  
원래의 데이터를 0.1%로 압축



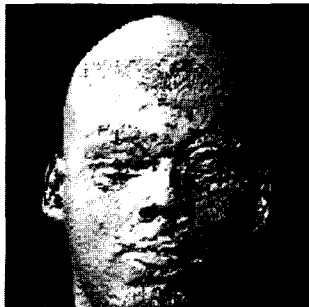
(b-6)Bentum: Harr Wavelet  
원래의 데이터를 0.03%로 압축



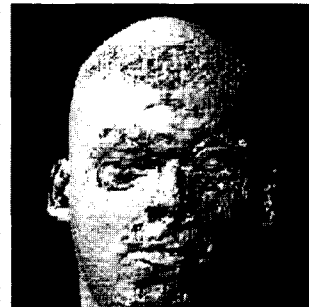
(b-7)Bentum:Deaubechies 4 Wavelet  
원래의 데이터를 50%로 압축



(b-8)Bentum:Deaubechies 4 Wavelet  
원래의 데이터를 10%로 압축

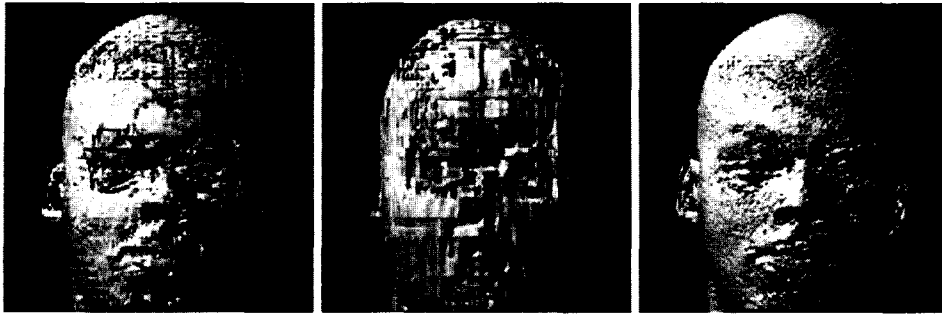


(b-9)Bentum: Daubechies 4 Wavelet  
원래의 데이터를 5%로 압축



(b-10)Bentum:Daubechies 4 Wavelet  
원래의 데이터를 1%로 압축

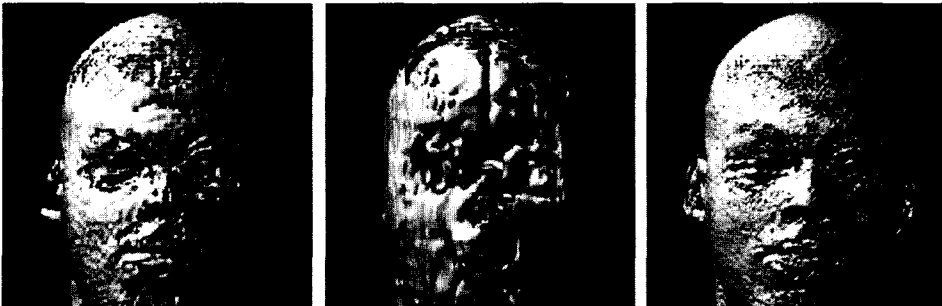




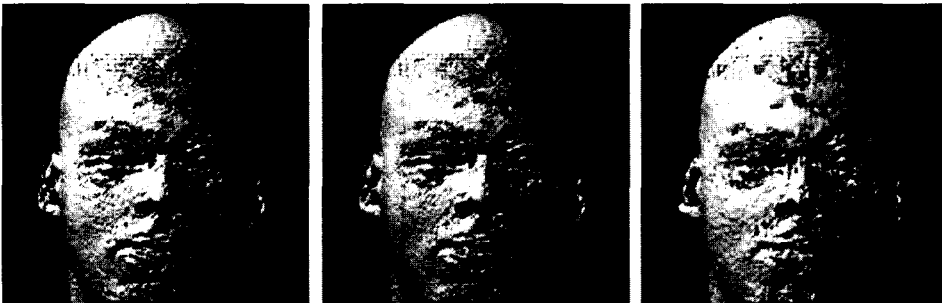
(b-11)Bentum:Daubechies 4 Wavelet 원래의 데이터를 0.1%로 압축  
 (b-12)Bentum:Daubechies 4 Wavelet 원래의 데이터를 0.03%로 압축  
 (b-13)Bentum:Daubechies 12 Wavelet 원래의 데이터를 50%로 압축



(b-14)Bentum:Daubechies 12 Wavelet 원래의 데이터를 10%로 압축  
 (b-15)Bentum:Daubechies 12 Wavelet 원래의 데이터를 5%로 압축  
 (b-16)Bentum:Daubechies 12 Wavelet 원래의 데이터를 1%로 압축



(b-17)Bentum:Daubechies 12 Wavelet 원래의 데이터를 0.1%로 압축  
 (b-18)Bentum:Daubechies 12 Wavelet 원래의 데이터를 0.03%로 압축  
 (b-19)Bentum:Daubechies 20 Wavelet 원래의 데이터를 50%로 압축



(b-20)Bentum:Daubechies 20 Wavelet 원래의 데이터를 10%로 압축  
 (b-21)Bentum:Daubechies 20 Wavelet 원래의 데이터를 5%로 압축  
 (b-22)Bentum:Daubechies 20 Wavelet 원래의 데이터를 1%로 압축



(b-23)Bentum:Daubechies 20 Wavelet (b-24)Bentum:Daubechies 20 Wavelet (C) CThead: Daubechies 20 Wavelet  
원래의 데이터를 0.1%로 압축 원래의 데이터를 0.03%로 압축 원래의 데이터를 1%로 압축

그림 4 Engine, Bentum, CThead 볼륨데이터를 Harr, Daubechies4, 12, 20웨이블릿으로 압축하여 3차원 가시화한 영상

경계면으로 간주하고 등치등고면분류법과 영역경계면 분류법은 경계면을 데이터 값과 경사값의 함수로 정의한다. 셰이딩은 조명 모델(illumination model)을 사용하여 볼륨데이터 집합의 일부분의 내외부를 사용자에게 보여주는 처리를 한다. 물체의 농담을 계산하는데는 셰이딩 모델(shading model)을 사용하는데 이 모델에는 고어(gouraud)셰이딩 모델과 풍(phong)셰이딩 모델이 있다. 이셰이딩 모델은 둘 다 풍조명모델(phong illumination model)을 사용한다. 고어 셰이딩 모델은 빛의 세기를 보간하여 물체 표면 위 각 점의 빛의 세기를 구하고 풍셰이딩 모델은 변의 법선 벡터를 보간하여 구한다. 축적 연산은 식 (18)을 이산화시킨 것으로 어떤 픽셀에 해당하는 광선의 진행 방향에 대하여 복셀 값을 샘플링하여 축적한다. 이렇게 함으로서 픽셀 한 개에는 수백 개의 복셀값을 축적하여 표현한다. 축적에는 앞에서 뒤로(front-to-back), 뒤에서 앞으로(back-to-front) 2 가지 방법이 있다. 앞에서 뒤로하는 연산은 식 (19)로 표시된다[9,15].

$$I = \sum_{i=0}^n I_i \prod_{j=0}^{i-1} (1 - a_j) \quad (19)$$

여기서  $I$ 는 임의의 픽셀에 해당하는 빛의 세기이고  $I_i$  광선이 진행하면서 만나는 하나의 임의의 복셀에 대한 빛의 세기이고  $a_j$ 는 해당 복셀의 불투명도이다.

#### 4. 영상평가지표

볼륨렌더링으로 가시화 한 영상을 육안으로 평가 할 경우에 비정상적인 영상이 생성되면 이것이 가시화 파이프라인 과정에서 생긴 것인지 데이터의 특성 때문에 생긴 것인지 구별하기가 어렵다. 비정상적인 영상 생성 원인을 찾는 것은 가시화 시스템 설계에 있어서 꼭 필요한 것이기 때문에 이것을 구별할 수 있는 영상평가지

표가 필요하게 된다. 또 웨이블릿 변환 등을 이용하여 데이터를 압축하여 가시화하면 영상이 왜곡되기 때문에 압축 등의 근사화 기술이 영상을 얼마나 왜곡시키는지 를 판정할 필요가 있다. 이를 위해서 이 논문에서는 전역차이지표인 평균절대값오차  $M_1$ , 제곱평균제곱근오차  $M_2$ 와 함께 N. Sahasrabudhe가 제안한 공간적 평가지표를 사용한다[17]. 편이상 전역차이 지표를  $M_1, M_2$ , 영상간 차이집중도를  $M_3$ , 고주파 영역의 차이 지표를  $M_4$ 라고 한다. 이것의 내용은 다음과 같다.

##### 4.1 전역차이 지표 $M_1, M_2$

영상평가지표로서 가장 많이 사용되는 것이  $L_1, L_2$  놈(norm)인데 이 지표들은 두 영상의 전체적인 차이를 측정한다.  $L_1$ 은 평균절대값오차(Mean Absolute Error)  $M_1$ 이고  $L_2$ 는 제곱평균제곱근오차(Root Mean Square Error)  $M_2$ 인데 이러한 평가지표는 영상의 품질을 사람이 느끼는 것보다 더 과장된 값을 갖는 문제점이 있으나, 이 논문에서는 이들 지표를 그대로 사용한다. 평균절대값오차 MAE는 이차원영상에서  $L_1$  놈을 바탕으로 한 전역차이지표로 식 (20)과 같다[9].

$$M_1 = \sum_{i,j} |A(i,j) - B(i,j)| / N^2 \quad (20)$$

여기서  $A, B$ 는 각각 비교되는 두 영상의 픽셀 값이다. 이차원영상에서  $L_2$  놈을 바탕으로 한 전역차이지표 제곱평균제곱근오차 RMSE는 식 (21)과 같다. 이것을 편이상  $M_2$ 라고 한다[9].

$$M_2 = \sqrt{\sum_{i,j} [A(i,j) - B(i,j)]^2 / N^2} \quad (21)$$

##### 4.2 영상간차이집중도 $M_3$

평가지표  $M_3$ 는 두 영상의 차이가 특별한 영역에 얼마만큼 집중되었는가 하는 정도를 평가한다. 이것은 통

계학에서 두 쌍의 측정값들 사이의 상관관계(correlation)와 유사한 척도인데 여기에서는 이 지표를 한정된 영역에서 영상의 상관관계를 결정하기 위하여 사용된다. 데이터 분석에서  $M_1$ 에서와 같이 차이가 발생하는 크기를 고려하여 전역차이 지표와 이 지표와의 관련성을 비교하는 것은 의미가 있다. 이 영상평가지표는 0~1의 크기를 갖고 영상의 차이가 존재하는 부분이 커지면 값이 커진다. 이 지표는 지역적으로 계산되며 전체적인 지표를 형성하기 위하여 지역적으로 계산된 것을 합한다. 식은 다음과 같은 단계로 구한다.

① 모든 샘플링 포인트에 대하여 식 (22)를 이용하여 픽셀 값의 차이를 계산한다.

$$d(i, j) = A(i, j) - B(i, j) \quad (22)$$

② 식 (24)를 이용하여 식 (23)을 구한다.

$$m_2(m, n) = \sum_k |r(m, n, k, l)|^r \quad (23)$$

여기서  $r$ 는 에러의 존재를 강조하면서 에러의 크기를 줄이는 계수이다. 이 논문에서는  $r$ 의 값을 0.25로 하였다.

$$\textcircled{3} \quad r(m, n, k, l) = \frac{[A_l - B_l]}{\theta} \quad (24)$$

$$\text{단: } A_l = \sum_j d(i, j) d(i+k, j+l)$$

$$B_l = \frac{\sum_j d(i, j) \sum_j d(i+k, j+l)}{\theta - 1}$$

일정한 크기를 갖는 픽셀 영역에서 합을 계산하기 위해서 윈도우의 범위를 정한다.  $(i, j)$ 와  $(i+k, j+l)$ 은 함께  $(m, n)$ 에 중심을 갖는 크기  $\theta \times \theta$  윈도우 안에 속한다. 범위  $[1..k]$ 와  $[1..l]$ 에서 상관계수를 계산하고 그들을 모두 더한다. 몇 단계 떨어져있는 특징점들에 대해서는 지역적으로 떨어져 있는 특징점보다 더 많은 하중을 줄 수 있다. 범위  $[-k..-l]$ 와  $[-l..-k]$ 는 고려 대상에서 제외한다. 왜냐하면 이것은 지금까지 포함되지 않은 새로운 거리를 유도하지 않기 때문이다.

④ 평가지표  $M_3$ 는 식 (25)와 같이 계산된다.

$$M_3 = \frac{1}{N} \sum_{m,n} \frac{m_2(m, n)}{\max(m_2(m, n))} \quad (25)$$

여기서  $N$ 은 픽셀 전체의 개수이다. 이 평가지표는 상관관계를 강조하면서 오차의 크기를 줄이기 위하여 정규화 한다[17].

#### 4.3 고주파 영역에서의 차이 $M_4$

$M_4$ 는 고주파 영역(변화가 몹시 심한 영역)에서 오차를 측정하는 지표이다.  $M_4$ 는 불연속적인 해를 포함하는 영상들 사이에서 차이를 측정하는 지표로서도 사용된다. 이 평가 척도는 기준 영상(여기서는 A)으로부터 수평 방향으로 활성 마스크를 식 26과 같이 만들어 계산한다.

$$V_k(i, j) = \frac{|A(i-k, j) - A(i+k, j)|}{\max[A(i, j)]} \quad (26)$$

여기서  $k_h$ 는 활성 윈도우의 범위이고 같은 모양의 식이 수직 방향에 대해서도 계산 된다( $k_v$ ). 그러나  $k_h$ 와  $k_v$ 가 같을 필요는 없다. 지역평가지표  $m_4$ 는 식 (27)과 같이 정의된다.

$$m_4(i, j) = |d(i, j)| [T_k(V_k(i, j)) + T_v(V_v(i, j))] \quad (27)$$

여기서  $T_k()$ 는 활성 마스크의 임계값을 처리하는 함수이다. 즉 활성 레벨이 임계값보다 큰 위치에서만 0이 아닌 값을 갖는다. 이 임계값의 선택은 연구자가 평가지표에서 얻으려고 하는 정보의 종류에 따라 달라진다. 연구자가  $T_k()$ 와  $T_v()$ 를 다르게 선택하여 관심 있는 방향으로 바이어스 시킬 수 있다. 활성 마스크에 따라 이 평가지표는 비대칭  $M(A, B) \neq M(B, A)$ 로 된다[17].

### 5. 실험 및 결과

서론에서 언급한 것처럼 본 연구의 목적은 네트워크를 통하여 연결된 서버 클라이언트 환경에서 볼륨데이터를 웨이블릿을 이용하여 압축 변환하여 전송하고 가시화하는데 효과적인 웨이블릿 기저와 압축률을 찾는 것이다. 이를 위해서 실험 목적을 다음과 같이 정했다.

① 볼륨데이터를 압축, 복원, 가시화 하는데 있어서 웨이블릿 기저의 종류에 따라서 성능 차이가 있는가? 성능 차이가 있다면 Harr, Daubechies4, 12, 20 웨이블릿 중에서 가장 효과적인 것은 어느 것인가?

② 육안 및 영상평가지표로 판정할 경우에 압축하여 가시화한 3차원 영상의 압축률을, 정확도와 데이터 전송의 측면에서 얼마로 하여야 하는가?

③ 영상을 육안으로 평가하는 것보다 영상평가지표로 평가하는 것이 더 타당한가?

볼륨렌더러, 웨이블릿 변환, 영상평가지표 프로그램은 윈도 2000 OS를 장착한 범용 PC플랫폼에서 Visual C++로 2, 3, 4 장의 이론을 바탕으로 구현하였다. 사용 PC 플랫폼은 800 MHz PENTIUM 3의 CPU와 512MB의 메모리를 가지고 있다. 볼륨 렌더러의 많은 부분은 레이캐스팅을 기반으로 하는 Levoy의 Volume Rendering을 이용하여 구현하였다[16]. 투영 방법은 직각평행투영법(Orthographic Parallel Projection)을 사용하였으며 볼륨데이터는 셀 모델을 사용하고 물질의 분류는 단순화된 Levoy의 영역경계면(region boundary surface)법을 이용하였다. 경사(Gradient) 계산은 중앙차분법(Central Difference Gradient)를 사용하고 음영법(Shading)은 단순화된 풍모델을 사용하여 외광과 확산 반사만을 고려하였다.

웨이블릿 기저는 Harr, Daubechies4, 12, 20를 사용

하였다. 이러한 알고리즘을 이용하여 데이터를 웨이블릿 변환한 다음에 계수를 구하고 압축률에 맞추어 이 계수 중에서 0에 근접하는 것을 0으로 하고 역변환하여 가시화하였다. 구체적인 처리 절차는 다음과 같다.

- ① Harr, Daubechies 등의 여러가지 정규화된 3차원 웨이블릿 기저에 볼륨데이터를 투상하여 계수  $c_{1, \dots, c_m}$  을 구한다.
- ② 계수를 내림차순 즉  $C_{\pi(1)}, \dots, C_{\pi(m)}$  순으로 정렬한다.
- ③ 값이 큰 순으로 지정된 %의 계수만을 남기고 나머지 계수의 값을 0으로 한다.
- ④ ③에서 구한 계수만으로 웨이블릿 역변환하여 볼륨데이터를 구한다.
- ⑤ ④에서 구한 볼륨데이터를 볼륨렌더러를 이용하여 가시화한다.

벤치마크데이터는 공공 도메인(public domain)에 있는 Engine, CThead, Bentum으로 하였다. 볼륨데이터의 사양은 표 1과 같다.

그림 4는 벤치마크 볼륨데이터 Engine, Bentum을 Harr, Daubechies4, 12, 20 웨이블릿으로 압축하고 복원하여 볼륨렌더러로 가시화한 결과 그림을 보인다. 실험의 압축률은 영상간 차이를 크게 하기위하여 전체데이터의 50%, 10%, 5%, 1%, 0.1%, 0.03%로 하였다. CThead의 가시화 영상은 Engine의 가시화 영상과 유사한 모양을 보여 그림 4(c) 하나만 표시하고 나머지는 생략하였다. Engine의 3차원 가시화 영상을 분석하면 다음과 같다.

- Harr웨이블릿과 Daubechies 웨이블릿 변환의 잡음 모양이 다르다. Harr웨이블릿은 압축률이 낮을 때(압축률 50-5%)에는 좁쌀 모양의 잡음이, 높을 때(압축률 0.1-0.03%)에는 창살 모양의 잡음이, 압축률이 중간(1%)에서는 좁쌀 모양과 창살 모양의 잡음이 동시에 나타났다. Daubechies 웨이블릿은 계수의 값이 작을 때(Daubechies4)에는 나뭇결 모양의 무늬가, 클 때(Daubechies20)에는 물결 모양의 무늬가 나타났는데 이러한 현상은 압축률이 증가함에 따라 커져 특히 압축률이 0.03%일 경우에는 웨이블릿의 계수에 관계없이 유리가 고온에서 녹아 굳은 모습을 하고 있다.

Daubechies4는 Daubechies12 웨이블릿 변환과 Harr웨이블릿 변환의 양 성질을 모두 보인다. 특히 압축률 0.1-0.03%에서 좁쌀 모양, 창살 모양, 나뭇결 모양의 무늬를 모두 보인다. 이것은 Harr웨이블릿이 비연속적인데 비하여 Daubechies는 연속적이고 유연(smooth)하게 대상합수를 표현할 수 있기 때문이라 생각된다. 구조의 변화는 Harr웨이블릿, Daubechies 4, 12, 20 모두 압축률이 0.1% 경우에 발생하였다. 압축률 1%까지는 구조의 변화가 그렇게 많지 않았으나 압축률 0.1%에서는 많은 변화가 있었다.

볼륨데이터 Bentum의 3차원 가시화 영상을 분석하면 다음과 같다.

- Bentum의 가시화 결과는 Engine의 가시화 결과와 다른 성질을 보인다. 압축률이 낮은 곳(100-5%)에서는 Harr웨이블릿과 Daubechies4, 12, 20 사이에 거의 차이가 없었으나 압축률이 높은 곳(1-0.03%)에서 영상의 모양에 차이가 발생하였다. Harr웨이블릿에서는 창살 모양의 잡음이 발생하였고 Daubechies 웨이블릿은 유리가 고온에서 녹아 흘러내린 모양의 잡음이 발생하였는데 계수가 4, 12, 20으로 증가함에 따라 그 경향이 더욱 증가하였다. Daubechies4 웨이블릿은 Harr웨이블릿과 Daubechies12와의 중간 모습을 하고 있다. 압축률이 낮은 곳에서 잡음의 모양에 차이가 없는 것은 MRI 데이터의 경우 CT 데이터와는 다르게 볼륨렌더러 만으로는 조직분류가 바르게 되지 않아 이것이 렌더링에 영향을 미쳤기 때문이라 생각된다. 압축률이 높은 곳에서 잡음의 모양에 차이가 발생하는 것은 Engine의 경우와 동일하게 Harr웨이블릿이 비연속적인데 비하여 Daubechies는 연속적이고 유연(smooth)하게 대상합수를 표현할 수 있기 때문이라 생각된다. 구조의 변화는 Harr웨이블릿, Daubechies4, 12, 20 전부 압축률이 0.1% 경우에 발생하였다. 압축률 1%까지는 구조의 변화가 그렇게 많지 않았으나 압축률이 0.1%에서 심한 구조적 변화가 발생하기 시작하였다.

표 2~5는 Engine, CThead, Bentum 볼륨데이터를 볼륨렌더링으로 3차원 가시화한 영상을 영상평가지표

표 1 볼륨데이터

종류	복셀당비트수 (bits/voxel)	데이터의 크기 (width × height × images)	영상획득방법	제조사
Engine	8	256 × 256 × 110	CT	
CThead	8	256 × 256 × 113	CT	North Carolina Memorial Hospital
Bentum	8	256 × 256 × 256	MRI	Mark Bentum

M1, M2, M3, M4를 사용하여 평가한 결과를 보인다. M1, M2는 각각 평균절대값오차, 제곱평균제곱근오차로 절대평가지표이다. M3는 두 영상의 차이가 어떤 영역에 얼마나 집중되었는가? 하는 정도를 가늠하는 지표이다. 영상의 차이가 특별한 영역에 집중되어 있으면 볼륨데이터에 구조적인 차이가 발생할 가능성이 커진다. M4는 주파수가 높은 영역의 오차를 측정하는 지표로 이 값이 클수록 물체의 작은 구성요소에서 오차가 크게 발생한다. 영상평가지표로 분석한 결과는 다음과 같다.

- Engine, CThead, Bentum 각각의 영상에 대하여 평균절대값오차 M1의 값은 0-40의 범위에 걸쳐있고 압축률이 증가할수록 커진다. M1의 값이 제일 작은 것도 Harr 웨이블릿(Engine Harr50%, 10%)이고 제일 큰 것도 Harr 웨이블릿(CThead Harr0.03%)이다. 일반적으로 압축률이 낮은 범위에서는 Harr 웨이블릿이 Daubechies 웨이블릿 보다 M1 평가지표의 값이 작았다. 따라서 압축률이 낮은 범위(50-1%)에서는 Harr 웨이블릿이 Daubechies 웨이블릿보다 성능이 우수하다고 할 수 있다. 그러나 압축률이 높은 범위(0.1-0.03%)에서는 Harr 웨이블릿의 성능이 Daubechies 웨이블릿 보다 성능이 떨어졌다. M1 지표의 값이 갑자기 증가하는 곳은 Engine, CThead의 경우에 있어서 웨이블릿의 종류에 관계없이 압축률이 1%에서 0.1%로 증가할 때이고, Bentum(Harr웨이블릿)의 경우는 1%에서 0.1%로 증가할 때이고 Bentum(Daubechies 웨이블릿) 경우는 계수에 관계없이 5%에서 1%로 증가할 때이다.
- 제곱평균제곱근오차 M2의 값은 Engine, CTdata, Bentum 각 영상에 대하여 0-67.4 까지 값을 갖고 압축률이 증가할수록 커진다. M2만을 고려하면 압축률이 낮은 범위(100-5%)에서는 Harr웨이블릿이 Bentum(Daubechies4,12(10%), 12(5%))를 제외하고는

Daubechies 웨이블릿 보다 성능이 좋았다. M2의 값은 압축률이 증가함에 따라 대체로 증가하는 경향을 보이나 Engine과 CThead에 있어서는 압축률이 1%에서 0.1%로 증가할 때 Bentum에 있어서는 5%에서 1%로 증가할 때 M2의 값이 갑자기 증가한다.

- 영상간차이의 영역집중도 M3의 값은 Engine, CTdata, Bentum 각 영상에 대하여 0.27- 0.61까지의 값을 갖는다. M3의 값은 압축률 및 웨이블릿의 종류에 따른 차이는 없으나 영상의 종류에 따라 약간의 차이를 보인다. Engine, CThead, Bentum의 M3의 값은 각각 0.27-0.40, 0.45-0.59, 0.43-0.61이다. M3의 최대값은 수 개(Engine(daubechi4, 12), Bentum(Harr))를 제외하고 10%/5%, 5%/1%에 집중되어 있다. 영상간차이의 영역집중도만을 고려하면 전체 데이터의 10%로 압축하는 것이 최적이라 할 수 있다.
- 고주파영역에서의 차이 M4의 값은 Engine, CTdata, Bentum 각 영상에 대하여 0.01-1.0까지의 값으로 편차가 매우 크다. 전반적으로 압축률에 따라 값이 증가하는 경향이 있으나 Engine과 CThead와 같이 CT로 획득한 영상에서는 Bentum 영상에서와 같이 극단적인 경향은 보이지 않는다. Engine(Harr 웨이블릿)의 경우는 M4의 최소치가 100%/50%에 존재하고 최대치는 1%/0.1%에 존재한다. 그리고 Engine(Daubechies 20)의 경우는 최소치가 10%/5%, 최대치가 1%/0.1%에 존재한다. 전반적으로 고주파 영역에서 오차의 차이가 압축률이 작은 곳에서는 그다지 없었으나 압축률이 높은 곳에서는 심한 오차를 보이고 있다. M4 값만 보아서는 모든 데이터의 5%가 압축률의 최적점이라고 할 수 있다. 위의 분석을 종합하면 다음과 같다.
- 웨이블릿의 종류에 따라서 성능의 차이가 있었으나 압축률하고 관계가 있다. M1, M2로 판정하면 압축률

표 2 평균절대값오차 M1

Bench Mark Data	Wavelet 종류	50 %	10 %	5 %	1 %	0.1%	0.03%
Engine	Harr	0	0	1.0	3.0	8.0	11.0
	Daubechies 4	2.0	2.0	3.0	3.0	7.0	11.0
	Daubechies 12	2.0	2.0	3.0	4.0	7.0	11.0
	Daubechies 20	2.0	2.0	3.0	3.0	8.0	12.0
CThead	Har	1.0	3.0	7.0	18.0	32.0	40.0
	Daubechies 4	11.0	11.0	12.0	18.0	27.0	37.0
	Daubechies 12	13.0	14.0	16.0	19.0	28.0	35.0
	Daubechies 20	13.0	14.0	16.0	19.0	29.0	38.0
Bentum	Har	0	1.0	5.0	9.0	23.0	31.0
	Daubechies 4	1.0	3.0	9.0	15.0	19.0	29.0
	Daubechies 12	1.0	3.0	7.0	14.0	18.0	28.0
	Daubechies 20	1.0	6.0	9.0	16.0	21.0	30.0

표 3 제곱평균제곱근오차 M2

Bench Mark Data	Wavelet 종류	50 %	10 %	5 %	1 %	0.1%	0.03%
Engine	Harr	0	2.2	4.1	9.2	24.3	33.5
	Daubechies 4	7.1	7.2	7.3	9.0	21.4	30.9
	Daubechies 12	6.9	7.0	7.2	9.8	21.0	30.7
	Daubechies 20	7.5	7.5	7.6	9.9	28.5	32.3
CThead	Harr	2.6	7.4	14.7	36.9	55.5	64.4
	Daubechies 4	24.9	25.0	26.8	36.0	51.2	64.0
	Daubechies 12	28.7	30.0	32.0	38.8	52.8	63.4
	Daubechies 20	27.6	29.4	32.3	38.9	53.7	67.4
Bentum	Harr	3.7	11.7	19.7	35.9	43.7	54.7
	Daubechies 4	3.7	8.3	19.8	31.6	38.7	54.5
	Daubechies 12	3.7	8.3	14.5	28.3	36.7	53.6
	Daubechies 20	4.8	13.0	19.6	34.7	42.3	58.2

표 4 영상간차이의 영역집중도 M3

Bench Mark Data	Wavelet 종류	100%/50%	50%/10%	10%/5%	5%/1%	1%/0.1%	0.1%/0.03%
Engine	Harr	0.27	0.38	0.40	0.41	0.32	0.32
	Daubechies 4	0.39	0.27	0.36	0.34	0.35	0.34
	Daubechies 12	0.38	0.30	0.31	0.37	0.37	0.34
	Daubechies 20	0.37	0.38	0.37	0.40	0.30	0.35
CThead	Harr	0.47	0.57	0.58	0.57	0.54	0.48
	Daubechies 4	0.50	0.57	0.57	0.59	0.54	0.45
	Daubechies 12	0.50	0.51	0.54	0.52	0.48	0.50
	Daubechies 20	0.51	0.57	0.58	0.54	0.49	0.45
Bentum	Harr	0.43	0.61	0.57	0.57	0.56	0.56
	Daubechies 4	0.45	0.54	0.57	0.54	0.53	0.53
	Daubechies 12	0.48	0.53	0.55	0.59	0.50	0.55
	Daubechies 20	0.44	0.56	0.59	0.55	0.53	0.47

표 5 고주파영역에서의 차이 M4

Bench Mark Data	Wavelet 종류	100%/50%	50%/10%	10%/5%	5%/1%	1%/0.1%	0.1%/0.03%
Engine	Harr	0.01	0.05	0.11	0.38	1	0.99
	Daubechies 4	0.18	0.037	0.065	0.24	0.96	1
	Daubechies 12	0.1	0.039	0.063	0.24	0.98	1
	Daubechies 20	0.27	0.10	0.068	0.257	1	0.80
CThead	Harr	0.03	0.09	0.16	0.56	1	0.88
	Daubechies 4	0.26	0.07	0.11	0.34	0.67	1.0
	Daubechies 12	0.26	0.08	0.12	0.31	0.70	1.0
	Daubechies 20	0.24	0.08	0.12	0.34	0.71	1.0
Bentum	Harr	0.06	0.20	0.76	0.69	0.68	1.0
	Daubechies 4	0.05	0.17	0.22	0.46	0.52	1.0
	Daubechies 12	0.05	0.11	0.17	0.39	0.49	1.0
	Daubechies 20	0.05	0.14	0.17	0.17	0.50	1.0

이 50-5%에서는 Harr 웨이블릿이 우수하고 0.1-0.03%에서는 Daubechies 4, 12가 우수하다.

- 생성된 영상을 이용하여 육안으로 판정할 경우에는 모든 불림데이터에 대하여 전체 데이터의 0.1%에서 구조가 변하기 때문에 1%가 최적이라고 할 수 있다.

평가지표로 판정을 하면 M1, M2의 경우도 Bentum (Daubechies4-12)을 제외하고 1%가 최적이라 할 수 있다. M3의 경우는 10%가 최적이라고 할 수 있고 M4의 경우는 5%가 최적이라 할 수 있다. 따라서 단지 두 영상간의 절대적인 차이만을 고려하면 1%까지

압축을 할 수 있고 여기에 고주파 영역에서의 차이까지를 고려하면 5%정도 또 영역간차이의 영역집중도까지 고려하면 10% 정도 압축할 수 있다.

- 영상평가지표로 판정하는 것이 육안으로 판정하는 것보다 더욱 민감하다. 두 영상간의 절대차이지표 M1, M2는 육안으로 판별하는 것과 유사하나 영상간차이의 영역집중도, 고주파영역에서의 차이 등 육안으로는 어려운 것을 판정할 수 있다.

## 6. 결론

이 논문에서는 웹 기반의 볼륨렌더링 클라이언트 서버 시스템을 구축하는데 필요한 기초 자료를 얻기 위하여 연구하였다. 서버 컴퓨터에서 볼륨데이터를 웨이블릿 알고리즘을 이용하여 압축하여 클라이언트 컴퓨터로 전송한 후 해독하여 디렉트볼륨렌더링하는 계산 패러다임에 맞추어 Harr, Daubechies4, 12, 20 웨이블릿 기저에 대하여 전체 데이터의 50%, 10%, 5%, 1%, 0.1%, 0.03%로 압축한 후 다시 복원하여 디렉트볼륨렌더링을 이용하여 가시화하여 육안 및 영상평가지표를 이용하여 평가하였다. 영상평가지표는 평균절대값오차, 제곱평균제곱근오차 이외에 영역간차이의 영역집중도, 고주파영역에서의 차이 등 구조적 공간 평가지표를 함께 사용하였다. 실험으로부터 다음과 같은 사항을 알 수 있었다.

웨이블릿의 종류에 따라서 성능의 차이가 있었으나 압축률하고 관계가 있었다. 평균절대값오차, 제곱평균제곱근오차만을 고려하면 압축률이 50-5%에서는 Harr웨이블릿이 0.1-0.03%에서는 Daubechies4, 12가 우수한 성능을 보였다. 육안으로 판정할 경우에 최적 압축률은 구조가 0.1%에서 갑자기 변하기 시작하여 약 1%가 최적이라고 할 수 있다. 영상평가지표 평균절대값오차, 제곱평균제곱근으로 판정 한 경우에도 Bentum(Daubechies4-12)을 제외하고 1%가 최적이라 할 수 있다. 영상간차이의 영역집중도를 고려하면 10%가 최적이라고 할 수 있고 고주파영역에서의 차이를 고려하면 5%가 최적이라 할 수 있다. 즉 단지 두 영상간의 절대적인 차이만을 고려하면 1%까지 압축을 할 수 있고 여기에 고주파 영역에서의 차이까지를 고려하면 5%정도 또 영역간의 차이집중도까지 고려하면 10%정도 압축할 수 있다.

이 연구를 하면서 느낀 것은 웨이블릿 변환은 적은 양의 데이터만으로도 구조를 왜곡시키지 않고 볼륨데이터를 3차원 가시화할 수 있다는 점이다. 웨이블릿 알고리즘은 웹 기반의 볼륨렌더링 시스템에서도 이용 가능성이 있다고 기대된다. 앞으로 보다 많은 웨이블릿 기저에 대하여 충분한 실험을 거친 후에 이러한 데이터를 이용하여 실용 가능한 서버 클라이언트 볼륨렌더링 시

스템을 구축할 예정이다.

## 참고 문헌

- [1] X. Yang and L. Yang, "A Progressive Wavelet Volume Rendering System," <http://www.cs.uregina.ca/~young/impsiht.htm>.
- [2] E. Klus, S. Ove, E. Christian and E. Thomas, "Remote 3D Visualization using Image-Streaming Techniques," Proceedings of the International Symposium on Intelligent Multimedia and Distance Education, 1999.
- [3] S. G. Mallat, "A Theory for Multiresolution Signal Decomposition: The Wavelet Representation," IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol. 11. No.7, Jul. 1989, pp. 674-693.
- [4] S. Muraki, "Volume Data and Wavelet Transforms," IEEE Computer Graphics & Applications, Vol 13. No.4, Jul. 1993, pp. 50-56.
- [5] L. Linsen, J. T. Gray, V. Pascucci, M. A. Duchaineau, B. Hamann, and K. I. Joy, "Hierarchical Large-scale Volume Representation with  $\sqrt[3]{2}$  Subdivision and Trivariate B-Spline Wavelets," Technical Report Number CSE-2002-7, Department of Computer Science, University of California, Davis, 2002.
- [6] R. Westermann, "A Multiresolution Framework for Volume Rendering," ACM Workshop on Volume Visualization, pp 51-57, 1994.
- [7] H. G. Pagendarm and F. H. Posts, "Comparative Visualization Approaches and Examples," Fifth Eurographics Workshops on Visualization in Scientific Computing, Rostock, Germany, May 30 June, 1994.
- [8] H. Rushmeier, G. Ward, C. Piatko, P. Sanders, and B. Rust, "Comparing Real and Synthetic Images: Some Ideas About Metrics," Proceedings of sixth Eurographics Workshop on Rendering, Dublin, Ireland, 1995, pp. 82-91.
- [9] K. Kim, C. M. Wittenbrink, and A. Pang, "Extended Specifications and Test Data Sets for Data Level Comparisons of Direct Volume Rendering Algorithms," IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, Vol. 7, No. 4, Oct-Dec 2001, pp. 299-317.
- [10] C. M. Wittenbrink, A. T. Pang, S. K. Lodha, "Glyphs for Visualizing Uncertainty in Vector Fields," IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, Vol. 2, No.3, Sep 1996.
- [11] A. S. Glassner, Principles of Digital Image Synthesis, Morgan Kaufman Publishers, Inc. 1995.
- [12] W. H. Press, S. A. Teukolsky, W. T. Vetterling and B. P. Flannery, Numerical Recipes in C, Cambridge University Press, 1992.
- [13] E. J. Stollnitz, T. D. DeRose and D. H. Salesin, Wavelets for Computer Graphics, Morgan Kau-

- fmann Publishers, Inc. 1996.
- [14] P. Sabella, "A Rendering Algorithm for Visualizing 3D Scalar Fields," ACM SIGGRAPH Computer Graphics, Vol. 22, No. 4, Aug 1988, pp. 160-165.
- [15] B. Lichtenbelt, R. Crane and S. Naqvi, Introduction to Volume Rendering, Prentice Hall PTR, 1998.
- [16] M. S. Levoy, "Display of Surfaces from Volume Data," IEEE Computer Graphics and Applications, Vol. 5, No. 3, May 1988. pp. 29-37.
- [17] N. Sahasrabudhe, J. E. West, R. Machiraju, M. Janus, "Structured Spatial Domain Image and Data Comparison Metrics," Proc. Visualization'99. pp. 97-104, 1999.



최 임 석

1987년 전북대학교 전산통계학과 졸업(학사). 2000년 전북대학교 전산통계학과 졸업(이학석사). 2003년 전북대학교 박사과정 재학중. 1989년~현재 고창북고등학교 교사 재직중. 관심분야는 컴퓨터 그래픽스(볼륨렌더링)



권 오 봉

1980년 고려대학교 전기공학과 졸업(학사). 1983년 고려대학교 전기공학과(공학석사). 1993년 일본구주대학교 총합이공학연구과(공학박사). 1992년~1993년 일본구주대학교 정보공학과 조수. 1994년~1995년 전북대학교 컴퓨터과학과 전임강사. 1996년~1999년 전북대학교 조교수. 2000년~현재 전북대학교 부교수. 관심분야는 컴퓨터 그래픽스, 사이언티픽 비주얼라이제이션



송 주 환

1995년 전주대학교 전자계산학과 졸업(학사). 1997년 전북대학교 전산통계학과(이학석사). 2003년 전북대학교 전산통계학과(이학박사). 2001년~현재 전주대학교 교양학부 강의전담전임강사. 관심분야는 컴퓨터그래픽스, 사이언티픽 비주얼라이제이션, 멀티미디어