



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

공학박사학위논문

Feature-preserving Reduction and
Visualization of Industrial CT data
using GLCM texture analysis
and Mass-spring Model Deformation

GLCM 텍스처 분석과 질량-스프링 모델 변형을
이용한 산업 CT 데이터의 특징 보존적 압축 및
가시화 기법

2014년 8월

서울대학교 대학원

전기컴퓨터공학부

강 성 태

Feature-preserving Reduction and Visualization of
Industrial CT data using GLCM texture analysis and
Mass-spring Model Deformation

GLCM 텍스처 분석과 질량-스프링 모델 변형을 이용한
산업 CT 데이터의
특징 보존적 압축 및 가시화 기법

지도교수 신 영 길

이 논문을 공학박사 학위논문으로 제출함

2014 년 5 월

서울대학교 대학원

전기컴퓨터공학부

강 성 태

강성태의 공학박사 학위논문을 인준함

2014 년 6 월

| | | |
|-------|------------|-----|
| 위 원 장 | <u>김명수</u> | (인) |
| 부위원장 | <u>신영길</u> | (인) |
| 위 원 | <u>서진욱</u> | (인) |
| 위 원 | <u>김보형</u> | (인) |
| 위 원 | <u>이정진</u> | (인) |

초록

본 논문에서는 3D 볼륨 데이터에서 중요한 영역을 보존하면서 크기를 줄이는 방법을 제안한다. 볼륨 데이터에서 어느 부분이 중요한 영역인지를 결정하기 위해 질감 분석 방법 중 하나인 GLCM 균일도를 이용한 중요도 측정 모델을 제안하고, 이를 기반으로 한 MSM 기반의 볼륨 변형을 수행한다. 중요도가 반영된 볼륨 변형 과정을 통해, 중요한 영역은 상대적으로 크기가 확장되는 반면, 덜 중요한 영역은 줄어들게 된다. 이로 인해, 일반적으로 손실률이 높은 균일 다운샘플링을 이용한 압축 후에도 작은 크기의 중요한 특징점들이 손실되지 않고 보존될 수 있다. 실측 산업 영상 데이터를 이용한 실험을 통해, 그냥 균일 다운샘플링을 이용한 압축 결과에서는 사라진 작은 기공이나 수축 균열 형태의 결함 영역이 제안 방법에서는 보존되는 것을 확인할 수 있었다. 이 변형 볼륨을 원래 형태로 가시화하기 위해선 역변형 과정을 추가로 수행해야 하지만, 이 계산은 가시화 과정에 간단하게 추가할 수 있으며, 결과를 얻기 위한 소요시간에 유의미한 영향을 미치지 않는다.

주요어 : 컴퓨터 단층촬영, 볼륨 데이터 압축, 명암도 동시발생 행렬, 중요도 측정, 질량-스프링 모델

학번 : 2005-21318

목차

| | |
|------------------------|-----|
| 초록 | i |
| 목차 | iii |
| 그림 목차 | vi |
| 표 목차 | x |
| 1장 서론 | 1 |
| 1.1 볼륨 렌더링 | 1 |
| 1.2 비파괴검사 | 2 |
| 1.3 연구 내용 | 4 |
| 1.4 논문의 구성 | 6 |
| 2장 관련 연구 | 7 |
| 2.1 볼륨 렌더링 알고리즘 | 7 |
| 2.1.1 볼륨 데이터의 특성 | 7 |

| | | |
|-----------|------------------------------|-----------|
| 2.1.2 | 표면 추출 기법..... | 8 |
| 2.1.3 | 직접 볼륨 렌더링..... | 10 |
| 2.2 | 압축 볼륨 렌더링..... | 17 |
| 2.2.1 | 벡터 양자화..... | 18 |
| 2.2.2 | 변환 부호화..... | 19 |
| 2.2.3 | 다중-해상도 기반 기법..... | 23 |
| 2.2.4 | 볼륨 변형 기반 방법..... | 25 |
| 2.3 | 질량-스프링 기반 볼륨 변형 모델..... | 27 |
| 2.4 | 산업용 CT 영상의 중요 특징점 측량 방법..... | 30 |
| 3장 | 중요도 측정 기법..... | 32 |
| 3.1 | 명암도 동시발생 행렬..... | 32 |
| 3.2 | GLCM 균일도 기반 중요도 모델..... | 36 |
| 3.3 | 공기 영역 제거..... | 44 |

| | |
|--------------------------------|------------|
| 4장 볼륨 변형, 축소 및 가시화..... | 4 7 |
| 4.1 질량-스프링 모델 기반 볼륨 변형..... | 4 7 |
| 4.2 볼륨 축소..... | 5 4 |
| 4.3 역변형 및 렌더링..... | 5 5 |
| 5장 실험 및 결과..... | 5 8 |
| 5.1 화질 평가..... | 6 0 |
| 5.2 속도 평가..... | 6 5 |
| 5.3 파라미터 연구..... | 6 9 |
| 6장 결론..... | 7 4 |
| 6.1 요약..... | 7 4 |
| 6.2 향후 연구..... | 7 5 |
| 참고문헌..... | 7 7 |
| Abstract..... | 8 3 |

그림 목차

| | |
|--|-----|
| 그림 1.1 제안 방법의 흐름 개략도..... | 5 |
| 그림 2.1 마칭 큐브 알고리즘의 15가지 기본 다각형 구조..... | 1 0 |
| 그림 2.2 직접 볼륨 렌더링의 기본 모델. 시점과 결과 영상 투영면 상의 한 픽셀을 잇는 직선이 볼륨 광선의 방향이 되며, 이 광선이 볼륨 데이터를 관통하면서 만나는 복셀들의 광학적 특성 값의 총합이 해당 픽셀의 결과값이 된다..... | 1 3 |
| 그림 2.3 직접 볼륨 렌더링 파이프라인. 볼륨에서 샘플링 된 밝기값은 일련의 과정을 거쳐 결과 영상에 투영된다..... | 1 4 |
| 그림 2.4 압축 볼륨 렌더링 파이프라인..... | 1 7 |
| 그림 2.5 벡터 양자화를 이용한 코드북 기반 압축 볼륨 렌더링 기법.. | 1 9 |
| 그림 2.6 푸리에 슬라이스 이론. 공간 영역에서 각도 θ 방향으로 투영한 영상 P 는 주파수 영역에서 원점을 지나는 각도 θ 방향의 단면과 동일하다..... | 2 1 |

| | |
|---|-----|
| 그림 2.7 웨이블릿 변환 기반 압축 볼륨 렌더링. (a) 블록 재배치 순서. (b) 재배치된 블록 상에서의 원본 값 복원. 원본 값의 볼륨 상 위치와 이 값의 복원에 필요한 각 서브 밴드 블록 내의 값의 위치가 동일하다..... | 2 3 |
| 그림 2.8 볼륨 변형 기반 압축 볼륨 렌더링 기법 | 2 6 |
| 그림 2.9 영역의 균일성을 이용한 가시화 가속. 광선 상의 샘플링 지점에서 주변 영역을 검사하여, 같은 밝기 값을 갖는 부분은 하나의 균일한 영역으로 간주, 추가적인 샘플링을 생략하고 바로 다음 영역으로 건너뛰는다..... | 3 1 |
| 그림 3.1 2차원 영상과 그에 따른 GLCM. (a) 원본 영상. (b) 방향 별 행렬을 합산한 최종 GLCM. (c)~(f)는 각각 우측, 좌측, 위, 아래 방향을 기준으로 계산된 GLCM을 나타낸다..... | 3 4 |
| 그림 3.2 산업 CT 스캔 영상의 밝기값 분포도 | 3 9 |
| 그림 3.3 영상 특징점과 GLCM 균일도 값의 연관 관계. 엔진 블록을 촬영한 영상 (a)로부터 16x16 단위로 GLCM 역-균일도를 계산한 결과가 (b)이다. 물체의 외곽선을 나타내는 부분과, 내부에 보이는 결합 부분에서 균일도가 낮음을 확인할 수 있다..... | 4 2 |

| | | |
|--------|---|-----|
| 그림 3.4 | 공기 영역 제거 기법 수행 후의 중요도 측정 결과 변화. (a)(d) 원 볼륨 데이터. (b)(e) 원 볼륨을 이용한 중요도 측정 결과. (c)(f) 공기 영역 제거 기법을 수행한 후 중요도 측정 결과. 컬러 코딩은 중요도가 높은 순에서 낮은 순으로 적색, 녹색, 청색 순으로 할당되었다..... | 4 6 |
| 그림 4.1 | 중요도에 따른 스프링의 정지 길이 예시. 스프링이 통과하는 영역의 중요도를 이용해 수식 (12)에 따라 정지 길이가 계산된다. 중요도가 높은 영역에 위치한 스프링은 (a)와 같이 정지 길이가 1보다 크고, 중요도가 낮은 영역의 스프링은 (b)와 같이 정지 길이가 1보다 작아진다..... | 4 9 |
| 그림 4.2 | 볼륨 변형을 위한 육면체 스프링 모델. (a) 격자 스프링 (b) 2차원 대각 방향 스프링 (c) 3차원 대각 방향 스프링 (d) 이중 변 스프링..... | 5 1 |
| 그림 4.3 | 변환 위치 테이블을 이용한 볼륨 역변환 샘플링 과정. 현재 광선의 위치에 해당하는 좌표를 변환 위치 테이블을 참조해 이동시키면, 변환된 볼륨 상에서의 좌표를 얻을 수 있다..... | 5 6 |
| 그림 5.1 | 작은 주조 결함이 있는 Gas governor의 렌더링 결과 영상. (a)(d) | |

| | |
|---|-----|
| 원 볼륨 데이터. (b)(e) 단순 다운샘플링 기법(R_{DS}). (c)(f) 제안 방법($R_{Proposed}$)..... | 6 1 |
| 그림 5.2 인위적인 기공이 타공된 금속 물체 데이터의 렌더링 결과 영상. (a) 원 볼륨 데이터. (b) 단순 다운샘플링(R_{DS}). (c) 제안 방법($R_{Proposed}$)..... | 6 2 |
| 그림 5.3 다중-해상도 기반 압축 기법과의 결과 영상 비교. (a) 원 볼륨 데이터. (b) 다중-해상도 기반 기법(R_{MR}). (c) 제안 방법($R_{Proposed}$)..... | 6 3 |
| 그림 5.4 GLCM 거리에 따른 GLCM 균일도 측정치의 비교. (a) 원영상 (b) $d = 1$. (c) $d = 2$. (d) $d = 3$ | 7 0 |
| 그림 5.5 가중치 w 의 변화에 따른 결과 영상 비교. (a) Bored metal. (b) Gas governor..... | 7 2 |

표 목차

| | |
|---|-----|
| 표 5.1 실험 데이터 명세 | 5 9 |
| 표 5.2 기법별 제공 평균 제공근 편차 (RMSD)..... | 6 4 |
| 표 5.3 데이터 별 중요도 측정 및 볼륨 변환 소요 시간 | 6 6 |
| 표 5.4 렌더링 소요 시간 (1024×1024 영상, 초당 프레임 수)..... | 6 8 |
| 표 5.5 GLCM 거리에 따른 RMSD 비교 | 7 1 |
| 표 5.6 가중치 w 에 따른 중요 블록의 평균 확장률 비교..... | 7 3 |

1장 서론

1.1 볼륨 렌더링

볼륨 데이터는 3차원 구조의 정보를 표현하는 데에 일반적으로 사용되는 방식이다. 특히 컴퓨터 단층 촬영(CT, Computed Tomography) 또는 자기 공명 영상 장치(MRI, Magnetic Resonance Imaging)의 출현으로 물체의 내부 구조를 3차원 정보 형태로 얻을 수 있게 된 이후, 볼륨 데이터 형식은 영상 처리 전 분야에서 광범위하게 도입되었다. 볼륨 렌더링은 일반적인 2차원 기반의 영상처리나, 표면 모델 기반의 전통적인 3차원 렌더링 기법과 비교했을 때 훨씬 큰 데이터를 다루며 연산량도 많기 때문에 시간이 많이 소요되는 문제점이 있었다. 그러나 최근에는 하드웨어의 발달로 비교적 빠른 속도로 가시화를 구현할 수 있게 되었으며, 특히 최근에는 그래픽스 처리 장치(GPU)의 고속 병렬 처리 특성을 이용해 실시간 렌더링도 가능해졌다.

1.2 비파괴검사

비파괴검사(NDT, Non-Destructive Testing)는 제조 산업 분야에서 제조물의 제품 상태를 변형시키지 않고 내부 구조나 결함을 확인하는 검사 방법이다. 재료를 파괴하지 않고 검사할 수 있기 때문에 고가의 부품이나 전수 검사를 행하는 경우에 유용하며, 자동차, 조선, 항공 등 제조업 전반 분야에서 폭넓게 이용되고 있다[1, 2]. 예를 들어 주물 제품에서 흔히 나타날 수 있는 수축 기공(shrinkage cavity)이나 균열(crack)을 검출하려 하는 경우, 내부 구조를 확인할 수 있는 비파괴검사 기법이 다른 방법에 비해 훨씬 유용하다.

공정상에서 이루어지는 실시간 전수검사에 비파괴검사를 이용하는 경우 전통적으로 2D X-선 영상을 사용해 왔다[3]. 3차원 컴퓨터 단층 촬영 기법은 2차원 영상에 비해 훨씬 정확한 검사가 가능하지만, CT 촬영 영상으로부터 3차원 정보를 재구성하는 데에 시간이 많이 소요되므로 실시간 검사에 적용하기 어려웠다. 그러나, 최근의 하드웨어의 발전으로 인해 CT 재구성 속도가 극적으로 향상되었고[4], 병렬 처리를 이용한 가속화 기법의

도입으로 실시간 공정에 도입 가능한 수준에 이르게 되었다[5, 6]. 전통적인 2차원 X-선 영상 기반 방법에 비해, CT 기반의 비파괴검사 기법은 물체의 3차원 공간 구조를 볼 수 있으므로 결함의 정확한 위치 관계 확인이 가능하고, 이를 공정 개선에 반영함으로써 불량률의 대폭적인 개선이 가능하다. 산업용 CT로 금속 등의 고밀도 재료로 이루어진 물체를 촬영하는 경우, X-선의 반사와 흡수, 회절로 인해 재구성된 3차원 영상에 큰 왜곡이 생기는데 이를 금속 아티팩트(metal artifact)라 한다. 이러한 왜곡의 영향을 줄이기 위해 산업용 CT는 매우 높은 에너지의 X-선 광원을 이용하는 경우가 많다. 인체에 대한 방사선 노출 선량 한계를 고려해야 하는 의료용 CT와 달리, 비파괴검사 대상인 제조물은 과다 노출 문제에서 비교적 자유로운 것도 고 에너지 CT가 널리 이용되는 원인이다. 이렇게 고 에너지 CT로 촬영을 하는 경우 일반적인 의료용 CT에 비해 훨씬 높은 해상도의 원본 영상을 얻게 되며, 재구성된 3차원 데이터도 매우 큰 용량이 된다. 앞 절에서 언급했듯이 현재 볼륨 렌더링 기법은 GPU를 이용해 가속하는 경우가 많은데, 일반적으로 산업용 CT 데이터는 GPU 메모리에 모두 적재할 수 없는 수준의 대용량인 경우가 많으므로, 이를 적절한 크기로 줄이는 과정이 필요하다.

1.3 연구 내용

본 논문에서는 데이터의 중요 영역을 보존하면서 데이터 크기를 줄이는 기법을 제안한다. 먼저 볼륨 데이터 전체 영역에 대해 중요도를 할당한다. 이 중요도를 정의하기 위해 기존 영상처리에서 폭넓게 이용되는 명암도 동시발생 행렬(GLCM, Grey-Level Co-occurrence Matrix) 기반의 텍스처 특징 분석 방법을 이용하였다. 볼륨데이터는 일정한 작은 크기의 블록으로 구분된 후, 각 블록에 대해 GLCM의 균일도(homogeneity) 특성을 계산해 이를 기반으로 중요도를 구한다. 이를 기반으로, 중요도가 높은 블록은 확장하고, 낮은 부분은 축소되도록 볼륨 변형을 수행한다. 변형된 볼륨 데이터에서 중요한 블록들은 보다 많은 공간을 점유하고 있으므로, 다운 샘플링을 이용해 볼륨 크기를 줄이더라도 변형되지 않은 원 볼륨에 비해 중요한 부분의 주요 특징점들이 더 잘 보존된다.

이 변형된 볼륨 데이터와 변형에 사용된 제어점 정보를 이용해 실시간으로 원 볼륨 복원과 가시화를 실시간으로 수행한다.

제안 방법의 전체적인 구성은 그림 1.1과 같다.

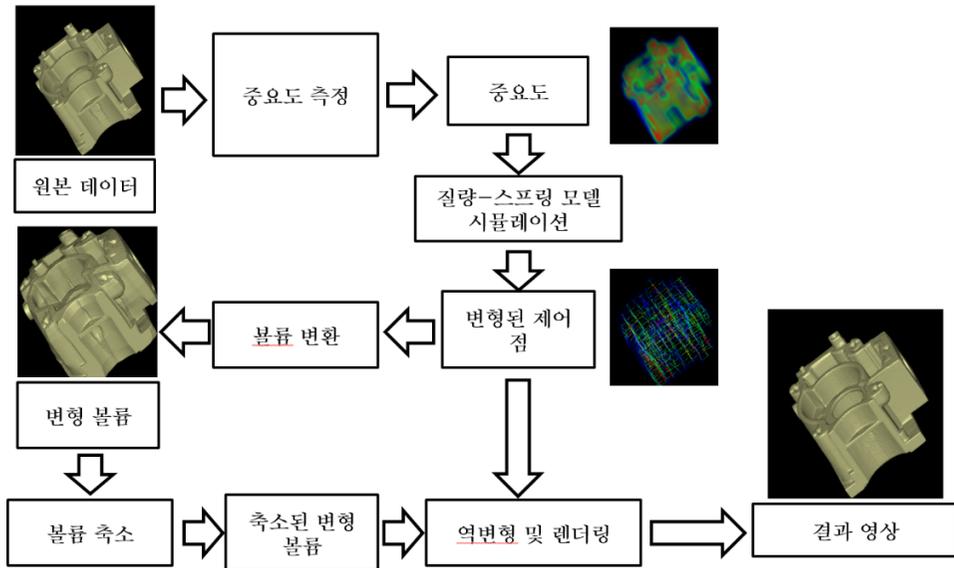


그림 1.1 제안 방법의 흐름 개략도

기존의 상세 수준(LOD, Level-Of-Detail) 데이터 압축 방식과 비교했을 때, 제안하는 방법은 블록 경계에서의 왜곡 현상에 대한 별도의 처리가 필요하지 않다. 또한 일단 변형된 블록으로 크기를 줄일 때에는 균일 다운샘플링(uniform down sampling) 방법을 사용하므로 압축 수준을 목표 용량에 맞도록 임의로 지정할 수 있다.

1.4 논문의 구성

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 볼륨 렌더링 알고리즘에 대해 간략히 설명하고, 볼륨 압축과 변형에 관한 기존 연구들을 소개한다. 3장에서는 제안 방법에서 볼륨의 어느 부분이 중요한 지를 결정하기 위해 사용한 GLCM 기반의 중요도 측정 모델을 설명한다. 4장에서는 3장에서 설명한 과정을 통해 얻은 중요도 값을 기반으로 볼륨을 변형한 후, 이를 실시간으로 복원하면서 직접 볼륨 렌더링을 수행하는 방법을 제안한다. 5장에서 실험 결과를 분석하고 6장에서 결론을 맺는다.

2장 관련 연구

2.1 볼륨 렌더링 알고리즘

2.1.1 볼륨 데이터의 특성

볼륨 데이터를 구성하는 원소를 복셀(voxel)이라고 하며, 볼륨데이터는 복셀 v 의 집합 V 로 표현된다. 하나의 복셀은 위치에 대한 공간 좌표 x 와 복셀 값 c 로 구성된다.

$$V = \{ v_i \}, v_i = (x_i, c_i) \quad (1)$$

볼륨 렌더링은 3차원 볼륨 데이터에서 2차원 영상으로 가시화 하는 기법으로, 직접 볼륨 렌더링 (DVR : Direct Volume Rendering) 방식과 표면 추출 렌더링(SF : Surface Fitting) 방식으로 나눌 수 있다. 표면 추출 렌더링 기법은 볼륨 데이터를 기하정보로 변환하여 전통적인 표면 렌더링 방식을 통해 결과 영상을 얻는 방법이며, 직접 볼륨 렌더링은 중간 변환 없이 볼륨

데이터의 각 정보를 투영하는 방법이다.

2.1.2 표면 추출 기법

표면 추출 렌더링 기법으로 볼륨 데이터를 가시화하기 위해서는 먼저 볼륨 데이터를 기하정보로 변환하는 과정을 거쳐야 한다. 먼저 볼륨 데이터를 이진 분할(binary segmentation)하여 표면의 안쪽과 바깥쪽 영역을 구분한다. 이진 분할은 가장 간단한 기법인 경계값 방식(thresholding)을 이용할 수도 있고, 보다 정교한 분할 기법을 사용할 수도 있다. 이렇게 구분된 두 영역의 경계점을 추출하고, 이를 연결한 표면을 생성하는데, 이를 단일값-표면(iso-surface)이라 부른다.

표면 추출 렌더링 방식은 직접 볼륨 렌더링 방식에 비해서 훨씬 빠르는데, 최초에 표면을 추출할 때에만 볼륨 데이터 전체를 다루고, 그 뒤로는 추출된 표면을 가지고 전통적인 표면 렌더링 파이프라인을 이용해 고속으로 가시화할 수 있기 때문이다. 반면에, 표면 추출에 이용된 단일값-표면에 기여하지 않는 영역의 정보는 모두 무시되어 결과 영상에 반영되지 않는다. 또한, 단일값-표면을 결정하는 분할 조건을 변경할 때마다 다시 표면

추출을 하는 과정을 거쳐야 한다. 따라서, 표면 추출 렌더링 기법에서는 어떻게 빠르고 정확한 표면 정보를 추출하는지가 알고리즘 성능을 좌우하게 된다.

Ganapathy[7]는 볼륨 데이터를 구성하는 각 2차원 슬라이스 영상에 대해 먼저 경계선(contour)을 구하고, 인접한 슬라이스의 경계선 상의 두 대응점을 이어 다각형을 생성하는 방법을 제안하였다. 이 방법으로 생성된 표면은 다각형 수가 매우 많아 다루기 어려우므로, 이를 줄이기 위해 매쉬 간략화(mesh simplification) 방법을 사용하게 된다 [8, 9].

한편, 3차원 볼륨 상에서 직접 빠르게 표면을 추출하는 대표적인 기법으로 마칭 큐브 알고리즘[10]이 있다. 이 알고리즘은 8개의 인접한 복셀을 꼭지점으로 갖는 육면체 셀을 상정하고, 각각의 셀이 가진 여덟 복셀의 안팎 정보를 이용해 다각형을 생성한다. 여기서 여덟 복셀의 값 조합으로 나타날 수 있는 경우의 수는 모두 256가지이나, 대칭성을 고려하면 그림 2.1과 같은 15개의 기본구조만으로 전부 분류될 수 있다. 이러한 특성을 이용해, 모든 경우의 수에 대해 15가지의 기본 구조 중 하나로 사상되는 인덱싱 테이블을 가지고 있으면 고속으로 표면을 생성할 수 있다.

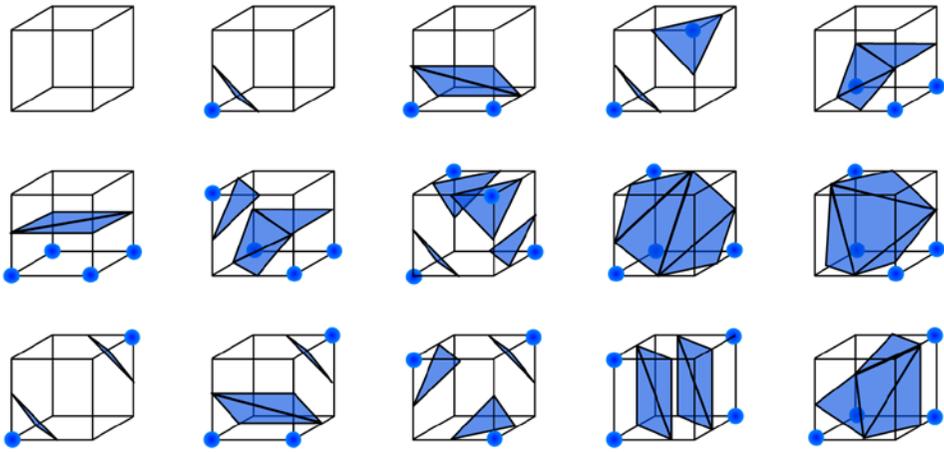


그림 2.1 마칭 큐브 알고리즘의 15가지 기본 다각형 구조

2.1.3 직접 볼륨 렌더링

직접 볼륨 렌더링 방식은 3차원 볼륨 데이터의 각 복셀이 갖는 데이터를 직접 화면 영상에 투영하여 결과를 얻는 기법이다. 직접 볼륨 렌더링은 다시 객체 순서 볼륨 렌더링(object order volume rendering)과 영상 순서 볼륨 렌더링(image order volume rendering)으로 구분할 수 있다.

2.1.3.1 객체 순서 볼륨 렌더링

객체 순서 볼륨 렌더링은, 볼륨 데이터를 각 복셀을 구성하는 입자로 구성된 집합으로 보고 각 입자가 영상에 어떻게 투영될 것인지를 계산해 화면에 집적해 결과를 얻는 기법이다. 이를 위해 입자가 어떻게 결과 영상에 영향을 미칠 것인지를 결정하는 기저 함수(basis function)를 정의해야 하며, 이 기저함수의 컨볼루션(convolution) 연산을 통해 입자가 결과 영상의 얼마만큼의 영역에 얼마만큼의 강도로 영향을 미치는 지를 결정한다.

이러한 기저함수의 컨볼루션을 미리 계산해 두고 영상 평면에 각 입자의 밀도값을 고려해 영상 평면에 누적시켜나가는 기법이 스플래팅(splatting) 기법이다[11]. 이 알고리즘은 3차원 입자가 2차원으로 투사된 풋프린트(footprint) 영상을 미리 정의된 형태로 가지고, 여기에 렌더링 할 입자의 밀도를 가중치 삼아 가공을 한 후 영상에 직접 투사한다.

객체 순서 볼륨 렌더링 기법은 볼륨 데이터의 대부분이 빈 공간인 경우 뛰어난 성능 효율을 보이지만, 다음에 설명할 영상 순서 볼륨 렌더링 기법에 비해 화질이 크게 떨어지며, 결과 영상에 투영할 입자를 모두 시점으로부터의 거리에 따라 정렬하는 데에 추가적인 시간이 소요된다. 최근

에 많이 사용되는 의료 영상이나 산업 영상 등의 볼륨 데이터는 데이터 자체의 해상도도 높고 의미 있는 값을 갖는 복셀의 비중이 높은 편이므로, 이로 인한 정렬 오버헤드로 인해 영상 순서 볼륨 렌더링 방식에 비해 속도 면에서 이득이 없어서 거의 사용되지 않는다.

2.1.3.2 영상 순서 볼륨 렌더링

영상 순서 볼륨 렌더링은 최종 영상을 구성하는 픽셀들을 하나씩 결정해 나가는 기법이다. 가장 일반적으로 이용되는 영상 순서 볼륨 렌더링 방법은 Levoy[12]와 Drebin[13]에 의해 거의 비슷한 시기에 제안된 광선 추적법(Ray-casting)이다.

2.1.3.3 볼륨 렌더링 파이프라인

광선추적법 기반의 직접 볼륨 렌더링 기법의 기본 모델은 그림 2.2와 같이 시점, 시선 방향, 결과 영상 평면, 그리고 대상 볼륨 데이터로 이루어진다.

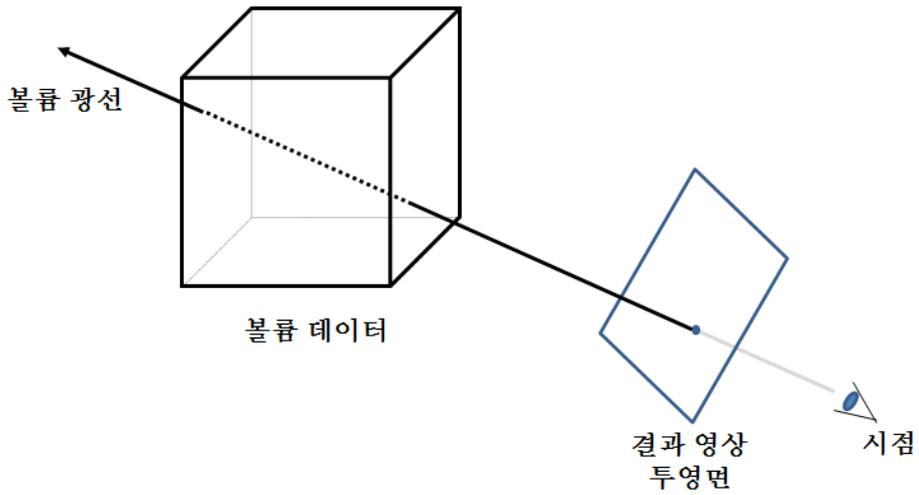


그림 2.2 직접 볼륨 렌더링의 기본 모델. 시점과 결과 영상 투영면 상의 한 픽셀을 잇는 직선이 볼륨 광선의 방향이 되며, 이 광선이 볼륨 데이터를 관통하면서 만나는 복셀들의 광학적 특성 값의 총합이 해당 픽셀의 결과값이 된다.

출력 영상의 한 픽셀에서 출발하여, 볼륨을 관통하는 광선(ray)을 따라 일정 간격으로 광선이 지나는 위치의 복셀 값을 샘플링 한 후, 이를 미리 정의된 광학적 특성 값으로 변환하고, 역시 정의된 광학 모델을 이용해 결과 영상 화면에 누적시킨다. 이러한 일련의 과정은 다음 그림 2.3과 같이 표현된다.

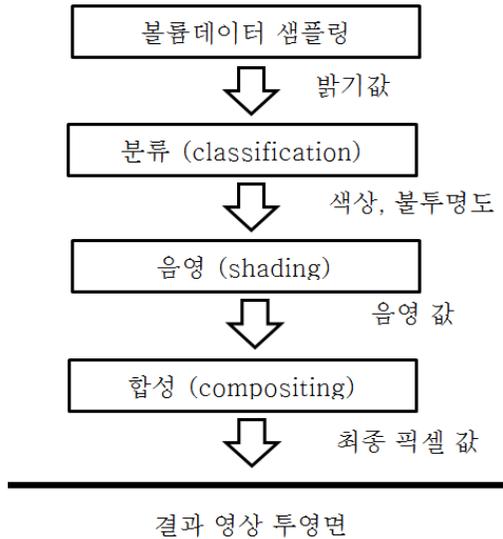


그림 2.3 직접 볼륨 렌더링 파이프라인. 볼륨에서 샘플링 된 밝기값은 일련의 과정을 거쳐 결과 영상에 투영된다.

샘플링을 통해 얻어온 값은 영상의 밝기값으로, 이 자체는 물리적인 의미를 가지지 않는 스칼라 값에 불과하다. 따라서 이를 가시화하기 위해서는 여기에 광학적 특성(optical property)을 부여해줄 사상이 필요한데, 이를 전이 함수(TF, transfer function)라 하며 일반적으로 색상 전이 함수(color transfer function)와 불투명도 전이 함수 (opacity transfer function)으로 구성된다. 전이 함수는 밝기값을 색상이나 불투명도로 사상하는 1:1 함수 형태

를 가지게 되는데, 이를 이용하여 밝기값으로부터 색상과 불투명도 같은 실질적인 광학적 특성 값을 얻을 수 있다. 이 과정을 분류(classification)라 한다. 분류 과정을 거쳐 광학 특성을 가진 입자가 된 복셀 값은 일반적인 표면 기반 렌더링과 같은 방식의 음영(shading)처리를 거치게 된다. 음영 모델은 역시 일반적인 표면 렌더링에서 사용되는 Phong 조명 모델(Phong illumination model) 등이 주로 이용된다.

표면 렌더링의 조명 모델을 이용해 음영을 계산하려면 해당 지점의 법선 벡터가 필요하다. 그러나, 볼륨 데이터에는 실제 표면이 존재하지 않으므로, 법선 벡터를 계산하기 위해 주변 밀도값을 이용한 경사도(gradient)를 계산한다. 복셀 $v(x, y, z)$ 에 대해 중앙 차분(central difference) 방식을 이용한 법선 벡터의 계산식은 다음과 같다.

$$\mathbf{N}(v) = \nabla v(x, y, z) = \frac{1}{2} \left(\begin{bmatrix} v(x+1, y, z) \\ v(x, y+1, z) \\ v(x, y, z+1) \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} v(x-1, y, z) \\ v(x, y-1, z) \\ v(x, y, z-1) \end{bmatrix} \right) \quad (2)$$

따라서 실제로 하나의 복셀에 대한 음영 값을 구하기 위해선 총 7번의 샘플링이 필요하다.

이렇게 음영 처리가 끝난 입자는 최종적으로 결과 영상에 누적되는데, 이 작업을 합성(compositing)이라 한다. 표면 기반 렌더링과 달리 입자를 직접 화면에 투영하는 형태가 되는 볼륨 렌더링에서는 별도의 누적 모델이 필요하다. 볼륨 렌더링을 위한 입자의 누적 모델로는 낮은 반사율을 갖는 입자의 광선 적분을 근사한 모델이 널리 이용되는데, 다음과 같은 적분식으로 표현된다[14, 15].

$$I = \int_0^D \tilde{c}(s(x(\lambda))) e^{-\int_0^\lambda \tau(s(x(\lambda'))) d\lambda'} d\lambda \quad (3)$$

여기서 D 는 적분 영역의 한계를 나타내는 시점의 끝을, $x(\lambda)$ 는 시점으로부터 거리 λ 인 지점을 나타내는 위치함수이다. $s(x)$ 는 지점 x 에 위치한 입자의 밀도, \tilde{c} 는 s 의 색상 밀도이며, τ 는 밀도에 따른 밝기 감쇄를 정의하는 감쇄 함수이다. 이 식은 한 지점에서 출발하여 그 사이의 입자들로부터 감쇄가 일어난 후 최종적으로 시점에 도달하는 빛의 양을 나타내는 식으로, 이를 점화식 형태로 이산화하면[16] 다음과 같이 표현된다.

$$c_{i+1} = c_i + (1 - \alpha_i)\alpha_{in}c_{in} \quad (4)$$

$$\alpha_{i+1} = \alpha_i + (1 - \alpha_i)\alpha_{in}$$

결과적으로, 볼륨 렌더링의 결과 영상은 광선이 시점으로부터 진행해나 가면서 샘플링 해 얻은 값을 분류와 음영 과정을 통해 얻은 광학적 특성 값 α_{in} 과 c_{in} 을 식 (4)에 따라 누적해서 얻을 수 있다.

2.2 압축 볼륨 렌더링

볼륨 데이터는 일반적으로 매우 크기 때문에, 이를 처리하기 위해 데이터를 압축할 필요가 있는 경우가 많다. 일반적으로 압축 볼륨 렌더링은 다음 그림과 같은 과정을 거친다.



그림 2.4 압축 볼륨 렌더링 파이프라인

여기서 데이터를 압축하는 과정은 일반적으로 전처리 단계로 분류되며, 소요시간이 그렇게 중요하지 않다. 그러나, 압축한 데이터를 해제하는 과정은 렌더링과 동시에 이루어져야 하는 경우가 대부분이며, 이 경우 압축 해제 속도가 렌더링 속도에 큰 영향을 미치게 되므로, 실시간 압축 해제가 불가능한 경우 치명적인 단점이 된다.

볼륨 데이터의 크기를 줄이는 가장 단순한 방법은 단순 균일 다운샘플링(uniform downsampling)이다. 균일 다운샘플링은 사실상 아무런 압축 해제 루틴을 필요로 하지 않으므로 가시화 단계에서 속도의 손실이 전혀 없지만, 볼륨 데이터 내부의 영역별 특성을 무시하고 같은 비율로 크기를 줄이므로 관심 영역의 정보가 보존되기 어렵다. 특히 작은 크기의 중요한 특징점들에 대한 정보가 완전히 소실될 위험이 크다. 산업용 CT를 이용한 비파괴검사에서 검출하려는 정보가 주로 작거나 얇은 형태의 균열 또는 기공 형태인 것을 고려할 때 이것은 치명적인 단점이 된다.

2.2.1 벡터 양자화

데이터를 압축하는 방법으로 잘 알려진 기법 중 하나가 벡터 양자화

(Vector Quantization)이다. Ning과 Hasselink[17]는 그림 2.5와 같이 데이터를 작은 블록 단위로 나눈 후 이를 벡터 양자화를 통해 부호화하는 방법을 제시하였다.

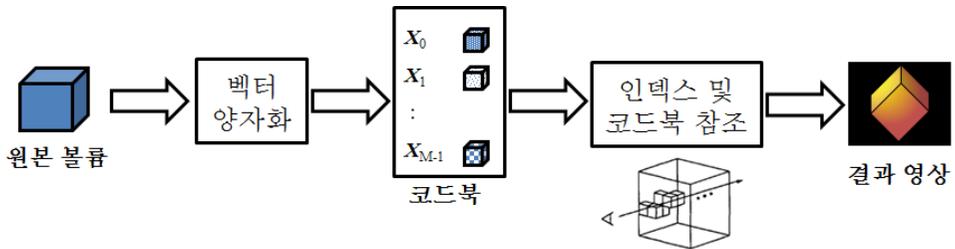


그림 2.5 벡터 양자화를 이용한 코드북 기반 압축 볼륨 렌더링 기법

이 방법은 벡터 트레이닝에 별도의 시간이 소요되지만, 일단 코드북이 정의되면 랜덤 액세스가 가능하므로 비교적 빠른 속도로 렌더링이 가능했다. 그러나 데이터의 절대적인 크기가 커지면서 이러한 코드북 기반 방식으로는 압축 효율을 기대하기 어려워졌다.

2.2.2 변환 부호화

오늘날 영상 처리 분야에서 가장 널리 사용되는 압축 방법은 변환 부호화

(transform coding)을 이용한 방법이다. 이 방법은 원본 데이터에 비해 좀 더 정보가 공간적으로 편향된 분포를 갖는 특성을 가진 변환을 이용한 것이다. 이러한 접근 방식에서는 일반적으로 주파수 영역으로 데이터를 변환한 후, 이 공간상의 신호에서 계수들의 정보를 선별하는 방식으로 압축이 이루어진다.

직접 볼륨 렌더링에 주파수 해석을 도입한 최초의 사례는 푸리에 변환을 이용한 접근이다. 푸리에 공간 기반 데이터 표현의 문제점은 위에서 언급한 공간 정보의 지역화 특성이 부족하다는 점이다. 그러나 CT 영상을 만드는 재구성(CT reconstruction) 알고리즘이 주파수 공간의 특성인 푸리에 슬라이스 이론(Fourier Slice Theorem)을 기반으로 하고 있기 때문에 (그림 2.6), Dunne[18]와 Levoy[19]의 연구와 같이 푸리에 변환을 통해 별도의 복셀 누적 과정 없이 볼륨 데이터의 단면 투영 영상을 직접 얻는 가시화 기법은 널리 이용되었다. 그러나 이 방법으로는 단면 투영 방식 이외의 다른 렌더링 기법은 근본적으로 사용하기 어렵다는 문제점이 있다.

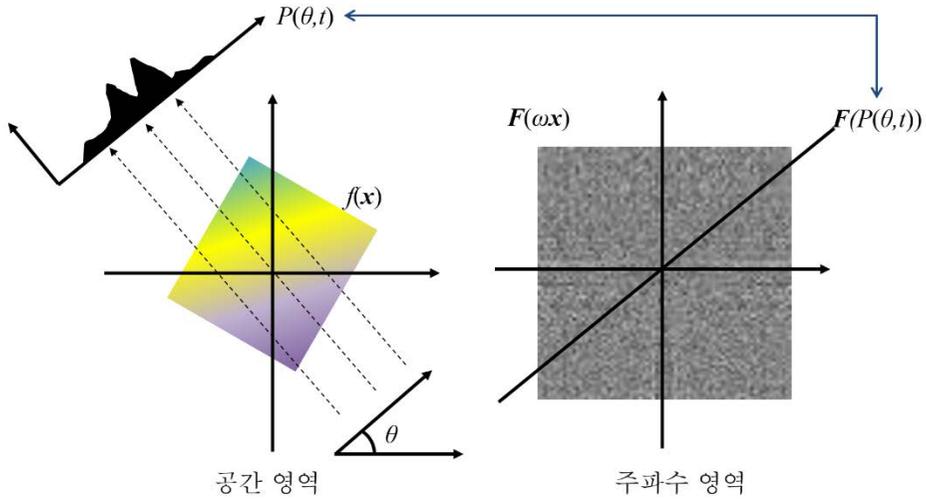


그림 2.6 푸리에 슬라이스 이론. 공간 영역에서 각도 θ 방향으로 투영한 영상 P 는 주파수 영역에서 원점을 지나서 각도 θ 방향의 단면과 동일하다.

Yeo와 Liu[20]는 이산 코사인 변환(DCT, discrete cosine transform)을 이용한 변환 부호화를 기반으로 벡터 양자화를 이용한 압축 볼륨 렌더링 방식을 제안하였다. DCT 기반의 부호화는 이 신호 영역에서 직접 볼륨 렌더링을 수행할 수 없기 때문에, 이들은 블록 단위로 구분하고 현재 결과 영

상에 필요한 블록만을 압축 해제하여 사용하는 방식의 기법을 제안하였으나, 결과적으로 필요한 블록이 많은 경우 실시간 렌더링은 기대하기 어렵다.

위의 변환들과 달리 웨이블릿 변환(Wavelet Transform)은 데이터를 주파수 영역으로 변환하면서도, 공간적 위치 관계를 보존하고 있는 변환 방법이다. 공간 정보가 유지된다는 점은 광선이 볼륨 데이터 내부를 샘플링하는 방식인 직접 볼륨 렌더링 기법에서는 커다란 이점이 된다. Muraki[21]가 볼륨 데이터를 웨이블릿 변환을 통해 표현하는 방법을 제안한 이후, Kim[22]은 웨이블릿 변환 도메인 상에서 압축 볼륨 렌더링을 수행하기 위해 변환된 블록들을 재배열, 원본 신호를 복원할 때 모든 서브 밴드 블록에서 항상 같은 위치의 데이터만 참조할 수 있는 방법을 제안하였다. (그림 2.7)

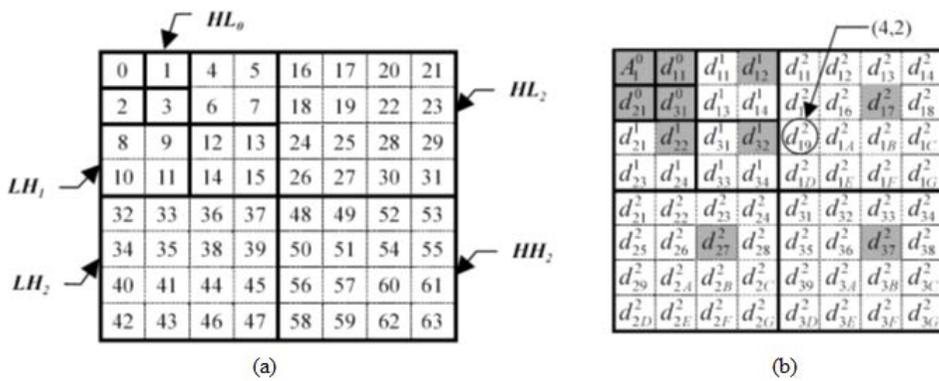


그림 2.7 웨이블릿 변환 기반 압축 볼륨 렌더링. (a) 블록 재배치 순서. (b) 재배치된 블록 상에서의 원본 값 복원. 원본 값의 볼륨 상 위치와 이 값의 복원에 필요한 각 서브 밴드 블록 내의 값의 위치가 동일하다.

2.2.3 다중-해상도 기반 기법

볼륨 데이터가 가진 정보를 여러 단계로 나누고 이를 취사 선택하여 데이터 크기를 줄이는 기법을 다중-해상도(multi-resolution) 기법이라 한다.

가우시안 필터 연산을 이용한 라플라스 피라미드는 영상 처리에서 폭넓게 이용되는 개념인데, Ghavamnia[23]는 기반의 볼륨 재구성 및 렌더링 기법을 제안하였다. 피라미드 형태의 이 데이터 구조 특성상 다중-해상도 기반 방식에 쉽게 적용할 수 있는데, 이 방법은 구현이 간단한 반면 데이

터의 지역성과 관계 없이 단계 단위로만 데이터를 압축해야 하므로 효율이 떨어진다.

이를 보완하기 위해, 볼륨을 더 작은 크기의 블록으로 나누어, 각 블록의 중요도에 따라 서로 다른 크기를 갖도록 하는 방식의 데이터 압축 기법들이 제안되었다. **Wilhelms**[24]는 다중-해상도 기반의 블록 트리 형태의 자료 구조를 사용하는 볼륨 렌더링 기법을 보였으며, 옥트리를 사용하는 단계적 표현 방법을 사용하는 기법들도 제안되었으나, 기본적으로 데이터 구조를 다루는 데에 복잡한 연산이 필요하고 하나의 복셀 값을 구하기 위해 많은 순차적 입출력이 필요한 특징은 병렬화를 통한 고속화에 장애가 되었다.

다중-해상도 기반 압축 기법으로 좀 더 병렬 처리나 분산 처리에 적합한 형태로 만들기 위해, 볼륨을 더 작은 단위로 나눌 때 균일한 크기의 격자 블록 형태를 사용하는 방법들이 제안되었다. **Guthe**는 볼륨을 단일 크기의 격자 블록 형태로 나눈 뒤 이를 웨이블릿 변환을 이용해 압축, 복원하는 다중-해상도 기반의 대용량 볼륨 렌더링 기법을 제안하였는데[25], 이는 현재에도 분산 시스템 기반 대용량 볼륨 렌더링 프레임워크에 널리 이용되는 기법이다.

다중-해상도 기반 기법은 데이터 전체의 원본 유사정보보다는 중요한 관심 영역의 정보를 보존하는 것이 더욱 중요한 경우 유용한 접근 방식이다. 레벨을 여러 단계를 두고 압축률이 적당한 경우, 각 레벨 간 가중치에 극단적인 차이를 두는 방법으로 관심 영역에 대해서는 무손실 압축에 가까운 결과물을 얻는 것도 가능하다.

그러나, 공간적으로 인접한 블록이 서로 다른 레벨을 가지는 경우, 이로 인한 데이터의 불연속성이 결과 영상에 심각한 아티팩트를 일으키는 문제점이 있다. 이를 해결하기 위해, Weiler는 각 블록의 경계에 윗 단계의 보간값을 저장하는 공간을 추가하여 이를 이용해 경계면을 보간하는 방법 [26]을, Ljung은 서로 단계가 다른 블록의 경계값들끼리 연속성을 갖는 수동 보간 방법을 이용해 이러한 불연속성을 없애는 방법 [27]을 제안하였으나, 각각 이 과정에서 추가 저장 공간과 많은 연산을 소요하여 렌더링 성능 효율이 떨어지는 단점이 있다.

2.2.4 볼륨 변형 기반 방법

Wang[28]은 기존의 압축 볼륨 렌더링의 접근 방식과 달리, 볼륨 변형을

통한 압축 방식을 제안하였다. 볼륨 변형은 볼륨 렌더링 분야에서는 특정 관심 영역을 과장해서 좀 더 크게 보여주는 용도로 사용되었는데[29], 이를 이용해 중요한 영역이 자료구조 상에서 더 많은 공간을 점유하도록 볼륨을 변형한 후, 이를 기존 방법으로 크기를 줄이고, 다시 역변환 후 렌더링 하는 방식으로 압축 볼륨 렌더링을 구현한 것이다(그림 2.8).

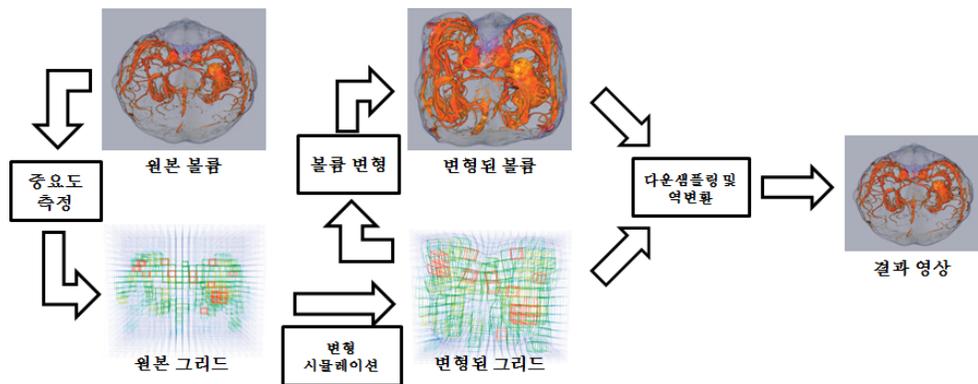


그림 2.8 볼륨 변형 기반 압축 볼륨 렌더링 기법

이 방법의 장점은 다중-해상도 기반 방법처럼 중요한 관심 영역의 정보를 더 잘 보존하도록 쉽게 조절 가능하면서도, 볼륨 내부의 연속성이 유지되는 볼륨 변형 방식을 이용함으로써 자연스럽게 불연속성 문제가 해결된다는 점이다. 그러나 또한, 볼륨 데이터 값이 TF를 통과한 값을 중요도

를 매기는 기준으로 삼았기 때문에, 사용자가 실시간으로 TF를 변경할 경우 볼륨 변형을 매번 다시 수행해야 하므로 실시간으로 반응하기 어렵다는 문제점이 있다.

본 논문에서는 이러한 문제를 해결하기 위해, 다음 절에서 설명할 질량-스프링 모델 기반의 고속 볼륨 변형 기법을 도입하고, 볼륨의 밝기값을 기반으로 계산하므로 TF의 영향을 받지 않는 중요도 모델을 제안하였다.

2.3 질량-스프링 기반 볼륨 변형 모델

그래픽 객체들에 물리적인 속성을 조합한 Terzopoulos의 연구[30]와 같이, 물체의 변형을 물리 기반 모델로 시뮬레이션 기법은 컴퓨터 그래픽스 분야에서 매우 활발하게 연구되었다. 초기의 연구들은 대부분 역학적 시뮬레이션을 위한 위한 기법으로 대표적으로 유한요소법(FEM, Finite Element Method)을 사용하였다[31]. FEM은 물리적 특성을 비교적 더 정확히 반영할 수 있지만 매우 복잡한 순차적 계산을 필요로 한다.

이러한 방대한 계산량을 줄이기 위해, 좀 더 간단한 근사 모델인 질량-스프링 모델이 도입되었다. 질량-스프링 모델은 각 입자에 대응되는 질량

을 가진 개별 노드 m_i 의 집합 M 과, 두 노드 m_i 와 m_j 사이를 연결하는, 질량이 없는 스프링 s_{ij} 의 집합 S 로 구성된다. 스프링 s_{ij} 에 의해 가해지는 힘을 \mathbf{F}_s , 노드 m_i 에 스프링으로 연결된 노드들의 집합 M_i 라 할 때, Newton의 제 2법칙에 의해 노드 m_i 에 가해지는 힘에 따른 운동 방정식은 다음과 같이 표현된다.

$$\mathbf{m}_i \mathbf{a}_i = \sum_{j \in M_i} \mathbf{F}_{ij} \quad (5)$$

강성계수 k 와 정지 길이 l_{ij}^r 를 갖는 스프링 s_{ij} 의 현재 길이가 l_{ij} 일 때, 이 스프링에 의한 힘 \mathbf{F}_s 는 Hooke의 법칙에 의해 다음 수식과 같이 정의된다.

$$\mathbf{F}_s = k(l_s - l_s^r) \quad (6)$$

그런데 l_{ij} 는 노드 m_i 와 m_j 간의 거리이므로, 식 (5)와 (6)을 통해 노드 m_i 의 위치 \mathbf{x}_i 는 다음과 같은 이차 미분 방정식 형태로 정리된다.

$$\mathbf{m}_i \frac{d^2 \mathbf{x}_i}{dt^2} + c \frac{d \mathbf{x}_i}{dt} - \sum_{j \in \mathcal{S}_i} k(\|\mathbf{x}_i - \mathbf{x}_j\| - l_s^r) \frac{\mathbf{x}_i - \mathbf{x}_j}{\|\mathbf{x}_i - \mathbf{x}_j\|} = 0 \quad (7)$$

이를 이용해 \mathbf{x}_i 를 계산하기 위한 시간 적분(time integration)에는 여러 가지 수치 해석 알고리즘을 사용할 수 있는데, GPU와 같은 고속의 병렬 처리 하드웨어를 이용할 수 있는 명시적 방법(explicit method)들이 주로 이용된다[32].

이 모델은 FEM만큼 정확하지는 않으나, 충분한 수준의 정확성을 제공하면서도, 비교적 빠른 속도로 물리적 특성에 따른 입자의 위치 변화를 근사할 수 있어 의복 시뮬레이션[33], 근육 변형 모델[34], 가상 수술[35] 등 다양한 분야에서 폭넓게 이용되고 있다. 물리 시뮬레이션에 널리 사용된다. 이 기법에서 중요한 것은 실제 역학적 특성을 정확히 근사할 수 있도록 스프링 계수와 노드 간 스프링 연결 관계를 정의하는 것이다[36, 37].

2.4 산업용 CT 영상의 중요 특징점 측량 방법

산업용 CT 영상을 가시화하는 가장 중요한 목적 중 하나는 결함과 같은 특징점(feature)들을 분석하는 것이다. 이를 위해서는 먼저 특징점에 해당하는 영역을 정의해야 한다. 이러한 특징점 추출은 다른 분야의 데이터와 마찬가지로 전처리를 통한 영상 분할(segmentation)을 통해 이루어지는 경우가 대부분이다. 산업용 CT 영상 도메인의 가시화에 집중한 초창기 연구로는 Huang[38]이 제안한 영역 성장법 기반 방법이 있는데, 여기서는 특징점의 검출을 위한 영역 성장법의 확장 기준으로 복셀의 값 자체와 그 라디언트값을 가중평균한 공식을 사용하였다. Hadwiger[39]는 이러한 전처리 분할 기법을 기반으로 영역 성장 조건에 따른 크기 변화를 저장해, 사용자가 실시간으로 원하는 특징을 가지는 관심 영역을 선택할 수 있는 방법을 제안하였다.

한편, 산업 영상 데이터 상에서 중요한 영역 여부를 평가하기 위해 해당 영역의 균일성(homogeneity)에 주목한 시도는 Frey[40]의 산업 영상 가시화 가속 기법 연구(그림 2.9)인데, 여기서는 가시화를 위한 광선 투사 과정에서 중요하지 않은 영역을 건너뛰기 위해서 해당 데이터 영역이 열

마나 주변과 비슷한지를 비교하는 방법을 사용하였다. 다만 여기서는 주변 복셀과의 밝기값 차이로만 균일성을 정의하였으므로, 데이터에 잡음이 나 아티팩트가 심한 경우엔 거의 가속이 이루어지지 않는 문제점이 있었다.

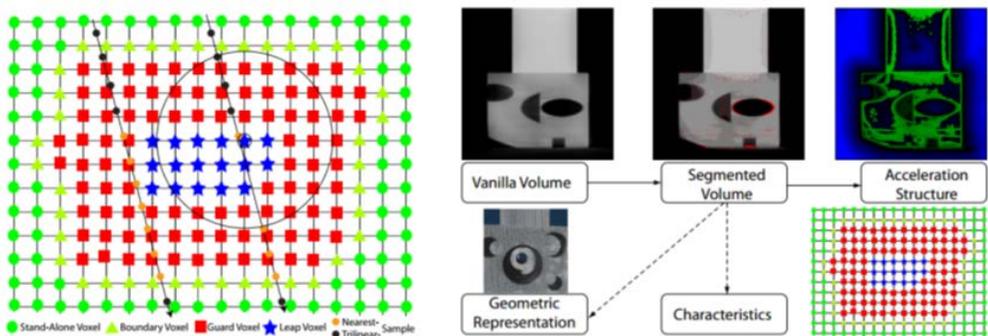


그림 2.9 영역의 균일성을 이용한 가시화 가속. 광선 상의 샘플링 지점에서 주변 영역을 검사하여, 같은 밝기 값을 갖는 부분은 하나의 균일한 영역으로 간주, 추가적인 샘플링을 생략하고 바로 다음 영역으로 건너뛰는 구조이다.

3장 중요도 측정 기법

3.1 명암도 동시발생 행렬

명암도 동시발생행렬(GLCM, Grey Level Co-occurrence Matrix)은 영상 처리분야에서 텍스처 분석을 위해 도입된 개념으로, 2차원 영상에서 특정 거리를 두고 인접한 픽셀간에 얼마만큼의 값 차이가 나는지를 통계적으로 표현한 행렬이다[41, 42]. 평균, 분산과 같이 픽셀 값 자체를 참조하는 방식과 달리 GLCM은 두 픽셀 값 사이의 관계를 이용한 2차 통계 척도 기반 분석 방법이며, 이를 이용해 다양한 2차 통계량을 구할 수 있다.

GLCM 행렬을 생성할 때 중요한 두 가지 요소는, 기준 픽셀(reference pixel)에서 어느 픽셀이 이웃 픽셀(neighboring pixel)인지를 결정하는 방향과 거리이다. GLCM 윈도우는 GLCM 값을 계산할 때 주위를 얼마나 볼지를 결정하는 역할을 한다. GLCM 윈도우 값의 거리 이내의 주변 픽셀로

부터, 방향과 거리를 기준으로 차이 값을 계산하고, 이를 행렬에 반영한다. 이 세 가지 상수는 GLCM을 통한 텍스처 분석에서 텍스처의 방향, 주파수, 지역성 특성을 각각 정의하는 역할을 한다. 2차원 영상에서 GLCM을 만드는 경우 일반적으로 상하좌우의 4방향이나, 여기에 대각 방향을 추가한 8방향 모델을 사용한다.

그림 3.1은 4단계의 밝기값을 가지는 2비트 2차원 영상에 대해 GLCM을 구성하는 예시를 보인 것이다. 여기서는 4방향을 기준으로 이웃 거리는 1로 하였다. GLCM의 행과 열의 크기는 밝기값의 단계 수이고, 방향별로 행렬을 하나씩 계산할 수 있으므로 총 4개의 4X4행렬을 얻을 수 있다(그림 3.1 (c)~(f)). 텍스처 분석에서 방향을 고려하지 않는 경우 일반적으로 이 행렬들을 합산한 하나의 행렬을 GLCM으로 정의한다(그림 3.1 (b)). 행렬의 (0, 1) 값이 20이라는 것은 밝기값이 0인 픽셀 기준으로 그 이웃에 밝기값 1이 오는 경우가 총 20번 출현함을 의미한다.

| | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 0 | 0 | 1 | 1 | 2 | 3 | 3 | 3 |
| 0 | 0 | 1 | 1 | 2 | 3 | 3 | 2 |
| 0 | 1 | 2 | 2 | 1 | 2 | 2 | 3 |
| 1 | 2 | 3 | 3 | 2 | 1 | 1 | 2 |
| 2 | 3 | 2 | 3 | 2 | 1 | 1 | 2 |
| 1 | 2 | 3 | 2 | 1 | 0 | 0 | 1 |
| 0 | 1 | 2 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 |
| 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 |

(a)

기준 픽셀의 밝기값(i)

| | | | | |
|-------------------|----|----|----|----|
| | 0 | 1 | 2 | 3 |
| 이웃 픽셀의 밝기값(j) | 0 | 1 | 2 | 3 |
| 0 | 30 | 20 | 0 | 0 |
| 1 | 20 | 24 | 28 | 0 |
| 2 | 0 | 28 | 10 | 25 |
| 3 | 0 | 0 | 25 | 14 |

(b)

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| | 0 | 1 | 2 | 3 |
| 0 | 7 | 4 | 0 | 0 |
| 1 | 8 | 5 | 5 | 0 |
| 2 | 0 | 9 | 2 | 5 |
| 3 | 0 | 0 | 7 | 4 |

(c)

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| | 0 | 1 | 2 | 3 |
| 0 | 7 | 8 | 0 | 0 |
| 1 | 4 | 5 | 9 | 0 |
| 2 | 0 | 5 | 2 | 7 |
| 3 | 0 | 0 | 5 | 4 |

(d)

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| | 0 | 1 | 2 | 3 |
| 0 | 8 | 6 | 0 | 0 |
| 1 | 2 | 7 | 9 | 0 |
| 2 | 0 | 5 | 3 | 8 |
| 3 | 0 | 0 | 5 | 3 |

(e)

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| | 0 | 1 | 2 | 3 |
| 0 | 8 | 2 | 0 | 0 |
| 1 | 6 | 7 | 5 | 0 |
| 2 | 0 | 9 | 3 | 5 |
| 3 | 0 | 0 | 8 | 3 |

(f)

그림 3.12 4차원 영상과 그에 따른 GLCM. (a) 원본 영상. (b) 방향 별 행렬을 합산한 최종 GLCM. (c)~(f)는 각각 우측, 좌측, 위, 아래 방향을 기준으로 계산된 GLCM을 나타낸다.

볼륨 데이터에 GLCM을 적용하기 위해서는 이를 3차원으로 확장할 필요가 있다. 이에 따라 방향도 3차원을 기준으로 6방향이나 26방향 모델을 사용하게 된다.

[42]에서는 GLCM에서 계산할 수 있는 텍스처 특징 통계량을 14종류 소개하고 있는데, 이 통계량을 계산하기 위해서는 먼저 정규화를 통해 기준 픽셀과 이웃 픽셀 간의 조합이 출현하는 횟수를 확률로 변환할 필요가 있다.

l -단계의 밝기값 i 와 j 에 대해, 정규화된 GLCM은 다음 수식과 같은 상대 분포 행렬로 정의된다.

$$N(i, j) = num \left\{ \begin{array}{l} \left((\mathbf{m}_{x_1}, \mathbf{m}_{x_2}, \mathbf{m}_{x_3}), (\mathbf{n}_{x_1}, \mathbf{n}_{x_2}, \mathbf{n}_{x_3}) \right) \in (V_{x_1} \times V_{x_2} \times V_{x_3}) \times (V_{x_1} \times V_{x_2} \times V_{x_3}) \\ \max(|\mathbf{m}_{x_1} - \mathbf{n}_{x_1}|, |\mathbf{m}_{x_2} - \mathbf{n}_{x_2}|, |\mathbf{m}_{x_3} - \mathbf{n}_{x_3}|) \leq d, \\ I_{l-gray}(\mathbf{m}_{x_1}, \mathbf{m}_{x_2}, \mathbf{m}_{x_3}) = i, I_{l-gray}(\mathbf{n}_{x_1}, \mathbf{n}_{x_2}, \mathbf{n}_{x_3}) = j \end{array} \right\} \quad (8)$$

여기서 V_{x_1} , V_{x_2} , V_{x_3} 은 각각 x_1 -, x_2 -, x_3 - 축의 공간 도메인을 의미하며, $V_{x_1} \times V_{x_2} \times V_{x_3}$ 은 볼륨 데이터 공간이 된다. $(\mathbf{m}_{x_1}, \mathbf{m}_{x_2}, \mathbf{m}_{x_3})$ 과

$(n_{x_1}, n_{x_2}, n_{x_3})$ 은 복셀의 위치를 의미하며, I_{l-gray} 는 볼륨 데이터의 밝기 값 도메인을 뜻한다.

이렇게 얻어진 정규 GLCM을 이용해 정규화된 확률 값 $E_{i,j}$ 는 다음 수식으로 표현된다[41].

$$E_{i,j} = \frac{N(i,j)}{\sum_{m=0}^{l-1} \sum_{n=0}^{l-1} N(m,n)} \quad (9)$$

이 확률 값으로부터 텍스처 패턴의 여러 가지 특성을 정의하는 통계량들을 계산할 수 있는데, 본 논문에서 사용하는 통계량은 균일도 (Homogeneity)이다.

3.2 GLCM 균일도 기반 중요도 모델

볼륨 데이터에서 중요도를 평가하기 위해, 먼저 볼륨 데이터가 가진 어떤 특성을 중요도의 척도로 사용할 것인지 정의해야 한다. 2.1절에서 설명한 바와 같이 볼륨 데이터에서 복셀의 특성을 나타내는 수치로는 TF를 통과

하기 전의 원 밝기값과, TF를 통과한 광학적 특성 값이 있다. 이 중요도를 데이터 값이 아닌, 렌더링 시점의 시야로부터의 거리를 기준으로 매기는 방법도 있는데[43], 이러한 기법의 경우 가까운 영역에는 높은 중요도가, 먼 영역에선 낮은 중요도가 할당되므로 시야에 최적화된 중요도 모델을 정의할 수 있으나, 시야가 바뀔 때마다 중요도 측정을 다시 수행해야 하므로 거의 매 프레임마다 시야 변경이 일어나는 볼륨 렌더링의 실시간 구현에는 적합하지 않은 접근 방법이다.

2.2장에서 설명한 압축 볼륨 렌더링 연구 중에서 중요도 측정이 필요한 알고리즘의 경우 대부분 TF를 통과한 광학적 특성 값인 투명도를 사용하였는데, 이는 이러한 연구들이 다루는 데이터의 상당수가 의료 영상 데이터들인 것과 관련이 있다. 의료 영상은 보통 여러 가지 밀도와 텍스처 특성을 갖고 구조도 복잡한 기관들이 가까운 위치에 있는 경우가 많다. 이러한 데이터를 볼륨 렌더링을 통해 가시화하는 경우, 사용자는 일반적으로 복잡한 형태의 TF를 통해 관심 영역을 지정하게 된다. 따라서 결과 영상에 보이는 관심 영역의 특성은 TF를 통과한 광학적 특성 값에 크게 좌우되며, 상대적으로 TF를 통과하기 전의 원 밝기값 정보는 결과 영상에 큰 영향을 주지 못한다. 이런 경우에는 TF를 통과한 투명도를 중요도 측

정의 기준으로 삼는 것이 좋은 결과를 보여줄 수 있다.

그러나, 이렇게 분류 후 값을 중요도의 기준으로 삼는 경우 사용자가 TF를 조작할 때마다 중요도를 새로 계산해야 하므로 실시간으로 TF를 변경하기가 어려운 단점이 있다.

산업 CT영상의 경우, 비파괴검사의 대상이 되는 제조물은 일반적으로 수 종류 이하의 균일한 재료로 이루어진 경우가 대부분이다. 이로 인해 산업 영상 데이터의 밝기값 분포도를 작성해 보면 그림 3.2와 같이 몇 개의 피크를 가지는 매우 단순한 모양이 된다. 단일 재질의 기계 부품의 경우 공기와 물체의 소재를 대표하는 단 두 개의 피크를 갖게 된다. 복잡한 밝기값 분포를 갖는 의료 영상과 명확히 구분되는 이러한 단순한 형태의 분포 특성은 TF를 통과하지 않은 원 밝기값을 기준으로 중요도를 측정하여도 결과 영상에서 보이는 관심 영역과의 피리가 상대적으로 크지 않음을 의미한다.

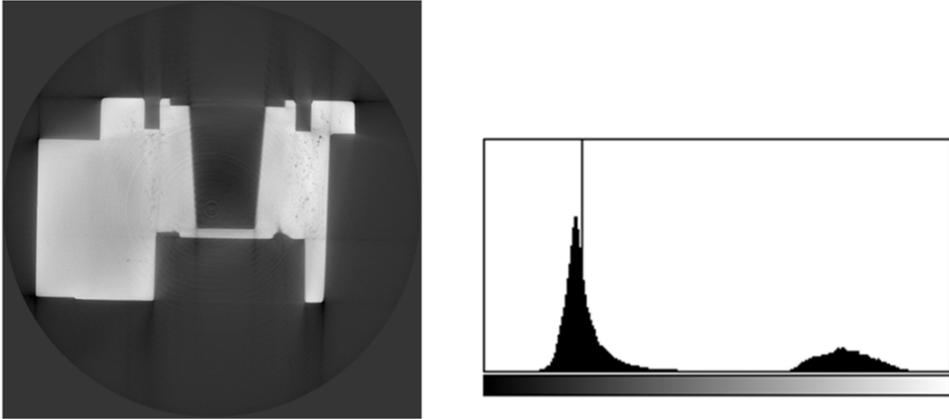


그림 3.2 산업 CT 스캔 영상의 밝기값 분포도

더욱이, 산업 영상의 경우 관심 영역은 일반적으로 미리 정의되어 있다. 즉, 균열이나 기공과 같은 결함을 검출하는 것이 산업영상을 이용한 비파괴검사의 가장 중요한 목표인데, 이러한 특성은 오히려 사용자가 임의로 지정하는 TF의 영향을 받은 광학적 밝기값 특성보다, 실제 물체의 물리적 특성이 X-선 조사를 통해 반영된 원 밝기값이 더 잘 반영할 수 있으므로, 굳이 TF를 통과한 투명도 등을 이용할 필요가 없다.

원 밝기값을 중요도 척도로 사용함으로써 얻을 수 있는 또 한가지 장점은, 앞에서 서술한 TF를 조작할 때마다 중요도를 새로 계산하는 작업이

필요하지 않다는 점이다.

산업 영상을 이용한 비파괴검사에서는 균열이나 기공과 같은 결함을 검출하는 것이 가장 중요한 목표이다. 이러한 영역은 전체적으로 균일한 텍스처 특성을 갖는 단일 재질의 부품 안에서 특징적인 비균일성을 보인다. 따라서, 영상에서 밝기 강도의 균일성을 정량화하는 작업을 통해 관심 영역이 어느 부분인지를 알아낼 수 있다. 이를 위해 본 논문에서는 3.1에서 설명한 GLCM의 균일도 특성을 이용한 중요도 평가 모델을 제안한다.

먼저 볼륨을 균일한 크기의 작은 블록으로 나눈다. 이 블록의 크기가 3.1에서 서술한 GLCM 윈도우의 크기가 된다. 4장에서 설명할 볼륨 변형은 실제로는 이 블록 단위로 이루어지므로, 그 범위를 넘어서는 텍스처 특성은 의미가 없기 때문이다.

GLCM 거리 값은 1을 사용하였는데, 거리 d 에 따른 결과 차이 분석은 6.3절에서 다루었다. 다른 균일 영역과 확연하게 차이가 나는 부분을 관심 영역으로 특정하기 위해서 GLCM 통계량 중 영상이 얼마나 불균일한 텍스처를 가지는지를 나타내는 균일도(homogeneity)[42]의 역수 값을 이용하였다. 볼륨 데이터 내부의 한 블록 x 에 대해 정규화된 역-균일도

(normalized inverse homogeneity) $\hat{H}(x)$ 는 다음과 같이 계산된다.

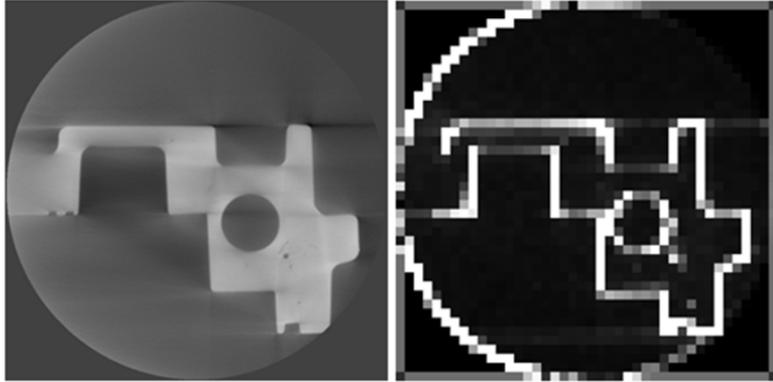
$$H(x) = \frac{1}{\left(\sum_{i=0}^{l-1} \sum_{j=0}^{l-1} \frac{E_{i,j}}{1+(i-j)^2}\right)}$$

(10)

$$\hat{H}(x) = \frac{H(x) - H_{min}}{H_{max} - H_{min}}$$

여기서 $E_{i,j}$ 는 앞의 수식에서 정의된 확률 값으로, 현재 블록 내의 각 복셀에 대해 이웃 복셀 값들을 비교해서 생성한 GLCM을 이용해 계산된다. 정규화는 계산된 $H(x)$ 중 최소값과 최대값을 이용한다.

그림 3.3은 2차원 산업 영상에 이 방법을 적용해 정규화된 역-균일도를 계산한 결과이다.



(a)

(b)

그림 3.3 영상 특징점과 GLCM 균일도 값의 연관 관계. 엔진 블록을 촬영한 영상 (a)로부터 16x16 단위로 GLCM 역-균일도를 계산한 결과가 (b)이다. 물체의 외곽선을 나타내는 부분과, 내부에 보이는 결합 부분에서 균일도가 낮음을 확인할 수 있다.

3.1에서 언급한 바와 같이 $\hat{H}(x)$ 는 지역적인 텍스처 특성만을 반영하므로, 여기에다 1차 통계량인 밝기값의 분산치를 정규화한 수치를 전역적 특성을 반영하는 항으로 추가하였다. 결과적으로 한 복셀 x 의 중요도 $IV(x)$ 는 $\hat{H}(x)$ 와 $\hat{V}(x)$ 의 가중평균으로 정의되는데, 이를 수식으로 표현하면 다음과 같다.

$$IV(x) = w\hat{H}(x) + (1 - w)\hat{V}(x) \quad (11)$$

여기서 w 는 지역적 비균일성과 전역적 비균일성을 어느 비율로 반영할지를 결정하는 가중치이다. 실험에서는 0.5를 이용하였다. w 에 따른 결과 차이도 6.3절의 파라미터 연구에서 후술하였다. 위와 같은 척도 모델을 통해, 전체적으로 균일한 영역은 낮은 중요도 값을, 불균일한 영역은 높은 중요도 값을 가지게 된다.

위에서 제시한 중요도 모델은 볼륨 전처리 단계에서 한번만 계산하면 그 뒤로는 새로 계산할 필요가 없으므로, 색상이나 투명도를 기반으로 중요도를 평가하는 방법들과 달리 TF가 실시간으로 변화할 때에도 지연이 발생하지 않는다. 다만, 이러한 원 밝기값 기반 중요도 모델을 이용하기 위해서는 원 밝기값이 물체 자체가 가진 물리량 외에 다른 잡음이 크게 반영되지 않아야 한다. 이를 위해 별도의 전처리를 수행하는데, 다음 절에서 이에 대해 논한다.

3.3 공기 영역 제거

1.2에서 언급하였듯이, 고밀도의 금속 재질 재료가 많은 산업용 CT 영상의 특성상, 강한 금속 아티팩트로 인한 영상의 왜곡이 나타난다. 이는 특히 X-선이 통과하는 매질의 밀도와 특성이 급격히 변화하는 빈 공간과 물체의 경계면을 이루는 부분과 그 주변 빈 공간 영역에서 특히 두드러진다. 물체의 경계면 부근은 물체의 윤곽선을 특정 짓는 요소이므로 실제 중요 영역에 해당하지만, 그 바깥의 빈 공간 영역은 실제로는 아무런 정보를 가지고 있지 않음에도 불구하고 이러한 왜곡으로 인한 신호 잡음으로 인해 매우 낮은 밝기 균일성을 가지게 된다. 이를 방지하기 위해 본 논문에서는 미리 빈 공간 영역을 제거하는 전처리 작업을 수행한다.

이러한 전처리 과정에서는 어느 영역을 빈 공간으로 정의할 것인가를 정의하는 것이 중요한 문제이다.

이 빈 공간 경계값을 결정하기 위해 매질 별 영역 분할을 수행한다. n 종류의 소재로 이루어진 물체의 영상을 공기를 포함한 $n + 1$ 종류의 영역으로 구분하기 위해 히스토그램을 기준으로 K-평균 기반 클러스터링을 적용하였다. 산업 영상에서 촬영되는 매질 중 가장 밀도 낮은 부분이 공

기이므로, 이중에 가장 낮은 값의 평균을 갖는 클러스터가 공기 영역을 대표하는 구간이 된다. 실제 공기 영역 제거 과정에서는 부분 볼륨 효과 (partial volume effect)를 고려하여, 공기 주변의 물체 영역이 깎여나가는 것을 방지하기 위해 이 최저 구간의 평균을 경계값으로 설정, 그 이하의 밝기값을 0으로 만든다. 우리가 필요한 것은 정확히 공기를 분할한 결과 데이터가 아니라, 공기 영역의 잡음이 중요도 계산에 영향을 미치는 것을 방지하는 것이 목적이므로 구간 최대값이 아닌 이러한 보수적인 경계값으로도 충분한 결과를 얻을 수 있다. 그림 3.4 는 공기영역 제거 기법 수행 전후의 중요도 측정 결과 변화를 나타낸 것이다. 특히 (d), (e), (f)에서 확연하게 볼 수 있듯이 물체 외곽 영역의 금속 아티팩트로 공기 영역의 대부분이 중요 영역으로 판별되는 문제가 공기 영역 제거 과정을 통해 해결되는 것을 볼 수 있다.

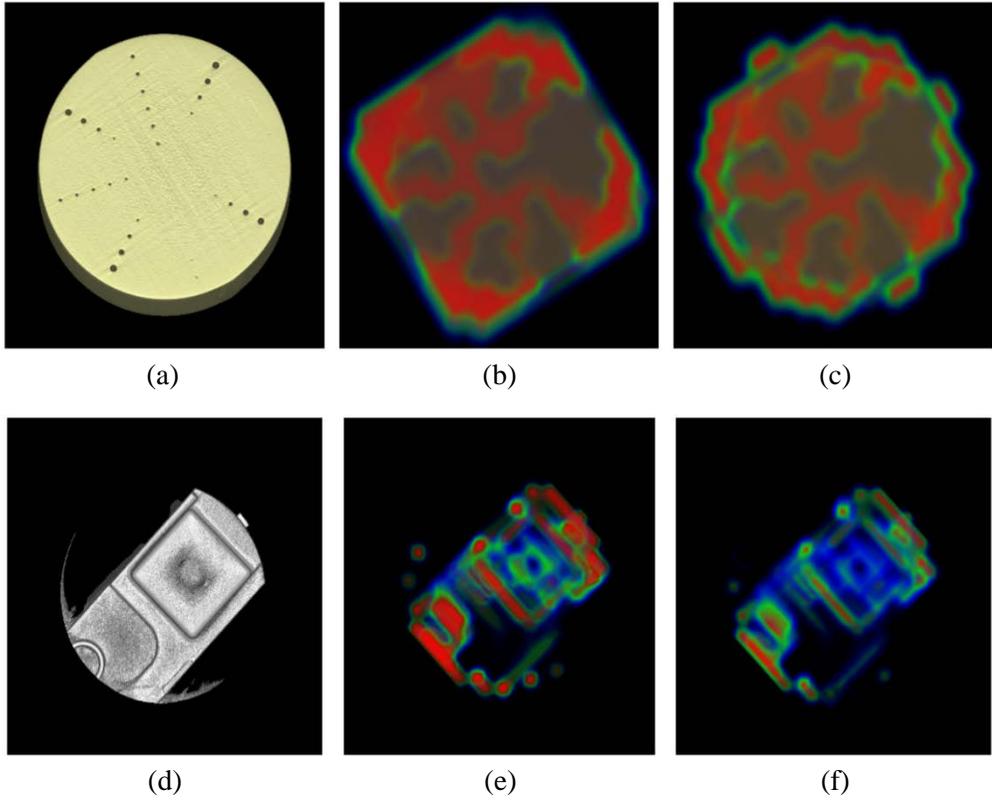


그림 3.4 공기 영역 제거 기법 수행 후의 중요도 측정 결과 변화. (a)(d) 원 볼륨 데이터. (b)(e) 원 볼륨을 이용한 중요도 측정 결과. (c)(f) 공기 영역 제거 기법을 수행한 후 중요도 측정 결과. 컬러 코딩은 중요도가 높은 순에서 낮은 순으로 적색, 녹색, 청색 순으로 할당되었다.

4장 볼륨 변형, 축소 및 가시화

4.1 질량-스프링 모델 기반 볼륨 변형

볼륨 전체의 각 블록에 대해 중요도 값을 계산하고 나면, 이를 기반으로 볼륨 변형을 수행한다. Wang[28]은 볼륨 변형을 위해 비선형 목적함수 최적화 기법을 사용하였는데, 이 기법은 제약 조건을 설정하기 쉽고 물리적으로 더 정확한 결과를 얻을 수 있지만, 수행 시간이 오래 걸리는 단점이 있다. 볼륨 압축에 물리 변형 시뮬레이션을 사용하는 기법은 엄밀한 물리적 특성을 반영하는 것이 아니라, 중요도 값을 물리적 외력으로 보는 일종의 유추적 기법이므로, 물리적 특성을 잘 반영하는 것은 그다지 큰 장점이 되지 못한다. 따라서, 본 논문에서는 비교적 빠른 시간에 변형 결과를 계산할 수 있는 질량-스프링 기반의 볼륨 변형 모델을 사용하였다.

먼저 볼륨을 잘게 나눈 각 블록의 각 변을 따라 중요도-가중 스프링을

정의한다. 스프링의 정지 길이 L_r 은 해당 스프링이 인접한 블록들의 중요도 값의 평균을 이용해 다음 수식과 같이 정의된다.

$$L_r = 1 \alpha + 2\alpha \frac{\sum_{x \in V(e)} IV(x)}{|V(e)|} \quad (12)$$

여기서 $V(e)$ 는 스프링 e 에 인접한 블록의 복셀의 집합을 나타내며, α 는 사전에 정의된 최대 확장률이다. 그림 4.1은 각 변에 할당된 스프링의 중요도가 어떤 방식으로 계산되는지를 표현하고 있다. 중요도가 높은 영역 근처에서는 L_r 이 초기 길이보다 긴 값으로 할당되고(그림 4.1 (a)), 시뮬레이션 과정에서 이 길이를 목표로 확장하게 된다. 반면, 중요도가 낮은 영역 부근의 스프링에는 그림 4.1 (b)와 같이 초기 길이보다 짧은 정지 길이가 할당되고, 결과적으로 축소하는 힘이 작용하게 된다.

α 는 스프링이 중요도 값에 따라 축소되거나 확장할 수 있는 최소 및 최대치를 결정하는 계수이다. 이는 다중-해상도 기법의 단계 수와 마찬가지로, 중요한 부분을 얼마나 더 보존할 것인가를 조절하는 변수로 이용될 수 있다.

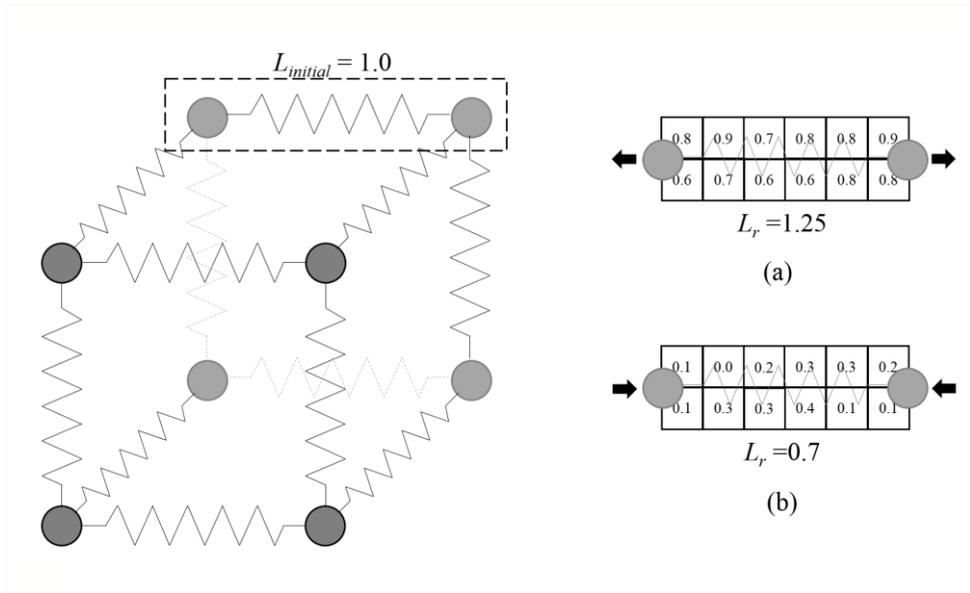


그림 4.1 중요도에 따른 스프링의 정지 길이 예시. 스프링이 통과하는 영역의 중요도를 이용해 수식 (12)에 따라 정지 길이가 계산된다. 중요도가 높은 영역에 위치한 스프링은 (a)와 같이 정지 길이가 1보다 크고, 중요도가 낮은 영역의 스프링은 (b)와 같이 정지 길이가 1보다 작아진다.

한편 본 논문에서 사용하는 육면체 격자 형태의 모델로 볼륨 데이터를 정의하는 경우, 단순히 육면체 변에 스프링을 할당하는 것만으로는 시뮬레이션 시에 전체 형태를 유지할 수 없다. 그림 4.2가 본 기법에서 사용된 스프링 모델을 도식화한 것인데, 육면체 격자 구조를 유지하고 노드를 연

결하는 스프링이 접히는 것을 막기 위해 Chen의 격자 모델에 추가로 두 종류의 스프링연결을 정의하였다.

먼저, 육면체의 각 면 위와 내부를 연결하는 대각 방향 스프링(그림 4.2(b), (c))은 육면체 자체의 형태를 유지하는 역할을 한다. 이 스프링들이 없이 육면체의 각 변에 해당하는 스프링으로만 모델을 정의할 경우, 변형 과정에서 서로 다른 연결 관계인 변들이 겹쳐지면서 결과적으로 변형된 볼륨 상에 공간적 불연속성을 초래할 수 있다.

두 번째로, 한 노드와 격자 거리로 2만큼 떨어져 있는 노드를 연결하는 이중 변(double node) 스프링이 추가되었다(그림 4.2(d)). 이 스프링의 정지 길이는 스프링이 지나가는 영역의 두 개의 격자 스프링의 정지 길이의 합으로 정의된다. 이 스프링은 격자 축 상의 노드 간 순서 관계가 역전되는 것을 방지해, 결과적으로 각 블록간의 인접 관계가 초기 상태에서 변화하지 않도록 유지해주는 역할을 한다.

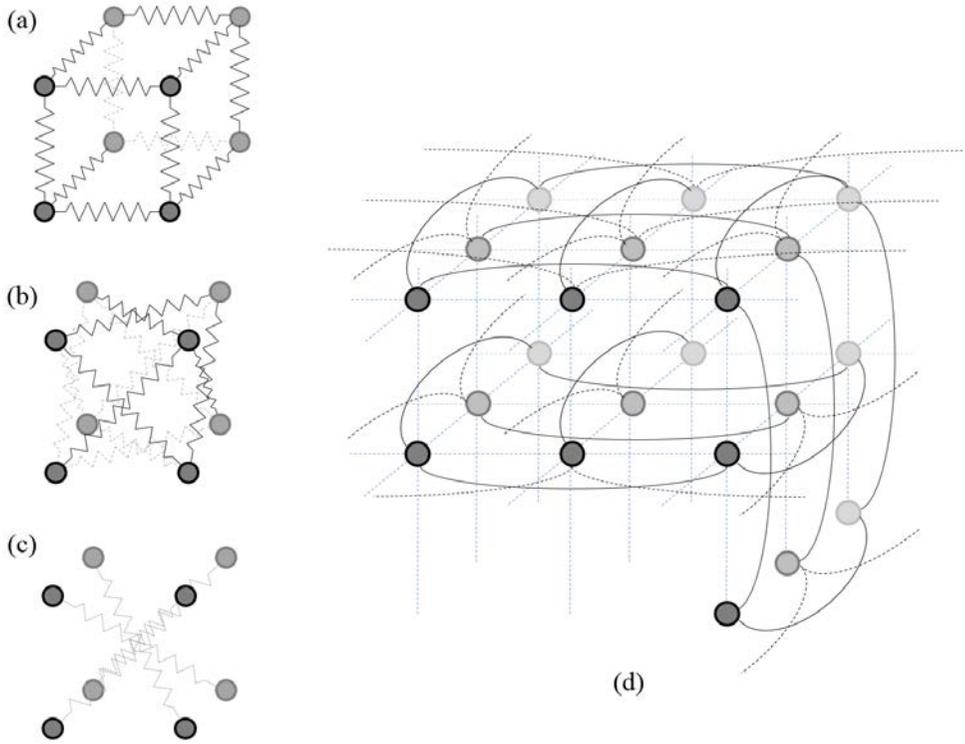


그림 4.2 볼륨 변형을 위한 육면체 스프링 모델. (a) 격자 스프링 (b) 2차원 대각 방향 스프링 (c) 3차원 대각 방향 스프링 (d) 이중 변 스프링

또 한 가지 고려해야 할 조건이 경계 조건이다. 아무리 볼륨 변형이 일어나더라도, 전체 볼륨 데이터의 경계를 구성하는 여섯 면은 변형되어서는 안 된다. 이것이 보존되지 않으면 데이터를 격자 형태로 저장할 수 없기 때문이다.

이를 위해, 볼륨 데이터의 가장자리에 위치한 노드들에는 다른 노드들과 달리 자유도(dgree of freedom)에 제약을 받는다. 먼저 원 볼륨 육면체의 꼭지점에 해당하는 8개의 노드들은 변형 과정에서 위치가 전혀 변하지 않아야 한다 (DoF=0). 볼륨 육면체의 변 위에 있는 노드들은 DoF=1로 정의할 수 있는데, 항상 그 변을 따라서만 움직일 수 있다. 마지막으로 그 외 볼륨 육면체의 여섯 면 상에 위치한 점들은 해당 면 위에서만 움직일 수 있으며 2의 DoF를 가진 것으로 볼 수 있다.

이와 같은 경계 조건을 설정하기 위해, 본 논문에서는 질점의 질량을 볼륨 데이터 좌표계의 세 축 방향을 따르는 3차원 직교 질량으로 분리하였다. 여기서 움직일 수 없는 축의 직교 질량을 무한에 가까운 값으로 둬으로써, 사실상 해당 방향의 이동을 막는 역할을 하도록 하였다.

이렇게 질량-스프링 시스템이 정의되면, 2.3절에서 서술한 수식 (2)을 이용해 다음 방정식의 시간 적분을 계산해나가는 방법으로 시뮬레이션을 수행할 수 있다.

$$m_i \frac{d^2 \mathbf{x}_i}{dt^2} + c \frac{d\mathbf{x}_i}{dt} - \sum_{j \in \mathcal{S}_j} k(\|\mathbf{x}_i - \mathbf{x}_j\| - l_r) \frac{\mathbf{x}_i - \mathbf{x}_j}{\|\mathbf{x}_i - \mathbf{x}_j\|} = 0. \quad (13)$$

이 모델은 초기 외력(external force)이 0인 상태로 정의된다. 따라서, 시뮬레이션 과정에서 이 시스템은 오로지 초기 스프링 길이가 정의된 정지 길이로 확장/수축하는 힘에 의해서만 변형이 일어나게 된다.

본 논문에서는 GPU의 고속 병렬처리 기능을 활용하기 위해, 명시적 Verlet 적분 (explicit Verlet integration) 방법[44]을 사용하였는데, 여기서 유도되는 시간 적분 식은 다음과 같다.

$$\mathbf{x}_i(\mathbf{t} + \Delta \mathbf{t}) = 2\mathbf{x}_i(\mathbf{t}) - \mathbf{x}_i(\mathbf{t} - \Delta \mathbf{t}) + \frac{1}{2} \mathbf{F}_i \Delta \mathbf{t}^2 \quad (14)$$

질량-스프링 시뮬레이션이 완료되면, 변형된 격자 노드 집합을 얻을 수 있다. 이 노드들을 볼륨 블록 변형을 위한 제어점(control point)으로 보고, 볼륨 데이터를 이 제어점 기준으로 워핑하면 최종적으로 변형된 볼륨 데이터를 얻는다.

4.2 볼륨 축소

볼륨 변환이 완료되면, 이 변환 볼륨에 대해 일반적인 균등 다운샘플링을 수행, 크기를 줄인다. 다운샘플링 방식 자체는 데이터 특성을 고려하지 않은 데이터 축소 기법이지만, 변환된 볼륨에 이미 중요한 영역이 확대된 형태로 존재하고 있으므로 실질적으로 다른 영역에 비해 정보량이 더 많이 보존될 수 있다. 다운샘플링은 일반적인 삼선형 보간(trilinear interpolation)방법을 사용하였는데, 이는 역변환과 렌더링 단계에서 GPU를 이용한 고속 처리를 위해서는 하드웨어 가속이 지원되는 선형 커널을 사용하는 것이 유리하기 때문이다.

4.3 역변형 및 렌더링

지금까지 설명한 과정을 통해, 축소된 크기의 변형된 볼륨 데이터와, 볼륨 변형에 사용된 블록 단위 위치 변환 정보를 얻게 된다. 변형된 볼륨을 가시화하여 원 볼륨과 같은 형태의 결과를 얻기 위해서는 역변형 과정을 거쳐야 한다. 역변환은 그림 2.3에서 설명한 렌더링 파이프라인의 과정 중에서, 샘플링 단계에서 추가적인 좌표 변환을 한번 더 수행하는 것으로 간단하게 구현할 수 있는데, 그림 4.3이 이 과정을 표현하고 있다. 현재 광선이 지나가는 샘플링 좌표 p 에 해당하는 위치는, 해당 점이 위치한 블록 내부의 질량 중심 좌표(barycentric coordinate)로 표현될 수 있다. 이 변환은 원 볼륨의 블록 구조가 단일 크기의 격자 형태이므로, 단순한 나머지 연산을 통해 오버헤드 없이 구할 수 있다. 그런데, 이 블록 내부의 질량 중심 좌표계의 기저 위치(basis position)로 정의되는 여덟 개의 점이 블록 변환을 위한 시뮬레이션에 사용된 노드 그 자체이므로, 단순히 블록 단위 위치 변환 테이블 T 를 참조하는 것만으로 각 기저 위치들 변형된 볼륨 상에서 어느 지점에 위치하는지를 바로 알아낼 수 있다.

따라서 변환 볼륨 상에서 현재 샘플링 지점 p 에 대응되는 지점 p' 는 이

변형된 기저 위치에 앞에서 구한 질량 중심 좌표 가중치를 이용한 삼선형 보간을 수행하는 것만으로 바로 계산할 수 있다.

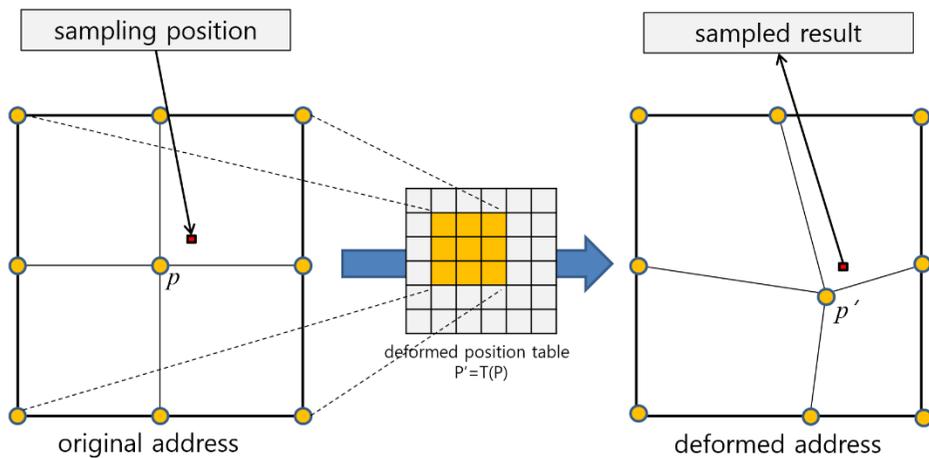


그림 4.3 변환 위치 테이블을 이용한 볼륨 역변환 샘플링 과정. 현재 광선의 위치에 해당하는 좌표를 변환 위치 테이블을 참조해 이동시키면, 변환된 볼륨 상에서의 좌표를 얻을 수 있다.

변환 테이블 T 는 텍스처 메모리 형태로 GPU에 적재되는데, 원 볼륨 데이터와 달리 블록 단위의 노드 정보만 가지고 있으므로 매우 작은 용량을 가지며, 높은 캐시 연관성(cache coherency)을 가지게 된다. 이로 인해, 다음

장의 실험 결과에서 설명하겠지만 최신의 그래픽스 하드웨어에서는 이 테이블에 대한 액세스가 거의 오버헤드를 발생시키지 않는다.

5장 실험 및 결과

이 장에서는 본 연구에서 제한한 기법의 성능을 분석한다. 실험은 Intel i7 2.67 GHz 프로세서와 8GB의 주 메모리를 가진 데스크톱 시스템에서 수행되었다. GPU기반 가속 및 가시화를 위해 1.5GB의 그래픽스 메모리가 내장된 nvidia GeForce 480GTX 그래픽 보드를 사용하였다.

실험에 사용된 데이터의 종류와 크기는 표 5.1에 기술되어 있다. 실험에 사용된 모든 데이터는 자연적 혹은 인위적으로 생성된 기공, 균열, 천공 등을 포함하고 있다. Gas governor (HE) 데이터는 Gas governor 데이터와 동일한 부품을 더 강한 X-선 세기로 촬영한 데이터이다. 성능 평가는 본 논문에서 제안한 방법($R_{Proposed}$)과, 균일 다운샘플링 방법(R_{DS}), 그리고 LOD 기반의 다중해상도 압축 기법(R_{MR})[45] 과의 비교를 통해 이루어졌다.

표 5.1 실험 데이터 명세

| 데이터 | 크기 해상도 | 블록 개수 |
|-------------------|-------------|----------|
| Bored metal | 512×512×512 | 26×26×26 |
| Gas governor | 976×976×320 | 49×49×17 |
| Gas governor (HE) | 976×976×320 | 49×49×17 |
| Engine block | 672×672×960 | 34×34×48 |
| Engine block 2 | 976×976×984 | 34×34×35 |
| Piston | 688×688×970 | 35×35×49 |

5.1 화질 평가

제안 방법의 화질을 평가하기 위해 실험 데이터를 단순 균일 다운샘플링 기법(R_{Ds})으로 1/64 크기로 줄였다. 제안방법($R_{Proposed}$)은 먼저 중요도 측정을 통해 볼륨을 변환하고 역시 다운샘플링 방법으로 1/64로 크기를 줄인 후, 이를 역변환 하면서 렌더링 한 결과이다.

그림 5.1은 표면에 작은 주조 결함이 있는 부품을 촬영한 볼륨 데이터를 렌더링 한 결과를 비교한 것이다. R_{Ds} 의 결과에서는 해당 부분의 세부 모양이 거의 남아있지 않은 반면, 제안 방법에서는 크기가 1/64로 줄었음에도 해당 부분이 남아 있는 것을 확인할 수 있다.

그림 5.2는 산업 영상 CT 테스트를 위해 인위적으로 표면에 여러 크기의 기공을 타공한 금속 원반을 촬영한 볼륨 데이터를 가시화한 것이다. 단순 다운샘플링 방법을 사용한 (b)에선 특정 크기 이하의 기공은 아예 정보가 사라져버린 반면, 제안 방법을 사용한 (c)에서는 화질의 열화가 있으나 기공의 존재는 충분히 확인할 수 있다.

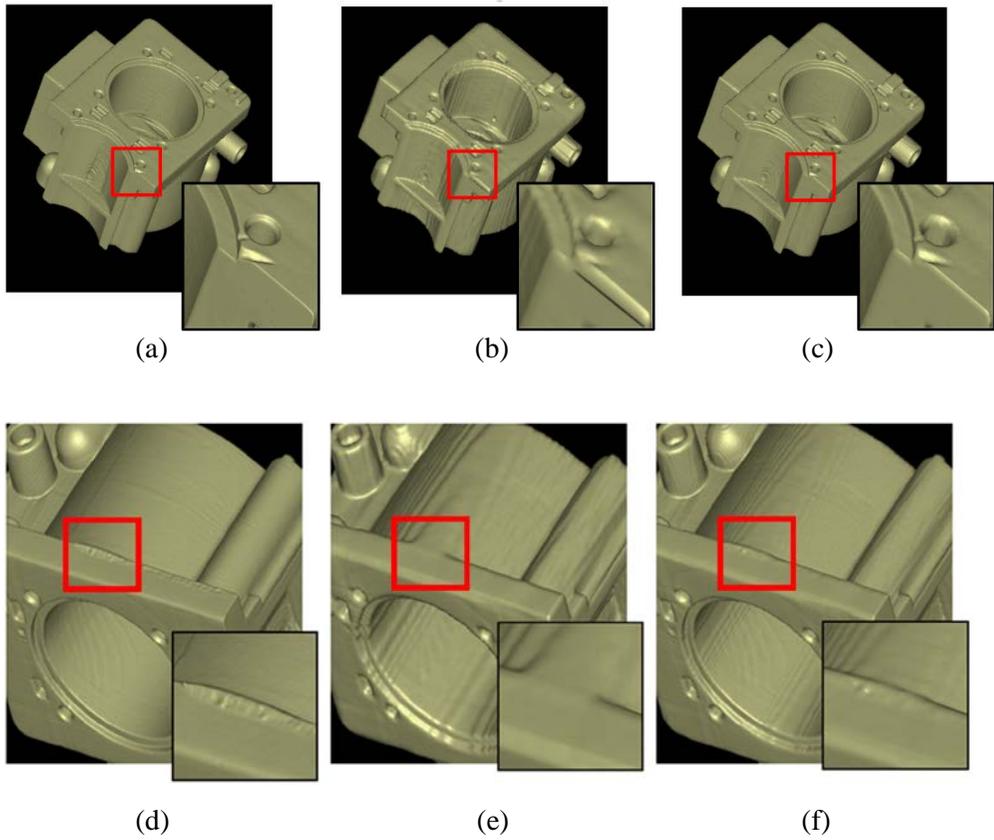


그림 5.1 작은 주조 결함이 있는 Gas governor의 렌더링 결과 영상. (a)(d) 원 볼륨 데이터. (b)(e) 단순 다운샘플링 기법(R_{DS}). (c)(f) 제안 방법($R_{Proposed}$).

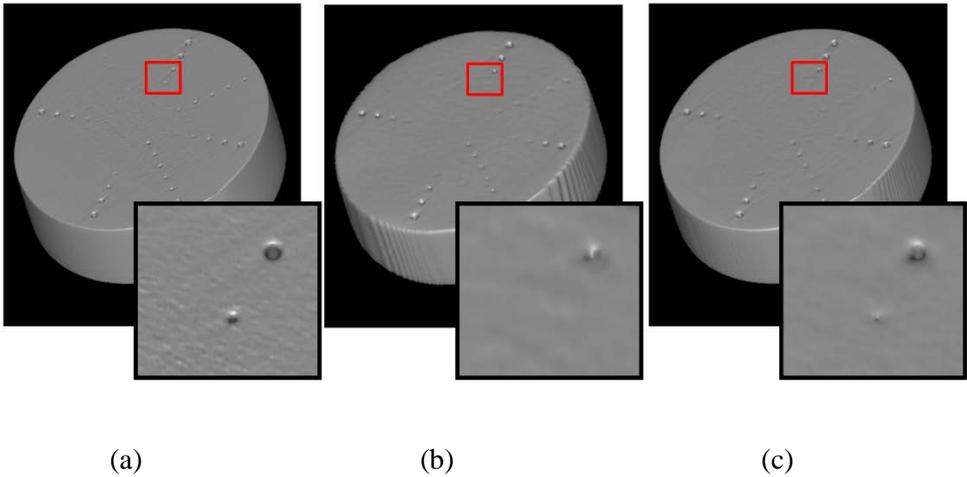


그림 5.2 인위적인 기공이 타공된 금속 물체 데이터의 렌더링 결과 영상. (a) 원 볼륨 데이터. (b) 단순 다운샘플링(R_{DS}). (c) 제안 방법($R_{Proposed}$).

그림 5.3은 제안 방법이 다중-해상도 기반 압축 기법에 비교해 갖는 경계면 연속성을 보여주는 실험 결과이다. 제안방법은 마찬가지로 원 볼륨을 1/32 크기로 줄였으며, 다중-해상도 기반 기법은 먼저 볼륨을 0단계의 원 볼륨, 1/8 크기의 1단계 볼륨, 1/64 크기의 2단계 볼륨으로 나누고, 전체 볼륨 크기가 원 볼륨의 1/32가 되도록 블록 별 중요도를 기준으로 단계를 선택해 맞추도록 하였다. (b)의 다중-해상도 기반 기법을 사용한 결과에서는 인접 블록의 단계가 차이 나는 부분에서 확연히 드러나는 불연속면이

보인다. 반면, 제안 방법은 (b)와 비슷한 수준의 세부 모양을 유지하면서도 이러한 불연속성이 없는 것을 확인할 수 있다.

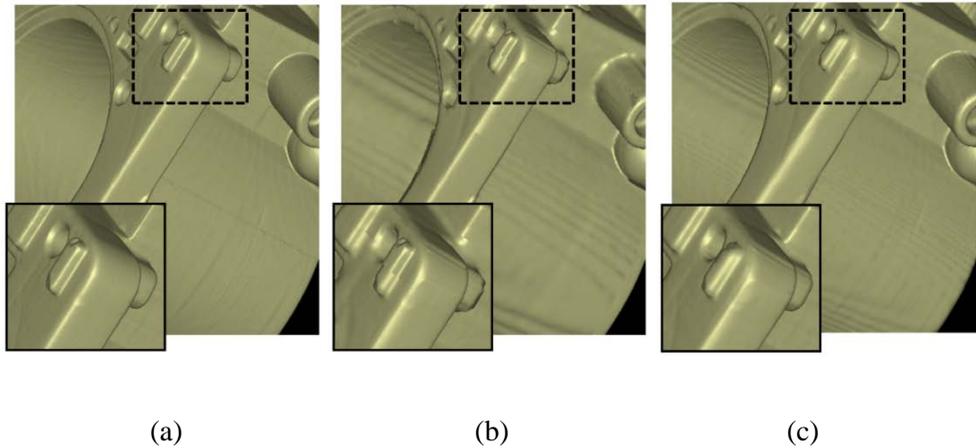


그림 5.3 다중-해상도 기반 압축 기법과의 결과 영상 비교. (a) 원 볼륨 데이터. (b) 다중-해상도 기반 기법(R_{MR}). (c) 제안 방법($R_{Proposed}$).

제안 방법이 정량적으로 어느 정도로 화질 개선 효과가 있는지를 확인하기 위하여, 제안 방법과 단순 다운 샘플링, 다중-해상도 기반 기법의 세 가지 방법으로 동일한 크기의 결과 영상을 볼륨 축에 정렬된 6방향의 시점에서 렌더링하고 해당 결과 영상을 직접 비교하였다. 표 5.1에 이 결과

영상들에서 계산된 제곱 평균 제곱근 편차 (RMS difference) 값이 정리되어 있다. R_{DS} , R_{MR} , $R_{Proposed}$ 의 평균 RMSD값은 각각 193.3, 92.6, 76.1로, 단순 다운 샘플링 방법, 다중-해상도 방법, 제안 방법 순서로 값이 낮아지는 것을 확인할 수 있었다. 이를 통해, 다른 두 방법에 비해 제안 방법의 렌더링 결과물이 보다 정량적으로 원 볼륨 렌더링 결과에 근접한 것을 확인할 수 있었다.

표 5.2 기법별 제곱 평균 제곱근 편차 (RMSD)

| | R_{DS} | R_{MR} | $R_{Proposed}$ |
|--------------|----------|----------|----------------|
| Bored metal | 152.9 | 72.4 | 52.1 |
| Gas governor | 242.3 | 78.0 | 64.7 |
| Engine block | 175.7 | 91.3 | 79.5 |
| Piston | 202.1 | 128.5 | 108.0 |

5.2 속도 평가

전처리 과정에 걸린 시간에 대한 실험 결과는 표 5.2에 정리되어 있다. 중요도 측정에 소요된 평균 시간은 0.138초였다. Wang [16]의 방법은 소요 시간을 줄이기 위해 다운 샘플링 된 볼륨 데이터를 기반으로 중요도 평가를 수행하였으나, 본 논문에서 제안한 중요도 모델은 원본 볼륨 데이터를 기반으로 충분한 속도를 보여주고 있다.

볼륨 변형은 이 압축 볼륨 렌더링 기법에서 가장 많은 소요 시간을 차지하는 부분이다. 제안 방법에서는 비교적 계산량이 적은 질량-스프링 기반의 변형 모델을 사용하였고, 시뮬레이션의 종료 조건을 다음과 같이 정의하였다.

$$\begin{aligned} n_{iteration} &\geq 1000 \\ or, \max(\epsilon) &\leq 0.5 \end{aligned} \tag{9}$$

$n_{iteration}$ 은 시뮬레이션의 반복 횟수의 상한선을 정의하는 제약조건이며, ϵ 는 한 번의 반복 후 각 노드가 이동한 거리 중 가장 큰 값을 나타낸다. 이 값이 0.5 복셀 이하라는 것은 모든 노드가 수렴하였다는 것을 의미한

다.

변형에 소요된 평균 소요 시간은 34.0 초로 나타났다. 이 부분은 2.2절에서 언급한 전처리 부분에 해당하므로 일반적인 경우 소요 시간이 실시간일 필요는 없다. 그러나, 생산 공정 상에서 실시간 촬영 후 바로 가시화를 수행할 경우, 여기에 소요되는 시간도 최대한 줄일 필요성이 실시간에 근접할 필요가 있다. 소요 시간이 실시간일 필요는 없으나, 사용자가 볼륨 데이터를 선택한 후 최초로 결과 영상이 나오기까지 걸리는 지연 시간에 해당하므로, 수 분 단위 이상의 시간이 소요되는 Wang[16]의 비선형 목적 함수 최적화 방식의 변형에 비해 의미 있는 속도 차이라고 볼 수 있다.

표 5.3 데이터 별 중요도 측정 및 볼륨 변환 소요 시간

| | 격자 해상도 | 중요도 측정 | 볼륨 변형 |
|-------------------|-----------|-----------|----------|
| Bored metal | 26×26×26 | 0.097 | 28.2 |
| Gas governor | 49×49×17 | 0.140 | 32.3 |
| Gas governor (HE) | 49×49×17 | 0.155 | 37.2 |
| Engine block | 34×34×48 | 0.155 | 37.2 |
| Engine block 2 | 34×34×35 | 0.311 | 67.7 |
| Piston | 35×35×49 | 0.161 | 38.1 |

표 5.4는 압축 해제 및 렌더링에 소요된 시간을 보여주고 있다. 실험에서는 조기 광선 종료법(ERT)외에 다른 최적화 기법을 사용하지 않은 순수한 GPU 기반 광선 추적법을 사용하였다. 1024×1024 크기의 결과 영상을 얻는데에 걸린 평균 시간은 원 볼륨의 경우 평균 초당 4.44 프레임이다. 1/64로 크기가 줄어든 볼륨 데이터를 사용하는 경우, 샘플링 과정에서 캐시 적중률이 매우 높아지므로 성능이 크게 향상되며, 이는 단순 다운 샘플링을 한 1/64 볼륨 데이터를 사용한 볼륨 렌더링의 평균 성능이 초당 26.8프레임인 것에서 확인할 수 있다.

한편, 제안 방법을 사용한 1/64 볼륨의 경우 25.2 프레임으로 나타났다. 제안 방법에서는 렌더링 과정에서 볼륨 압축 해제가 동시에 이루어지므로 측정된 렌더링 속도는 볼륨 압축 해제에 걸리는 소요시간이 포함된 결과로 볼 수 있는데, 이는 단순 다운 샘플링 결과에 비해 약 4~9%의 속도 저하를 나타내는 수치로서 화질 개선 효과를 고려하면 용인 가능한 수준이다. 반면, 비교를 위해 실험한 다중 해상도 기법 방식 가시화의 경우 12~22%의 속도 저하가 일어나는데, 이는 인접한 영역이 다른 레벨의 블록인 경우 실제 물리적 메모리 공간상에서의 지역성이 떨어지게 되고, 이로 인해 캐시 성공률이 낮아지기 때문인 것으로 보인다.

표 5.4 렌더링 소요 시간 (1024×1024 영상, 초당 프레임 수)

| | 원 볼륨 | 1/64 볼륨 (R_{DS}) | 1/64 볼륨 ($R_{Proposed}$) | 1/64 볼륨 (R_{MR}) |
|-------------------|------|-------------------------|-------------------------------|-------------------------|
| Bored metal | 8.29 | 52.58 | 50.28 | 44.76 |
| Gas governor | 4.61 | 25.25 | 23.04 | 20.57 |
| Gas governor (HE) | 4.58 | 25.62 | 23.18 | 16.94 |
| Engine block | 3.62 | 21.19 | 20.73 | 18.84 |
| Engine block 2 | 2.62 | 19.44 | 18.68 | 17.08 |
| Piston | 2.94 | 16.99 | 15.22 | 15.22 |

5.3 파라미터 연구

3장의 중요도 측정 과정에는 여러 종류의 파라미터들이 이용된다. 이 절에서는 이 파라미터 값이 결과에 어떤 영향을 미치는지 실험한 결과에 대해 논한다.

그림 5.4는 GLCM 거리에 따라 2차원 영상에서 GLCM 균일도 측정 결과 영상이 어떻게 달라지는 지를 보여준다. 물체의 외곽 형태와 비교적 큰 결함들은 거리 값에 관계 없이 잘 표현되는 것을 볼 수 있다. 그러나, 붉은 사각형으로 표시된 비교적 크기가 작고 부분 블룸 효과의 영향을 강하게 받은 결함들은 거리가 2나 3인 경우에는 보이지 않는 것을 볼 수 있다.

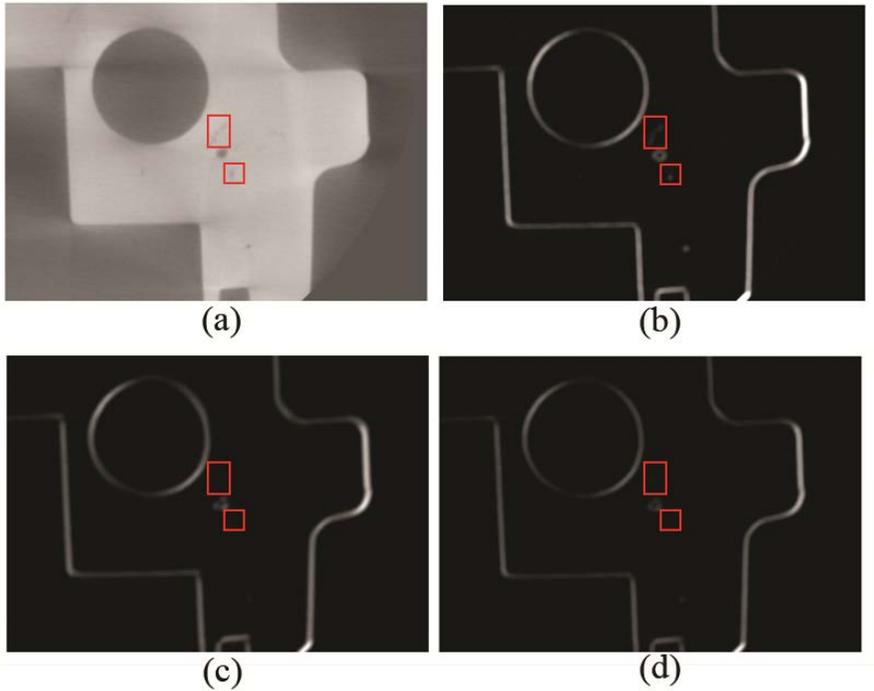


그림 5.4 GLCM 거리에 따른 GLCM 균일도 측정치의 비교. (a) 원영상 (b) $d = 1$. (c) $d = 2$. (d) $d = 3$.

표 5.5 는 이 데이터로 볼륨 변환을 수행해 렌더링한 결과 영상에서 RMSD 를 구해 비교한 결과이다. 여기서도 거리가 1 일 때에 가장 원 볼륨의 결과에 근접한 결과가 나오는 것을 확인할 수 있다.

표 5.5 GLCM 거리에 따른 RMSD 비교

| | $d = 1$ | $d = 2$ | $d = 3$ |
|-------------------|---------|---------|---------|
| Bored metal | 52.1 | 54.8 | 54.1 |
| Gas governor | 64.7 | 68.9 | 69.3 |
| Gas governor (HE) | 59.3 | 62.8 | 61.9 |
| Engine block | 79.5 | 83.1 | 82.2 |
| Engine block 2 | 86.5 | 90.3 | 91.1 |
| Piston | 108.0 | 121.4 | 127.2 |

3.2절에서 언급했듯이, 수식 w 는 지역적 비균일성과 전역적 비균일성을 어느 비율로 반영할지를 결정하는 가중치이다. w 가 0.5 이상인 경우, 상대적으로 GLCM 기반 통계량이 대표하는 지역적 텍스처 특성의 비중은 줄어들게 되고, 전역적 특성이자 1차 순서통계량인 밝기값 분산의 영향력이 커지게 된다. w 가 0.5인 경우 두 항이 같은 비율로 중요도에 반영된다.

그림 5.5는 가중치 w 의 변화에 따른 렌더링 결과에서 중요도가 높은 영역을 확대하여 비교한 것이다. Bored metal 데이터의 경우 $w=0.5$ 인 경우에 극적으로 결과가 좋은 것을 볼 수 있고, Gas governor 데이터의 경우는 $w=0.2$ 인 경우와 $w=0.5$ 인 경우가 비슷하나 $w=0.8$ 인 경우는 화질이 눈에 띄

게 나빠진 것을 볼 수 있다.

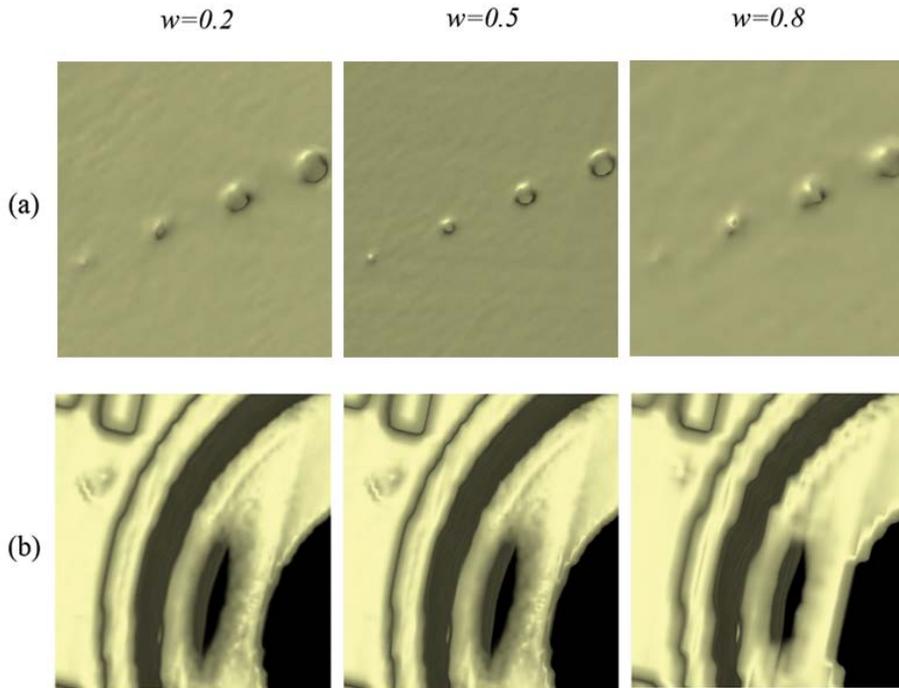


그림 5.5 가중치 w 의 변화에 따른 결과 영상 비교. (a) Bored metal. (b) Gas governor.

이를 정량적으로 검증하기 위해, 실제로 결함이나 기공이 포함된 블록 50개를 미리 수작업으로 선별한 뒤, 이 블록들이 중요도 계산과 볼륨 변

형을 거친 후 원래 체적에 비해 얼마나 확장되었는지를 계산하였다. w 가 이러한 중요 영역을 잘 선별하도록 중요도 계산에 반영되었다면 체적이 더 크게 확장되었을 것이다. 이 결과가 표 5.6에 정리되어 있다. 데이터에 따라 정도의 차이는 있으나, 대부분의 경우 $w=0.5$ 부근에서 가장 좋은 결과를 보이는 것을 확인할 수 있었다.

표 5.6 가중치 w 에 따른 중요 블록의 평균 확장률 비교

| | 0.2 | 0.3 | 0.4 | 0.5 | 0.6 | 0.7 | 0.8 |
|-------------------|------|------|------|------|------|------|------|
| Bored metal | 2.89 | 2.93 | 3.11 | 3.25 | 2.71 | 2.27 | 1.92 |
| Gas governor | 2.82 | 2.83 | 2.90 | 2.84 | 2.13 | 1.56 | 1.55 |
| Gas governor (HE) | 2.89 | 3.04 | 2.98 | 2.75 | 1.88 | 1.74 | 1.40 |
| Engine block | 2.16 | 2.41 | 2.88 | 2.34 | 2.58 | 1.88 | 1.29 |
| Engine block 2 | 1.98 | 2.19 | 2.33 | 2.32 | 1.59 | 1.24 | 1.10 |
| Piston | 3.01 | 2.98 | 3.07 | 3.10 | 3.03 | 2.14 | 2.42 |

6장 결론

6.1 요약

본 논문에서는 3차원 산업 CT 영상 데이터를 효과적으로 압축하여 실시간 가시화하는 방법을 제안하였다. 제안 방법은 볼륨 데이터 내부에서 어느 영역이 실질적으로 유의미한 부분인지를 판별하기 위해 GLCM 텍스처 분석 기반의 중요도 모델을 제시하였으며, 이를 기반으로 질량-스프링 모델 기반의 볼륨 변형을 수행, 중요하지 않은 영역의 정보를 희생하는 대신, 중요 영역이 점유하는 공간적 크기를 늘이는 방법으로 압축 시 손실을 줄이는 결과를 얻을 수 있도록 하였다. 또한, 그래픽스 하드웨어를 이용하여 이를 실시간으로 복원, 렌더링 하는 효과적인 방법도 제시하였다.

실제 촬영한 산업 영상 데이터를 이용한 실험을 통해, 제안한 방법이 균일 다운샘플링 방법에 비해 작은 결함들을 잘 보존되는 것을 확인하였

다. 또한, 화질 비교를 통해 기존의 LOD 기반 압축 기법에서 일어나는 경계면 불연속 현상이 일어나지 않는 것을 보였고, 결과적으로 이러한 불연속성을 제거함으로써 결과 영상 전체를 원본과 비교한 오차 측정에서 더 뛰어난 결과를 보이는 것을 확인하였다. 이러한 불연속성을 별도로 처리로 해결한 LOD 기반 방법에 비해서는 속도 면에서 우월함을 보였다.

6.2 향후 연구

본 방법에서 사용한 볼륨 변환은 2.2절에서 설명한 볼륨 압축 파이프라인에서 데이터 압축 전 전처리에 해당하는 데이터 부호화에 가까우며, 실제 데이터 크기를 줄이는 데 사용한 균일 다운 샘플링 기법은 수행 속도 문제로 선택하였으나 이 과정 자체에서는 데이터 특성을 고려하지 않고 일률적인 정보 손실이 이루어진다.

따라서 실시간으로 압축 해제가 가능한 데이터 특성 기반 압축 알고리즘을 제안한 볼륨 변형 기법에 결합할 수 있다면, 좀 더 중요 영역의 정보 손실을 줄일 수 있는 압축 볼륨 렌더링이 가능할 것으로 예상된다.

참고문헌

- [1] R. Krupka, T. Waltz, and A. Ettemeyer, "Industrial applications of shearography for inspections of aircraft components," in *Proceedings of SPIE*, 2003, pp. 637-642.
- [2] N. Wylie, S. R. Wylie, J. D. Cullen, M. Al-Jader, A. I. Al-Shamma'a, and A. Shaw, "NDE system for the quality control of spot welding in the automotive industry," in *Sensors Applications Symposium (SAS), 2010 IEEE*, 2010, pp. 73-78.
- [3] R. Hanke, T. Fuchs, and N. Uhlmann, "X-ray based methods for non-destructive testing and material characterization," *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, vol. 591, pp. 14-18, 2008.
- [4] F. Xu and K. Mueller, "Accelerating popular tomographic reconstruction algorithms on commodity PC graphics hardware," *Nuclear Science, IEEE Transactions on*, vol. 52, pp. 654-663, 2005.
- [5] M.-C. Lee, W.-T. Chen, C.-T. Lin, M.-H. Yang, and J.-Y. Lai, "Detection of micro defects in 3dic packages by means of non-destructive 3D X-ray," in *Microsystems, Packaging, Assembly and Circuits Technology Conference (IMPACT), 2012 7th International*, 2012, pp. 209-211.
- [6] Y. Li, Y. Cai, M. Pacheco, R. C. Dias, and D. Goyal, "Non destructive failure

analysis of 3D electronic packages using both Electro Optical Terahertz Pulse Reflectometry and 3D X-ray Computed Tomography," in *Istfa 2012: Conference Proceedings from the 38th International Symposium for Testing and Failure Analysis*, 2012, p. 95.

- [7] S. Ganapathy and T. Dennehy, "A new general triangulation method for planar contours," *ACM Siggraph Computer Graphics*, vol. 16, pp. 69-75, 1982.
- [8] H. Hoppe, "Progressive meshes," in *Proceedings of the 23rd annual conference on Computer graphics and interactive techniques*, 1996, pp. 99-108.
- [9] M. Garland and P. S. Heckbert, "Surface simplification using quadric error metrics," in *Proceedings of the 24th annual conference on Computer graphics and interactive techniques*, 1997, pp. 209-216.
- [10] W. E. Lorensen and H. E. Cline, "Marching cubes: A high resolution 3D surface construction algorithm," in *ACM Siggraph Computer Graphics*, 1987, pp. 163-169.
- [11] L. Westover, "Footprint evaluation for volume rendering," in *ACM Siggraph Computer Graphics*, 1990, pp. 367-376.
- [12] M. Levoy, "Display of surfaces from volume data," *Computer Graphics and Applications, IEEE*, vol. 8, pp. 29-37, 1988.
- [13] R. A. Drebin, L. Carpenter, and P. Hanrahan, "Volume rendering," in *ACM Siggraph Computer Graphics*, 1988, pp. 65-74.
- [14] J. F. Blinn, "A generalization of algebraic surface drawing," *ACM Transactions on Graphics (TOG)*, vol. 1, pp. 235-256, 1982.
- [15] J. T. Kajiya and B. P. Von Herzen, "Ray tracing volume densities," in *ACM SIGGRAPH Computer Graphics*, 1984, pp. 165-174.

- [16] H. Hege, T. Höherer, and D. Stalling, "Volume Rendering," 1994.
- [17] P. Ning and L. Hesselink, "Vector quantization for volume rendering," in *Proceedings of the 1992 workshop on Volume visualization*, 1992, pp. 69-74.
- [18] S. Dunne, S. Napel, and B. Rutt, "Fast reprojection of volume data," in *Visualization in Biomedical Computing, 1990., Proceedings of the First Conference on*, 1990, pp. 11-18.
- [19] M. Levoy, "Volume rendering using the Fourier projection-slice theorem," in *Proceedings of the conference on Graphics interface'92*, 1992, pp. 61-69.
- [20] B. L. Yeo and B. Liu, "Volume rendering of DCT-based compressed 3D scalar data," *Visualization and Computer Graphics, IEEE Transactions on*, vol. 1, pp. 29-43, 1995.
- [21] S. Muraki, "Volume data and wavelet transforms," *IEEE Computer Graphics and Applications*, vol. 13, pp. 50-56, 1993.
- [22] T. Kim and Y. Shin, "An efficient wavelet-based compression method for volume rendering," in *Computer Graphics and Applications, 1999. Proceedings. Seventh Pacific Conference on*, 1999, pp. 147-156.
- [23] M. H. Ghavamnia and X. D. Yang, "Direct rendering of laplacian pyramid compressed volume data," in *Proceedings of the 6th conference on Visualization'95*, 1995, p. 192.
- [24] J. Wilhelms and A. Van Gelder, "Multi-dimensional trees for controlled volume rendering and compression," in *Proceedings of the 1994 symposium on Volume visualization*, 1994, pp. 27-34.
- [25] S. Guthe, M. Wand, J. Gonser, and W. Straßer, "Interactive rendering of large volume data sets," in *Visualization, 2002. VIS 2002. IEEE*, 2002, pp. 53-60.

- [26] M. Weiler, R. Westermann, C. Hansen, K. Zimmermann, and T. Ertl, "Level-of-detail volume rendering via 3D textures," in *Proceedings of the 2000 IEEE symposium on Volume visualization*, 2000, pp. 7-13.
- [27] P. Ljung, C. Lundström, and A. Ynnerman, "Multiresolution interblock interpolation in direct volume rendering," in *Proceedings of the Eighth Joint Eurographics/IEEE VGTC conference on Visualization 2006*, pp. 259-266.
- [28] Y. S. Wang, C. Wang, T. Y. Lee, and K. L. Ma, "Feature-preserving volume data reduction and focus+ context visualization," *Visualization and Computer Graphics, IEEE Transactions on*, vol. 17, pp. 171-181, 2011.
- [29] Y. S. Wang, T. Y. Lee, and C. L. Tai, "Focus+ context visualization with distortion minimization," *Visualization and Computer Graphics, IEEE Transactions on*, vol. 14, pp. 1731-1738, 2008.
- [30] D. Terzopoulos, J. Platt, A. Barr, and K. Fleischer, "Elastically deformable models," in *ACM Siggraph Computer Graphics*, 1987, pp. 205-214.
- [31] J. E. Chadwick, D. R. Haumann, and R. E. Parent, "Layered construction for deformable animated characters," in *ACM Siggraph Computer Graphics*, 1989, pp. 243-252.
- [32] A. Rasmusson, J. Mosegaard, and T. Sangild, "Exploring parallel algorithms for volumetric mass-spring-damper models in cuda," in *Biomedical Simulation*, ed: Springer, 2008, pp. 49-58.
- [33] X. Provot, "Deformation constraints in a mass-spring model to describe rigid cloth behaviour," in *Graphics interface*, 1995, pp. 147-147.
- [34] L. P. Nedel and D. Thalmann, "Real time muscle deformations using mass-spring systems," in *Computer Graphics International, 1998. Proceedings*, 1998,

pp. 156-165.

- [35] U. Kühnapfel, B. Neisius, H. Krumm, and M. Hübner, "CAD-based simulation and modelling for endoscopic surgery," *Proceedings SMIT*, vol. 94, pp. 1-4, 1994.
- [36] B. A. Lloyd, G. Székely, and M. Harders, "Identification of spring parameters for deformable object simulation," *Visualization and Computer Graphics, IEEE Transactions on*, vol. 13, pp. 1081-1094, 2007.
- [37] G. San-Vicente, I. Aguinaga, and J. T. Celigueta, "Cubical Mass-Spring Model Design Based on a Tensile Deformation Test and Nonlinear Material Model," *Visualization and Computer Graphics, IEEE Transactions on*, vol. 18, pp. 228-241, 2012.
- [38] R. Huang, K.-L. Ma, P. McCormick, and W. Ward, "Visualizing industrial CT volume data for nondestructive testing applications," in *Proceedings of the 14th IEEE Visualization 2003 (VIS'03)*, 2003, p. 72.
- [39] M. Hadwiger, F. Laura, C. Rezk-Salama, T. Hollt, G. Geier, and T. Pabel, "Interactive volume exploration for feature detection and quantification in industrial CT data," *Visualization and Computer Graphics, IEEE Transactions on*, vol. 14, pp. 1507-1514, 2008.
- [40] S. Frey and T. Ertl, "Accelerating Raycasting Utilizing Volume Segmentation of Industrial CT Data," in *TPCG*, 2009, pp. 33-40.
- [41] S. Park, B. Kim, J. Lee, J. M. Goo, and Y.-G. Shin, "GGO nodule volume-preserving nonrigid lung registration using GLCM texture analysis," *Biomedical Engineering, IEEE Transactions on*, vol. 58, pp. 2885-2894, 2011.
- [42] R. M. Haralick, K. Shanmugam, and I. H. Dinstein, "Textural features for image

classification," *Systems, Man and Cybernetics, IEEE Transactions on*, pp. 610-621, 1973.

- [43] E. LaMar, B. Hamann, and K. I. Joy, "Multiresolution techniques for interactive texture-based volume visualization," in *Proceedings of the conference on Visualization'99*, 1999, pp. 355-361.
- [44] L. Verlet, "Computer" experiments" on classical fluids. I. Thermodynamical properties of Lennard-Jones molecules," *Physical review*, vol. 159, p. 98, 1967.
- [45] I. Boada, I. Navazo, and R. Scopigno, "Multiresolution volume visualization with a texture-based octree," *The visual computer*, vol. 17, pp. 185-197, 2001.

Abstract

Non-destructive testing is a method which examines the internal structures of industrial components such as various machine parts without dissecting them. Recently, 3D CT based analysis enables more accurate inspection than traditional X-ray based tests. However, manipulating volumetric data acquired by CT is still challenging due to its huge size of the volume data. This dissertation proposes a novel method that reduces the size of 3D volume data while preserving important features in the data. Our method quantifies the importance of features in the 3D data based on gray level co-occurrence matrix (GLCM) texture analysis and represents the volume data using a simple mass-spring model. According to the measured importance value, blocks containing important features expand while other blocks shrink. After deformation, small features are exaggerated on deformed volume space, and more likely to survive during the uniform volume reduction. Experimental results showed that our method well preserved the small features of the original volume data during the reduction without any artifact comparing with the previous methods. Although additional inverse deformation process was required for the rendering of the deformed

volume data, the rendering speed of the deformed volume data was much faster than that of the original volume data.

keywords : Computed Tomography (CT), Volume Data Reduction, Gray Level Co-occurrence Matrix, Importance-based Feature Preservation, Mass-spring Model

student number : 2005-21318