

일반논문-10-15-4-07

## x264와 GPU를 이용한 고속 양안식 3차원 방송 시스템

최정아<sup>a)</sup>, 신인용<sup>a)</sup>, 호요성<sup>a)‡</sup>

### Fast Stereoscopic 3D Broadcasting System using x264 and GPU

Jung-Ah Choi<sup>a)</sup>, In-Yong Shin<sup>a)</sup>, and Yo-Sung Ho<sup>a)‡</sup>

#### 요 약

사용자에게 보다 실감나는 입체감을 제공하는 양안식 3차원 영상을 위해서는 기존 2차원 영상의 두 배에 해당하는 데이터가 필요하므로 이를 고속으로 처리하는데 어려움이 따른다. 본 논문에서는 2차원 영상과 깊이 영상을 입력 영상으로 한 고속 양안식 3차원 방송 시스템을 제안한다. 제안하는 시스템은 전송해야 할 데이터의 양을 줄이기 위해 전송 전에 H.264/AVC 오픈 소스 고속 부호화기인 x264를 이용하여 부호화를 수행한다. 수신단에서는 수신한 비트스트림을 GPU(Graphics Processing Unit)에 내장된 CUDA 비디오 복호기 API를 이용해 설계된 복호기로 고속으로 복호하고, GPU를 이용해 고속으로 가상시점의 영상을 생성하여 양안식 3차원 영상을 재현한다. 제안한 시스템을 이용하면 수신단의 환경에 따라 2차원 디스플레이와 3차원 디스플레이에서 모두 영상을 출력할 수 있다. 컴퓨터 모의 실험을 통해 제안한 시스템이 3차원 양안식 콘텐츠를 초당 최대 24 프레임까지 서비스할 수 있음을 확인했다.

#### Abstract

Since the stereoscopic 3-dimensional (3D) video that provides users with a realistic multimedia service requires twice as much data as 2-dimensional (2D) video, it is difficult to construct the fast system. In this paper, we propose a fast stereoscopic 3D broadcasting system based on the depth information. Before the transmission, we encode the input 2D+depth video using x264, an open source H.264/AVC fast encoder to reduce the size of the data. At the receiver, we decode the transmitted bitstream in real time using a compute unified device architecture (CUDA) video decoder API on NVIDIA graphics processing unit (GPU). Then, we apply a fast view synthesis method that generates the virtual view using GPU. The proposed system can display the output video in both 2DTV and 3DTV. From the experiment, we verified that the proposed system can service the stereoscopic 3D contents in 24 frames per second at most.

Key Words: Fast 3D broadcasting system, fast view synthesis, x264, GPU

#### 1. 서 론

최근 방송과 통신을 위한 정보처리 기술이 빠르게 발전함에 따라 차세대 방송서비스에 대한 관심이 높아지고 있다.

3차원 영상은 기존의 2차원 영상과는 달리 현실에서 보고 느끼는 것과 흡사한 입체감과 몰입감을 주는 새로운 개념의 영상으로, 차세대 영상 문화를 주도할 것으로 기대된다.

기존의 2차원 영상과 차별되는 보다 실감나는 3차원 입체 영상을 제공하기 위해 양안식 비디오(stereoscopic video), 홀로그래피(holography), 다시점 비디오(multi-view video)와 같은 새로운 영상 처리 기술이 연구되고 있다<sup>[1]</sup>. 그 중에서도 두 개의 2차원 화면을 이용하여 확장된 3차원 입체

a) 광주과학기술원 정보통신공학과

Gwangju Institute of Science and Technology

‡ 교신저자 : 호요성(hoyo@gist.ac.kr)

·접수일(2010년3월26일), 수정일(2010년7월2일), 게재확정일(2010년7월13일)

장면을 제공하는 양안식 비디오 기술은 가장 기본적인 입체 영상 제공 방법으로, 동일한 3차원 장면을 두 대의 카메라로 획득하여 보다 입체감 있는 화면을 제공한다.

본 논문에서는 2차원 색상 영상과 깊이 정보로 구성된 2D+깊이 영상의 3차원 콘텐츠를 고속으로 부호 및 복호할 수 있는 3차원 코덱이 탑재된 고속 양안식 3차원 방송 시스템을 개발하였다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 양안식 3차원 영상 및 이를 위한 2D+깊이 영상 포맷에 대해 소개하고, 3장에서 제안한 고속 3차원 방송 시스템의 각 부분을 설명한 후, 제안한 시스템의 구성을 보여준다. 4장에서 제안한 시스템의 성능을 보인 후, 5장에서 결론을 맺는다.

## II. 깊이 영상 기반 양안식 3차원 영상

하나의 색상 영상과 깊이 영상으로 3차원 영상을 재현하기 위해서는 가상시점 영상을 추가로 합성해야 한다. 카메라 위치와 특성에 기반하여 정확한 합성 영상을 얻기 위해서는 영상 기반 렌더링 방법 중의 하나인 3차원 워핑 기술이 필요하다. McMillan이 제안한 3차원 워핑 기술은 그림 1과 같이 카메라 특성과 위치, 깊이 정보 등을 이용하여 원본 영상을 3차원 전역 좌표계로 이동시킨 뒤, 이를 다시 가상시점의 영상 면으로 투영하는 방식이다<sup>2)</sup>.

전역 좌표계와 카메라 좌표계는 초점거리, 화소의 크기, 카메라의 위치 등을 나타내는 물리적인 매개변수로 그 관계를 기술할 수 있다. 전역 좌표계의 한 점  $X$ 가 한 카메라를 통해 투영된 점을  $x$ 라고 하면, 이 두 점간의 관계식은 식 (1)과 같다.

$$x = A[R | t]X \tag{1}$$

여기서  $x$ 와  $X$ 는 영상 면과 전역 좌표계의 화소의 위치를 동차 행렬 형식으로 변환한 벡터이고, 행렬  $A$ 는 전역 좌표계와 카메라 좌표계의 초점거리, 화소의 크기, 카메라의 위치 등을 나타내는 물리적인 매개변수인 카메라의 내부 변수를, 행렬  $R$ 은 카메라의 방향을, 행렬  $t$ 는 카메라의 위치를

의미한다. 그림 1은 3차원 워핑 기술로 카메라 특성과 위치, 깊이 정보를 이용해 원 영상을 3차원 전역 좌표계로 변환하고, 이를 다시 가상시점의 영상으로 재투영한 결과를 보여준다. 그림 1의 왼쪽 부분은 참조 영상의 한 화소인  $(u,v)$ 를 깊이값  $d_{u,v}$ 를 이용하여 전역 좌표계의 한 점  $(x,y,z)$ 로 환원하는 과정이다. 이를 식으로 표현하면 식 (2)와 같다.

$$(x,y,z)^T = R_r A_r^{-1}(u,v,1)^T d_{u,v} + t_r \tag{2}$$

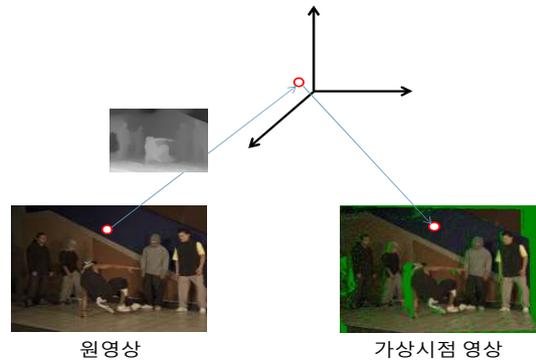


그림 1. 가상시점 영상 합성  
Fig. 1. Virtual view synthesis

여기서 아래첨자  $r$ 은 참조 영상을 의미하고  $(u,v,1)$ 은 참조 영상 화소  $(u,v)$ 의 동차 좌표를,  $(x,y,z)$ 는 전역 좌표계에서의 위치를 의미한다. 이렇게 전역 좌표계로 이동된 점은 그림 1의 오른쪽 부분처럼 다시 가상시점의 영상 면으로 투영되게 된다. 이를 식으로 표현하면, 식 (3)과 같다.

$$(l,m,n)^T = A_v R_v^{-1}(x,y,z)^T d_{u,v} - t_v \tag{3}$$

여기서 아래첨자  $v$ 는 가상시점을 의미하고, 실제 영상 면에서의 좌표는  $(l/n, m/n)$ 이 된다. 참조 영상의 모든 화소를 가상시점으로 재배치하면 최종 가상시점 영상을 얻을 수 있다. 재투영하는 과정이 정확하게 1:1 사상이 아니기 때문에 기하학적인 차이로 인해 빈공간(hole)이 발생하게 된다. 그림 1의 가상시점 영상에서 녹색으로 표시된 부분

이 기하학적 차이로 인해 발생하는 빈공간이다. 중간시점 영상 합성을 위해서는 이 빈공간들을 처리해야 한다.

2D+깊이 영상을 이용하면 전송단의 데이터의 양을 줄일 수 있기 때문에 기존의 네트워크 환경과 호환성이 있다는 장점이 있지만, 수신단에서 가상시점을 합성해야 하므로 복호기 부분의 부담이 커진다는 단점이 있다. 병렬 처리를 이용하여 고속화를 가능하게 하는 GPU를 이용해 복호기의 처리 속도를 개선하여 이러한 문제를 해결할 수 있다.

### III. 고속 양안식 3차원 방송 시스템

#### 1. 2D+깊이 영상의 부호화 및 전송 부분

제안하는 시스템은 보내야 할 데이터를 줄이기 위해 전송 전에 입력 영상을 압축한다. 현존하는 비디오 부호화 표준 중 가장 높은 성능을 보이는 H.264/AVC 참조 소프트웨어 JM(Joint Model)은 고속 부호화 목적이 아닌 성능 개선을 목적으로 개발되었으므로 부호화 속도가 느려 고속 부호화에 적합하지 않다. 따라서 제안하는 시스템에서는 H.264/AVC 표준을 따르는 고속 부호화기인 x264 비디오 코덱을 사용한다<sup>[3]</sup>. x264 비디오 코덱은 VideoLAN의 프로젝트의 일환으로 만들어졌고 복호 기능은 포함하고 있지 않다. SIMD (MMX, SSE, SSE2, SSE3 등) 환경에서 최적화되어 있고, 오픈 소스이므로 라이선스 제약이 없다.

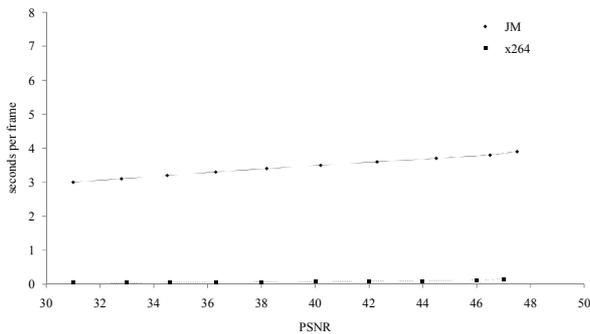


그림 2. JM과 x264의 속도 비교  
Fig. 2. Processing time comparison between JM and x264

그림 2는 x264와 JM 15.1<sup>[4]</sup>의 속도를 비교한 결과이다. 성능 비교는 Intel Core2 Quad CPU @ 2.40 GHz 2.00GB RAM에서 수행하였다. 실험 결과에서 볼 수 있듯이 x264는 JM과 거의 비슷한 화질을 보이면서 부호화 속도는 약 50배 이상 빠르다. 그림 3에서 보듯이, x264는 비트율 관점에서 38 dB 이상의 화질에서는 JM보다 적은 비트율을, 그 이하의 화질에서는 JM보다 많은 비트율을 가진다. 하지만 비트율이 증가하더라도 빠른 처리 속도에 비해 비트율의 증가량이 5% 이내로 무시할만한 수준이므로 고속 시스템을 위해서는 x264를 사용하는 것이 합리적이다.

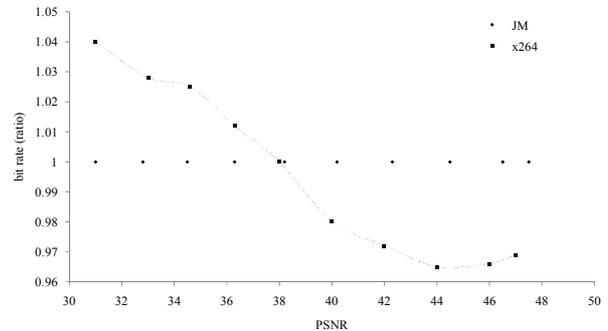


그림 3. JM과 x264의 비트율 비교  
Fig. 3. Bit rate comparison between JM and x264

x264의 입력 영상은 좌측 색상 영상과 그 깊이 영상이다. 수신 단에서 동일한 프레임의 두 영상을 통해 우측 색상 영상을 합성해야 하므로 동기화를 위해 동일한 프레임의 두 영상을 상하로 배치하여 한 번에 전송한다.

#### 2. 수신 및 2D+깊이 영상 복호화 부분

전송단으로부터 데이터가 균일하게 전송되지 않기 때문에 유연한 동작을 위해 버퍼를 두어 복호할 데이터가 항상 존재하도록 하였다. 버퍼의 형태는 Queue의 구조를 이루고 GOP (Group Of Pictures) 별로 묶어 저장된다. 제안하는 시스템에서는 한 GOP로 30 프레임을 사용했다. 한 장의 영상은 적어도 하나의 데이터 패킷으로 구성되기 때문에 고속 시스템을 위해서는 데이터 패킷을 수신하는 함수가 최소 초당 15회 이상 수행되어야 한다. 이를 위해 화면 갱신을 주기적으로 수행하였다.

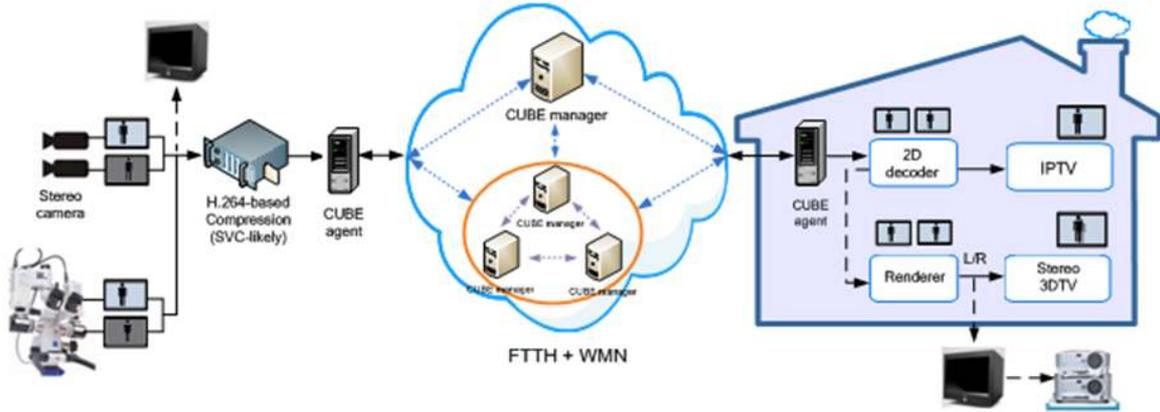


그림 5. 제안한 고속 양안식 3차원 방송 시스템  
Fig. 5. Proposed fast stereoscopic 3D broadcasting system

제안하는 시스템에서는 CUDA 비디오 복호기 API에서 제공하는 함수들을 이용하여 목적 시스템에 맞는 고속 복호기를 설계하였다. 이 API를 통해 NVIDIA 그래픽 카드의 비디오 복호 기능을 사용할 수 있다<sup>5)</sup>.

CUDA 비디오 복호기 API는 CUDA를 기반으로 설계되어 CUDA 내부 기능들과 호환은 물론, 비디오 메모리와 시스템 데이터를 빠르게 복사할 수 있다. 또한, CUDA 비디오 복호기 API를 이용해 MPEG-1, MPEG-2, H.264/AVC 표준으로 부호된 데이터를 고속으로 복호하여 CUDA 내부 메모리로 옮길 수 있다. 제안한 2D+깊이 영상 복호기는 부호된 비트스트림을 수신 받아 복호 대상을 생성하고 한 프레임 단위로 복호하는 구조로 구성되어 있다.

### 3. 가상시점 생성 및 3차원 장면 재현 부분

GPU는 중앙 처리 연산장치(CPU)와는 다르게 내부에 연산장치가 많아 병렬처리를 이용한 고속화에 유리한 구조를 갖고 있다. 본 논문에서는 GPU 기반의 CUDA를 통하여 병렬화된 가상시점 영상 생성 알고리즘을 구현하였다<sup>6)</sup>.

CUDA는 병렬화를 위한 SIMT 구조를 가지고 있어 동일한 명령을 다수의 데이터에 동시에 적용시키는 것이 가능하다. 이 구조를 활용하기 위해서는 데이터 사이에 종속성

이 없어야 하므로 3차원 워핑 후 투영 위치가 겹칠 가능성이 있는 화소들의 분포 특성을 고려하였다. 투영 위치가 겹칠 수 있는 화소들은 원시점과 가상시점이 수평 이동된 구조를 갖기 때문에 시점 이동 방향과 동일하게 수평적으로 분포한다. 이 특성을 이용하여 병렬화의 단위를 그림 4와 같이 세로축으로 묶어 투영 위치가 겹치지 않도록 처리하였다.

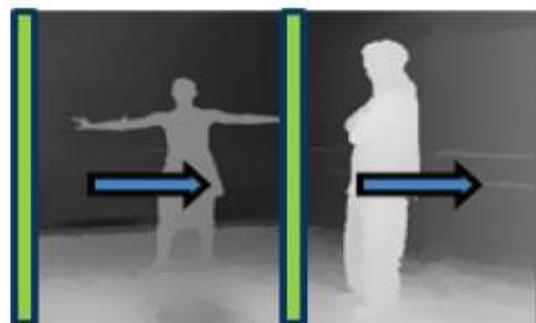


그림 4. 3차원 워핑을 위한 제안한 수직 병렬화 구조  
Fig. 4. Proposed vertical parallel structure for 3D warping

고속 시스템의 GPU 성능을 최적화하기 위해서는 용도에 맞게 메모리를 사용하는 것이 중요하다. 최적의 속도를 내기 위해 자주 참조되는 영상은 GPU의 메모리 중 읽기 전용

인 텍스처 메모리에 위치시켰다. 텍스처 메모리의 경우 부분적인 수정은 불가능하지만 값을 참조하는 속도가 빠르다는 장점이 있다. 따라서 3차원 워핑 시 자주 사용하는 호모그라피 행렬과 참조만 하는 영상을 텍스처 메모리에 위치시켜 고속화하였다.

#### 4. 제안하는 시스템

그림 5는 제안하는 고속 양안식 3차원 방송 시스템의 개념도를 보여준다. 전송 단계에서는 x264를 이용해 2D+깊이 영상으로 구성된 방대한 양의 3차원 콘텐츠를 부호화한다. 고속 시스템을 위해 한 프레임에 대한 부호화가 수행되면 압축된 비트스트림을 전송한다. 수신단에서는 CUDA 비디오 복호기 API를 이용한 복호기로 2D+깊이 영상을 복호하고 복호된 영상을 GPU를 이용해 고속 렌더링을 수행하고, 3차원 콘텐츠를 재현한다.

제안한 시스템을 사용하면 2차원 디스플레이를 보유한 시청자에게는 좌측 색상 영상을, 3차원 양안식 디스플레이를 보유한 시청자에게는 좌측 색상 영상뿐 아니라 합성된 우측 색상 영상을 모두 제공해 3차원 콘텐츠의 시청을 가능하게 한다. 스테레오 디스플레이 장치에서 좌우 영상을 구성하는 방법은 여러 가지가 있는데, 현재 많이 활용되고 있는 구성 방법은 좌우 입력 방식 (side-by-side)과 상하 입력 방식(top-and-bottom)이다.

좌우 입력 방식은 양안식 영상을 좌우로 붙여서 하나의 프레임을 형성한 것으로 수평 해상도를 하향 샘플링해야 한다. 상하 입력 방식은 좌우 영상을 위 아래로 붙여 하나의 영상 프레임을 형성하는 방법으로, 좌우 영상이 하나의 프레임 안에 들어가기 때문에 수직 해상도를 하향 샘플링해야 한다. 제안한 시스템에서는 기존의 스테레오 3D 방송 시스템과 달리, 수신 환경에 따라 좌우 입력 방식 및 상하 입력 방식을 모두 지원한다.

### IV. 실험 결과

본 논문에서 제안한 고속 양안식 3차원 방송 시스템의

성능을 테스트하기 위해 Dual Core Processor 1.86 GHz @ 2 GB RAM을 사용해 성능 비교를 수행하였다. 실험 영상으로는 Microsoft Research에서 제공하는 720×480 크기의 “Ballet” 영상을 이용했다<sup>[7]</sup>. 시스템의 입력단에서 동기화를 위해 SD 크기의 2차원 영상과 깊이 영상을 상하로 배치하였으므로 입력 영상의 크기는 720×960가 된다.

부호기의 성능 평가는 H.264/AVC 기준 소프트웨어인 JM과 x264를 이용하여 수행하였다. 메인 프로파일에서 양자화 계수 22, 27, 32, 37의 값에 대하여 부호화를 수행되었다. GOP는 30이며 참조 화면 수는 고속 부호화를 위해 2장을 사용하였으며 엔트로피 부호화로는 CABAC (Context-Adaptive Binary Arithmetic Coding)을 사용하였다. 표 1의 부호기 성능 평가 결과에서 볼 수 있듯이, x264를 이용해 JM에 비해 870배 이상 빠른 부호화 속도를 얻을 수 있다.

표 1. 부호기의 성능  
Table 1. Performance of the encoder

양자화 계수	JM 15.1		x264	
	프레임율 (fps)	비트율 (Kbps)	프레임율 (fps)	비트율 (Kbps)
22	0.04	1882.52	22.38	2232.63
27	0.04	1024.39	25.85	1148.56
32	0.04	585.29	31.11	632.27
37	0.04	336.90	34.83	347.35

CUDA를 이용하기 위해서는 이를 지원하는 GPU가 필요하다. 따라서 CUDA를 지원하는 최신 버전 GPU인 GeForce GTX 260 (896MB, 1.35GHz)을 이용하여 실험을 수행하였다. 이것은 512 MB의 글로벌 메모리와 16개의 멀티프로세서, 128개의 코어를 가지고 있으며 클럭 속도는 1.62 GHz이다.

표 2는 양안식 3차원 영상 복호기의 성능을 보여준다. 복호기는 CUDA 비디오 복호기 API를 이용한 2D+깊이 영상 복호기와 3차원 렌더링 부분으로 이루어져 있다. 2D+깊이 영상 복호기는 JM 15.1 복호기와 비교하였고, GPU를 이용한 3차원 렌더링은 CPU 상에서의 성능과 비교하였다. 기존의 JM 복호기는 720×960 크기의 2D+깊이 영상을 초당 최대 6.8 프레임을 복호할 수 있으나, CUDA 비디오 복호기

API를 이용하여 초당 최대 143.1 프레임을 복호할 수 있다.

표 3은 GPU를 이용한 3차원 렌더링과 기존의 CPU 상에서의 3차원 렌더링의 수행 시간을 비교하였다. 3차원 렌더링이라 함은 3차원 워핑을 통해 가상시점 영상을 합성한 후, 발생한 빈공간을 채우는 과정까지를 의미한다. 3차원 렌더링 알고리즘은 화소별 연산이 많이 수행되기 때문에 복잡도가 매우 높다. 따라서 기존의 CPU에서 3차원 렌더링을 수행하면 초당 7.73 프레임의 속도만 얻게 된다. GPU를 이용한 3차원 렌더링은 평균 초당 82.8 프레임을 처리하는 것을 확인할 수 있다.

표 2. 2D+깊이 영상 복호기의 성능 (단위: fps)  
Table 2. Performance of the video-plus-depth decoder

양자화 계수	JM 15.1 복호기	제안한 복호기
22	3.8	140.9
27	4.9	142.2
32	5.9	142.3
37	6.8	143.1

표 3. GPU를 이용한 고속 3차원 렌더링의 성능 (단위: fps)  
Table 3. Performance of fast 3D rendering using GPU

양자화 계수	CPU를 이용한 렌더링	GPU를 이용한 렌더링
22	6.42	88.2
27	7.33	87.1
32	8.25	88.3
37	9.36	87.9

표 4. 제안한 시스템의 속도 (단위: fps)  
Table 4. Processing time of the proposed system

양자화 계수	시스템 속도
22	10
27	17
32	22
37	24

시스템들의 각 부분을 통합하여 전체 시스템의 속도를 측정된 결과를 표 4에 나타내었다. 양자화 계수 22, 27, 32, 37에 대하여 초당 10, 17, 22, 24 프레임을 확인하였다. 따라서 제안한 시스템 고속 응용을 위해서는 27 이상의 양자화 계수를 사용해야 하는 것을 알 수 있다.

본 논문에서는 합성된 가상시점의 영상의 화질 평가를 위해 객관적인 화질 평가 방법인 PSNR을 수행하였다. 27보다 높은 양자화 계수를 사용하면 처리 속도는 증가하지만 화질이 낮다는 단점이 있으므로 응용에 맞는 적합한 양자화 계수를 선택해야 한다. 그림 6과 7은 양자화 계수가 27일 때의 “Ballet” 영상 100 프레임에 대한 PSNR과 합성된 우영상을 보여준다.

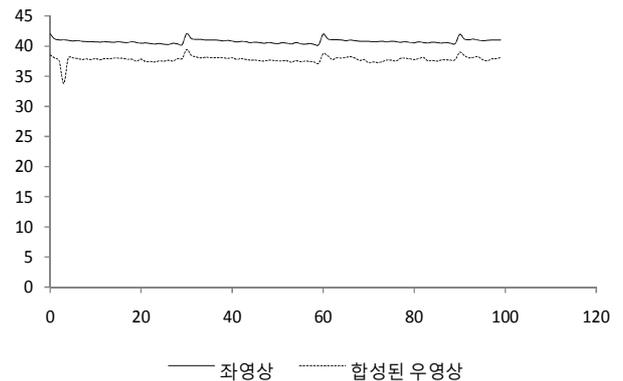


그림 6. 합성된 가상 영상의 화질  
Fig. 6. PSNR of the synthesized virtual view



그림 7. 합성된 가상 영상  
Fig. 7. Synthesized virtual view

## V. 결론

본 논문에서는 깊이 영상을 기반한 3차원 콘텐츠를 고속으로 부호 및 복호할 수 있는 3차원 방송 시스템을 제안했다. 제안한 시스템은 전송 단에서 2D+깊이 영상을 x264를 이용해 부호하여 전송하고, 수신 단에서 CUDA 비디오 복

호기 API를 이용한 복호기와 GPU를 이용한 3차원 렌더링으로 양안식 3차원 영상을 고속으로 재현하였다. 컴퓨터 모의실험을 통해 제안한 시스템이 합성 영상의 화질이 35 dB를 상회하는 영상에 대해서 양자화 계수가 27일 때 초당 17 프레임, 양자화 계수가 32일 때 초당 22 프레임을 처리함을 확인했다. 일반적으로 초당 30 프레임 이상 처리하는 시스템을 실시간 시스템이라 한다. 제안한 시스템의 복호기, 복호기 및 렌더링 부분은 고속 처리 및 병렬 처리를 이용해 각각 초당 최대 34.83 프레임, 143.1 프레임 87.9 프레임을 처리하므로 실시간 시스템의 요구사항을 만족한다. 시스템의 각 부분을 연결하였을 때 전체 시스템의 처리 속도가 떨어지는 원인은 송/수신 단이다. 만약, 부호화 및 송신단과 복호단을 분리하여 시간 지연을 두고 복호화를 수

행하면 시스템의 처리 속도를 개선할 수 있을 것이다.

참 고 문 헌

- [1] 이천, 오관정, 호요성, "영상 보간을 이용한 다시점 비디오 부호화 방법," 방송공학회 논문지, 제12권 제2호, pp. 128-136, 2007.
- [2] L. McMillan, An image-based approach to three-dimensional computer graphics, Technical Report, Ph.D. Dissertation, UNC Computer Science TR97-013, April 1997.
- [3] x264 software. Available from: <http://www.videolan.org/developers/x264.html>
- [4] Reference software JM15.1. Available from: <http://iphome.hhi.de/suehring/tml/download/>
- [5] F. Jargstorff and E. Young, CUDA video decoder API, 2008.
- [6] NVIDIA corporation, CUDA 2.3 Programming Guide, 2009.
- [7] Contribution for 3D video test material of outdoor scene, document m15371.doc, ISO/IEC JTC1/SC29/WG11, April 2008.

저 자 소 개



최 정 아

- 2002년 ~ 2007년 : 한국항공대학교 전자 및 항공전자공학과 학사
- 2007년 ~ 2008년 : 광주과학기술원 정보기전공학부 정보통신공학과 석사
- 2008년 ~ 현재 : 광주과학기술원 정보기전공학부 정보통신공학과 박사과정
- 주관심분야 : 디지털 영상처리, H.264/AVC, High Efficiency Video Coding



신 인 용

- 2001년 ~ 2008년 : 인하대학교 전자공학과 학사
- 2009년 ~ 현재 : 광주과학기술원 정보기전공학부 정보통신공학과 석사과정
- 주관심분야 : 디지털 영상처리, H.264/AVC, 병렬처리



호 요 성

- 1977년 ~ 1981년 : 서울대학교 전자공학과 학사
- 1981년 ~ 1983년 : 서울대학교 전자공학과 석사
- 1983년 ~ 1995년 : 한국전자통신연구소 선임연구원
- 1985년 ~ 1989년 : University of California, 전기전산공학과 박사
- 1990년 ~ 1993년 : 미국 필립스 연구소 선임연구원
- 1995년 ~ 현재 : 광주과학기술원 정보통신공학부 교수
- 2003년 ~ 현재 : 광주과학기술원 실감방송연구센터 센터장
- 주관심분야 : 디지털 영상신호 처리 및 압축, 디지털 TV, MPEG 표준, 3차원 TV, 실감방송