

HEVC를 위한 깊이 영상 고속 모드 결정 방법

준회원 윤 다 현*, 종신회원 호 요 성*

Fast Mode Decision Method for HEVC in Depth Video

Da-Hyun Yoon* Associate Member, Yo-Sung Ho** Lifelong Member

요 약

HEVC는 성능 향상과 더불어 복잡도 또한 크게 증가했다. 본 논문은 깊이 영상의 복잡도를 줄이기 위해 깊이 영상의 특성을 이용한 조기 SKIP과 인터 예측의 고속 모드 결정 알고리즘을 제안한다. 이 알고리즘은 동차 영역에서 SKIP 모드가 자주 발생한다는 점을 이용해 설계됐다. 동차 영역의 SKIP에서 발생한 비용값이 양자화 매개 변수에 적응적인 문턱값과, 평균 SKIP의 비용값의 곱보다 작다면 조기 SKIP 모드를 발생시킨다. 그렇지 않은 경우 인터 2N×2N의 비용값을 구한 뒤 인터 2N×2N의 움직임 벡터가 0이고 부호화 단위의 분산이 인터 예측을 위한 문턱값보다 작다면 인터 2N×N과 인터 N×2N의 탐색을 수행하지 않는다. 조기 SKIP과 인터 예측을 위한 문턱값은 실험을 통해 결정이 됐고, 실험 결과는 기존의 HEVC와 비교하였을 때 BDBR이 0.24%, BDPSNR이 -0.011 dB로 비트율과 화질의 큰 변화 없이 부호화 시간은 최소 39%에서 최대 82%까지 줄었다.

Key Words : HEVC, MVC, EarlySKIP, depth video coding, mode decision

ABSTRACT

In order to reduce the complexity of HEVC, we propose a fast mode decision algorithm in depth videos. Since almost CU mode is decided as SKIP mode in depth-continuity regions, we design the algorithm using the property of depth videos. If cost of SKIP is smaller than the multiplication between the threshold for EarlySKIP and average cost of SKIP, EarlySKIP is performed. Otherwise, we calculate Inter 2N×2N. Then, if motion vector of Inter 2N×2N is 0 and variance of CU is smaller than threshold for inter, we skip Inter 2N×N, Inter N×2N. Experimental results show that our proposed algorithm reduces the encoding time from 39% to 82% with negligible PSNR loss and bitrate increase.

I. 서 론

ISO-IEC/MPEG과 ITU-T/VCEG은 HEVC(High Efficiency Video Coding)라고 불리는 차세대 비디오 표준안 제정을 목적으로 JCT-VC(Joint Collaborative Team on Video Coding)를 설립했다. 현재 표준화가 진행중인 HEVC는 기존의 비디오 압축 표준인 H.264/AVC와 비교해 고해상도 영상 부호화 효율을 두 배 이상 향상시키기 위해 비디오 코덱 전반에 걸쳐 새로운 부호화 알고리즘들이 제안됐다. HEVC

는 낮은 복잡도와 높은 효율의 부호화를 통해 고해상도의 비디오를 모바일과 실시간 통신환경에서 이용 가능하게 하는 저복잡도 응용과 추가적인 복잡도와 부호화 효율을 통해 높은 성능의 연산을 수행하는 고성능 응용을 목적으로 한다.

비디오 영상 부호화 분야의 진보 양상을 평가하기 위해, 2010년 1월에 CFP(Call for Proposal)이 공표 되었고^[1], 2010년 4월 제1차 JCT-VC 회의에서 CFP에 대한 광범위한 평가가 있었다. 평가 결과를 통해, JCT-VC는 제안된 기고서들 중 좋은 성능

* 광주과학기술원 실감방송연구센터 ({yoon, hoyo}@gist.ac.kr), (°:교신저자)

논문번호 : KICS2011-08-361, 접수일자 : 2011년 8월 19일, 최종논문접수일자 : 2011년 12월 31일

을 보인 기술들을 조합해 참조 소프트웨어인 TMuC (Test Model under Consideration) ^[2]을 만들었다. 2010년 7월 제네바에서 열린 두 번째 회의에서 TMuC에 들어간 기술들의 성능을 검증해 다음 미팅까지 HM(HEVC Test Model)을 만들기로 결정했다. 2010년 10월에 열린 광저우 회의에서 TMuC에 들어간 기술들의 절반을 제거해 HM 1.0이 결정되었으며, 개별 기술 단위 채택 경쟁을 위한 CE(Core Experiment)가 시작됐다. CE는 회의에서 제안된 기술을 표준에 채택된 기술들과 비교해 더 높은 성능을 보이는 경우 이를 표준으로 채택하는 것이다. 2011년 1월 대구에서 열린 제4차 회의에서 CE에 대한 평가가 있었고 이 결과로 WD(Working Draft)와 HM 2.0 ^[3]이 발표됐다. 현재 2011년 7월 토리노 회의까지 총 6번의 회의가 이루어졌으며, HM 3.3 ^[4]까지 발표됐다.

깊이 영상은 그레이 스케일 이미지로서 카메라와 물체사이의 거리를 나타낸다. 깊이 영상의 비경계 영역은 전경과 배경에서 발생하며 경계 영역은 전경과 배경사이에서 발생한다. 깊이 영상은 텍스처 영상과는 다른 특성을 갖고 있기 때문에 이를 이용해 깊이 영상을 위한 효율적인 부호화 방법이 제안됐다. 복잡도를 줄이기 위해 대응하는 텍스처 영상의 움직임 정보를 재사용하는 방법이 있으며 ^[5], Shin에 의해 제안된 방법은 영역에 대한 분석을 수행해 복잡도를 줄였다 ^[6]. 그리고 이웃하는 시점간의 비트율 왜곡값 상관도에 기반을 둔 SKIP 모드를 이용하는 방법도 있다 ^[7].

깊이 영상을 빠르게 부호화하는 방법은 두 가지로 나눌 수 있다. 첫 번째는 텍스처 영상과 깊이 영상과의 상관도를 이용해 공통된 정보를 공유해 복잡도를 줄이는 방법이다. 두 번째는 깊이 영상만을 이용해 빠르게 부호화하는 방법이다. 대부분의 고속 깊이 영상 부호화 알고리즘의 경우 첫 번째 방법에 해당되지만 두 번째 방법이 다양한 3DTV 응용에 일반적으로 쓰이고 있다. 그 이유는 실험 환경과 상관없이 깊이 영상만의 특성을 이용하기 때문이다. Kang이 제안한 알고리즘 ^[8]에서는 깊이 영상의 기하학적인 특성과 확률적인 특성을 이용해 인트라 예측 모드를 결정한다.

제안하는 알고리즘은 3단계로 구성되어 있다. 1) 최종 모드로 결정된 SKIP의 평균 비용값과 결정된 문턱값의 곱이 현재 부호화 단위의 SKIP 비용값보다 작은 경우에는 조기 SKIP으로 결정해 인트라와 인터 예측을 수행하지 않는다. 2) 인터 $2N \times 2N$ 에

대한 예측을 수행한다. 3) 인터 $2N \times 2N$ 의 움직임 벡터가 0이고 인터 연산에 대한 문턱값보다 부호화 단위의 분산이 작은 경우 인터 $2N \times N$, 인터 $N \times 2N$, 인터 $N \times N$ 예측을 수행하지 않는다. 그렇지 않은 경우는 인터 $2N \times N$, 인터 $N \times 2N$, 인터 $N \times N$ 예측을 수행한다. 동차 영역인지 아닌지를 구분하는 문턱값은 양자화 매개변수에 적응적으로 설정된다.

본 논문은 다음과 같이 구성되어 있다. 2장에서는 HEVC의 모드에 대해 설명하고, 3장에서는 제안한 알고리즘에 대해 설명한다. 4장에서는 제안한 알고리즘에 대한 실험 결과에 대해 기술하고, 5장에서 이 논문의 결론을 맺는다.

II. HEVC 예측 모드

2.1 HEVC에서의 모드 결정 방법

HEVC의 참조 소프트웨어인 HM의 모드 결정 방법은 그림 1과 같다. 각 모드에 대한 비용값을 비교해 최소 비용값을 구한다. 각 모드의 비용값은 예측값과 실제값의 차이를 통해 얻어진 잔여 데이터, SKIP 플래그, merge 플래그, merge 인덱스값, 인터 플래그, 참조 영상의 인덱스값, 움직임 벡터, 움직임 벡터 값 인덱스, 그리고 인트라 모드 인덱스 등을 나타낸 부가정보들이 고려된 값이다. 최소의 비용값을 가지는 모드가 최적모드로 결정이 되며 다음과 같은 순서로 결정 된다.

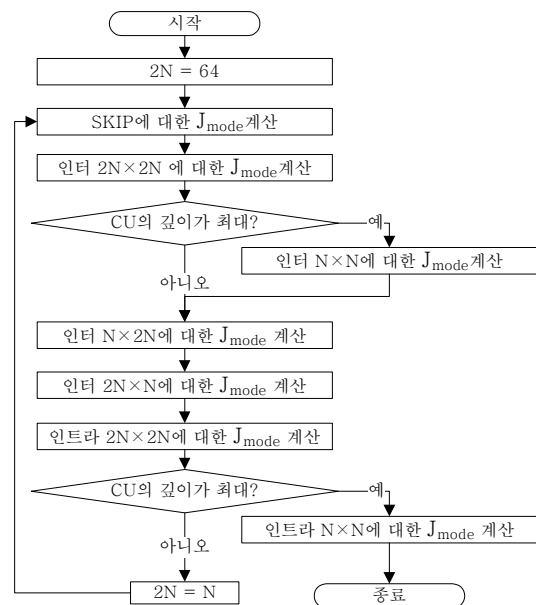


그림 1. HEVC 에서의 모드 결정 방법

1) SKIP모드와 인트라 2N×2N에 대한 비용을 구한다. 2) 부호화 단위의 깊이가 최대라면 3번으로 이동하고 그렇지 않을 때는 4번으로 이동 한다 3) 인트라 N×N의 비용값을 구한다. 4) 인트라 N×2N을 계산한다. 이 경우 부호화 단위가 최대 깊이값이 아니면, 첫 번째 PU가 merge모드로 예측될 수 있고 그래서 첫 번째 PU가 merge 후보 군들을 갖고 있지 않을 때는 이 모드가 선택되지 않는다. 5) 인트라 2N×N을 계산한다. 인트라 2N×N에서도 최대 깊이 부호화 단위가 아니면 첫 번째 PU가 merge 모드를 통해 예측이 될 수 있고 merge후보군이 없을 때는 선택되지 않는다. 6) 인트라 2N×2N의 비용값을 결정한다. 7) 최대 깊이값의 부호화 단위라면 8번으로 가고 그렇지 않을 때는 9번으로 간다. 8) 인트라 N×N의 비용값을 계산하고 모드 결정 과정이 종료된다. 9) 부호화 단위는 재귀함수 구조이다. 동일한 함수를 이용하지만 부호화 단위의 사이즈를 절반으로 줄여 호출한다.

2.2 모드 분포 분석

Peng이 제안한 알고리즘에 따르면, 동차 영역에서의 모드 분포는 비동차 영역의 모드 분포와는 다르다. 그림 2에서 동차와 비동차 영역의 모드 분포도를 나타냈다. 동차 영역에서는, 모드 분포가 상당히 불균형하다. 대부분의 동차 영역은 SKIP과 인트라 모드로 부호화 되었으나, 비동차 영역에서는 균일한 모드 분포가 나타나는 것을 볼 수 있다. 특히 동차 영역에서는 SKIP이 대다수 발생되는 것을 알 수 있다.

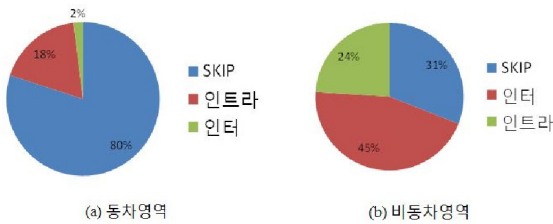


그림 2. 부호화 단위의 모드 분포

표 1. 실험 환경

실험 변수	값
실험 영상	Balloon
문턱값	30
양자화 매개변수	32
시점	1
시간	0

III. 제안하는 알고리즘

3.1 깊이값 분리

깊이 영상의 동차 영역과 비동차 영역은 다른 특성을 보인다. 따라서 제안한 알고리즘을 적용하기 이전에 부호화 단위를 동차 영역과 비동차 영역으로 나누어야 한다. 동차 영역과 비동차 영역으로 나누기 위해, 깊이값의 분산을 식 1과 같이 계산한다.

$$f(x,y) = \frac{1}{\text{너비} \times \text{높이}} \sum_1^{\text{너비}} \sum_1^{\text{높이}} (r(i,j) - m_{x,y})^2 \quad (1)$$

좌표 (x,y)는 현재 부호화 단위의 위치를 나타내며, (i,j)는 부호화 단위 안에서의 상대적인 픽셀들의 위치를 나타낸다. r(i,j)는 현재 부호화 단위 안에서의 실제 깊이값을 나타낸다. 그리고 n은 현재 부호화 단위의 평균값을 나타낸다. 비동차 영역에서는 깊이값이 크게 바뀌기 때문에 f(x,y)값이 크다. 이와 반대로 동차 영역에서는 깊이값이 거의 유사하기 때문에 f(x,y)값이 작다. 이러한 특성을 이용해 분산값을 문턱값과 비교함으로써 현재 부호화 단위가 동차인지 아닌지를 나눌 수가 있다.

3.2 제안하는 깊이 영상 고속 모드 결정 방법

본 논문에서는 깊이 영상을 빠르게 부호화를 위해 다음과 같은 알고리즘을 제안한다. 첫 단계는 부호화 단위에 대한 분산을 계산한다. 그 다음단계는 조기 SKIP을 위한 문턱값, 인트라 모드 결정을 위한 문턱값을 설정한다. 각각의 문턱값은 실험에 의해 결정된 값으로 양자화 매개변수에 적응적이다. 문턱값 계산 후에, SKIP에 대한 비용값을 계산하고 조기 SKIP에 대한 확인 과정을 거친다. 조기 SKIP으로 판별이 되기 위해서는 SKIP 모드가 최소비용 모드로 결정된 비용값들의 평균과 문턱값을 곱해 이보다 작아야 한다. 조기 SKIP모드로 결정이 되면 인트라와 인트라의 모드 결정을 거치지 않고 바로 SKIP이 최종 모드로 결정이 된다.

깊이 영상의 동차 영역에서는 SKIP의 발생 빈도가 상당히 높기 때문에 조기 SKIP을 이용할 경우 추가적인 비트의 증가량을 매우 줄이면서도 부호화 속도를 크게 향상시킬 수 있다. 조기 SKIP을 이용할 경우 추가적인 비트증가가 있지만 무시할 수 있을 만큼 작고, 상당한 시간을 절약할 수 있다. 예측의 정확도를 높이기 위해 문턱값을 수정하였고, 동차 영역에서만 조기 SKIP을 이용하도록 하였다. 조

기 SKIP의 조건을 만족시키지 못하면 인터 2N×2N에 대해 비용값을 계산하고, 여기서 결정된 움직임 벡터와 왜곡값이 0이고 분산이 처음에 정의한 문턱값보다 작은 경우에는 인터 2N×N, 인터 N×2N, 인터 N×N에 대한 비용값 계산을 수행하지 않는다. 그렇지 않은 경우에는 기존의 방식대로 모드 결정을 수행한다. 제안하는 알고리즘의 순서도는 그림 3와 같다.

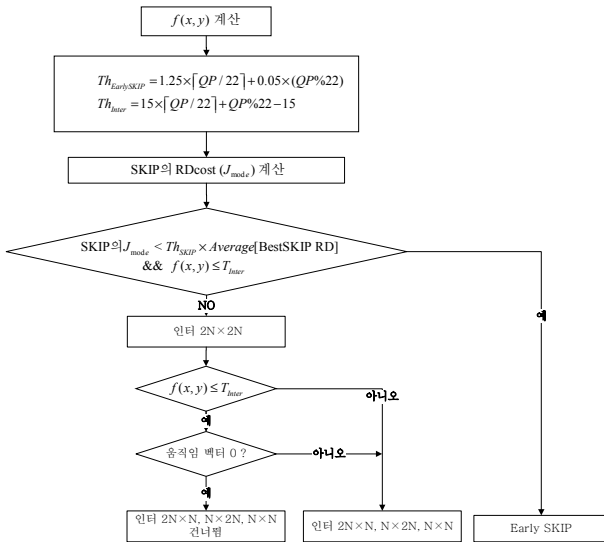


그림 3. 제안하는 알고리즘의 블록도

IV. 실험 및 결과

제안한 알고리즘에 대한 효율을 평가하기 위해 표 2와 같은 실험 환경을 이용했다. 성능 비교에는 Bjontegarrd Delta (BD) [9]를 이용해 부호화 효율을 측정했다. 본 알고리즘을 HEVC 참조소프트웨어인 HM 3.0에서 실험했다.

$$\Delta PSNR = PSNR_{proposed} - PSNR_{original} \quad (2)$$

$$\Delta TS = \frac{Time_{proposed} - Time_{original}}{Time_{original}} \times 100 \quad (3)$$

$$\Delta BR = \frac{Bitrate_{proposed} - Bitrate_{original}}{Bitrate_{original}} \times 100 \quad (4)$$

$$\text{문턱값} = 15 \times \text{floor}(QP/22) + QP/22 \quad (5)$$

표 2. 실험 환경

실험 변수	값
MaxCUWidth	64
MaxCUHeight	64
The Number of Encoding Frame	50
Fast search	EPZS
Search Range	64
Intra Period	-1
GOP Size	1
Number of Reference	4
QP	22,27,32,37
Symbol Mode	CABAC

표 3은 제안한 알고리즘에 대한 실험 결과를 보여준다. 비트율 증가 폭이 평균 0.14%로 최소 -2.01비트부터 1.33비트까지 발생하였다. 또한 PSNR은 평균 0.01dB 감소로 무시할 수 있을 만큼 작은 것을 알 수 있다. 특정 결과에서는 PSNR이 증가되는 모습을 볼 수 있는데, 그 이유는 기존의 방법을 건너뛰는 과정에서 PSNR의 열화가 발생하였다더라도, 이후에 ALF와 같이 이미 보간된 영상의 화질을 개선하기 위한 추가적인 작업이 수행됨과 동시에 추가적인 비트를 동반하게 된다. PSNR을 고정시켰을 때의 비트 증가율을 나타내는 BDBR이 0.24% 비트율을 고정시켰을 때의 PSNR을 나타내는 평균 BDPSNR이 -0.011로 부호화 화질에 큰 변화가 없이 비트 증가율도 작음을 알 수 있다. 그에 반해 부호화 시간이 평균 59%의 시간이 절약되는 것을 볼 수 있다. 그리고 Love Bird의 깊이 영상에서는 뛰어난 성능을 보여주고 있는데, 그 이유는 대부분의 영역이 동차 영역이기 때문이다.

표 3. 실험 결과

영상	BDBR	BDPSNR	ΔTime
Book Arrival	0.51	-0.019	47
Love1	0.61	-0.021	76
Newspaper	0.03	-0.001	70
Balloons	0.19	-0.008	62
Cafe	0.13	-0.009	61
Kendo	0.35	-0.014	46
Carpark	0.05	-0.004	55
Hall	0.12	-0.002	56
평균	0.24	-0.011	59

표 4. Peng이 제안한 알고리즘

영상	BDBR	BDPSNR	ΔTime
Book Arrival	5.23	-0.174	-48
Love1	2.5	-0.092	-86
Newspaper	2.34	-0.08	-79

표 4는 제안한 알고리즘과 JMVC기반의 Peng이 제안한 알고리즘^[10]을 비교한 결과이다. Peng이 제안한 알고리즘은 JMVC기반으로 설계가 되어있다. 하지만 아직까지 HEVC기반의 영상 알고리즘이 제안되지 않았기 때문에 JMVC기반의 알고리즘을 HEVC에 맞게 적용을 하였다. CU의 크기가 32보다 작은 경우에 대해서만 Peng의 알고리즘을 적용하였다. Peng의 알고리즘은 동차 영역과 비동차 영역을 나누는데 있어서, 고정 문턱값 30을 이용한다. Peng이 제안한 알고리즘에 비해서 절약되는 시간은 다소 작지만, BDBR과 BDPSNR측면에서는 Peng이 제안한 알고리즘에서는 추가적인 비트가 5%이상 사용되는 것에 반해 제안하는 알고리즘은 1%미만의 비트변화가 있다. 따라서 제안한 알고리즘은 비트율과 PSNR의 큰 변화없이 시간을 최대 76%까지 줄이는 것을 알 수 있다.

표 5는 문턱값에 따른 성능을 나타낸 결과이다. 높은 QP에서는 시간이 문턱값에 변화가 성능에 크게 영향을 미치지 않는 것을 알 수 있다. 하지만 문턱값이 커질수록 부호화 시간이 더 감소하는 것을 알 수 있다. 따라서 높은 QP에서 높은 문턱값을 설정하는 것이 복잡도와 부호화 효율을 고려했을 때 적절하다 낮은 QP에서도 문턱값의 변화에 따라서

표 5. 문턱값에 따른 성능 변화

Threshold	QP22			QP27			QP32			QP37		
	Bitrate	PSNR	Time	Bitrate	PSNR	Time	Bitrate	PSNR	Time	Bitrate	PSNR	Time
(Original) 0	619.4	49.86	3640	319.6	46.40	3499	165.2	43.24	3448	88.6	40.35	3393
5	623.9	49.76	1830	324.4	46.32	1721	166.2	43.15	1682	87.0	40.30	1641
10	631.3	49.76	1804	326.6	46.29	1716	166.7	43.13	1651	88.3	40.28	1601
15	633.2	49.76	1795	328.9	46.32	1706	169.4	43.14	1658	88.8	40.28	1593
20	635.4	49.76	1806	328.9	46.28	1698	167.7	43.10	1630	88.0	40.27	1598
25	636.0	49.75	1782	330.7	46.29	1689	170.5	43.14	1645	88.6	40.24	1603
30	638.9	49.77	1770	332.1	46.29	1675	169.4	43.11	1615	88.6	40.21	1587
35	639.7	49.77	1758	332.7	46.29	1681	170.0	43.11	1621	88.8	40.23	1575
40	640.5	49.75	1777	332.3	46.27	1684	169.7	43.10	1628	87.6	40.21	1569

부호화 시간이 감소하고 있다. 하지만 더불어 부호화 효율이 크게 열화 되므로 부호화 시간에 큰 차이가 없기 때문에 낮은 문턱값을 쓰는 것이 더 적절하다. 이러한 실험 결과를 통해 QP에 비례하는 문턱값을 설정해 주었다.

중간시점을 합성하는데 이용한 시점은 Newspaper와 Love Bird영상의 4번째와 6번째 시점을 이용해 5번째 시점을 합성하였고, Book Arrival은 7번째 시점과 9번째 시점을 이용해 8번째 시점을 합성하였다.

표 6는 합성된 영상과 원본영상의 차이값을 나타냈다. 합성 소프트웨어인 VSRS^[11]을 이용해 중간영상을 생성하였다. 제안한 알고리즘 모두 최소 -0.04dB에서 최대 0.01dB까지 무시할 만큼 작은 차이값을 보여준다. 이 결과는 제안한 알고리즘이 합성 화질에 영향을 미치지 않는다는 것을 보여준다.

표 6. 합성 실험 결과

영상	QP			
	22	27	32	37
Book Arrival	0.01	-0.04	0.00	0.00
Love1	0.00	0.00	-0.01	-0.02
Newspaper	0.00	0.00	0.00	0.00

V. 결 론

MVD는 삼차원 영상을 나타내는 효과적인 방법이지만, 카메라의 수에 비례해 부호화 시간이 증가한다는 단점이 있다. 본 논문에서는 이러한 문제점을 개선하기 위해 부호화 효율을 떨어트리지 않고

부호화 시간을 줄이는 알고리즘을 제안한다. 3차원 영상 표준화에서는 H.264/AVC보다 효율이 좋은 HEVC를 이용한 부호화 연구를 시작하였다. 하지만 아직은 부호화 효율을 증가시키는 방향으로 연구가 진행 중이고, 깊이 영상만을 이용한 고속화 알고리즘은 아직 제안되지 않았다. 동차 영역과 비동차 영역 각각의 모드 분포 특성이 다른 점을 이용해, 고속 깊이 영상 모드 결정 알고리즘을 제안했다. 제안한 알고리즘은 합성 영상의 화질과 비트율의 큰 증가 없이 부호화 시간을 평균 57%까지 줄였다. 특히 단순한 깊이 영상에서는, 제안하는 방법을 이용하면 최대 82%까지 줄일 수 있다.

참 고 문 헌

- [1] "Joint Call for Proposals on Video Compression Technology," ISO/IEC JTC1/SC29/WG11/N11113, ITU-T Q6/16, VCEG-AM91, Jan. 2010.
- [2] "Test Model under Consideration," ITU-T SG16 WP3 and ISO/IEC JTC1/SC29/WG11, JCTVC-A205, April 2010.
- [3] HEVC Reference Software HM 2.0 Available from:https://hevc.hhi.fraunhofer.de/svn/svn_HEVCSoftware/branches/HM-2.0-dev/
- [4] HEVC Reference Software HM 3.3 Available from:https://hevc.hhi.fraunhofer.de/svn/svn_HEVCSoftware/branches/HM-3.0-dev/
- [5] H. Oh, Y. Ho, "H.264/AVC-Based depth map sequence coding using motion information of corresponding texture video," Lecture Notes in Computer Science, pp. 898-907 Vol. 4319, Dec. 2006.
- [6] K. Shin, S. Chun, and K. Chung, "A fast mode prediction of multi-view video coding using region analysis," Digital Content, Multimedia Technology and its Applications, pp. 87-90, Aug. 2010.
- [7] W. Zhu, W. Jiang, and Y. Chen, "A fast inter mode decision for multiview video coding," Information Engineering and Computer Science, pp. 1-4, Dec. 2009.
- [8] M. Kang, Y. Ho, "Depth video coding using adaptive geometry based intra prediction for 3D video system," IEEE Transactions on Multimedia, pp. 001-008, July 2010.
- [9] "Improvements of the BD-PSNR Model," ITU-T SG16/Q6, VCEG-AI11, July 2008.
- [10] Z. Peng, M. Yu, G. Jiang, Y. Si, and F. Chen, "Virtual view synthesis oriented fast depth video encoding algorithm," International Conference on Industrial and Information Systems, pp. 204-207, July 2010.
- [11] "View Synthesis Algorithm in View Synthesis Reference Software 2.0 (VSRS 2.0)," ISO/IEC JTC1/SC29/WG11 MPEG2009/M16090, Feb. 2009.

윤 다 현 (Da-Hyun Yoon)

준회원



2010년 경희대학교 전자전과 공학부 졸업(학사)
2010년~현재 광주과학기술원 정보통신공학과 석사과정 <관심분야> 깊이 영상 부호화, HEVC

호 요 성 (Yo-Sung Ho)

중신회원



1981년 서울대학교 공과대학 전자공학과 졸업(학사)
1983년 서울대학교 대학원 전자공학과 졸업(석사)
1989년 Univ. of California, Santa Barbara, Dept. of Electrical and Computer Engineering.(박사)

1983년~1995년 한국전자통신연구소 선임연구원
1990년~1993년 미국 Philips 연구소, Senior Research Member
1995년~현재 광주과학기술원 정보통신공학과 교수 <관심분야> 디지털 신호처리, 영상 신호 처리 및 압축, 디지털 TV와 고선명 TV, 멀티미디어 시스템, MPEG 표준, 3차원 TV, 실감방송