

홀로그램 미디어를 위한 압축 기술

□ 서영호 / 광운대학교

요약

본 고에서는 차세대 영상 시스템 중의 하나인 디지털 홀로그램의 압축과 관련해서 진행되어 온 여러 연구 사례들에 대해서 살펴보고 이들을 몇 가지 기준으로 분류해본다. 또한 이러한 연구들에 포함된 몇 가지 주요 알고리즘 및 기법들에 대해서 소개한다. 이를 통해서 앞으로 홀로그램 기술에 대한 압축 기술의 발전 방향을 모색하고자 한다.

1. 서론

일부 아날로그 방식이 접목된 형태를 제외하고, 멀티미디어로서의 디지털 홀로그램은 아직까지 상용화 기술로 보기 어렵고, 아직까지도 원천적인 연구 및 개발이 이루어지고 있다. 뿐만 아니라 앞으로 상당한 기간 동안에도 이러한 상태는 지속될 것으로 사료된다. 디지털 홀로그램에 대한 촬영과 디스플레이가 제품으로써의 품질을 갖는 시대가 온다면

그때부터 중요한 것은 디지털 홀로그램을 다루는 다양한 신호처리 기술일 것이다. 신호처리 기술에는 다양한 것들이 포함될 수 있을텐데, 2차원 혹은 3차원 멀티미디어에서도 그러하듯이 홀로그램에서도 압축 기술이 여기에 포함될 것이다. 본 고에서는 지금까지 진행되어 왔던 여러 학술적인 연구들을 조사하고 분석함으로써 압축 기술과 관련하여 어떤 기술들이 연구되어왔고, 현재는 어떤 수준인지 살펴보고자 한다.

가장 쉽고 간단하게 적용할 수 있는 홀로그램 압축 방법은 무손실 압축(Lossless coding) 방법일 것이다. 이전 연구들에서도 무손실 방법으로 홀로그램을 압축하는 여러 시도를 수행하였다[1][2]. 부동소수점 형식으로 표현된 복소수 형태의 홀로그램은 실수(RE, real)와 허수(IM, imaginary) 혹은 진폭(AM, amplitude)과 위상(PH, phase)의 쌍으로 표현될 수 있다. 이들 쌍은 같은 정보를 표시하지만

다른 특성을 보이므로 압축에 대한 효과도 상이할 가능성은 존재한다. 연구 결과를 살펴보면 AM/PH 쌍의 경우에 홀로그램의 압축 효과는 거의 미미하고, RE/IM의 쌍의 경우에는 약 3:1~4:1의 압축율을 나타내었다. 모든 경우에 BW가 가장 좋은 특성을 보인다[1].

홀로그램의 resampling은 scaling이라는 용어를 사용하기도 하고[3], 최근에는 compressive sensing[4][5][6][7][8]이라는 용어를 사용하기도 한다. Resampling은 대체로 일정한 형태로 홀로그램의 화소수를 조절하기 때문에 압축의 효과가 존재하지만, 최근의 compressive sensing은 특정 알고리즘에 따라 무작위적으로 홀로그램의 화소를 조절하기 때문에 압축의 효과는 거의 없다고 볼 수 있다. 나이퀴스트 샘플링 이론보다 더 낮은 샘플링 주파수로 선택된 홀로그램을 거의 완전히 복원하는 것이 compressive sensing의 목표이고, 이를 위한 알고리즘이 compressive sensing 기법이다. 그러나 실제로 이러한 알고리즘은 홀로그램 화소를 무작위적으로 선택하는 결과를 가져온다. 선택된 화소의 개수만 따지면 원래 입력된 홀로그램의 화소보다 작지만, 이 선택된 화소들은 홀로그램 내부에 무작위적으로 분포하기 때문에 이 과정을 통한 압축 효과는 별개의 문제가 된다. 고전적 형태의 resampling 연구는 이전에 주로 수행되었고[1], 압축율이 낮기 때문에 최근에는 거의 연구결과가 발표되지 않고 있다. 그러나 최근 JPEG에서 홀로그램에 대한 표준 코덱을 만들기 위해 다양한 데이터 세트를 공개하고 있는데, 이들에 대한 다양한 resampling 연구는 반드시 필요할 것이다. 연구 결과를 살펴보면 평균적으로 bilinear 보간을 사용한 경우가 가장 좋은 결과를 보였고, 다음으로 bicubic 보간, 마지막으로 nearest neighbor 보간 방식의

순서로 결과가 나타났다[1].

홀로그램에 양자화를 적용한 후에 양자화 효과가 홀로그램에 미치는 영향을 관찰한 연구는 지금까지 여러 연구사례에서 살펴볼 수 있다. 예전에는 주로 균일 양자화기를 이용하고, 홀로그램 화소 하나만 고려하는 스칼라 양자화가 주로 고려되었다[1]. 최근에는 여기에 블록 단위로 양자화를 수행하는 벡터 양자화에 대한 연구까지 수행되고 있다[9]. 또한 스칼라 양자화도 균일 양자화기 뿐만 아니라 비균일 양자화기도 연구되고 있다. 가장 최근에 수행된 연구 결과를 살펴보면 아래와 같은 양자화기가 사용되었다[9]. 연구 결과를 살펴보면 NSTD (Normalized Standard Deviation)를 이용하여 원래의 객체와 복원된 객체를 비교하였는데, 낮은 양자화 비트를 할당한 경우(고압축)에서는 균일 양자화기가 좋은 성능을 보이고, 높은 양자화 비트를 할당한 경우(저압축)에서는 K-medians Clustering 방식이 좋은 성능을 보였다. 그러나 그 차이는 매우 작은 수준인데, 전체적으로는 K-means Clustering 방식이 모든 양자화 비트에 대해서 낮은 성능을 보였다. 이러한 연구 결과를 통해서 살펴보면, 연산량이 높고 알고리즘이 복잡한 벡터 양자화기가 반드시 홀로그램의 양자화에 좋은 성능을 보이지 않는다는 것이다. 연산량과 성능을 고려하면 균일 양자화기가 가장 좋은 성능을 나타내는 것을 알 수 있다. 그러나 사용된 홀로그램의 포맷에 따라서 달라질 수 있기 때문에 JPEG Pleno의 데이터세트에 대해 다양한 양자화 실험이 필요하다.

많은 연구들이 홀로그램을 압축하기 위한 기본 변환으로 이산 웨이블릿 변환(discrete wavelet transform)을 사용하고 있고, 많은 연구들이 사용하고 있는 만큼 다양한 형태의 기법들이 소개되어

왔다. 웨이블릿 변환을 기반으로 하는 방식은 홀로그래프 자체를 변환하여 압축하는 방식[10][11][12][13][14]과 홀로그래프를 회절시킨 이후에 특정 거리에서 변환하여 압축하는 방식[15][16][17][18][19]으로 나뉘어진다. JPEG2000 코덱을 이용하여 홀로그래프를 압축하는 방식들이 전자의 방식들이고, 프레넬릿을 이용한 방식이 후자의 방식들이다. [12]의 연구에서는 홀로그래프의 압축을 위해서 JPEG2000 코덱을 일부 수정하여 확장된 버전의 코덱을 제안하였다. 수정된 부분은 DWT를 수행하는 부분으로, 원래의 DWT에서 부대역의 구조가 다양한 방법으로 생성될 수 있도록 수정하였고, 다양한 방향성을 갖는 필터를 이용하여 영상을 분해하는 방식으로 필터링을 수정하였다. 이때 다양한 방향성에 대한 웨이블릿 변환은 DA(Directional Adaptive)-DWT[20]를 사용하였다. [12]에서 연구 결과를 살펴보면 원래의 JPEG2000 코덱에 비해서 일부 성능이 개선되는 것을 확인할 수 있고, [13]논문에서 제안된 Vector Lifting Scheme(VLS) 방식과 유사한 성능을 나타내었다. VLS 방식은 다시점 및 스테레오 영상들을 압축하기 위해 제안된 기법으로 다른 시점들 사이의 공간적인 상관성을 찾아 제거함으로써 압축 효율을 높인다. VLS는 separable 방식[11]과 non-separable 방식[13]이 있는데, 전자는 1차원과 2차원 리프팅 연산을 별도로 수행하는 방식이고 후자는 1차원과 2차원 리프팅을 동시에 수행하는 방식이다. 또한 기본 VLS는 2가지 방식(VLS-I, VLS-II)이 존재한다[11].

홀로그래프를 압축하기 위해 비디오 코덱을 사용한 연구도 진행되었다[21][22][23][24]. 물론 HEVC나 AVC와 같은 비디오 코덱을 홀로그래프에 적용한 시도도 많았지만[25][26] 이 두 코덱은 Intra 모드로 사용되었기 때문에 실제로는 비디오 압축보다는 한

장의 영상에 대한 압축으로 보는 것이 더욱 적합하다. 비디오 코덱을 사용하는 경우는 크게 두 가지로 나뉠 수 있다. 첫 번째는 홀로그래프 비디오의 압축을 위해 사용한 경우이고[46], 두 번째는 한 장의 홀로그래프를 비디오와 같이 변형한 후에 압축을 한 경우이다[21][22][23]. 전자의 경우에 압축율과 GOP의 크기를 조절하면서 몇 가지 홀로그래프(Stormtrooper, Dice, Cat, Screws)에 대한 압축을 수행하였다. 압축율은 1에서 20:1까지 조절하면서 실험하였고, GOP는 1, 2, 5, 및 7로 조절하였다. 실험 결과를 살펴보면 GOP가 1인 경우 즉, Intra 모드보다 Inter 모드가 더 좋은 결과를 나타낸다는 것을 알 수 있다. 이를 통해 홀로그래프 비디오도 시간적으로 상관성이 있다는 것을 알 수 있다. 지금까지 연구 사례들을 살펴보면 홀로그래프 동영상을 위한 연구는 다소 부족한 상황이기 때문에 홀로그래프 비디오에서 시간적 상관성에 대한 많은 연구가 이루어져야 할 것으로 보인다.

JPEG, JPEG2000, AVC, HEVC 등과 같은 표준 코덱들을 이용하여 홀로그래프를 압축하고, 이들 사이의 압축 효율을 벤치마킹한 다양한 연구가 진행되었는데 이들 중에서 몇 가지 최근에 발표된 결과들을 살펴보고자 한다[27][25][26]. 모두 유사한 데이터와 유사한 코덱을 사용했기 때문에 유사한 결과를 보이고 있다. 그러나 몇 가지 점에서 유사한 실험환경이라 할지라도 다른 결과를 만들어낼 수 있는 여지가 존재한다. 첫 번째는 부동소수점 형태의 복소 홀로그래프를 표준 코덱에 입력시키기 위해 8비트의 정수형 데이터로 변환하는 과정에 있다. 이 과정은 각 연구자별로 프로그래밍 방식에 따라서 크지는 않지만 일부 차이를 만들 수 있다. 두 번째는 코덱의 파라미터 조정에 있다. 각각의 코덱은 조절할 수 있는 다양한 파라미터가 존재한다. 예를

들어 HEVC의 경우에 Intra 모드를 사용한다면 QP 및 CU 사이즈 등을 조절할 수 있고, JPEG2000의 경우에는 목표 PSNR을 위한 압축을 할 수도 있고, 압축율을 목표로 압축을 수행할 수도 있다. 이와 같이 선호하는 파라미터의 셋팅 차이에 의해서 일부 결과에 차이가 발생할 수 있다. 마지막으로 PSNR과 같은 평가 톨을 어느 데이터에 적용하느냐에 따라서 일부 결과가 달라질 수 있다. 홀로그램은 다양한 방법으로 표현될 수 있는데, 광학적 방법으로 CCD를 이용하여 홀로그램을 촬영했다면 intensity 기반의 홀로그램이고, 위상-천이 방식의 홀로그램인 경우에는 각 홀로그램 사이의 차이값(Phase-shifted distances based representation)을 압축에 이용한다. 마지막으로 가장 일반적인 홀로그램은 복소파(complex object wavefield based representation)로 표현하는 것이다. 복소파의 형태로 표현하는 것도 실수와 허수로 표현할 수도 있고, 진폭과 위상으로 표현할 수도 있다. 이러한 다양한 홀로그램의 표현 방법들로 인해 같은 홀로그램에 대한 정보를 나타낸다 할지라도 압축에 대한 효율성은 달라질 수 있다. 홀로그램의 방향성에 대한 특성을 HEVC에 적용한 연구도 수행되었다 [89]. 이 연구에서는 HEVC의 인트라 예측 모드에 방향성을 고려한 연산이 가능한 알고리즘을 삽입하였다. 원래 HEVC Intra 모드는 방향성을 따지는 알고리즘이 내재되어 있는데 이를 홀로그램에 적합한 변환과 양자화기를 고안하여 추가함으로써 홀로그램에 대한 압축 효율을 향상시키고자 하였다. 압축 과정에서 최적의 압축 방식을 결정하기 위해 홀로그램에 맞는 Rate-Distortion Optimized 방식을 사용하였다. 그러나 결론적으로 압축 효율은 HEVC Intra와 거의 유사한 특성을 보였다.

홀로그램을 압축하는 연구는 크게 홀로그램 자체를 압축하는 방법과 홀로그램을 특정한 거리로 전파시킨 후에 그 위치에서 회절된(복원된) 면의 정보를 압축하는 방법[15][16][17][18][19]으로 나눌 수 있다. 지금까지 논의한 대부분의 방법은 홀로그램 자체를 압축하기 위해 시도된 것들이다. 홀로그램은 잡음과 유사한 형태를 갖고 있어 화소들간에 공간적인 상관성을 찾기가 매우 어렵기 때문에 주파수 변환을 수행하더라도 좋은 에너지 집중도를 보이지 어렵다. 따라서 홀로그램을 조금 더 공간적인 상관성이 높은 데이터의 형태로 변환한 후에 이를 압축하고자 하는 것이 복원 영역에서의 압축방식이다. 복원 영역에서의 방식은 홀로그램 자체를 압축하는 것보다는 개념적으로 더 높은 압축율을 달성할 수 있는 것으로 이해될 수 있으나 특정한 거리에서 회절된 데이터를 압축하는 것이기 때문에 특정 거리의 정보에 오차가 집중될 수도 있고, 거리에 따른 홀로그램의 복원 품질에 차등이 발생할 수도 있다. 그러나 만일 압축으로 인해 발생한 오차가 시각적으로 영향을 주지 않는 범위에 있고, 특정한 거리에서 발생한 오차로 인해 다른 거리에서의 복원에 영향을 미치지 않는다면 이 방식은 매우 효율적인 방식이라 할 수 있다. 이러한 논의에 대한 연구는 아직 되고 있지 않기 때문에 추후 복원 영역에서의 압축에 대한 다양한 실험과 검증 과정이 필요할 것으로 보인다. 복원 영역에서의 압축을 시도한 가장 대표적인 연구는 프레넬릿 기반의 압축 방법이다 [15][28]. 프레넬릿 변환은 웨이블릿 필터를 프레넬 영역의 공간적인 크기만큼 확장시킨 개념이다. 이는 결국 홀로그램을 특정 거리로 프레넬 회절시킨 이후에 그 회절면을 웨이블릿 필터로 변환한 것과 동일한 결과를 가져온다. 홀로그램의 random phase를 고려한다면 이론적으로 B-spline 함수를

이용한 기저를 웨이블릿 필터링에 사용하는 것이 가장 좋은 결과를 가져온다[28]. 프레넬릿을 이용하여 홀로그래프를 변환한 이후에는 양자화기와 엔트로피 코더 그리고 SPIHT 등을 이용하여 압축을 수행한다[16][29][30][31]. 이전 연구들을 살펴보면 세밀한 알고리즘에는 약간의 차이가 있지만 큰 틀에서는 거의 유사한 구조와 알고리즘을 사용하여 홀로그래프를 압축하고 있고, 압축율도 거의 비슷한 수준이다.

II. 홀로그래프 미디어의 압축을 위한 주요기술

본 장에서는 홀로그래프의 압축과 관련하여 지금까지 소개되었던 연구들 중에서 몇 가지 주요한 기술들에 대해 좀 더 상세히 소개함으로써 다양한 기법들이 홀로그래프 압축에 기여하는 정도와 각 기술들 간의 비교 분석을 시도한다.

1. Adaptive Transform을 이용한 확장된 HEVC

DA-DWT를 기반으로 하여 JPEG2000 코덱을 확장한 연구[12]에서 홀로그래프를 압축하기 위해서 방향성을 고려한 주파수 변환 도구를 사용하는 것이 성능이 우수하다는 특성을 보였다. 이와 같은 연구 결과에 기초하여 HEVC의 변환 도구에도 방향성에 대한 특성을 부여할 수 있다면 더욱 좋은 홀로그래프 코덱을 만들 수 있을 것이라는 아이디어가 본 연구의 시작이다[26]. JPEG2000과 HEVC Intra를 이용하여 홀로그래프를 압축할 경우에 HEVC Intra가 더 우수한 성능을 나타내기 때문에 JPEG2000

에서 방향성을 고려한 변환으로 이득을 보인 것만큼 HEVC Intra에서도 그 만큼의 이득을 보일 수 있을 것이라는 예측에 기반한다. 따라서 본 연구에서는 HEVC의 인트라 예측 모드에 방향성을 고려한 연산이 가능한 알고리즘을 삽입하였다. 원래 HEVC Intra 모드는 방향성을 따지는 알고리즘이 내재되어 있는데 이를 홀로그래프에 적합한 변환과 양자화기를 고안하여 추가함으로써 홀로그래프에 대한 압축 효율을 향상시키고자 하였다. 압축 과정에서 최적의 압축 방식을 결정하기 위해 홀로그래프에 맞는 Rate-Distortion Optimized 방식을 사용하였다. 그러나 결론적으로 압축 효율은 HEVC Intra와 거의 유사한 특성을 나타냈다. HEVC의 Intra 예측만을 개선하여 압축 효율을 높이고자 하였으나, HEVC는 내장된 전체 알고리즘들이 전체적으로 최적화 과정을 거쳤기 때문에 특정 부분을 수정하였다면 그때부터 이미 그 부분을 제외한 나머지 다른 부분들은 수정된 부분에 대해 최적화된 것이 아닌 형태로 볼 수 있다. 따라서 특정 부분의 개선으로 인해 전체의 성능이 향상된다는 것은 선형적인 관계가 아니다.

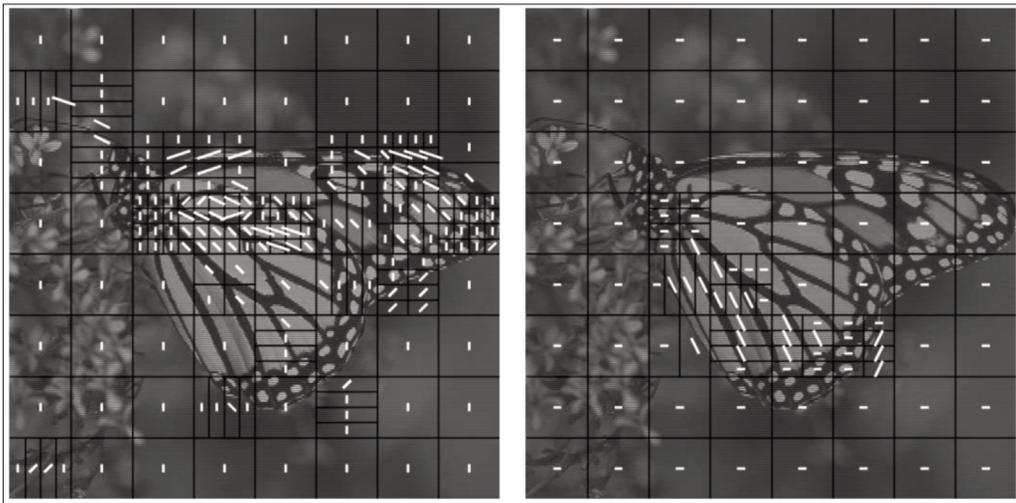
2. 확장된 JPEG2000

웨이블릿 변환을 이용한 압축 방식이 디지털 홀로그래프에 잘 적용되기 때문에 이전에 많은 연구들이 웨이블릿 변환을 이용하여 디지털 홀로그래프를 압축하고자 시도하였다. 이 연구는 이러한 연구 줄기의 하나로써 웨이블릿 변환을 기반으로 하는 JPEG2000에 홀로그래프의 특성을 반영할 수 있는 알고리즘을 부가하여 JPEG2000 코덱을 확장하였다[12]. 먼저 디지털 홀로그래프의 주파수 특성은 일

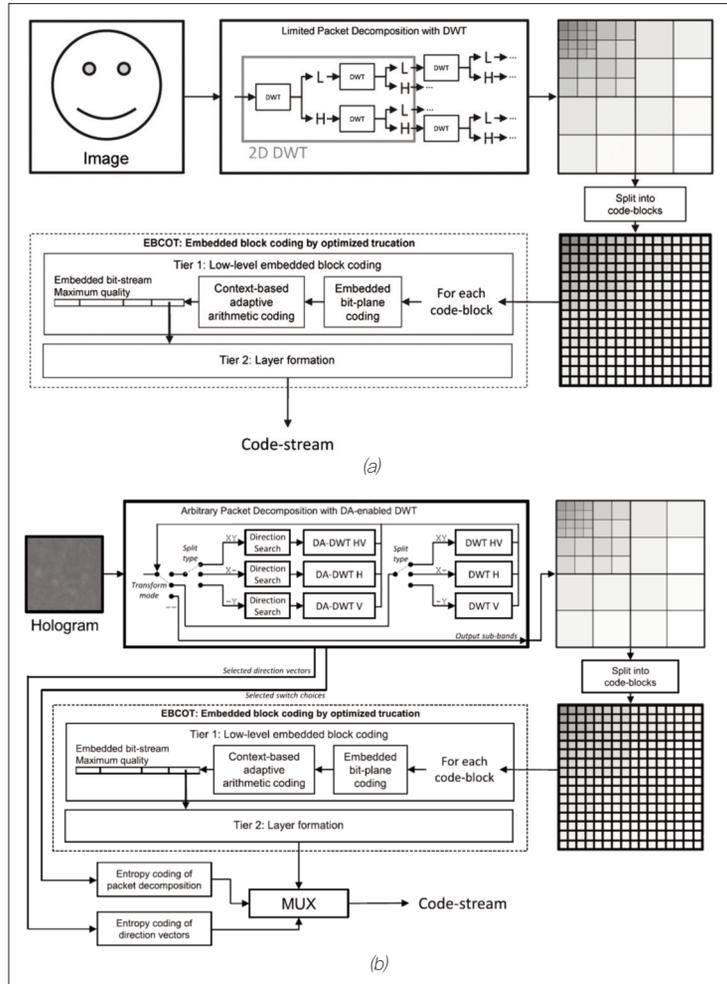
반적인 2차원 영상과 매우 상이한 형태로 나타나고, 2차원 영상과 다른 주파수 성분을 갖는다. 따라서 2차원 영상을 위해 만들어지고 최적화된 변환 방식들은 홀로그램에 적합하지 않다. JPEG2000의 경우에 DWT를 이용하여 Mallat 트리 방식의 부대역 구조를 만들고, EBCOT를 이용하여 패킷 기반의 적응적 엔트로피 코딩을 통해 압축을 수행한다. 그러나 홀로그램은 2차원 영상과 다른 주파수 성분을 갖지 않기 때문에 Mallat 트리 방식의 부대역 구조가 적합하지 않을 수도 있다. 즉, 다양한 부대역 구조로 홀로그램을 분해해야 하는데 JPEG2000에는 이러한 동작을 수행하기에 한계가 있다. 따라서 <그림 1>과 같이 다양한 부대역 구조를 만들어 낼 수 있는 DWPT(Discrete Wavelet Packet Transform)를 사용해야 한다. 홀로그램은 2차원 영상과 전혀 다른 공간 특성을 나타내기 때문에 다른 형태의 주파수 분해를 시도해야 한다. 즉, 홀로그램의 다양한 구조적 형태를 분해하고 해석하기 위해

<그림 1>과 같이 방향성을 고려할 수 있는 변환 도구를 사용해야 한다. 본 연구에서는 이를 위해 DA-DWT를 채택하여 디지털 홀로그램의 공간 특성을 해석하는데 이용하였다[20].

앞서 설명한 2가지 기능을 취합하여 JPEG2000에 추가하였고, 영상의 특성에 따라서 이들을 선택할 수 있도록 하였다. DA-DWT를 이용하여 DWPT 방식으로 변환된 홀로그램은 EBCOT를 이용하여 실제 압축을 수행한다. 그러나 DA-DWT 기반의 DWPT 구조가 표준 JPEG2000의 EBCOT에 최적화된 것은 아니기 때문에 코덱 전체가 최적화된 형태라고 보기는 어렵다. <그림 2>에 원래의 JPEG2000에 대한 구조와 확장된 JPEG2000의 구조를 나타냈다. DA-DWT를 수행하면서 얻어진 방향성에 대한 정보(direction vector)와 DWPT의 정보는 별도의 엔트로피 코딩을 거쳐서 비트스트림에 포함된다.



<그림 1> Directional-Adaptive 이산 웨이블릿 변환(DA-DWT)의 부대역 예시

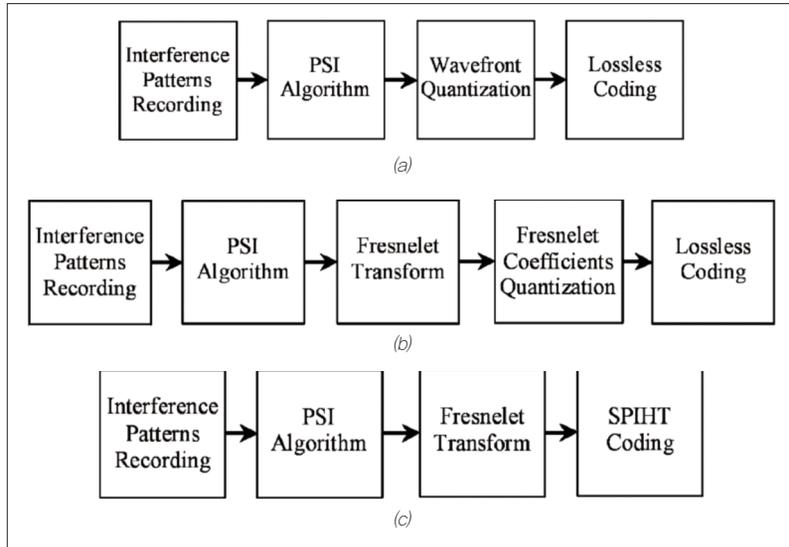


〈그림 2〉 제안한 JPEG2000 기반의 홀로그램 코덱의 구조 (a) 원래의 구조, (b) 확장된 구조

3. 복원영역 기반 압축

홀로그램을 압축하는 연구는 크게 홀로그램 자체를 압축하는 방법과 홀로그램을 특정한 거리로 전파시킨 후에 그 위치에서 회절된(복원된) 면의 정보를 압축하는 방법[15-19]으로 나눌 수 있는데, 본 절에서는 그 중에서 대표적인 몇 개의 연구에 대해서 살펴본다. 이전 연구들에서 세밀한 알고리즘에는 약간의 차이가 있지만 거의 유사한 구조와 알고

리즘을 사용하여 홀로그램을 압축하고 있기 때문에 몇 가지 대표적인 사례를 살펴보면 전체적인 흐름을 파악할 수 있다. 복원영역 기반의 압축 방식 중에서 가장 대표적인 것이 프레넬릿 변환을 이용한 압축 방법이다[15]. 프레넬릿 변환은 기본적으로 웨이블릿 변환에 근본을 두고 있기 때문에 웨이블릿 변환에서 이용되던 양자화 방식과 엔트로피 코딩 방식, 그리고 부대역 사이의 상관성을 사용한 코딩 방식 등을 그대로 활용하여 왔다. 〈그림 3〉에 대표



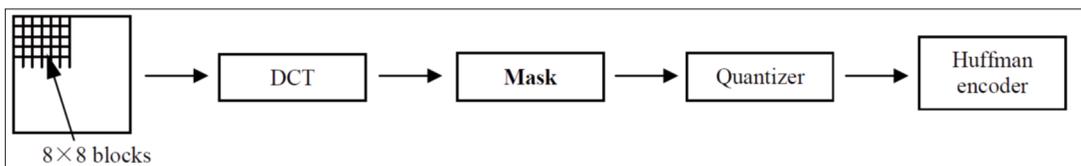
〈그림 3〉 프레넬릿 기반의 압축 (a) BWT 코딩, (b) 프레넬릿+BWT 코딩, (c) 프레넬릿+SPIHT 코딩

적인 압축 방법들을 나타냈다. 가장 기본적인 방법은 〈그림 3〉(b)인데 이 방법은 초창기의 웨이블릿 코덱의 형태를 그대로 차용하였다. 프레넬릿 변환 이후에 양자화를 수행하고, 양자화된 결과에 엔트로피 코딩을 적용한다. 그 다음의 방법은 부대역의 특성을 이용하여 코딩하는 SPIHT를 활용한 방법이다. 2차원 영상에 대해서는 SPIHT가 좋은 성능을 보일 수 있으나 홀로그램은 2차원 영상과 특성이 다르기 때문에 양자화기 및 엔트로피 코딩을 사용한 방식에 비해 탁월한 성능을 보이지 않는다. 서론에서 설명한 것과 같이 홀로그램의 코딩에는 BWT

가 좋은 성능을 보이는데, 이를 이용한 결과는 SPIHT를 이용한 결과와 압축 효율이 유사함을 확인할 수 있다.

4. JPEG기반의 압축

JPEG을 이용하여 홀로그램을 압축한 연구 사례 중에서 가장 최근 이루어졌던 연구를 〈그림 4〉에 나타냈다[32]. 대부분의 논문들[25][26][28]에서는 홀로그램을 압축하는데 JPEG을 그대로 이용하였으나 [32]에서는 JPEG의 내부구조를 홀로그램에



〈그림 4〉 JPEG 기반의 홀로그램 압축 알고리즘

맞게 수정한 후에 압축을 시도한다. 먼저 DCT를 이용하여 홀로그램을 주파수로 변환하고, DCT 영역에서 홀로그램의 일차항을 제거하기 위해 Masking을 수행한다. 이 Masking이 [32]의 핵심 기법인데 일차항이 포함되지 않은, 생성된 홀로그램의 경우에는 무의미하다. Masking 이후에 양자화를 수행하고 허프만 코딩을 거쳐서 홀로그램을 위한 JPEG 비트 스트림을 생성한다. 실험결과를 살펴보면 동일한 압축 조건에서 일반적인 JPEG에 비해서 약 6% 가량의 성능향상을 볼 수 있었다. 뿐만 아니라 일반적인 JPEG 디코더와 완벽히 호환되기 때문에 유용성이 높은 코덱으로 볼 수 있다.

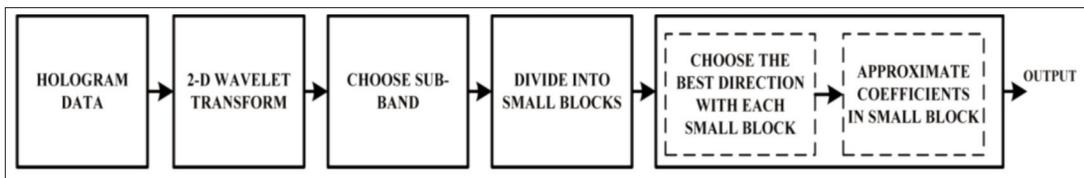
5. Wavelet-Bandelet 변환 기반의 압축

홀로그램의 방향성을 고려하여 압축을 시도하는 연구가 JPEG2000기반의 방식[12]과 HEVC기반의 방식[26]에서 각각 수행되었었다. 그 이전에 웨이블릿 영역에서 부대역 내부에서 방향성을 고려하여 부대역 계수를 예측하고 양자화함으로써 압축의 효율을 높이고자 하는 연구가 진행되었는데, 이 방식이 <그림 5>의 Wavelet-Bandelet 기반의 압축 기법이다[10]. 홀로그램에 대해 DWT를 수행한 이후에 부대역을 작은 블록으로 나눈다. 작은 블록 단위 내에서 가장 큰 형태의 방향성을 정하고 이 방향성을 기준으로 블록 내의 계수들을 유사한 값들로 근

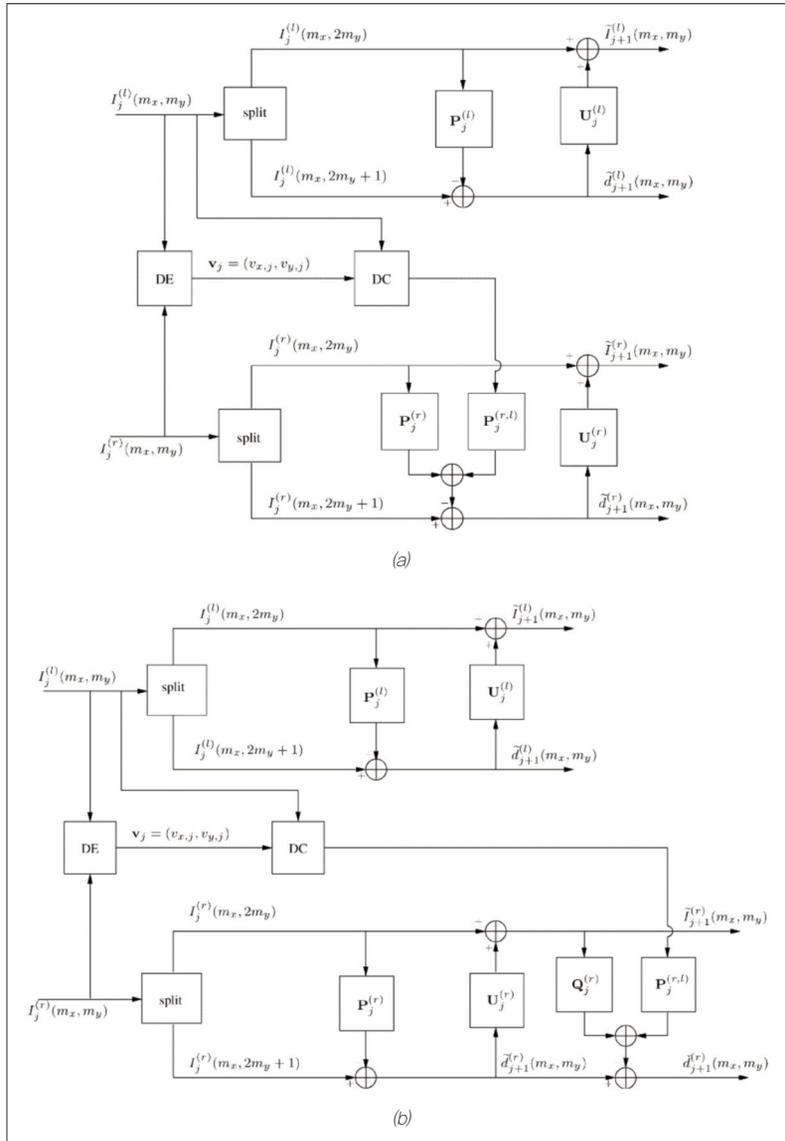
사화한다. 근사화된 계수들은 설정된 방향에 따라 RLC(Run-Length Coding)를 수행하여 코드 워드로 표현하고 이를 엔트로피 코딩을 거쳐서 압축된 비트스트림을 생성한다. [10]의 연구결과를 살펴보면 DCT 및 DWT를 이용한 방식의 압축보다 낮은 에러율을 보이고 있다. 다양한 웨이블릿 필터를 이용하여 제안한 알고리즘을 적용하였으나 특정 필터가 모든 경우에 대해 우수한 결과를 보이는 경향성은 나타나지 않았다.

6. Vector Lifting Scheme(VLS) 기반의 압축

리프팅 알고리즘은 웨이블릿 필터링을 factorization함으로써 in-phase 연산이 가능하고, 연산의 횟수를 감소시킬 수 있는 고속화 기법이다. 리프팅 알고리즘은 예측(Predict, P)과 업데이트(Update, U) 연산을 통해서 신호가 가지고 있는 저주파 성분과 고주파 성분(잔차 성분)을 효과적으로 분리할 수 있다. 이러한 능력은 다양한 영상처리에서 활용되어 왔는데, 여기에는 두 가지 응용 분야가 있다. 첫 번째는 영상신호의 시간적인 상관성을 줄이기 위해 만들어진 MCTF(Motion Compensated Temporal Filtering)이고, 두 번째는 두 영상의 공간적인 상관성을 줄이기 위해 만들어진 VLS(Vector Lifting Scheme)이다. 이 중에서 두 번째인 VLS는



<그림 5> Wavelet-Bandelet 변환을 이용한 홀로그램 압축 방식



〈그림 6〉 VLS의 구조 (a) VLS-I, (b) VLS-II

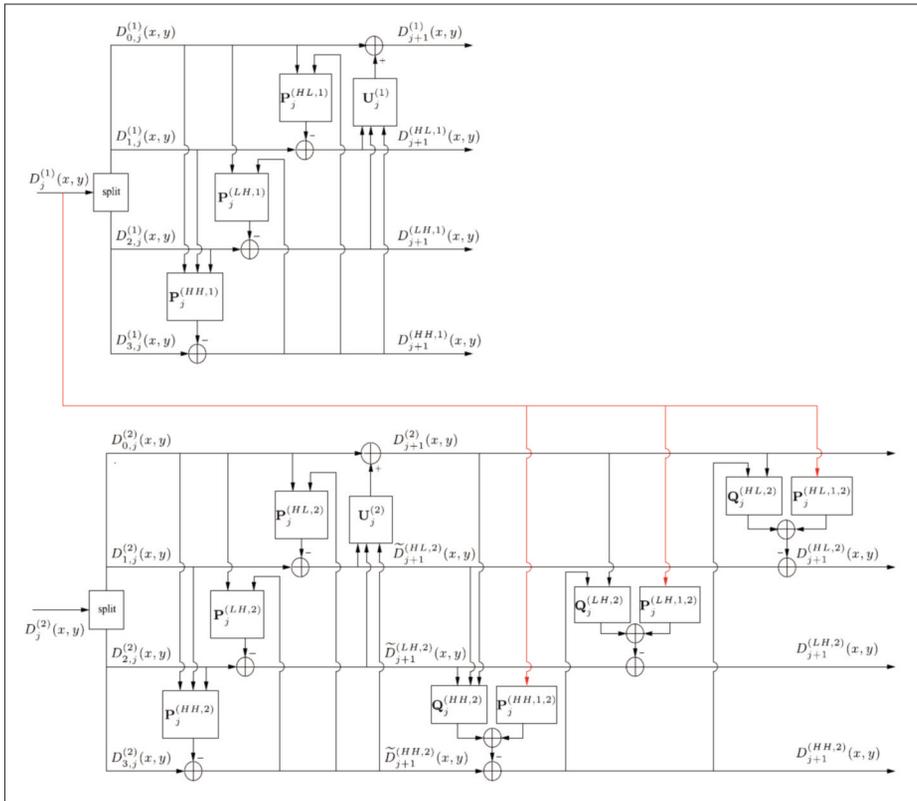
다시점 영상 혹은 스테레오 영상에서 두 시점의 영상 사이의 공간적인 중복성을 제거하기 위해 주로 사용되었다[33][34]. 두 개의 영상이 VLS에 입력되면 하나의 참조 영상과 하나의 잔차 영상이 출력된다. 이 두 영상을 이용하여 다시 두 시점의 영상을

복원할 수 있다. VLS의 특성을 이용하여 phase-shifting 홀로그래프에서 다른 위상들에서 생성된 홀로그래프들 사이의 상관성을 제거할 수 있다. 즉, 두 시점의 영상에 대한 문제를 두 위상의 홀로그래프에 대한 위상으로 옮겨 놓은 것으로 생각할 수 있다.

VLS를 통해서 출력된 저주파와 고주파 성분의 두 홀로그램은 JPEG2000을 이용하여 압축을 수행한다. 전체적인 구조를 따져보면 VLS는 JPEG2000을 위한 전처리의 역할을 수행하는 것으로 고려할 수 있다. VLS는 기본적으로 1차원 연산이고, 2차원 연산으로 확장하기 위해서는 2번의 1차원 연산을 수행한다. 이때 두 번의 1차원 연산은 각각 독립적으로 수행되고, 이 방식을 separable VLS라고 한다[1]. VLS는 2가지 구조를 가지고 있는데 <그림 6>에 각각의 방법을 나타냈다. 두 구조는 매우 유사한 구조를 가지고 있는데 먼저 첫 번째 위상 성분에 의한 홀로그램의 처리는 동일하다. 두 번째 위상 성분에 의한 홀로그

램을 연산하는 방법에 있어서 예측 혹은 업데이트 연산방법이 다르다. 그러나 결국 두 방식 모두 첫 번째 위상에 의한 홀로그램을 두 번째 위상에 의한 홀로그램을 예측하는데 사용한다는 점은 동일하다.

Separable 방식은 두 홀로그램 사이에 예측을 위해 1차원 정보만을 이용하고 있다. 만일 예측을 할 때 2차원 형태의 더 많은 정보를 활용한다면 조금 더 정확한 예측을 통해서 중복성을 효율적으로 제거할 수 있을 것이다. 이러한 개념으로 나온 것이 non-separable 방식이고, <그림 7>에 구조를 나타냈다 [13]. Separable 방식과 비교하면 기본적인 형태는 거의 동일하다. 단지 예측 및 업데이트에 이용되는



<그림 7> Non-separable 기반의 VLS 구조

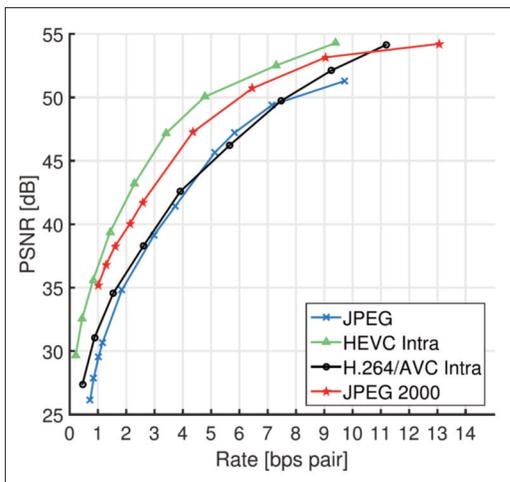
인접 화소가 1차원이 아닌 2차원 좌표로 이루어져 있다는 것이 차이점이다. 이러한 2차원의 인접 화소를 참조하여 예측을 수행함으로써 예측의 정확도를 높일 수 있었다. 그러나 <그림 7>(a)의 실험 결과를 살펴보면 압축 효율은 약 0.5dB 가량 향상되었기 때문에 큰 효과를 보기는 어려운 것으로 분석된다. 리프팅 방식의 특성에 따라 예측 및 업데이트를 수행하는 필터의 형태에 따라서 성능이 개선될 여지가 있다. 이러한 결과를 <그림 7>(b)에 나타냈다. 이 결과를 살펴보면 단지 필터 탭수가 크다고 해서 성능이 향상되는 것은 아니고 적절한 탭수의 필터를 사용해야지 최적의 성능을 보인다는 것을 확인할 수 있다. 이 실험에서는 (20,2)가 가장 우수한 성능을 보이고 있다.

III. 홀로그래밍 미디어의 압축 성능 평가

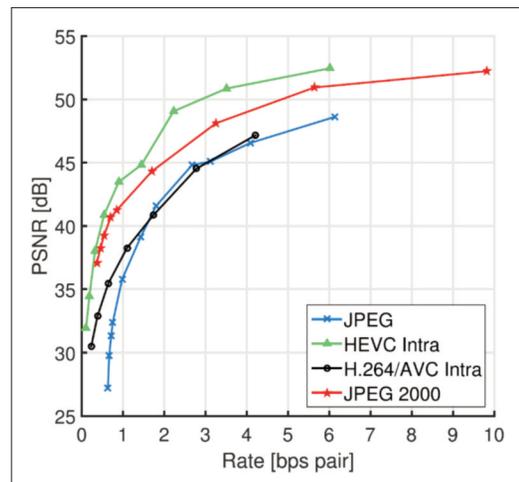
본 장에서는 기존의 연구들에서 가장 높은 압축

율을 나타내는 결과들에 대해서 간단히 정리하고자 한다. 참고하고자 하는 연구는 [25][26][95]의 연구이다. [26]의 연구에서 테스트 데이터는 3D Multi (1,920×1,080)와 Bunny (512×512)이고, 실험에 사용한 코덱은 JPEG, JPEG2000, H.264/AVC Intra와 HEVC Intra이다. 전체 적인 압축 성능은 HEVC Intra, JPEG2K, JPEG, AVC Intra의 순서이다. floating-point 형태의 matrix를 scaling과 quantization 과정을 거치면서 8-bit sample로 표현한 이후에 코덱에 입력하여 압축과 복원을 수행한다. 압축율은 bps(bit per sample)로 나타내었다. 샘플을 8-bit라고 가정하면 complex hologram 쌍에 대해서 <그림 8>과 같이 3D Multi는 HEVC Intra의 경우에 0.5bps, 32:1의 압축율에서 33dB의 성능을 보인다. <그림 9>와 같이 Bunny는 HEVC Intra의 경우에 0.5bps, 32:1의 압축율에서 40dB의 성능을 보인다.

[25]의 논문에서는 <표 1>과 같이 테스트 영상으로 INTERFERE-I dataset을 사용하고 있다. 압축



<그림 8> 3D Multi에 대한 PSNR 결과 (RE/IM)



<그림 9> Bunny에 대한 PSNR 결과 (RE/IM)

〈표 1〉 실험에 사용된 영상과 특성

Name	Description of hologram	Dimensions	Pixel size
2D Dice	2D image of a dice	1920x1080	2 μm
2D Dice	2D image of a dice	1920x1080	2 μm
2D Dice	2D image of a dice	1920x1080	2 μm
2D Dice	2D image of a dice	1920x1080	2 μm
2D Dice	2D image of a dice	1920x1080	2 μm

율을 측정하는 방법으로 bpp를 사용하고 있고, 0.125, 0.25, 0.5 및 1의 4가지 조건으로 압축을 하였다.

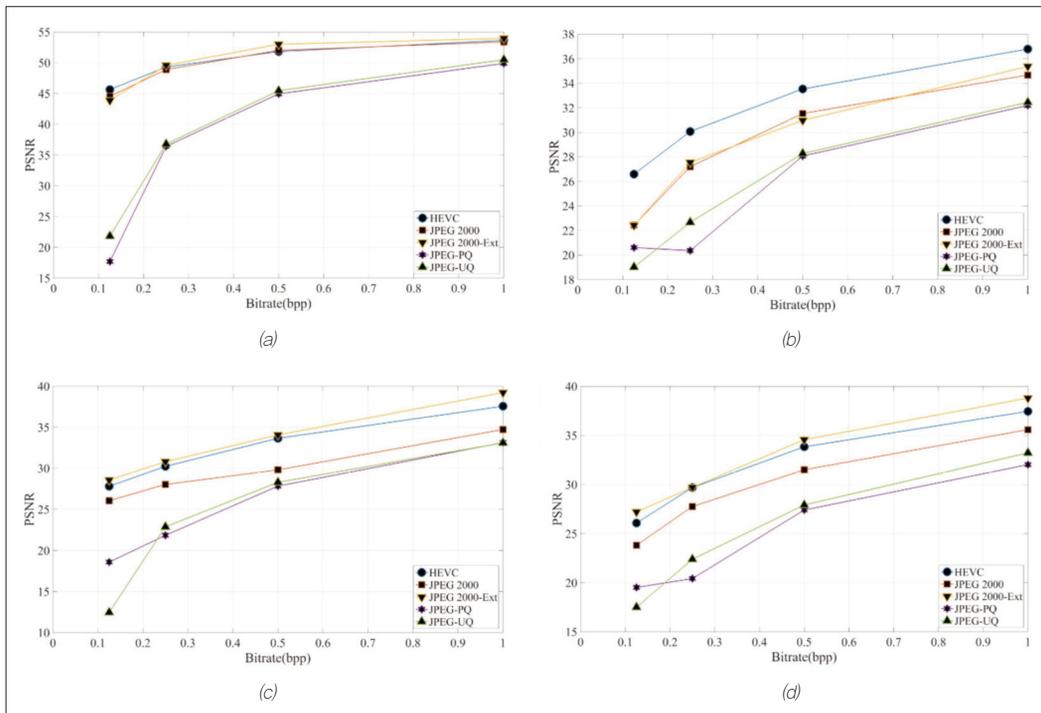
입력 홀로그램에 따라서 결과는 좀 차이가 있는데, 0.5bpp를 기준으로 앞서 설명한 논문과 비교를 위해서 3D multi-dice의 결과와 비교한다. 특이하게 3D cat의 경우에 HEVC로 압축을 하지 않아서 결과에서 제외시킨다. 분석 및 비교결과를 〈표 2〉

〈표 2〉 홀로그램 별 압축율에 따른 PSNR 분석 결과

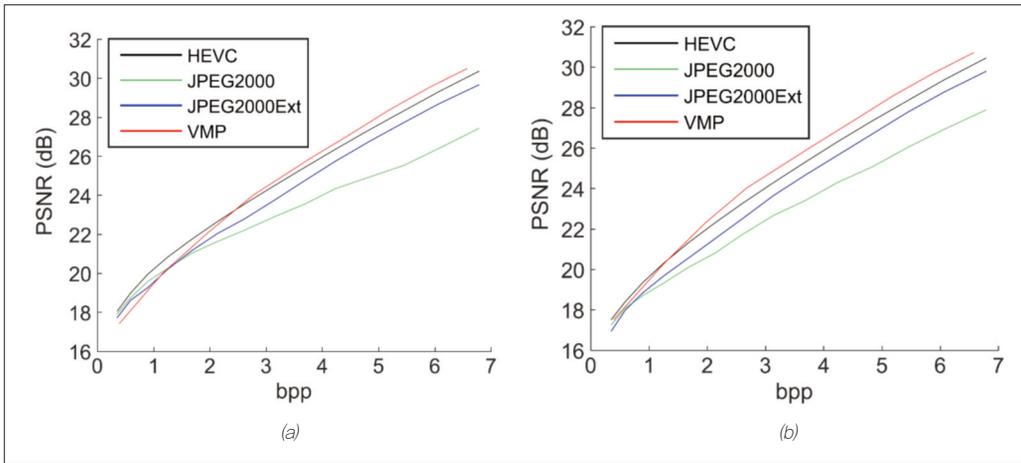
	PSNR	bpp	8-bit per pixel
2D Dice	52dB	0.5	32:1
3D Venus	34dB	0.5	
2D Multi-Dice	34dB	0.5	
3D Multi-Dice	34dB	0.5	

에 나타내었고, 성능을 〈그림 10〉에 나타냈다.

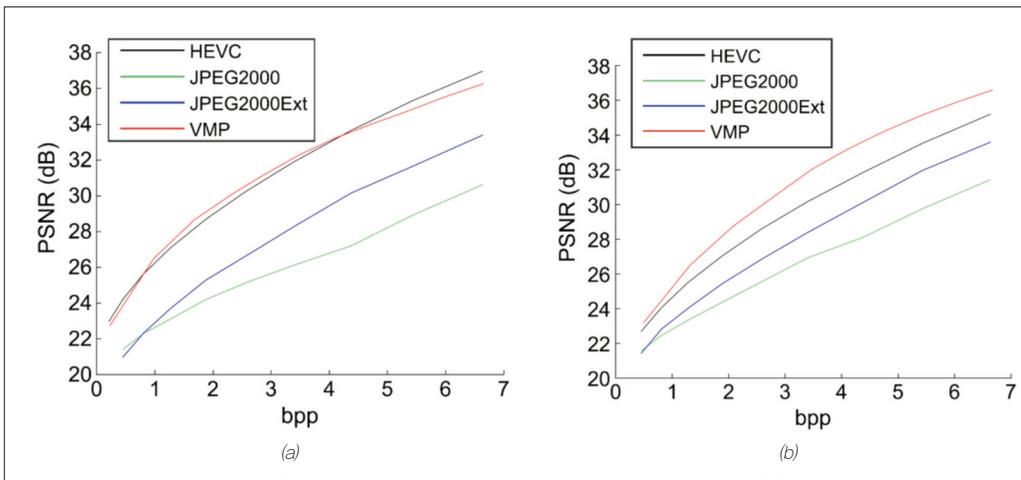
[35]의 논문에서는 컬러 홀로그램에 대한 압축



〈그림 10〉 홀로그램 압축 결과 (a) 2D Dice, (b) 3D Venus, (c) 2D Multi-Dice, (d) 3D Multi-Dice



〈그림 11〉 Ring 홀로그래밍의 압축 결과 (a) 중심 시점, (b) 오른쪽 시점



〈그림 12〉 Diffuse Car 홀로그래밍의 압축 결과 (a) 중심 시점, (b) 오른쪽 시점

알고리즘 결과를 소개하고 있다. 컬러이기 때문에 sample의 비트수는 24비트이다. 〈그림 11〉과 〈그림 12〉에 나타난 컬러 홀로그래밍들은 random phase가 고려된 홀로그래밍들이기 때문에 이것이 고려되지 않은 경우와 비교할 때 성능이 낮다. 30dB의 PSNR을 보이는 경우에 bps는 약 6에서 7사이이기 때문에 앞서 두 경우와 비교하면 10배 이상 차

이가 난다는 것을 확인할 수 있다.

IV. 결론

본 고에서는 최근까지 진행되었던 디지털 홀로그래밍 압축과 관련된 다양한 기술들에 대해서 논문

들을 분석해 보았다. 디지털 홀로그램에 대한 정의조차 명확하지 않기 때문에 디지털 홀로그램의 압축 기술을 다루는 분야는 이제 걸음마 단계로 생각할 수 있다. 따라서 앞으로 많은 원천 연구가 수반되어야 하고, 다양한 관점에서 디지털 홀로그램에 대한 코딩 기술이 논의되어야 한다. 특히 기존의 2차원 및 3차원 영상처리 기술을 기반으로 디지털 홀로그램에 대한 코딩 기술을 접근해야 할 것인지,

아니면 디지털 홀로그램을 위한 새로운 신호처리 기술들이 적용되어야 하는 것인지 등에 대해서도 많은 연구와 논의가 이루어져야 할 것이다. 또한 최근에는 딥러닝에 대한 연구가 모든 분야에 스며들기 시작하면서 디지털 홀로그램의 신호처리를 위한 분야에서 딥러닝의 역할도 기대해 볼만할 것이다.

참고 문헌

- [1] T. J. Naughton, Y. Frauel, B. Javidi and E. Tajahuerce, "Compression of digital holograms for three-dimensional object reconstruction and recognition," *Appl. Opt.*, vol. 41, pp. 4124-4132, July 2002.
- [2] T. J. Naughton, Y. Frauel, O. Matoba, N. Bertaux, E. Tajahuerce and B. Javidi, "Three-dimensional imaging, compression, and reconstruction of digital holograms," *SPIE Proc.*, vol. 4877, Opp.104-114, Mar, 2003.
- [3] H. Yoshikawa and K. Sasaki, "Image Scaling for electro-holographic display," editor, *SPIE Proc.*, vol. 2176 Practical Holography VIII, paper#2176-02, pp. 12-22, Feb, 1994.
- [4] Y. Rivenson, A. Stern, and B. Javidi "Compressive fresnel holography," *Journal of Display Technology*, vol. 6, no. 10, pp. 506-509, Sep,2010
- [5] P. Memmolo, M. Paturzo, A. Pelagotti, A. Finizio, P. Ferraro, and B. Javidi, "Compression of digital holograms via adaptive-sparse representation," *Optics letters*, vol. 35, no. 23, pp. 3883-3885, Dec,2010
- [6] P. Memmolo, M. Paturzo, A. Pelagotti, A. Finizio, P. Ferraro, and B. Javidi, "New high compression method for digital hologram recorded in microscope configuration," In *Modeling Aspects in Optical Metrology III*, International Society for Optics and Photonics, vol. 8083, no. 80830W, pp. 1-7, May,2011
- [7] Y. Rivenson, A. Stern, and B. Javidi, "Overview of compressive sensing techniques applied in holography," *Applied optics*, vol. 52, no. 1, pp. A423-A432, Jan,2013
- [8] H. Zhang, W. Zhou, D. Leber, Z. Hu, X. Yang, P. W. Tsang, and T. C. Poon, "Development of lossy and near-lossless compression methods for wafer surface structure digital holograms," *Journal of Micro/Nanolithography, MEMS, and MOEMS*, vol. 14, no. 4,pp. 1-8, Dec,2015
- [9] P. A. Cheremkhin, and E. A. Kurbatova, "Numerical comparison of scalar and vector methods of digital hologram compression," *Holography, Diffractive Optics, and Applications VII*, vol. 10022, no. 1002227, pp.1-10, Oct,2016
- [10] L. T. Bang, Z. Ali, P. D. Quang, J. H. Park, and N. Kim, "Compression of digital hologram for three-dimensional object using Wavelet-Bandelets transform," *Optics express*, vol. 19, no. 9, pp.8019-8031, Apr,2011
- [11] Y. Xing, M. Kaaniche, B. P. Popescu, and F. Dufaux, "Vector lifting scheme for phase-shifting holographic data compression," *Optical Engineering*, vol.53, no. 11, pp.1-12, Nov,2014
- [12] D. Blinder, T. Bruylants, H. Ottevaere, A. Munteanu, and P. Schelkens, "JPEG 2000-based compression of fringe patterns for digital holographic microscopy," *Optical Engineering*, vol. 53, no. 12, pp.1-13, Dec,2014
- [13] Y. Xing, M. Kaaniche, M. B. P. Popescu, and F. Dufaux, "Adaptive nonseparable vector lifting scheme for digital holographic data compression," *Applied optics*, vol. 54, no. 1, pp.A98-A109, Jan,2015

- [14] T. Birbaum, D. Blinder, C. Schretter, and P. Schelkens, "Compressing Macroscopic Near-field Digital Holograms With Wave Atoms," In Digital Holography and Three-Dimensional Imaging pp. DW2F-5, Jun,2018
- [15] E. Darakis and J. J. Soraghan, "Use of Fresnelets for Phase-Shifting Digital Hologram Compression," in IEEE Transactions on Image Processing, vol. 15, no. 12, pp. 3804-3811, Dec. 2006.
- [16] E. Darakis and J. J. Soraghan, "Reconstruction domain compression of phase-shifting digital holograms," Appl. Opt, vol. 46, no. 3, pp. 351-356, Jan, 2007.
- [17] E. Darakis, T. J. Naughton, and J. J. Soraghan, "Compression defects in different reconstructions from phase-shifting digital holographic data," Appl. Opt, vol. 46, no. 21, pp. 4579-4586, Mar, 2007.
- [18] J. Y. Sim, "Digital hologram compression using correlation of reconstructed object images," In Pacific-Rim Symposium on Image and Video Technology. pp. 204-214, Nov,2011
- [19] J. Y. Sim, and C. S. Kim, "Reconstruction depth adaptive coding of digital holograms," IEICE Transactions on Fundamentals of Electronics, Communications and Computer Sciences, vol. 95, no. 2, pp. 617-620, Feb,2012
- [20] C. L. Chang, and B. Girod, "Direction-adaptive discrete wavelet transform for image compression," IEEE Transactions on Image Processing, vol. 16, no. 5, pp. 1289-1302, May,2007
- [21] H. Yoshikawa and J. Tamai "Holographic image compression by motion picture coding," SPIE Proc, vol. 2652, Practical Holography X, pp. 2-9, March, 1996.
- [22] Y. H. Seo, H. J. Choi and D. W. Kim, "3D scanning-based compression technique for digital hologram video," Signal Processing: Image Communication, vol. 22, no. 2, pp. 144-156, Nov, 2006.
- [23] Y. H. Seo, H. J. Choi, J. W. Bae, H. J. Kang, S. H. Lee, J. S. Yoo and D. W. Kim, "A new coding technique for digital holographic video using multi-view prediction," IEICE TRANSACTIONS on Information and Systems, vol. E90-D, no.1, pp. 118-125, Jan, 2007.
- [24] E. Darakis and T. J. Naughton, "Compression of digital hologram sequences using MPEG-4," SPIE Proc, vol. 7358, pp. 735811-1, May 2009.
- [25] J. Peixeiro, C. Brites, J. Ascenso, and F. Pereira, "Digital holography: Benchmarking coding standards and representation formats," IEEE International Conference on Multimedia and Expo (ICME), pp. 1-6, July,2016
- [26] J. P. Peixeiro, C. Brites, J. Ascenso, and F. Pereira, "Holographic data coding: Benchmarking and extending hevc with adapted transforms," IEEE Transactions on Multimedia, vol. 20, no. 2, pp. 282-297, Feb,2018
- [27] A. Ahar, D. Blinder, R. Bruylants, C. Schretter, A. Munteanu, and P. Schelkens, "Subjective quality assessment of numerically reconstructed compressed holograms," In Applications of Digital Image Processing XXXVIII, International Society for Optics and Photonics, vol. 9599, no. 95990K, pp. 1-15, Sep,2015
- [28] M. Liebling, T. Blu and M. Unser, "Fresnelets: new multiresolution wavelet bases for digital holography," in IEEE Transactions on Image Processing, vol. 12, no. 1, pp. 29-43, Jan, 2003.
- [29] L. De, and J. Kim, J. "High capacity robust forensic marking using computer generated hologram," In Digital Content, Multimedia Technology and its Applications (IDC), 2010 6th International Conference on, IEEE, pp. 194-197, Aug,2010
- [30] J. Y. Sim, "Digital hologram compression using correlation of reconstructed object images," In Pacific-Rim Symposium on Image and Video Technology. pp. 204-214, Nov,2011
- [31] J. Y. Sim, and C. S. Kim, "Reconstruction depth adaptive coding of digital holograms," IEICE Transactions on Fundamentals of Electronics, Communications and Computer Sciences, vol. 95, no. 2, pp. 617-620, Feb,2012
- [32] H. Yu, Z. Zhang, and J. Zhong, "A JPEG-based enhanced compression algorithm of digital holograms," In Holography, Diffractive Optics, and Applications, International Society for Optics and Photonics, vol. 8556, no. 85560K, pp. 1-11, Nov,2012
- [33] M. Kaaniche, A. Benazza-Benyahia, B. Pesquet-Popescu, B. and J. C. Pesquet, "Vector lifting schemes for stereo image coding," IEEE Transactions on Image Processing, vol. 18, no. 11, pp. 2463-2475, Nov,2009
- [34] A. B. Benyahia, J. C. Pesquet, and M. Hamdi, "Vector-lifting schemes for lossless coding and progressive archival of multispectral images," IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, vol.40 no. 9, pp. 2011-2024, Sep,2002
- [35] A. E. Rhammad, P. Gioia, A. Gilles, M. Cagnazzo, and B. P. Popescu, "Color digital hologram compression based on matching pursuit," Applied Optics, vol. 57, no. 17, pp. 4930-4942, Jun,2018

필자소개



서영호

- 1999년 2월 : 광운대학교 전자재료공학과 졸업(공학사)
- 2001년 2월 : 광운대학교 일반대학원 졸업(공학석사)
- 2004년 8월 : 광운대학교 일반대학원 졸업(공학박사)
- 2005년 9월 ~ 2008년 2월 : 한성대학교 조교수
- 2008년 3월 ~ 현재 : 광운대학교 전자재료공학과 교수
- ORCID : <http://orcid.org/0000-0003-1046-395X>
- 주관심분야 : 실감미디어, 디지털 홀로그램, 딥러닝, 뉴로모픽 시스템, SoC 설계