

일반논문 (Regular Paper)

방송공학회논문지 제24권 제6호, 2019년 11월 (JBE Vol. 24, No. 6, November 2019)

<https://doi.org/10.5909/JBE.2019.24.6.1152>

ISSN 2287-9137 (Online) ISSN 1226-7953 (Print)

VR영상을 위한 SIFT 특징점 기반 디지털 워터마킹 방법

문 원 준^{a)}, 서 영 호^{a)}, 김 동 욱^{a)†}

SIFT Feature Based Digital Watermarking Method for VR Image

Won-Jun Moon^{a)}, Young-Ho Seo^{a)}, and Dong-Wook Kim^{a)†}

요 약

VR 산업의 급격한 발전에 따라 많은 VR 콘텐츠들이 제작 및 유통되면서 저작권 보호에 대한 필요성이 높아지고 있다. 본 논문에서는 VR 제작과정을 고려하여 워터마크를 삽입 및 추출하는 방법을 제안한다. 삽입에서는 VR 제작에서 왜곡이 최소화되는 영역을 선택하여 SIFT를 수행하고 DWT를 이용하여 주파수로 변환하여 QIM방식으로 삽입한다. 추출에서는 투영 과정에서의 왜곡을 보정하기 위해 위와 아래영역은 투영방법을 변경하고, 중간영역 중 일부는 3DoF를 이용하여 회전을 수행한 후 워터마크를 추출한다. 이에 대해 기존의 워터마크 방법을 적용했을 때보다 높은 정확도를 가지며 다양한 공격에서도 정확도가 유지되는 것을 보임으로 제안한 워터마크의 유효함을 확인한다.

Abstract

With the rapid development of the VR industry, many VR contents are produced and circulated, and the need for copyright protection is increasing. In this paper, we propose a method of embedding and extracting watermarks in consideration of VR production process. In embedding, SIFT is performed by selecting the region where distortion is minimized in VR production, and transformed into frequency domain using DWT and embedded into the QIM method. In extracting process, in order to correct the distortion in the projection process, the top and bottom regions are changed to different projection methods and some middle regions are rotated using 3DoF to extract the watermark. After this processing, extracted watermark has higher accuracy than the conventional watermark method, and the validity of the proposed watermark is shown by showing that the accuracy is maintained even in various attacks.

Keyword : virtual reality, watermark, degree of freedom, SIFT, projection

a) 광운대학교 전자재료공학과(Department of Electronic Materials Engineering, Kwangwoon University)

† Corresponding Author : 김동욱(Dong-Wook Kim)

E-mail: dwkim@kw.ac.kr

Tel: +82-2-940-5167

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4668-743X>

※ This research was supported by Basic Science Research Program through the National Research Foundation of Korea(NRF) funded by the Ministry of Education(NRF-2016R1D1A1B03930691).

· Manuscript received September 30, 2019; Revised October 25, 2019; Accepted October 25, 2019.

I. 서론

VR(Virtual Reality)이란 실제 현실에서는 쉽게 경험할 수 없는 환경을 가상공간에 구현하여 사용자와의 상호작용을 통해 몰입하여 경험할 수 있는 기술이다^[1]. VR 산업의 급격한 발전에 따라 많은 VR 콘텐츠들이 제작 및 유통되면서 이에 대해 저작권을 보호할 수 있는 기술이 필요하게 되었다.

영상에 대한 저작권 보호를 위한 방법으로는 전통적으로 워터마크가 많이 연구되어 왔으며 워터마크 기술은 크게 두 가지의 사항을 고려하는데 삽입할 영역을 선택하는 것과 삽입 방법을 선택하는 것이다. 먼저 영역을 선택하는 것은 워터마크를 삽입 시에 중요한 것이 비가시성이기 때문에 이를 고려하여 공간 영역에서 직접 픽셀 값을 바꾸는 것이 아닌 DCT^[2,3], DWT^[4,8], QDFT^[9] 등을 통해 주파수 영역을 이용하는 방법, SVD를 이용한 방법^[4,6], PCA를 이용한 방법^[10] 등 변환에 대한 많은 연구들이 진행이 되었다. 또한, 이러한 영역을 특정 알고리즘을 통해 변환하는 것이 아니라 딥러닝 모델을 이용하여 변환 자체를 네트워크가 학습하여 비가시성을 높이는 워터마킹 방법도 활발히 연구되고 있다^[11-13]. 다음으로는 삽입하는 방법에 대한 문제인데 삽입할 영역에 대해 가중치를 주어 곱하는 방법^[3-7], 양자화하여 비트를 삽입하는 방법^[8,9] 등이 있다.

본 논문은 영상을 획득한 부분에서 워터마크를 삽입하고, 삽입된 영상들을 이용하여 VR영상으로 제작하는 과정을 거친 등장방형도법(ERP, Equi-Rectangular Projection)

영상에서 워터마크를 추출하는 것을 목표로 한다. 실사 기반의 영상을 VR로 제작하는 과정에서는 많은 기하학적 변형과 픽셀 값의 변형 등 비악의적인 공격이 필연적으로 발생하며 이를 모두 거친 후에 추출된 워터마크가 유효해야 한다^[14]. 전통적인 워터마크를 이용할 경우 좋은 결과를 가지기 어렵기 때문에 제작과정에 대한 고려가 필요하다. 이에 삽입시에는 왜곡이 최소화 되는 영역을 선정하여 삽입하고, 추출시에는 ERP 영상을 기준으로 영역을 나누어 각각 다른 투영을 이용한 왜곡 보정 및 3DoF(Degree of Freedom)를 이용한 회전을 수행하여 왜곡 보정 후에 워터마크를 추출하는 알고리즘을 제안한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 ERP, 제안하는 알고리즘에서 사용되는 cubemap 투영 및 3DoF 회전에 대해 설명한다. 3장에서는 2장에서의 내용을 토대로 워터마크의 삽입 및 추출 알고리즘에 대해서 제안하고, 4장에서는 제안하는 알고리즘에 대해 다양한 공격에 대한 실험과 이전 논문과의 비교를 통해 유효성을 검증한다. 그리고 마지막 5장의 결론으로 마친다.

II. VR영상 제작과정 및 3DoF 회전

1. VR 영상의 제작과정

실사 기반 VR 영상의 제작 과정은 그림 1에 나타내었는

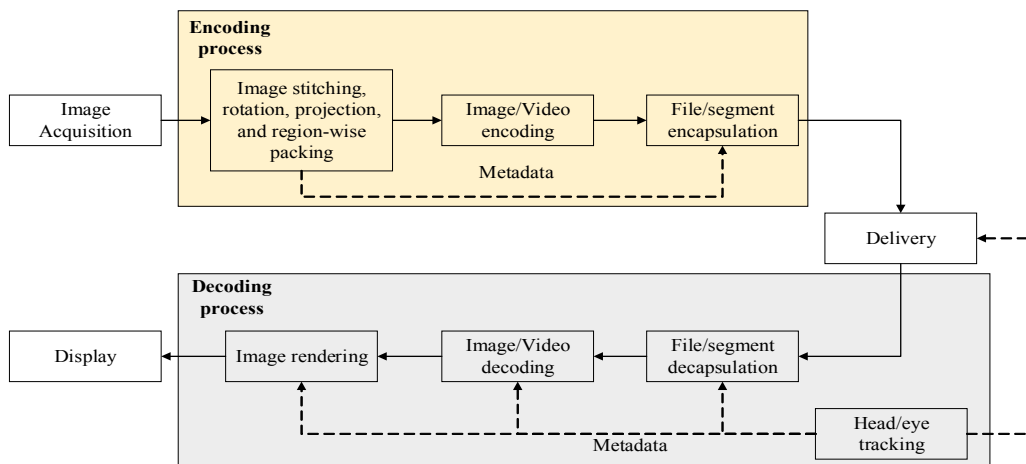


그림 1. VR 영상의 제작 과정

Fig. 1. Production process of VR image

데, 일반영상과 유사하게 영상의 획득(Image Acquisition), 부호화(Encoding), 전송(Delivery), 복호화(Decoding), 디스플레이의 순서로 수행하게 되고, 부호화 부분에서 영상을 정합 및 투영하는 과정이 추가된다^[15]. 본 논문에서는 획득한 영상에 워터마크를 삽입하고, 부호화 과정을 거쳐 전송된 영상에서 워터마크를 추출한다.

1.1. 영상의 획득

VR영상은 360°전체를 포함하기 때문에 전방위 매체(Omnidirectional Media)라고도 불리며, 일반적으로는 한번에 360°를 모두 포함되도록 촬영하지만 독립적으로 획득한 여러 영상을 스티칭 과정을 통해 하나의 VR영상으로 만드는 경우도 있다. 360°를 포함하기 위해서는 크게 카메라 리그를 이용해 모든 방향의 영상을 획득하는 경우와 한

제품 자체에 여러 개의 렌즈가 구성되어 있는 경우로 나뉘며^[16,17], 필요한 카메라의 수(n_{cam})는 카메라의 광각(θ_{cam})에 따라 식(1)로 나타낼 수 있다^[18].

$$\theta_{cam} = \frac{360^\circ}{n_{cam}(1-q)} \quad (1)$$

이때, q 는 좌우의 인접영상과 겹쳐지는 부분의 비율로 $[0,1]$ 의 범위를 가지며 보통 1/3 이상일 때 정확한 스티칭을 할 수 있다고 간주한다.

1.2. 부호화

부호화 과정은 획득한 영상 중에 인접한 영상들을 찾아 정합하는 스티칭(stitching) 과정과 이를 구에 매핑하

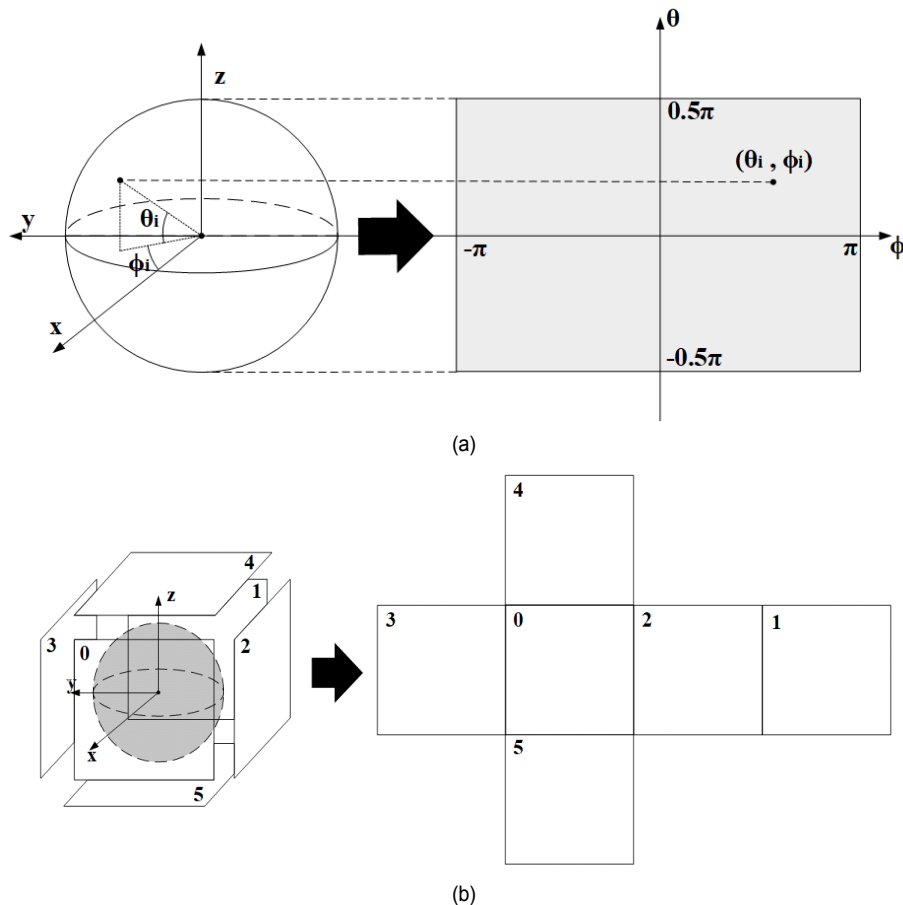


그림 2. VR 영상의 투영 방법: (a) 등장방형도법 (b) 큐브맵 투영

Fig. 2. Projection method of VR image: (a) Equi-rectangular projection (b) Cubemap projection

는 과정, 저장 및 전송을 위해 구에 매핑된 영상을 펼쳐서 정해진 포맷으로 투영하는 과정으로 나뉘며, 어느 포맷을 사용하는지에 따라 투영된 영상을 재정렬하는 리전와이즈 패킹(region-wise packing) 과정을 거치기도 한다^[15].

먼저 스티칭 과정에서는 영상 중에 동일한 성분을 찾아내어 매칭 시키는 과정을 거친다. 그 다음 구에 매핑을 시켜서 360°를 감싸기 위해 겹치는 부분을 자르고 자른 부분을 블렌딩 과정과 영상 간 밝기를 보정하기 위한 색 보정 과정을 거친다. 그리고 정해진 포맷으로 투영하게 되는데 MPEG-I에서는 다양한 포맷들이 계속 제안되고 있으며, Phase 1에서는 가장 보편적으로 사용되는 ERP와 CMP (CubeMap Projection)을 표준으로 정하였다^[19]. 그 표현 방법은 그림 2와 같은데 먼저 ERP는 3차원의 구 좌표계에서 θ 와 ϕ 의 값을 기준으로 2차원 평면에 투영한 것으로, 시점을 평면의 중심으로 하여 너비(ϕ)는 $[-\pi, \pi]$, 높이(θ)는 $[-0.5\pi, 0.5\pi]$ 의 범위를 가지도록 펼쳐놓은 것이다. 가장 일반적으로 사용되지만 중점에서 멀어질수록 왜곡의 정도가 강해진다는 단점이 있다. 예를 들어 높이가 -0.5π 이거나 0.5π 일 경우에 너비의 값에 상관없이 모두 구의 극점에 매핑이 되기 때문에 극점 한점이 ERP에서의 너비만큼 투영되게 된다.

반면 CMP는 원을 정육면체에 투영한 것으로 각각 90°의 시야각을 가진다. 각 면 내에서는 왜곡이 비교적 적지만, 면을 벗어날 경우에는 왜곡의 정도가 심해지는 단점이 있다^[20].

2. 3DoF(Degree of Freedom) 회전

3차원의 직각 좌표계에서 물체의 축에 따른 회전 동작을 의미하는 것으로, x축을 중심으로 회전하는 roll, y축을 중심으로 회전하는 pitch, z축을 중심으로 회전하는 yaw 가 있다. 그림 3은 구로 매핑된 영상에서 pitch, yaw, roll 순서대로 회전시켜서 ERP의 ϕ , θ 성분을 0π 로 변환하는 것으로, 이 과정을 통해 원하는 시점으로 맞추어 줄 수 있다.

III. 제안하는 알고리즘

1. 삽입 알고리즘

삽입하는 과정은 그림 4(a)와 같다. 먼저 영상을 획득한 부분에서 워터마크를 삽입해야 하므로 획득 영상에 특징점 추출 알고리즘인 SIFT를 이용하여 삽입 후보군을 추출한다^[21]. SIFT는 다양한 scale에서의 특징점을 추출하기 위해 다운샘플링을 여러 번 수행하게 되고, 몇 번 수행하는지에 따라 옥타브(Octave)라고 정의를 한다. 일반적으로 높은 옥타브일수록 추출되는 개수가 줄어들며, 저주파성분을 갖는 특징점이 추출되기 때문에 비가시성에 영향을 주므로 0~2 옥타브를 후보로 선정한다. 후보군들 중에서 옥타브가 높은 순서대로 삽입할 특징점을 선정하는데, 주변 영역이 겹쳐서 이미 삽입되어 있는 후보군에는 삽입을 제외한다. 또한, 영상의 가장자리 부분은 스티칭 과정에서 잘려나가거나 스무딩을 통해 값이 변하는 등 제작 과정에서 필연적으로 큰 왜곡이 발생하므로 삽입 영역에서 제외하여 왜곡의

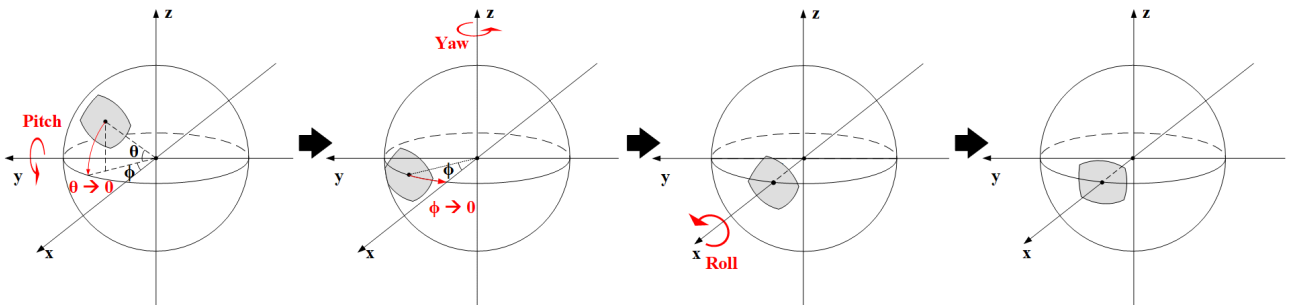


그림 3. 구로 매핑된 영상의 3DoF를 통한 회전
Fig. 3. 3DoF rotation of sphere mapped images

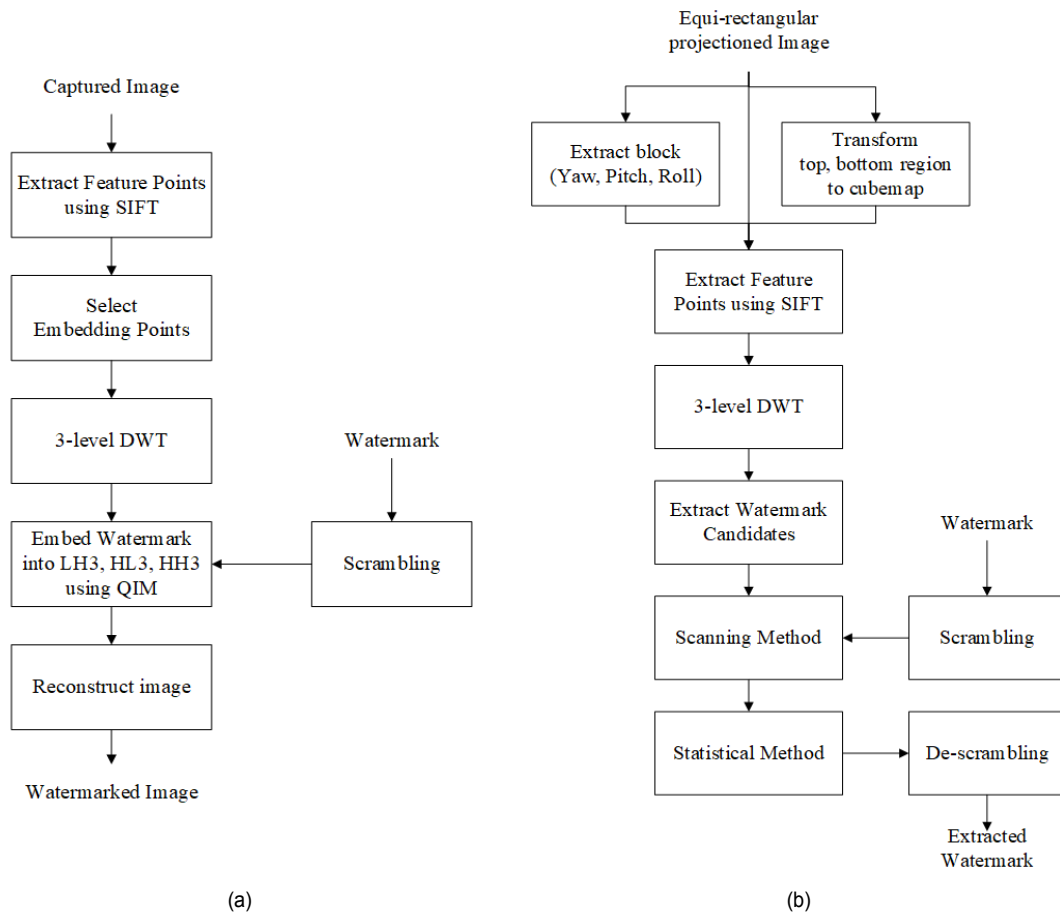


그림 4. 제안하는 워터마킹 방법: (a) 삽입 알고리즘, (b) 추출 알고리즘

Fig. 4. Proposed watermarking method: (a) Embedding algorithm, (b) Extracting algorithm

정도를 최소화한다. SIFT에서는 특징점을 정하면 인접 영역의 픽셀 분포를 가지고 방향성분(Orientation)을 구하게 되는데, 추출하는 영역을 일치시키기 위해 이 값을 사용한다. 선정된 특징점을 중심으로 방향성분을 0° 로 만들도록 회전을 수행하고, 특징점을 중심으로 32×32 의 영역을 정한다.

삽입 방법은 추출한 영역에 대해 3-level로 DWT를 수행하여 주파수 영역으로 변환한 후에 사람의 눈에 민감한 LL3영역을 제외한 각각 LH3, HL3, HH3의 각각 4×4 영역에 16bit씩 총 48bit를 삽입하게 되며, QIM(Quantization Index Modulation)방식으로 삽입한다. 이후에 DWT의 역변환을 수행하는 과정으로 워터마크가 삽입된 영역을 만들게 되고, 전체 선정된 특징점에 대해 반복 수행하여 최종 워터마크가 삽입된 영상을 생성한다.

2. 추출 알고리즘

추출하는 과정은 그림 4(b)와 같다. 먼저 2.1.2절에서 언급했듯이 ERP는 중심에서 멀어질수록 왜곡의 정도가 크기 때문에, SIFT를 수행하여 추출한 특징점 주변 영역이 실제 획득한 영상에서의 주변 영역과 같을 수 없다. 따라서 두 가지 방법으로 왜곡 보정을 수행하는데, 첫 번째로 그림 5(a)와 같이 중심에서 상대적으로 먼 $[0.25\pi, 0.5\pi]$ 와 $[-0.5\pi, -0.25\pi]$ 영역에 CMP로 변환하여 왜곡의 정도를 줄여 준다. 두 번째로 그림 5(b)와 같이 $[-0.25\pi, 0.25\pi]$ 영역에서는 SIFT를 이용하여 후보군을 추출하고, 해당 후보군의 x,y 좌표와 SIFT의 방향성분을 이용하여 yaw, pitch, roll에 대한 회전을 통해 왜곡을 보정해 준다. 이 때 각각 yaw는 x좌

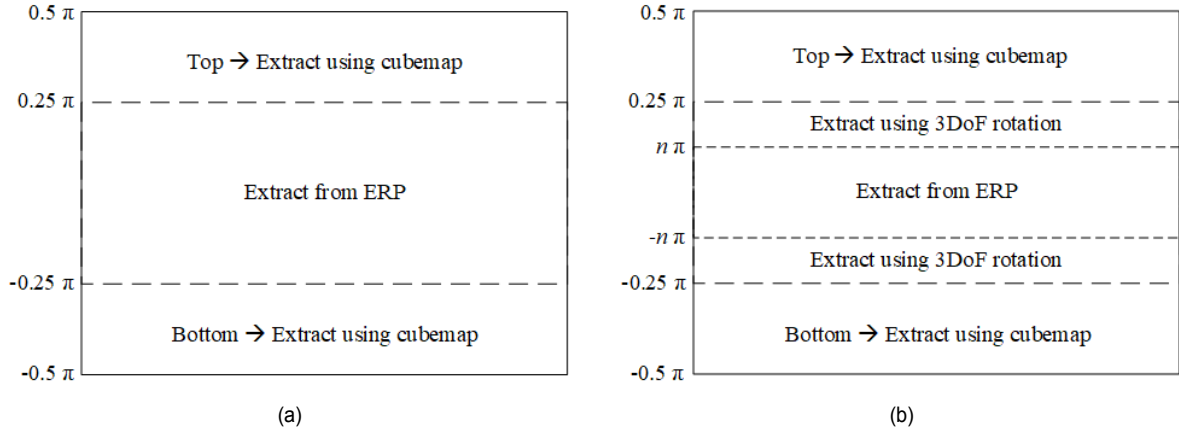


그림 5. 위치에 따른 왜곡 보정 방법
Fig. 5. Distortion correction method by location

표, pitch는 y좌표, roll은 방향성분으로 한다. $pitch = 0\pi$ 근처는 ERP 내에 왜곡 정도가 심하지 않기 때문에 보정을 하지 않아도 유사한 추출물을 보이므로 임계값 n 을 정의하여 $[-0.25\pi, -n\pi]$, $[n\pi, 0.25\pi]$ 영역에 있는 후보군들만 회전을 통해 보정하여 영역을 추출한다. 이렇게 pitch(y)값에 따라 왜곡보정 후 추출한 영역에 삽입과 마찬가지로 3-level DWT를 수행하고 LH3, HL3, HH3영역에 QIM을 통해 삽입했던 워터마크 bit를 추출한다. 모든 추출한 워터마크에 대해 비교 논문^[22]과 같이 삽입한 워터마크를 NCC 비교를 통해 임계값 이상을 가지는 점들을 워터마크 후보군으로 추출하고, 후보군을 통계적인 방법을 이용하여 최종 워터마크를 추출하게 된다.

IV. 실험결과

1. 실험환경 및 파라미터 정의

실험에 사용된 데이터 셋은 표 1에서 나타내었다. 삽입 과정에서는 이전 논문^[22]과의 비교를 위해 양자화 간격 (Quantization step)을 20으로 설정하여 PSNR을 약50dB로 맞추었다.

또한, 3.2절에서 정의한 3DoF로 회전할 영역에 대한 임계값(n)을 정해야 하는데, 이를 위해 ERP영상에서 추출한 약 6000개의 특징점에 대해 ERP영상에서 그대로 추출한

표 1. 데이터셋 구성
Table 1. Configuration of dataset

Camera information	Camera model		Gopro Hero4
	VR stitching tool		Autopano Giga 4.4
	FoV (degree)	Horizontal	122.6
		Vertical	94.4
		Diagonal	149.2
Data information	Resolution		4,000 x 3,000
	Images per 1 ERP		6
	# of datasets		10
Embedding information (average)	Quantization step		20
	Embedded WM per images		177.03
	PSNR (dB)		50.02

영역과 3DoF 회전 후 추출한 영역을 비교하였다. 각각을 VR영상으로 만들기 전의 원본영상에서 동일 영역을 추출하여 PSNR을 계산하였고, 이를 비교하여 회전이 유리한 임계값을 정의하였다. 그림 6(a)는 3DoF 회전의 여부에 따른 PSNR 차이를 정렬한 것으로 양수일 때에는 회전을 수행하지 않은 ERP에서 추출한 영역이 원본과 더 유사하고, 음수일 때는 3DoF 회전을 통해 보정한 것이 더 유사하다는 것이다. 또한 빨간 점선은 각 후보군에 대한 Pitch값을 추세선으로 나타낸 것인데, 오른쪽으로 갈수록 증가하므로

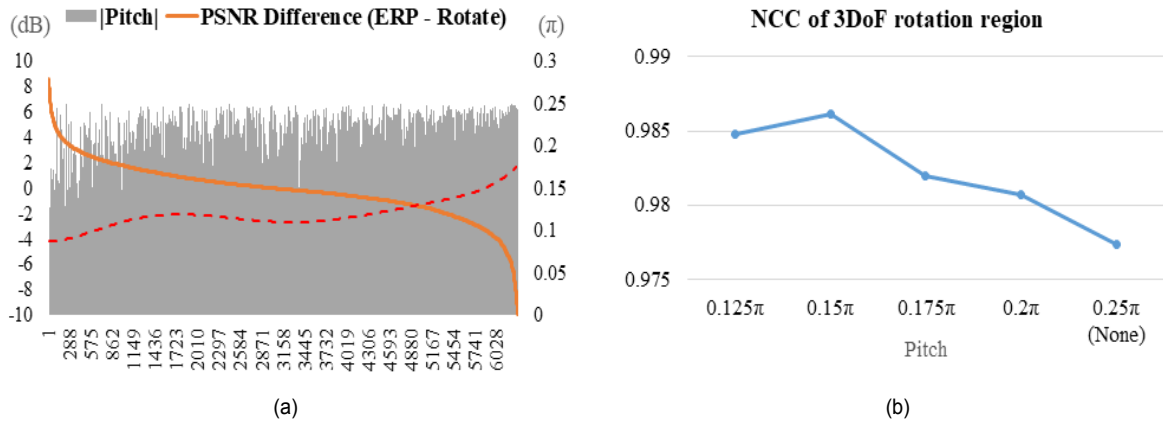


그림 6. 임계값 정의를 위한 실험: (a) ERP-3DoF 회전영상에서의 추출영역과 원본영역의 PSNR 차이에 따른 pitch 분포, (b) 임계값에 따른 워터마크 추출 결과 (NCC)

Fig. 6. Experiment for setting the threshold: (a) Pitch distribution according to the PSNR difference between extracted region of ERP-3DoF rotation and original region (b) Watermark extraction results by threshold

Pitch 값이 클수록 왜곡 보정한 것이 유리함을 알 수 있다. 공간영역에서의 이점이 주파수 영역으로 바꾸어 실제로 추출한 워터마크에도 영향을 미치는지 확인하기 위해 n 을 $0.125\pi \sim 0.25\pi$ 까지 증가시켜가며 워터마크를 추출한 결과를 그림 6(b)에 나타내었다. n 이 0.25π 일 때(회전을 통한 보정을 하지 않을 때)보다 n 이 0.25π 보다 작을 때(보정을 할 때) NCC 값이 더 높은 것을 확인할 수 있고, 그 중 n 이 0.15π 일 때 추출한 워터마크의 NCC값이 0.986으로 가장 높은 값을 가지게 된다. 따라서 회전을 수행하는 것이 워터마크 추출에 유리함을 확인할 수 있고, 본 논문에서는 n 을 0.15π 로 고정하고 실험을 진행하였다.

2. 제안하는 알고리즘에 대한 추출 비교

성능 비교를 위해 10개의 영상세트에 대해 ERP에서 추출한 워터마크(ERP), 그림 5(a)와 같이 ERP에서 중점으로 부터 거리가 먼 윗부분과 아랫부분을 CMP로 변경한 후 추출한 워터마크(EC), 그림 5(b)와 같이 EC에서 3DoF 회전에 의해 왜곡을 보정을 추가한 후 추출한 워터마크(ECR)를 비교한다. 각각의 방법에 대해 삽입한 원본 워터마크와의 NCC(Normalized Cross Correlation)와 BER(Bit Error

Rate)를 계산하여 비교하였고, 원본 영상 뿐만 아니라 다양한 악의적 공격을 수행하여 강인성을 확인하였다. 사용된 공격 파라미터는 JPEG압축(Quality 80, 60, 40)과 가우시안 노이즈(1%~5%), 가우시안 블러링(필터 크기: 3, 5, 7, 9), 평균값 블러링(필터 크기: 3, 5, 7, 9), 샤프닝 필터(1~5픽셀)을 가해주었고, 그 결과는 그림 7과 같다.

먼저 그림 7(a)에서는 원본에 대한 3가지 방법을 비교하였는데, 전체적으로 $NCC > 0.95$ ($BER < 0.02$)의 높은 추출률을 가지고 그 중에 ECR의 추출률이 $NCC = 0.986$ ($BER = 0.007$)로 EC와 ERP보다 높은 추출률을 보였다. 또한 그림 7(b)~(f)의 다른 공격들에 대한 실험에서도 공격의 강도가 강해질수록 추출률은 감소하지만, 전반적으로 원본과 유사하게 ECR, EC, ERP순으로 추출률을 보인다.

한편, 상대적으로 저주파 통과 필터를 이용한 블러링 공격에 해당하는 그림 7(d),(e)에서는 필터의 크기가 7 이상일 때 추출 정확도가 낮아지는 것을 확인할 수 있는데, 이는 SIFT에서 추출하는 특징점이 극값을 후보군으로 설정하기 때문이다. 즉, 극값이란 인접영역에 비해 크기가 크거나 작은 점이라고 볼 수 있는데 블러링의 강도가 강해지면 극값의 성질이 사라지기 때문에 정확도가 감소하는 것이라 사료된다.

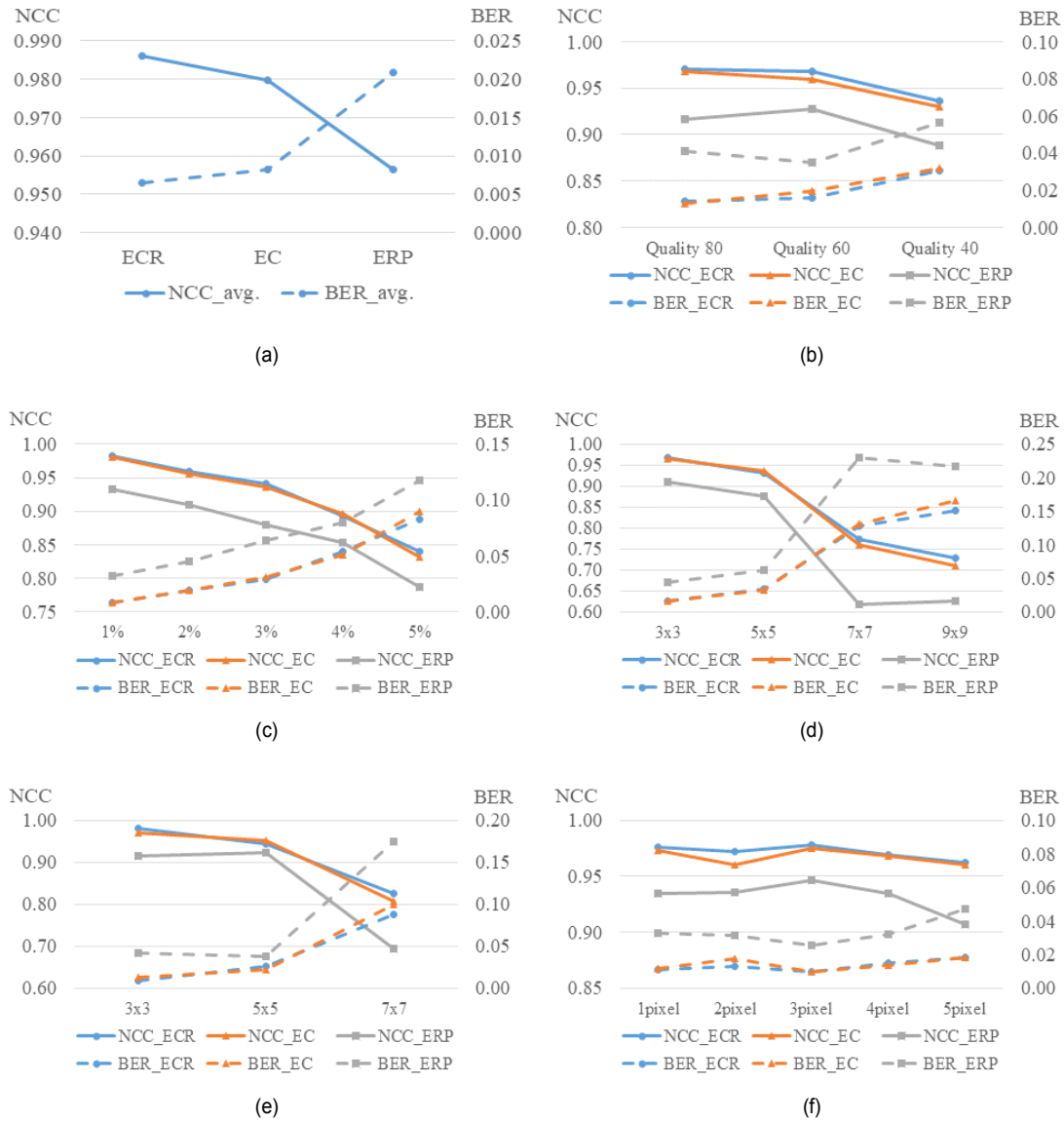


그림 7. 공격에 대한 추출된 워터마크의 NCC와 BER 비교: (a) 원본, (b) JPEG 압축, (c) 가우시안 노이즈, (d) 가우시안 블러링, (e) 평균값 블러링, (f) 샤프닝

Fig. 7. Comparison of NCC and BER of extracted watermark from attacks: (a) Original, (b) JPEG compression, (c) Gaussian noise, (d) Gaussian blur, (e) Average blur, (f) Sharpen

3. 이전 논문과의 비교

4.2에서 가장 좋은 성능을 가지는 ECR과 이전 논문^[22]을 비교한 결과는 그림 8에 나타내었다. JPEG압축과 가우시안 노이즈, 가우시안 블러링, 샤프닝에 대해 비교를 수행하

였고, 샤프닝을 제외한 나머지의 공격들에 대해 전반적으로 높은 정확도로 추출되었으며 샤프닝에서도 높은 정확도로 이전 논문과 비슷하게 추출되었다. 따라서 이전 논문보다 더 좋은 결과를 낸다고 판단할 수 있다.

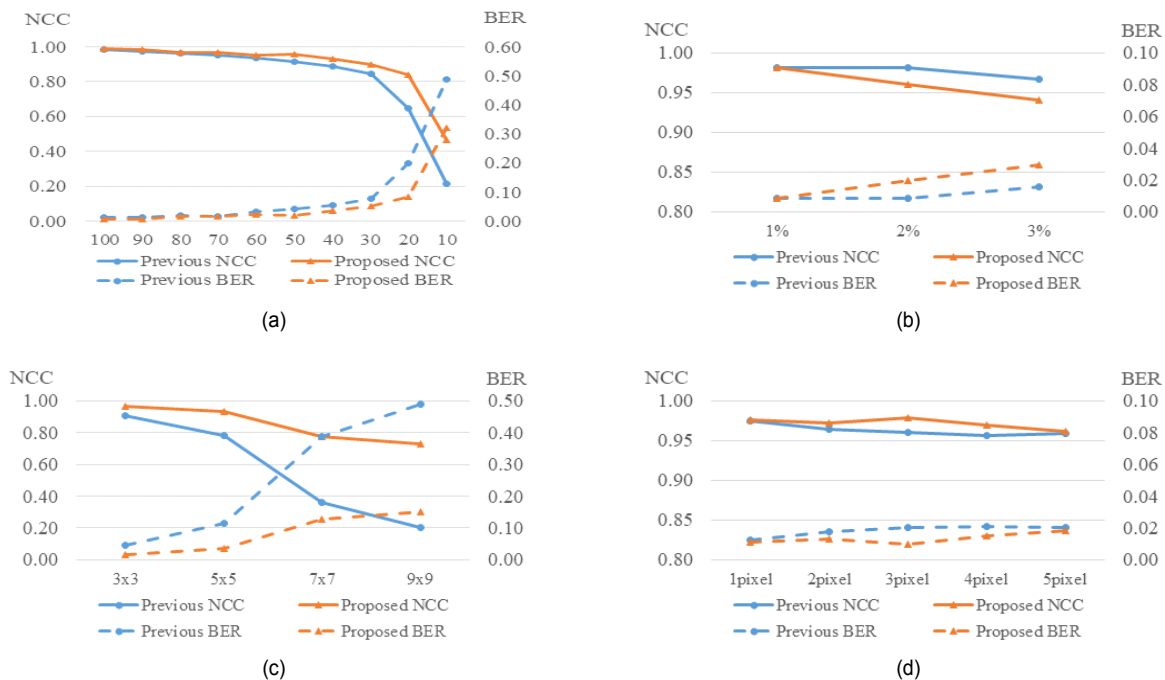


그림 8. 이전 논문과의 워터마크 추출 비교: (a) JPEG 압축, (b) 가우시안 노이즈, (c) 가우시안 블러링, (d) 샤프닝

Fig. 8. Comparison of extracted watermark with previous paper: (a) JPEG compression, (b) Gaussian noise, (c) Gaussian blur, (d) Sharpen

V. 결 론

본 논문에서는 획득한 일반영상에 워터마크를 삽입하고, 이를 스티칭, 매핑, 투영하여 만든 ERP에서 워터마크를 추출하는 방법을 제안하였다. 삽입에서는 SIFT 특징점을 이용하여 삽입할 영역을 정하고, DWT를 이용하여 주파수 영역에 QIM방식으로 워터마크를 삽입하였고, 추출에서는 VR영상에 대해 위치에 따른 왜곡정도를 보정하여 DWT와 QIM을 통해 워터마크를 추출하여 통계적인 방법으로 최종 워터마크를 추출하였다.

이에 대해 VR제작과정에서 필연적으로 발생하는 비악의적 공격에도 NCC=0.986 (BER=0.007)로 높은 정확도를 가졌으며, JPEG 압축, 가우시안 노이즈, 가우시안 블러링, 평균 블러링, 샤프닝 등의 악의적 공격이 가해진 후에도 강인함을 보였다. 또한, 이전의 논문과 비교했을 때에도 더 높은 정확도로 추출되어 알고리즘의 유효성을 입증하였다.

따라서 본 논문에서 제안한 방법은 VR영상의 저작권 보호에 충분한 성능을 갖고 있다고 판단된다.

참 고 문 헌 (References)

- [1] X. Li, B. Xu, Y. Teng, Y. Ren, and Z. Hu, "Comparative Research of AR and VR Technology based on User Experience," ICMSE, Helsinki, Finland, pp.1820-1827, 2014, <http://dx.doi.org/10.1109/ICMSE.2014.6930456>
- [2] J. Cox, M. Miller, J. Bloom and T. Kalker, Digital watermarking and steganography, 2nd Ed., Elsevier, 2008.
- [3] S. A. Parah, J. A. Sheikh, N. A. Loan, F. Ahad, and G. M. Bhat, "Utilizing neighborhood coefficient correlation: a new image watermarking technique robust to singular and hybrid attacks," Multidimensional Systems and Signal Processing, Vol.29, No.3, pp. 1095-1117, July 2018, <http://dx.doi.org/10.1007/s11045-017-0490-z>
- [4] C. C. Lai, C. C. Tsai, "Digital Image Watermarking Using Discrete Wavelet Transform and Singular Value Decomposition," IEEE Transactions on instrumentation and measurement, Vol.59, No.11, pp.3060 - 3063, Nov., 2010, <http://dx.doi.org/10.1109/TIM.2010.2066770>
- [5] M. Agoyi, E. Celebi, and G. Anbarjafari, "A watermarking algorithm based on chirp z-transform, discrete wavelet transform, and singular value decomposition," Signal Image and Video Processing, Vol.9, No.3, pp.735-745, June, 2014 <http://dx.doi.org/10.1007/s11760-014-0624-9>
- [6] T. H. Nguyen, D. M. Duong and D. A. Duong, "Robust and high capacity watermarking for image based on DWT-SVD," The 2015 IEEE

- RIVF International Conference on Computing & Communication Technologies - Research, Innovation, and Vision for Future, Can Tho, Vietnam, pp.83-88, 2015, <http://dx.doi.org/10.1109/RIVF.2015.7049879>
- [7] P. Rasti, G. Anbarjafari, and H. Demirel, "Colour Image Watermarking based on Wavelet and QR Decomposition," 2017 Signal Processing and Communications Applications Conference, Antalya, Turkey, pp.1-4, 2017, <http://dx.doi.org/10.1109/SIU.2017.7960259>
- [8] Y. S. Lee, Y. H. Seo, and D. W. Kim, "Blind Image Watermarking Based on Adaptive Data Spreading in n-Level DWT Subbands," Security and Communication Networks, Vol.2019, Feb., 2019, <http://dx.doi.org/10.1155/2019/8357251>
- [9] J. Ouyang, G. Coatrieux, B. Chen, and H. Shu, "Color image watermarking based on quaternion Fourier transform and improved uniform log-polar mapping," Computers and Electrical Engineering, Vol.46, pp.419 - 432, Aug., 2015, <https://doi.org/10.1016/j.compeleceng.2015.03.004>
- [10] A. Sarfaraz, Z. Mehmood, and A. M. Chema, "Highly robust hybrid image watermarking approach using Tchebichef transform with secured PCA and CAT encryption," Soft Computing, Vol.23, No.20, pp.9821-9829, Oct., 2019, <https://doi.org/10.1007/s00500-019-03838-2>
- [11] S. M. Mun, S. H. Nam, H. Jang, D. Kim, and H. K. Lee, "Finding robust domain from attacks: A learning framework for blind watermarking," Neurocomputing, Vol.337, No.14, pp.191-202, April, 2019, <https://doi.org/10.1016/j.neucom.2019.01.067>
- [12] M. Ahmadi, A. Norouzi, S. M. Reza Soroushmehr, N. Karimi, K. Najarian, S. Samavi, and A. Emami, "ReDMark: Framework for Residual Diffusion Watermarking on Deep Networks," arXiv:1810.07248, Dec. 2018
- [13] J. Zhu, R. Kaplan, J. Johnson, and L. Fei-Fei, "HiDDeN: Hiding Data With Deep Networks," arXiv:1807.09937, July, 2018
- [14] I. S. Kang, W. J. Moon, Y. H. Seo and D. W. Kim, "Distortion in VR 360 degree panoramic image," Summer conference on the KIBME, Jeju, Korea, pp.194-196, June, 2017
- [15] M. Wien, J. M. Boyce, T. Stockhammer, and W-H. Peng, "Standardization Status of Immersive Video Coding," IEEE Journal on Emerging and Selected Topics in Circuits and Systems, Vol.9, No.1, pp.5-17, March, 2019
- [16] R. Anderson, et al. "Jump: virtual reality video," ACM Transactions on Graphics, Vol.35, No.6, Nov., 2016 <https://doi.org/10.1145/2980179.2980257>
- [17] ETRI, Trends in Acquisition and Service Technology for VR Media, Electronics and Telecommunications Trends, Vol. 33(2), 2018 <https://doi.org/10.22648/ETRI.2018.J.330206>
- [18] I. S. Kang, Y. H. Seo, and D. W. Kim, "Blind Digital Watermarking Methods for Omni-directional Panorama Images using Feature Points," Journal of Broadcasting Engineering, Vol.22, No.6, pp.785-799, Nov., 2017
- [19] MPEG-I, Information Technology - Coded Representation of Immersive Media (MPEG-I) - Part 2: Omnidirectional Media Format, document N17563, SO/IEC FDIS 23090-2:201x, ISO/IEC JTC1 SC29/WG11 MPEG, 122nd Meeting, San Diego, USA, Apr., 2018
- [20] S. J. Yoon, and G. H. Park, "Improve Compression Efficiency of 360degree VR Video by Correcting Perspective in Cubemap Projection," Journal of Broadcasting Engineering, Vol.22, No.1, pp.136-139, Jan., 2017
- [21] D. G. Lowe, "Distinctive Image Features from Scale-Invariant Keypoints," International Journal of Computer Vision, Vol. 60, No. 2, pp. 91-110, Jan. 2004
- [22] I. S. Kang, A Study on a Digital Watermarking Method for an Omni-Directional Panorama Image using SIFT Feature Points, Kwangwoon University, Seoul, Korea, 2017, Retrieved from <http://www.riss.kr/link?id=T14792963>

저 자 소 개



문 원 준

- 2018년 2월 : 광운대학교 전자재료공학과 졸업(공학사)
- 2018년 3월 ~ 현재 : 광운대학교 전자재료공학과 석사과정
- ORCID : <https://orcid.org/0000-0002-9620-9524>
- 주관심분야 : Virtual Reality, 워터마킹, 2D 영상 신호처리

저 자 소 개



서 영 호

- 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 정교수
- ORCID : <https://orcid.org/0000-0003-1046-395X>
- 주관심분야: 실감미디어, 2D/3D 영상 신호처리, 디지털 홀로그램, SoC 설계



김 동 욱

- 1983년 2월 : 한양대학교 전자공학과 졸업(공학사)
- 1985년 2월 : 한양대학교 공학석사
- 1991년 9월 : Georgia 공과대학 전기공학과(공학박사)
- 1992년 3월 ~ 현재 : 광운대학교 전자재료공학과 정교수
- ORCID : <https://orcid.org/0000-0002-4668-743X>
- 주관심분야 : 3D 영상처리, 디지털 홀로그램, 디지털 VLSI Testability, VLSI CAD, DSP설계, Wireless Communication