

PSI 디지털 홀로그래피의 간섭 패턴 압축

*이대현 **심재영 ***이상욱

*,***서울대학교 전기컴퓨터공학부 **울산과학기술대학교 전기전자컴퓨터공학부

*dhlee@ipl.snu.ac.kr

Compression of interference patterns of phase-shifting digital holography

*Dae-Hyun Lee **Jae-Young Sim ***Sang-Uk Lee

*,***School of Electrical Engineering and Computer Science, Seoul National University

**School of Electrical and Computer Engineering, Ulsan National Institute of Science and Technology

요약

디지털 홀로그래피(holography) 기술은 3차원 물체의 정보를 디지털 영상으로 기록하고 복원하는 기술이다. PSI (Phase-shifting interferometry) 디지털 홀로그래피는 여러 장의 간섭 패턴 영상으로부터 홀로그램(hologram)을 합성하고, 이로부터 3차원 영상을 복원하는 대표적인 기법이다. 본 논문에서는 PSI 디지털 홀로그램 생성에 사용되는 여러 장의 간섭 패턴 영상의 효율적인 압축 기법을 제안한다. 먼저 네 개의 간섭 패턴 영상에서 JPEG2000 기반의 비트율-왜곡 (rate-distortion) 특성을 분석한다. 이에 기반하여 주어진 비트량을 일정 크기 단위로 사용할 때, 복원 영상의 왜곡을 가장 효과적으로 줄일 수 있는 간섭 패턴 영상에 우선적으로 비트량을 할당한다. 실험을 통하여 제안하는 알고리즘은 네 개의 간섭 패턴 영상마다 동일한 비트량을 할당하여 압축하는 기존의 방법에 비해 비트율-왜곡 측면에서 복원 영상의 왜곡을 더 효과적으로 줄일 수 있음을 확인한다.

1. 서론

홀로그래피(holography)는 현실세계의 3차원 물체를 빛의 간섭(interference)과 회절(defraction)을 이용하여 기록하고 복원하는 기술이다. 기록하는 과정에서는 단일 파장을 가지는 빛을 두 경로로 나누어, 물체에서 반사된 물체광(object light)과 참조광(reference light)이 서로 간섭하는 패턴을 홀로그램(hologram)으로 기록한다. 복원하는 과정에서는 홀로그램에 참조광을 다시 조사함으로써 3차원 물체의 상을 얻는다. 최근에는 디지털 기술의 발달로 기존의 홀로그래피 기록매체로 사용되던 감광필름을 CCD 카메라로 대체함으로써 홀로그램을 디지털 영상으로 저장하는 디지털 홀로그래피 기술이 등장하였다. 디지털 홀로그램 영상은 픽셀마다 간섭 패턴의 광도(intensity) 값을 가지며 컴퓨터로 처리 가능하기 때문에 이를 다양하게 조작하거나 변형할 수 있다.

하지만 디지털 홀로그래피는 복원된 영상이 DC 성분을 가지는 단점을 갖고 있다. DC 성분은 복원된 영상의 중앙에서 가장 밝게 나타나기 때문에 상대적으로 작은 광도 값을 가지는 물체를 잘 드러내지 못하게 하여 영상의 품질을 저하시킨다. 이러한 단점을 극복하기 위하여 PSI (Phase Shifting Interferometry) 디지털 홀로그래피 기술이 제안되었다[1]. PSI 디지털 홀로그래피에서는 한 개의 참조광을 위상이 다른 여러 개의 참조광으로 만들어 각 참조광과 물체광을 따로 간섭시켜 여러 개의 간섭 패턴(interference pattern)들을 만든다. 이렇게 생성된 간섭 패턴들은 각각이 디지털 홀로그램인데 PSI 기법에 의해 픽셀마다 복소수 값을 갖는 하나의 PSI 디지털 홀로그램으로 합성할 수 있다. PSI

디지털 홀로그램 합성에는 주로 네 개의 간섭 패턴들이 사용된다.

디지털 홀로그램 영상을 8 bpp (bits per pixel)로 저장하면, 1024 x 1024 크기의 영상은 1 MB (mega bytes)의 데이터를 갖는다. PSI 디지털 홀로그래피에서는 네 개의 간섭 패턴을 저장해야 하므로 4 MB의 용량이 필요하다. 컬러 영상으로 복원하는 경우 데이터 량이 더 증가하게 된다. 이와 같이 PSI 디지털 홀로그램은 방대한 데이터를 지니므로 효율적인 처리를 위하여 디지털 홀로그램 데이터 압축 기술이 필요하다. 초기에는 PSI 디지털 홀로그램의 무손실 압축 기법과 DCT를 이용한 손실 압축 기법이 제안되었다[2]. 또한, 웨이블릿 변환(wavelet transform) 및 영상의 히스토그램(histogram) 분포에 기반한 양자화 기법도 PSI 디지털 홀로그램 압축에 적용되었다[3,4]. 하지만 PSI 디지털 홀로그램은 픽셀마다 복소수 값을 가지기 때문에 기존의 영상 압축 기법을 그대로 적용하기는 어렵다. 따라서, 전 단계인 여러 장의 간섭 패턴 영상을 압축하는 연구가 등장하였다[5]. [5]에서는 각 간섭 패턴 영상을 JPEG2000 기법으로 압축하였고, 이때 각 간섭 패턴마다 동일한 비트량을 할당하였다. 본 논문에서는 비트율-왜곡(rate-distortion) 최적화에 기반하여 여러 장의 간섭 패턴 영상을 효율적으로 압축하는 알고리즘을 제안한다.

2. 제안하는 알고리즘

기존의 JPEG2000은 한 장의 영상에서 비트율-왜곡 최적화를 이용하여 각 블록별로 최적의 비트량을 할당한다. 하지만 PSI 홀로그래피에서 복원된 영상을 얻기 위해서는 네 개의 간섭 패턴 영상이 한 개의

PSI 홀로그래피로 합성되는 과정이 필요하다. 따라서 [4]에서처럼 각 간섭 패턴 영상에 동일한 비트량을 할당하여 압축하는 방식은 각각의 간섭 패턴 영상에서는 JPEG2000의 비트율-왜곡 최적화로 우수한 압축 결과를 나타내지만, 서로 다른 네 개의 간섭 패턴 영상 간에는 비트율-왜곡 측면에서 최적의 압축 결과를 나타내지 못한다. 또한, 디지털 홀로그래피에서는 복원된 3차원 영상에서 영상의 품질을 측정한다. 이는 PSI 디지털 홀로그래피 기반의 데이터 압축을 고려할 때, 서로 다른 네 개의 간섭 패턴 영상 간에도 비트율-왜곡 측면에서 최적의 비트량을 적응적으로 할당할 필요가 있음을 의미한다. 본 논문에서는 비트율-왜곡 최적화에 기반 하여 각 간섭 패턴 영상마다 서로 다른 비트량을 할당하여 압축함으로써 복원 영상의 왜곡을 효율적으로 줄이는 압축 기법을 제안한다.

F_k ($1 \leq k \leq 4$)를 k 번째 간섭 패턴이라고 하자. $R_k^{b_k}$ 는 F_k 를 JPEG2000으로 압축한 비트스트림을 b_k 에서 절단하는 경우 비트량을 의미한다. D 는 $R_k^{b_k}$ 로부터 복원한 영상의 왜곡값을 의미하며 다음과 같이 유클리드 거리(Euclidean distance)를 정규화(normalization)시킨 값으로 계산한다.

$$\sqrt{\frac{\sum_x \sum_y |I(x, y) - \hat{I}(x, y)|^2}{\sum_x \sum_y |I(x, y)|^2}} \quad (1)$$

I 는 원본 간섭 패턴 영상으로부터 복원한 3차원 영상이고, \hat{I} 는 압축한 간섭 패턴 영상으로부터 복원한 3차원 영상을 의미한다. $b = \sum_k b_k$ 라고 하면 D^b 는 비트량 b 로 생성되는 복원 영상의 왜곡이다.

최적화 문제는 주어진 비트량 제한 조건

$$R_{\max} \geq \sum_k R_k^{b_k} \quad (2)$$

를 만족시키고 복원된 영상에서의 왜곡 D^b 를 최소화시키는 b_k 를 찾는 것이다. 이 때 R_{\max} 는 최대 사용 가능한 비트량이다. 모든 간섭 패턴 영상에 대하여 비트량을 증가시키면서 모든 k 에 대해

$$\frac{D^b - D^{b+1}}{R_k^{b_k+1} - R_k^{b_k}} \quad (3)$$

을 구하고, 이 값이 최대가 되도록 하는 k 번째 간섭 패턴 영상에 비트량을 우선적으로 할당한다. 식 (3)은 b 가 증가할수록 감소하는 특성을 갖는다.

3. 실험결과

그림 1(a)는 실험에 사용한 1024 x 1024 크기의 네 개의 간섭 패턴 영상 중 하나를 나타내며, 그림 1(b)는 PSI 디지털 홀로그래피 기법으로 복원한 3차원 영상을 나타낸다. 각 간섭 패턴 영상 압축에 할당하는 비트량은 4 KB (kilo bytes) 단위로 증가시켰다.

그림 2는 제안하는 압축 알고리즘의 비트율-왜곡 성능을 나타낸다. 왜곡은 그림 1(b)와 같이 복원된 영상에서 식 (1)로 측정하였다. 간섭 패턴마다 동일한 비트량을 할당하는 알고리즘에 비해 간섭 패턴 간의 비트율-왜곡 최적화를 수행하는 제안 알고리즘이 0.05 bpp ~ 0.6 bpp의 낮은 비트율에서 더 작은 왜곡을 가짐을 확인할 수 있다.

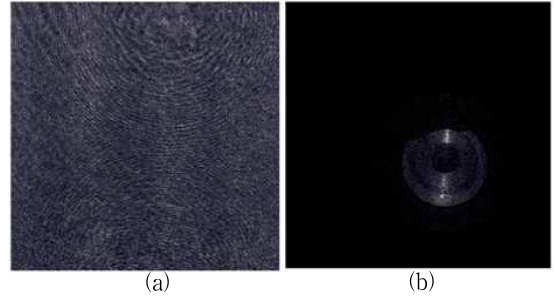


그림 1. (a) 간섭 패턴 영상, (b) 복원된 영상

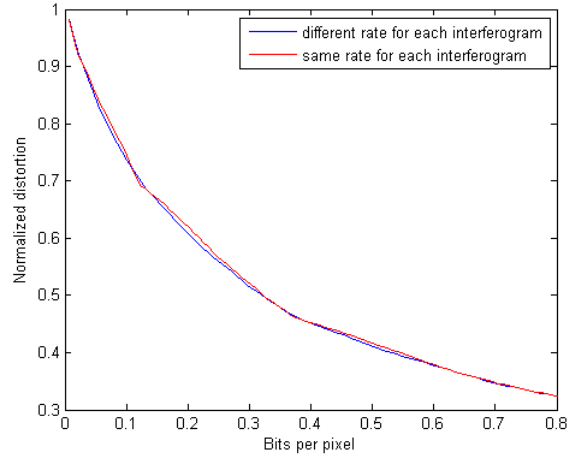


그림 2. 비트율-왜곡 성능 결과

4. 결론

본 논문에서는 PSI 디지털 홀로그래피에서 3차원 물체 정보가 기록된 여러 장의 간섭 패턴 영상을 비트율-왜곡 최적화에 기반하여 압축하는 방법을 제안하였다. 비트율-왜곡 최적화에 기반하여 여러 간섭 패턴 영상 중에서 복원 영상의 왜곡을 가장 크게 줄이는 간섭 패턴에 우선적으로 비트량을 할당한다. 기존의 JPEG2000 기반으로 간섭 패턴마다 동일한 비트량을 할당하는 기법에 비해 제안하는 알고리즘은 저 비트율에서 왜곡을 효과적으로 줄일 수 있다.

참고 문헌

- [1] I. Yamaguchi and T. Zhang, "Phase-shifting digital holography," *Optics Letters*, vol. 22, no 16, pp. 1268-1270, 1997.
- [2] 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.
- [3] A. E. Shortt, T. J. Naughton, and B. Javidi, "Compression of digital holograms of three-dimensional objects using wavelets," *Opt. Expr.*, vol. 14, no. 7, pp 2625-2630, April 2006.
- [4] A. E. Shortt, T. J. Naughton, and B. Javidi, "Histogram approaches for lossy compression of digital holograms of three-dimensional objects," *IEEE Trans. Image Processing*, vol. 16, no. 6, pp. 1548-1556, June 2007.
- [5] E. Darakis and J. J. Soragan, "Compression of interference patterns with application to phase-shifting digital holography," *Appl. Opt.*, vol 45, pp. 2437-2443, 2006