

디지털 홀로그래픽 현미경 데이터를 위한 위상 영상 압축

*김영민 *반현민 *최승미 **오관정 **임용준 *김휘용⁺
 *경희대학교, **한국전자통신연구원
 *{electron, hmban1996, 2018102242, hykim.v}@khu.ac.kr
 **{kjoh, yongjun}@etri.re.kr
 +: 교신저자(Corresponding author)

Phase Image Compression for Digital Holographic Microscopy

*YoungMin Kim *Hyunmin Ban *SeungMi Choi **Kwan-Jung Oh **Yongjun Lim
 *HuiYong Kim
 *Kyung Hee University **ETRI

요약

최근 홀로그램(Hologram)을 광학현미경(light microscopy)에 적용하여 시료의 두께를 측정하는 방식의 연구가 활발하게 진행되고 있다. 빛의 간섭패턴(Interference pattern)을 사용하여 시료의 두께를 측정할 수 있는 이유는 시료의 두께에 따라 빛의 위상(phase)이 달라지기 때문이다. 빛의 간섭패턴을 저장하는 홀로그램에서 위상만을 분리한 후 위상을 unwrapping 하면 물체의 두께를 측정할 수 있다.

JPEG은 기존의 연구방식인 시료를 통과한 홀로그램 이미지를 직접 압축하는 object 압축방식을 사용한다. 하지만 본 논문에서는 object 압축방식과 달리 홀로그램 이미지를 직접 압축하지 않고 홀로그램 이미지에서 시료의 위상(phase)만을 분리하여 위상 도메인에서 압축하는 방식을 취하였다. 이를 통해 object 압축방식에 비해 위상 도메인 압축방식에서 모든 데이터셋에 대하여 평균적으로 0.0003~0.0142 radian의 성능향상을 이룰 수 있었다.

1. 서론

디지털 홀로그래피 현미경(Digital Holographic Microscopy, DHM)이란 시료에서 나온 빛의 파면(light wave front)을 기록하는 현미경을 뜻한다. 일반적인 현미경은 빛이 시료를 통과한 후 보이는 정사형된 이미지(projected image)를 기록한다¹⁾. 반면에 디지털 홀로그래피 현미경은 반투명거울(Beam splitter)을 이용하여 레이저를 두 개로 나눈다. 이때, 시료를 투과하고 나온 빛을 물체광(object beam)이라 하며, 시료를 투과하지 않은 빛을 참조광(reference beam)이라 한다. 물체광의 파면과 참조광의 파면이 만나 간섭현상(interference)을 일으키고 간섭무늬(interference pattern)가 만들어진다. 이 간섭무늬가 홀로그램이다. 디지털 홀로그래피 현미경은 간섭무늬를 이미지 형태로 저장한다.

홀로그래피(Holography)란 3차원상에 존재하는 물체에서 나오는 빛의 진폭과 위상을 특수한 재료로 만들어진 2차원의 홀로그램(Hologram) 필름에 기록하는 기술이다. 홀로그래피 기술로 촬영된 것을 홀로그램이라 한다²⁾.

디지털 홀로그래피 현미경을 사용하여 시료에 대한 홀로그램을 획득하면 시료의 두께 정보를 파악할 수 있다. 이는 물체의 두께에 따라 물체를 통과한 빛의 위상(phase)이 달라지기 때문이다. 시료를 통과한 빛의 위상과 시료를 통과하지 않은 빛의 위상 간 위상차를 구하면 물체의 두께 정보를 알 수 있다. 위상은 $[-\pi, \pi]$ 사이의 주기성을 가진다. 따라서 시료를 통과한 빛의 위상과 시료를 통과하지 않은 빛의 위상 간

위상차는 2π 주기로 표현되어 있다. 위상차에서 주기성을 없애고 본래 위상값으로 복구하는 unwrapping 과정을 거치면 물체의 정확한 두께를 알 수 있다.

디지털 홀로그래피 현미경을 통해 획득한 홀로그램 이미지는 용량이 매우 크다. 따라서 물체의 두께 정보를 담고 있는 위상정보를 크게 손상시키지 않으면서 용량을 줄일 수 있는 적절한 압축 방법이 요구된다. 기존 방식인 JPEG의 경우 시료를 통과한 홀로그램 이미지를 직접 압축하는 object 압축방식을 사용한다(이하 'object 압축방식'이라고 한다). 홀로그램 이미지에는 DC 성분, Twin-image 성분, rescale된 물체광 성분이 모두 포함되어 있다. 정확한 위상차를 구하기 위해서는 홀로그램 이미지에서 DC 성분과 Twin-image 성분을 제거해야 한다. Object 압축방식의 장점은 원본 홀로그램 이미지에 대한 압축본을 가지고 있으므로, 후에 더 발전된 DC, Twin-image 성분 제거 기술을 적용할 수 있다는 점이다. 하지만 Rate-Distortion 관점에서 object 압축방식의 성능은 부적절하다고 판단했다.

본 논문에서는 object 압축방식과 비교하여 더 향상된 Rate-Distortion을 얻는 새로운 방법을 제시하고자 한다. Object 압축방식이 아닌 위상차를 직접 압축하는 방식이 그것이다. 논문의 구성은 다음과 같다. 첫째, 실험 개념에 대해 소개한다. 둘째, 실험 데이터셋과 설정조건에 대해 설명한다. 셋째, 실험방법에 대해 소개한다. 끝으로 성능평가와 실험 결과를 제시하며 향후 과제를 제시한다.

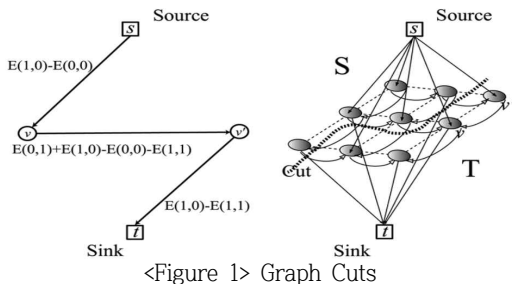
2. 실험 개념

1) Phase Retrieval

홀로그래프 이미지에서 위상만을 분리해주는 함수이다. 입력값으로 2464×2056 크기를 가지는 이미지를 입력받아 출력값으로 1972×1648 크기의 위상을 추출한다. 홀로그래프 이미지에서 위상만을 추출하기 위해 튜키 윈도우(Tukey Window)와 푸리에 변환(Fourier transform)을 복잡적으로 사용한다. 튜키 윈도우를 적용한 이미지에 푸리에 변환을 적용하여 이미지의 DC성분과 Twin-image를 제거하는 방식으로 위상을 추출하는 방식이다³⁾.

2) PUMA(Phase unwrapping via graph cuts) algorithm

모듈로(modulo)- 2π 로 표현된 위상을 본래 값으로 복원하는 알고리즘이다. 위상을 에너지로 해석하여 그래프로 표현한다. 그래프에 graph cuts 기술을 적용하여 위상을 본래 값으로 복원한다⁴⁾.



<Figure 1> Graph Cuts

3. 실험 데이터셋

1) 데이터 입출력 관계

	Phase Retrieval	PUMA	HEVC
입력 데이터 크기	2464 × 2056	영향 X	8의 배수
출력 데이터 크기	1972 × 1648	입력과 동일	입력과 동일

<Table 1> Data set size

2) 실험 데이터셋

Number	Name	Size
1	Brain Tissue	2464×2056
2	HaCaT cell	2464×2056
3	HaCaT single cell	2464×2056
4	PMMA spheres	2464×2056
5	USAF	2464×2056

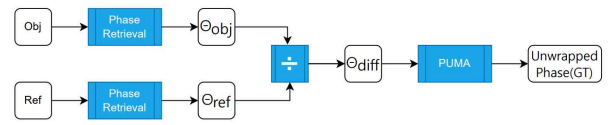
<Table 2> All data set

4. 실험 방법

1) Ground Truth

시료가 있는 상태에서 획득한 홀로그래프 이미지를 Obj라 하며 시료

가 없는 상태에서 획득한 홀로그래프 이미지를 Ref라 한다. Obj와 Ref에서 phase retrieval 함수를 통해 각각 위상만을 분리한다. Phase retrieval 함수를 통해 계산한 Obj의 위상을 θ_{obj} , Ref의 위상을 θ_{ref} 라 한다. 위상차 θ_{diff} 를 구하기 위해 θ_{obj} 와 θ_{ref} 를 나눈다. θ_{diff} 에 phase unwrapping 알고리즘인 PUMA를 적용하여 최종적으로 unwrapped phase를 구한다. 계산된 unwrapped phase가 GT이다.



<Figure 2> Ground Truth

Name	Value
Profile	monochrome
Tier	main
MaxCUWidth	64
MaxCUHeight	64
MaxPartitionDepth	4
QuadtreeTULog2MaxSize	5
QuadtreeTULog2MinSize	2
QuadtreeTUMaxDepthInter	5
QuadtreeTUMaxDepthIntra	5
IntraPeriod	1
DecodingRefreshType	0
GOPSize	1
InputColourSpaceConvert	UNCHANGED
InputChromaFormat	400
InternalBitDepth	8
WaveFrontSynchro	1
SummaryVerboseness	1
QP	[1,5,10,15,25,35,40]

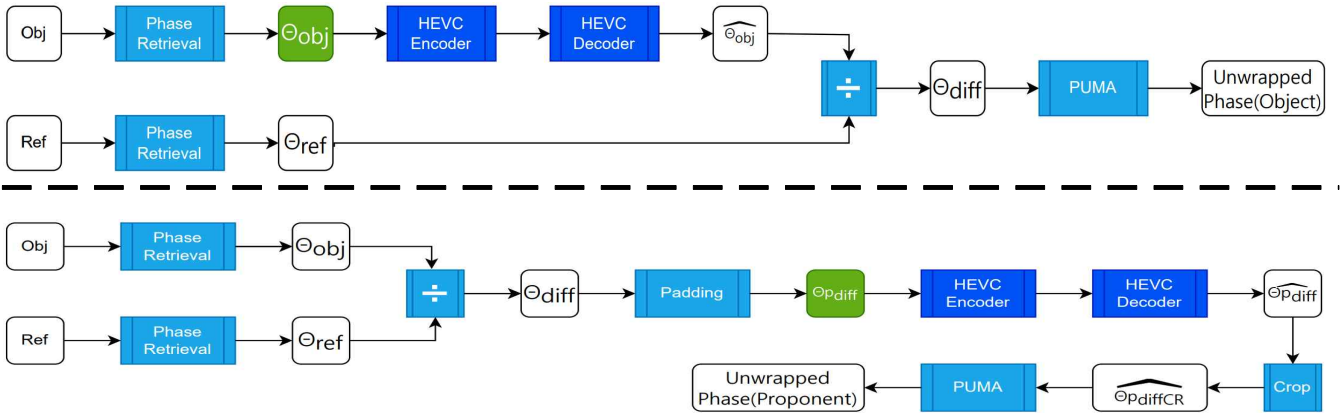
<Table 3> HEVC intra condition

2) Object 압축방식

Ground truth와 달리 object 압축방식에서는 θ_{obj} 에 HEVC 코덱을 적용하여 $\widehat{\theta}_{obj}$ 를 만든다. 이때, HEVC 모드 중 화면내 예측을 위한 intra 모드를 적용한다. 다음으로 $\widehat{\theta}_{obj}$ 과 θ_{ref} 를 나누어 위상차 θ_{diff} 를 구한다. θ_{diff} 에 PUMA 알고리즘을 적용하여 unwrapped phase를 계산한다.

3) Proponent 압축방식

본 논문에서 제시하는 위상 압축방식은 object 압축방식과 달리 θ_{obj} 를 압축하는 것이 아닌, 위상차에 해당하는 θ_{diff} 를 압축하는 방식이다. Phase Retrieval 함수의 출력값인 θ_{diff} 의 크기는 1972×1648이다. 이때, 1972×1648은 8의 배수가 아니므로 HEVC 코덱을 적용할 수 없다. 따라서 θ_{diff} 에 replicate padding을 적용하여 1976×1648 크기를 갖는 θ_{pdiff} 를 만든다. θ_{pdiff} 에 Object 압축방식에서 사용한 것과 동일한 HEVC 코덱을 적용한 결과를 $\widehat{\theta}_{pdiff}$ 이라 한다. GT의 크기는 1972×1648 이므로 1976×1648 크기를 갖는 $\widehat{\theta}_{pdiff}$ 에 crop를 적용하여 GT와 동일한 크기를 갖는 $\widehat{\theta}_{pdiffCR}$ 을 만든다. 최종적으로 $\widehat{\theta}_{pdiffCR}$ 에 PUMA를 적용하여 unwrapped phase를 획득한다.



<Figure 3> Object 압축방식(Top), Proponent 압축방식(Bottom)

5. 성능 평가

1) RMSE

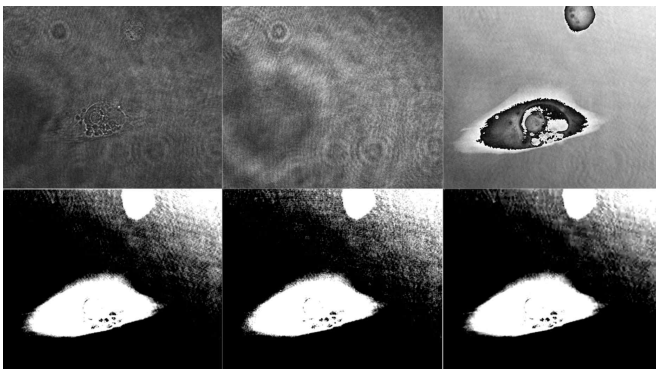
$$RMSE(\theta_1, \theta_2) = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^N (x_{1,i} - x_{2,i})^2}}{N}$$

$$\theta_1 = \begin{pmatrix} x_{1,1} \\ x_{1,2} \\ \vdots \\ x_{1,N} \end{pmatrix} \quad \theta_2 = \begin{pmatrix} x_{2,1} \\ x_{2,2} \\ \vdots \\ x_{2,N} \end{pmatrix}$$

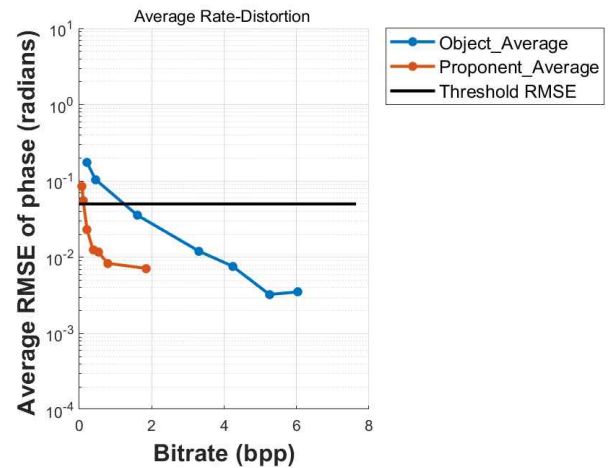
$\theta_1 = GT, \theta_2 = unwrapped \text{ phase}(\text{Object}, \text{Proponent})$
 N : Total pixel number

Object 압축방식과 본 논문이 제시한 압축방식의 성능을 평가하기 위해 RMSE 평가방식을 사용하였다. 아무런 조작을 가하지 않고 원본 홀로그래姆 이미지에서 위상만을 추출하여 PUMA 알고리즘만을 적용한 GT와 θ_{obj} 에 조작을 가한 Object 압축방식 사이의 RMSE를 구하고 동일한 방법으로 GT와 θ_{diff} 에 조작을 가한 proponent 방식에 RMSE를 구하였다. RMSE 평가방식을 통해 어떤 압축 방법이 더 좋은 RD-Cu rve를 그리는지 확인했다.

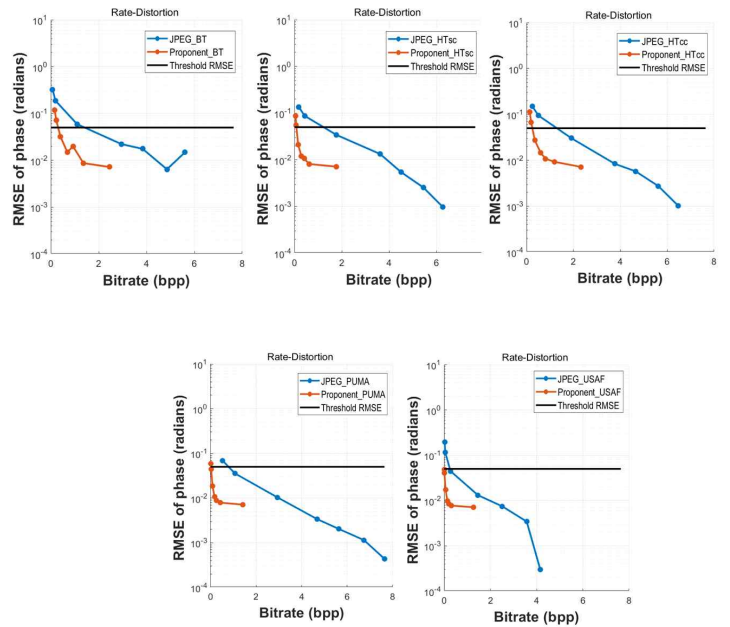
6. 실험 결과



<Figure 4> HaCaT single cell, 상단 왼쪽부터 오른쪽으로, $\theta_{obj}, \theta_{ref}, \theta_{diff}, Unwrapped \text{ phase}(GT), Unwrapped \text{ phase}(\text{Object}), Unwrapped \text{ phase}(\text{Proponent})$



<Figure 5> 모든 데이터셋에서 QP에 따른 평균 RMSE



<Figure 6> 모든 데이터셋에 대한 RMSE
 BT=Brain Tissue, HTcc=HaCaT cell,
 HTsc=HaCaT single cell,
 PUMA=PUMA spheres

7. 실험 결과분석 및 향후 과제

본 논문에서는 object를 압축하는 것이 아닌 위상차를 압축하는 방식을 제안한다. 실험 결과 모든 데이터셋에서 기존의 object 압축방식이 아닌 본 논문에서 제시한 위상차 압축방식이 월등한 성능을 보였다. 또한 각 QP값 별로 전체 데이터셋의 RMSE의 평균값에서도 위상차 압축방식의 성능이 더 뛰어난 것을 확인할 수 있다. Object 압축방식의 경우 디코더가 Ref에 관한 정보를 가지고 있다는 가정하에 동작한다. 반면에 위상차를 압축하는 방식의 경우 Ref에 관련된 정보가 불필요하다는 장점이 존재한다. 따라서 위상차 방식을 적용할 시 Object 압축방식보다 더 효율적인 홀로그램 압축성능을 얻을 수 있을 것이라 기대된다. 향후 특정 데이터셋에서 bitrate가 증가함에 따라 RMSE가 단조 감소하지 않는 현상에 대해서 추가 실험 및 분석이 필요할 것으로 보인다.

감사의 글

본 논문은 2022년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 정보통신기획평가원의 지원을 받아 수행된 연구임 (No. 2020-0-00981.(세부 2)홀로그램 기반의 위상 검출용 디지털 홀로그래피 매트릭스 기술 개발)

6. 참고문헌

- 1)Kwan-Jung Oh(ETRI), Peter Schelkens(VUB-imec), "JPEG Pleno Holography Uses Cases and Requirements", JPEG Pleno, 2020.
- 2)P. Hariharan, "Basics of Holography", Cambridge University Press, 2002.
- 3)J.R.Fienup, "Phase retrieval algorithms: a comparison", OPTICA PUBLISHING GROUP, Vol2 21, Issue 15, 1982, pp.2758-2769
- 4)Bioucas-Dias et al., "Phase unwrapping via graph cuts", IEEE TRANSACTIONS ON IMAGE PROCESSING, VOL.16, NO.3, MARCH 2007