

위상이미징을 위한 전역광단층영상 기법

Full-field Optical Coherence Tomography for Phase Imaging

나지훈*, 최우준, 민기현, 이병하
 광주과학기술원 정보통신공학과
 jhna@gist.ac.kr

전역광단층영상 (Full-field Optical Coherence Tomography: FF-OCT) 기법은 생체 내부에 위치한 미세조직의 구조를 절개 없이 3차원으로 영상화할 수 있는 광학단층영상 기법 중 하나이다⁽¹⁾. 주로 위상천이기술 (Phase Shifting Technique)을 사용하는데, 한 주기를 4개로 분할하여 4장의 간섭이미지를 획득하고 이로부터 샘플시료에 대한 세기정보 (Amplitude Information)와 위상정보 (Phase Information)를 복원한다⁽²⁾. FF-OCT는 대부분의 OCT가 사용하는 횡방향 주사 (A, B-scan) 없이 샘플 내부에 대한 수평방향(en-face)의 정보를 이차원 CCD를 사용하여 번에 획득할 수 있기 때문에 고속의 3차원 영상획득이 용이한 장점이 있다. 극광대역 광원을 사용하면 1 μm 내외의 축상 분해능을 갖는 세기 이미지를 통상의 FF-OCT로도 얻을 수 있었다. 하지만 간섭이미지에 내제된 시료의 위상정보를 이용하면 나노미터 스케일의 해상도를 갖고 단층영상을 추출할 수 있어⁽³⁾ 본 연구에서는 위상이미징을 위한 전역광단층영상기를 구현하였다.

그림 1은 자체 제작된 FF-OCT 시스템의 개략도인데 Linnik 구성을 가진 백색광 간섭계를 기반으로 시스템이 구성되었음을 나타내고 있다. 150 W의 할로젠램프를 광원으로 하였으며 구부러지기 쉬운 광섬유 다발 (fiber bundle)로 시스템에 입사시켰다. 입사광은 간섭계 내에 위치한 광대역 광속분할기 (BBS)를 통해 50:50 비율로 분리한 후 간섭계의 기준단과 샘플단으로 각각 보냈다. 시료에 대한 확대영상을 얻기 위하여 샘플단에 대물렌즈를 설치하였는데 샘플 표면에서의 반사를 최소화하고 index mismatching을 위하여 물잠김 렌즈 (water immersion lens; 10 \times , 0.3 NA, Olympus)를 사용하였다. 또한 샘플단과 기준단 간의 분산특성을 맞추어 주기 위하여 동일한 대물렌즈를 기준단에도 설치하였다. 각 단에서 산란 또는 반사된 빛은 역순으로 진행하여 BBS로 다시 합쳐져 간섭을 일으키게 되는데 그 간섭무늬를 실리콘 기반의 CCD 카메라 (CCD-1020, 12bit, 512 \times 512; VDS Vossküler)로 획득하였다. 간섭의 contrast를 높이기 위하여 광세기 가변형 Neutral Density Filter (NDF)를 기준단에 두었으며, NDF 설치로 발생하는 분산을 최소화시키기 위해서 Glass Plate(GP)를 샘플단에 추가하였다. 기준단 신호의 위상천이를 위하여 기준단 거울을 압전소자 (PZT)에 부착하였다.

기준단 거울에 부착된 압전소자 (PZT)의 Z축 이송에 의해서 간섭신호상에 위상변조가 일어나게 되는데 변조 한주기 당 4번의 간섭신호 획득을 하였다. 이때 CCD로 획득된 각각의 간섭신호는 다음과 같이 표현되어 진다⁽²⁾.

$$I_n = \frac{T}{4} I_{DC} + I_{AC} \int_{(n-1)T/4}^{nT/4} \cos [\phi(x, y) + \psi \sin(\omega t + \theta)] dt, \quad n=1, 2, 3, 4 \quad (1)$$

여기서 T 는 변조주기(period), ϕ 는 시료의 위상정보, ψ 는 변조세기, ω 는 변조주파수, θ 는 변조위상이다. 전술한 바와 같이 통상의 FF-OCT 에서는 시료에 대한 깊이정보로 식 (1)의 I_{AC} , 즉 세기정보만을 사용

한다. 하지만 본 연구에서는 시료에 대한 깊이정보를 위상이미지의 형태로 추출하고자 하였다. 식 (1)에서 시료에 대한 위상정보는 ϕ 인데 위상천이가 된 4장의 간섭이미지로부터 다음과 같이 구하여 진다.

$$\phi(x,y) = \tan^{-1} \left(\frac{I_1 - I_2 - I_3 + I_4}{I_1 - I_2 + I_3 - I_4} \right) \quad (2)$$

그림 2는 기준단의 PZT를 10 Hz로 변조시키면서 한 주기 당 총 4장의 간섭 이미지 I_1, I_2, I_3, I_4 를 같은 시간간격으로 취득한 후 식 (2) 이용하여 추출한 위상이미지이다. 시료로는 유리기판에 크롬으로 패틴이 코팅된 U.S. Air Force resolution target을 사용하였는데 코팅의 높이가 약 150 nm로 측정되었다.

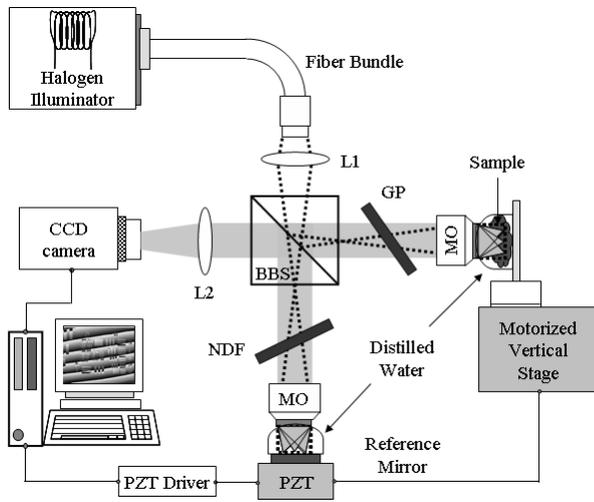


그림 1. FF-OCT 시스템 개략도

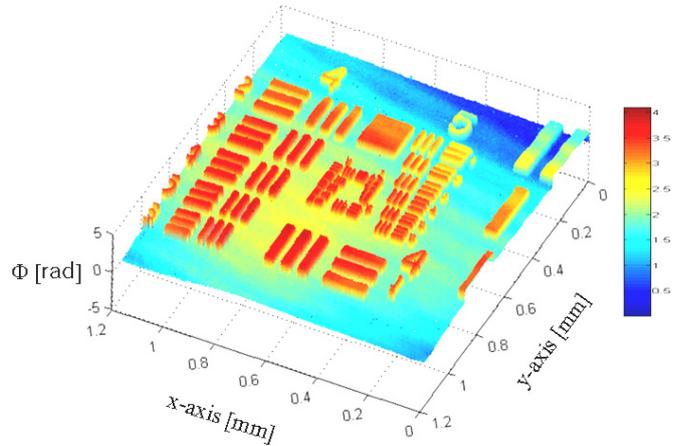


그림 2. U.S. Air force Target의 위상이미지

본 연구에서는 세기이미지만을 이용하는 통상의 전역광단층영상 기법을 확장하여 보다 향상된 깊이 방향 해상도를 제공할 수 있는 위상이미지 기반의 전역광단층영상기를 구현하였고 U.S. Air Force resolution target의 코팅두께를 나노미터 스케일로 측정할 수 있음을 보였다. 위상잡음을 효율적으로 제어하기 위한 연구가 계속된다면 조만간 세포와 같은 미세조직의 물리적 변화 및 특성을 관찰하는데도 사용될 수 있을 것으로 예상된다.

본 연구는 산업자원부 산업기술기반조성사업, 한국과학재단을 통해 과학기술부의 바이오기술개발사업과 특정기초 사업의 일부 지원금에 의한 것입니다.

Reference

1. A. Dubois, *et. al.*, "Ultrahigh-resolution full-field optical coherence tomography," *Appl. Opt.*, 43, 2874-2883 (2004).
2. A. Dubois, *et. al.*, "Phase-map measurements by interferometry with sinusoidal phase modulation and four integrating buckets," *J. Opt. Soc. Am. A*, 18, 1972-1979 (2001).
3. X. Li, *et. al.*, "Full-field quantitative phase imaging by white-light interferometry with active phase stabilization and its application to biological samples," *Opt. Lett.*, 31, 1830-1832 (2006)