

패턴 조명 현미경을 이용한 3차원 형상 측정 Structured illumination microscopy for 3D measurements

주기남

K. -N. Joo (knjoo@chosun.ac.kr)

조선대학교 광기술공학과

Key words : structured illumination microscopy, 3D measurement, wide field microscopy

1. 서론

최근, 패턴 조명 (structured illumination)은 현미경에서 공간 분해능 (spatial resolution)을 향상시키는 기법으로 널리 이용되고 있으나¹, 이와 동시에 위상 천이 (phase shifting)를 이용한 패턴 조명 현미경 (structured illumination microscopy)은 종축 방향의 구동을 통해 반도체 및 미세 제품의 3차원 형상 측정을 가능하게 한다. 위상 천이 패턴 조명 현미경은 3차원 형상을 측정하기 위해, 임의의 종축 위치에서 조명의 패턴을 위상 천이하여 가시도 정보를 추출한다. 이후, 종축 방향으로 구동하면서 이러한 과정을 반복하여, 가시도가 정점이 되는 위치인 최적의 초점 위치를 결정하고 이로부터 물체의 높이를 측정한다². 이러한 패턴 조명 현미경은 현재 산업계에서 널리 사용되고 있는, 공초점 현미경 (confocal microscopy)과 원리적인 측면에서 유사한 점을 가지지만, 공초점 현미경에 비해 저비용의 장치로 비교적 빠른 시간에 3차원 형상 정보를 획득할 수 있다는 장점을 가지고 있다. 그러나 기존의 패턴 조명 현미경의 측정 원리는 종축 구동과 위상 천이가 단계별로 구성되어있기 때문에, 측정시 오랜 시간을 필요로 하고, 이로 인하여 산업계에서 생산성을 저하하는 요인이 된다.

한편, 이를 보완하기 위한 시도로 패턴 조명 현미경에서 종축 구동과 패턴의 위상 천이를 동기화하여, 측정시 속도를 개선한 연속 주사형 패턴 조명 현미경이 제안되었다³. 본 논문에서는 연속주사형 패턴 조명 현미경의 원리를 소개하고, 획득한 신호로부터 높이 정보를 추출하는 알고리즘에 대해 소개한다.

2. 연속주사형 패턴 조명 현미경

Fig.1은 연속주사형 패턴 조명 현미경의 광학 구성과 측정 원리를 나타낸다.

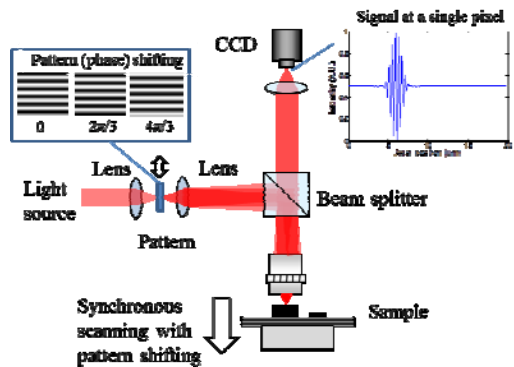


Fig. 1 An optical layout of continuous scanning structured illumination microscopy and its operating principle

위의 그림에서 알 수 있듯이, 광원으로 나온 빛은 사인과 분포를 가지는 패턴 (sinusoidal amplitude pattern)에 조사된 후, 다시 현미경으로 입사하여 측정 대상에 초점을 맞춘 후, 결상 광학계를 통하여 CCD 카메라에서 검출된다. 이때, 사인과 패턴과 측정 대상의 표면, CCD 카메라의 영상면은 광학적으로 공액 (conjugate) 관계에 놓이게 되어, 측정 대상에 정확히 초점이 맺을 경우, CCD 카메라에서는 선명한 사인과 형태의 광분포를 측정할 수 있다. 또한, 패턴 조명 현미경에서 패턴 조명은 측정 대상의 표면을 국지적으로 제한하여 조사함으로써, 초점이 맺지 않은 곳에서 반사되는 빛을 차단하는 역할을 한다. 각 종축

위치에서 가시도는 패턴의 위상 천이를 이용하여 추출하며, 연속 주사 패턴 조명 현미경은 패턴의 위상 천이와 종축 구동을 동기화하여 구동시킴으로써, 연속적으로 신호를 획득할 수 있다. 이렇게 획득된 신호는 CCD 카메라의 각 픽셀당 Fig. 1의 오른쪽 위 삽입 그림과 같이 백색광 주사 간섭계 (white light scanning interferometry)의 간섭 신호와 유사한 형태를 보인다. 변조 신호는 패턴의 위상 천이에 의한 효과이며, 전체 진폭의 크기는 초점의 위치에 따른 것이다. 결국, 이러한 패턴 조명 현미경에서 가시도 (진폭)의 크기가 가장 큰 위치는 정확히 초점이 맺힌 위치가 되며, 이를 전체 픽셀에서 계산하면 물체의 3차원 형상을 측정할 수 있다.

3. 측정 알고리즘 및 결과

연속 주사 패턴 조명 현미경에서 획득된 신호는 앞서 설명한 것과 같이 백색광 주사 현미경의 간섭 신호와 유사하다. 그와 같은 이유로 백색광 주사 간섭계에서 사용되고 있는 푸리에 변환 (Fourier transformation)에 근거한 방법들 및 무게 중심법 (center of gravity) 등의 알고리즘들 중 가시도 정점 추출 알고리즘 (envelope peak detection)은 바로 적용이 가능하다. 그러나 이와 달리 백색광 주사 간섭계의 고분해능을 위한 위상 추출 알고리즘 (phase peak detection)은 두 방법들의 기본 원리의 차이로 인하여 응용될 수 없다. 즉, 백색광 주사 간섭계는 광원의 저간섭성 (low coherence)을 이용하여 간섭 신호를 획득하며, 이때 간섭 신호의 위상은 광학 거리 차이 (optical path difference)에 의해 결정되는데 반해 연속 주사 패턴 조명 현미경의 경우, 신호의 위상은 사용하는 패턴의 위상 천이에 의해 결정되고, 이는 측정 때마다 달라지는 임의의 값이 되므로 측정 대상의 높이와는 무관하다.

기존의 연속 주사 패턴 조명 현미경의 측정 알고리즘은 푸리에 변환과 역푸리에 변환을 이용하여 가시도를 추출하는 방법을 사용하였다³. 그러나 앞서 설명한 것과 같이 연속 주사 패턴 조명 현미경의 측정 신호가 백색광 간섭 신호와 유사하다는 점을 이용하면,

보다 다양한 알고리즘의 적용이 가능하다. 특히 널리 알려진 FDA (Fourier domain analysis) 방법은 기존 방법에 비해 한번의 푸리에 변환을 통해 정점의 위치를 결정하므로 측정 시간을 단축시킬 수 있는 가능성을 가진다⁴.

Fig. 2(a)는 연속 주사 현미경에서 일정 종축 위치에서 사인파 패턴 조명이 측정 대상에 조사된 시뮬레이션 영상 (110 × 110 pixels)을 나타내며 Fig. 2(b)는 이를 기본으로 연속 주사 이후, 계산된 물체의 3차원 형상을 보여준다. 이때 획득된 영상 신호들은 FDA 방법을 이용하여 각 픽셀당 가시도 정점을 추출하였으며 설정한 물체의 형상과 계산된 형상과의 차이는 RMS (root mean square) 값으로 0.63 nm 였다⁴.

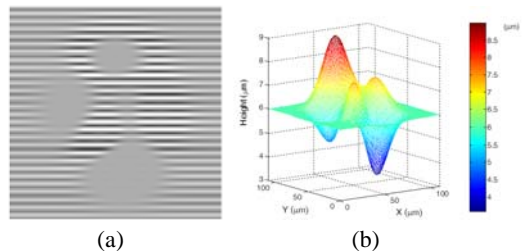


Fig. 2 (a) Simulated sinusoidal pattern on the target surface and (b) reconstructed height map of the target

4. 결론

본 논문에서는 3차원 형상 측정을 위한 패턴 조명 현미경의 원리와 측정 알고리즘에 대해 소개하였다. 향후, 패턴 조명 간섭계는 기존의 측정 방법에 비해, 저비용, 빠른 측정 등의 장점들로 인해 3차원 검사 분야에 널리 응용될 것으로 예상된다.

참고문헌

1. M. G. L. Gustafsson, J. Microsc. 198, 82-87, 2000.
2. M. A. A. Neil, R. Juškaitis, and T. Wilson, Opt. Lett. 22 (24), 1905-1907, 1997.
3. M. Vogel, Z. Yang, A. Kessel, C. Kranitzky, C. Faber and G. Häusler, Proc. of SPIE 8082, 80820S, 2011.
4. K-N, Joo, Meas. Sci. Technol. 23, 057002, 2012.