

간섭 현미경을 이용한 마이크로 물체의 6 자유도 운동 측정 및 제어

Six-Axis Visual Servo Control of Micro Objects

*김경현¹

*J.H. Kim¹

¹ 경성대학교 메카트로닉스학과

Key words : visual servo, white light interferometry, microscope, motion control

1. 서론

본 연구는 마이크로미터 단위 물체의 6 자유도 움직임을 간섭 현미경을 이용한 비전 센서를 통해 나노미터의 정밀도에 가까운 정밀도로 측정하고, 움직임을 제어하는 Visual Servoing 에 관한 것이다. 비전 센서의 장점은 물체의 움직임을 바로 센서 평면에 투사함으로써 직접적인 관측이 가능하고 특히 여러 물체간의 상대적인 다자유도 움직임을 측정할 수 있다는 것이다. 본 논문은 간섭현미경을 통해 작은 물체에 투사된 간섭무늬를 실시간으로 처리해 물체의 움직임을 측정하는 Laterally Sampled White Light Interferometry (L-SWLI) 방법[1,2]을 보여준다. 이 알고리즘을 통해 물체의 움직임을 완벽히 정의하는, 즉 6 자유도 측정이 가능한 비전 센서 시스템을 개발했고, 센서를 통한 feedback control를 구현했다.

2. 6-자유도 측정

측정 장치의 개략도가 Fig 1에 자세히 그려져 있다. 우선 현미경이 물체에 간섭 무늬를 투사하면 그 이미지가 CCD 카메라에 의해 잡혀 메인 PC에서 실시간으로 이미지를 프로세싱 한다. 백색 (White Light) 간섭 무늬의 특징은 투사표면의 광학 축 (z축) 위치에 따라서 무늬의 밝기가 변한다는 것인데, 그 관계를 다음과 같이 표현할 수가 있다[4,5]:

$$I(z) = I_o \cdot [1 + b(z) + e(z - z_o) \cos(2\pi f_z \cdot z + \theta)] \quad (1)$$

Fig 2(a)는 실제 폭이 30um 가량의 외팔보에 간섭 무늬를 투사했을 때의 이미지를 보여준다. 이러한 이미지에서 어떻게 6-자유도를 도출하는지에 대한 원리는 다음과 같다.

우선 물체의 표면을 평면으로 가정한 모델을 Fig 3과 같이 정의하면, 그 평면의 방정식을

$$k_x x + k_y y + z = \ell \quad (2)$$

과 같이 표현할 수가 있다. (2) 식을 (1)식에 대입하면, 평면의 밝기에 대한 식이 아래와 같이 구해진다:

$$I(x, y) = e^{(\ell - k_x x - k_y y)} \cdot \cos(2\pi k_x f_z x + 2\pi k_y f_z y + \theta') \quad (3)$$

이 밝기 함수는 Fig 2(b)의 이미지를 함수로 표현한 것이다. (3)을 보면, 밝기 함수의 주기적 변화, 즉 공간적 주파수는 (spatial frequency) 는 k_x 및 k_y 그리고 f_z 에 의해 결정됨을 알 수 있다. f_z 는 광원의 스펙트럼에 의해 결정되는데, calibration을 통해 구할 수가 있다. 그렇다면, 공간 주파수 $f_z k_x$ 및 $f_z k_y$ 를 구하는 것이 문제인데, 이는 간섭 무늬 이미지 (Fig.2(b))에 대한 이차원 FFT (Fig.2(c))를 실행했을 때 얻어지는 극점을 구하면 된다. 이 극점을 알면 k_x 및 k_y 는 결정이 되고, 이어서 k_x 및 k_y 가 결정이 된다. 그렇게 되면, 평면 방정식(2)에서 평면의 기울기가 결정되므로 물체의 pitch 및 roll 각도가 결정되는 꼴이다. 뿐만 아니라, Fig 2-(a)에 나와 있듯이, 간섭 무늬를 일정 방향으로 샘플링하면 Fig.2-(d)와 같은 interferogram을 얻게 된다. 백색 간섭 무늬의 특징은 이러한 interferogram의 modulation envelope의 최대 극점이 Peak Coherence Plane(PCP, Fig1 & Fig 3)이라는 평면에서 생긴다는 것이다.

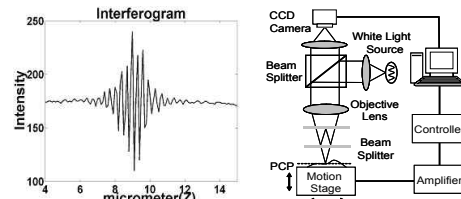


Fig.1: Experimental setup for L-SWLI measurement.

이 극점 ($x_p, y_p, 0$)를 찾아 식 (2)에 대입하게 되면,

$$\ell = k_x x_p + k_y y_p \quad (4)$$

평면 방정식은 완전히 결정된다. 평면 방정식이 결정되면, 총 6 자유도 중에서 3 자유도는 결정된다. 나머지 자유도의 결정은 기존의 이미지 프로세싱 알고리즘에 의해 구해지는데, 이 관한 자세한 설명은 [1]에 자세히 기술되어 있다.

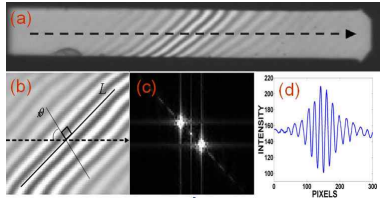


Fig. 2: Interference Fringes projected on a micro-cantilever and the lateral scan direction

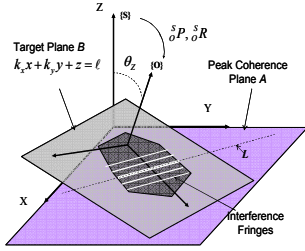


Fig. 3: Spatial model of interference fringes imposed on object

3. 6-자유도 서보 제어

6-자유도 비전 센서를 이용해 물체의 6-자유도 운동을 제어하는 비전 서보 제어를 구현하였다. 제어 방법의 개략도가 Fig 4에 그려져 있는데, inner loop와 outer loop를 가진 이중 구조다. Inner loop는 MSS 자체의 제어 루프로서, 1000Hz의 빠른 샘플링으로 unstable한 자기 부상 stage의 6 자유도를 제어한다. Outer loop는 6-자유도 비전 센서를 통해 제어되는데, 카메라의 샘플링 주파수인 30Hz에 의해 outer loop의 주파수가 결정된다. 제어된 위치 벡터는

$$\delta y = \delta r + [I + L(z)]^{-1} [\Delta_k \delta r - \frac{1}{2} K d] \quad (5)$$

로 구해진다. 여기서 Loop gain은,

$$L(z) = (I + \Delta_k) D_1(z) C(z) G(z) D_2(z) \quad (6)$$

인데, 제어기 C(z)를 L(z)가 high gain을 가지도록 설계해, disturbance 인 d 그리고 drift 및 mis-calibration을 대표하는 Δ_k 의 효과를 감소시킨다.

4. 실험 결과

개발된 센서를 이용한 운동 제어 성능을 보기 위해 MSS motion stage에 장착된 마이크로 외팔보 (Fig.2-(a))의 움직임을 제어했다. 비전 서보 제어를 하지 않은 상태에서, 외팔보를 반지름 1um의 원을 그리게 했다. 그 움직임을 L-SWLI로 측정 한 것이 Fig 6의 위에 나타나 있다. 움직임을 원에서 벗어남을 볼 수 있는데, 이는 MSS를 제어하는 laser interferometer가 온도 제어가 되지 않은 상태에서 생기는 drift 때문인 것으로 판단된다[3]. Fig.5의 밑에는

비전 서보 제어를 실행했을 때, 외팔보의 움직임을 보여준다.

5. 결론

본 연구는 마이크로미터 단위 물체의 6 자유도 움직임을 간접 현미경을 이용한 비전 센서를 통해 나노미터에 가까운 정밀도로 측정하고, 그 정보를 피드백 시켜서, 움직임을 제어하는 Visual Servoing에 관한 것이다. 구조물 및 센서의 drift를 보정할 수 있는 능력을 가진 센서 및 비전 서보의 기능을 실험을 통해 입증해 보였다.

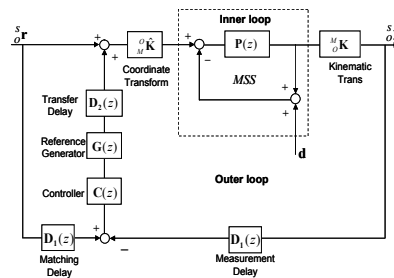


Fig. 4: Visual Servo Control Scheme

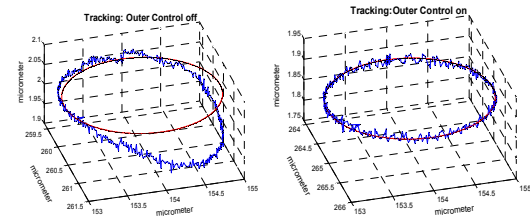


Fig. 5 Tracking performance

참고문헌

1. J. H. Kim, S.K. Kuo, C.H. Menq, "An Ultra Precision Six-Axis Visual Servo Control System," IEEE Transactions on Robotics, Volume 21, Issue 5, Oct. 2005 Page(s):985 – 993
2. J. Kim and C. H. Menq, "Visually Servo Control Achieving Nanometer Resolution in X-Y-Z," IEEE Trans. Robotics, vol. 25, no. 1, pp. 109-116, May 2009.
3. S.-K. Kuo and C. H. Menq, "Modeling and Control of a Six-Axis Precision Motion Control Stage," to appear in IEEE/ASME Transaction on Mechatronics.
4. P.J. Caber, "Interferometric profiler for rough surfaces," Appl.Opt., vol.32, pp.3438-3441, 1993
5. T. Dresel, G. Haeusler, H. Venzke, "Three-dimensional sensing of rough surfaces by coherence radar," Appl.Opt., vol.31, pp.919-925, 1992.