

고정밀 3 차원 측정을 위한 다중 줄무늬 투영 방법에 관한 연구

장민호#

A Method for Projecting Multiple Stripe Patterns for High Precision 3D Measurement

Minho Chang#

ABSTRACT

This paper proposes a novel method of projecting a multiple stripe pattern whose intensity profile is sinusoidal. The sinusoidal stripe patterns are plated with chromium on a piece of glass, and the glass is placed within an optical projection system. By linearly moving the glass along the direction of the stripe pattern, the projection system generates the motion blurring effect, and as a result, produces a blurred stripe pattern whose intensity profile is sinusoidal along the perpendicular direction of the stripe pattern. The sinusoidal pattern improves the measurement accuracy of phase-shifting method. Experimental results are provided for three different types of stripe patterns: rectangle, diamond, and sinusoid.

Key Words : 3D measurement (3 차원 측정), optical triangulation (광삼각법), phase shifting (위상이동), motion blurring, Graycode, stereo vision

1. 서론

최근 광학식 3 차원 측정 장비의 정밀도와 해상도가 높아짐에 따라 그 응용 분야가 역설계(reverse engineering)뿐 아니라 품질 검사로 점차 확대되고 있다. 가장 널리 사용되는 광학식 측정 원리로는 빛의 간섭 현상을 이용한 광간섭법(interferometry)¹과 빛의 직진성을 이용한 광삼각법(optical triangulation)^{2,3,4,5,6,7}이 있는데, 반도체 부품과 같은 소형 물체의 측정에는 광간섭법을 이용한 측정 장비가 주로 활용되며, 자동차 부품과 같이 비교적 크기가 큰 물체의 측정에는 광삼각법을 이용한 측

정 장비가 주로 활용된다.

광삼각법에는 일상적인 조명 환경에서 카메라만을 이용하는 passive stereo vision 방식과, 카메라와 함께 별도의 광원을 이용하여 측정 대상물 표면에 빛을 이용한 무늬를 투영하는 active stereo vision 방식이 있다. Passive stereo vision 방식은 항공 측량과 같이 측정 영역이 넓기 때문에 별도의 조명 장치를 활용하기 어려운 분야에서 적합한 반면, active stereo vision 방식은 높은 정밀도와 해상도를 필요로 하는 제조 분야에서의 정밀 계측 용도에 적합하다. 본 논문에서는 active stereo vision 방식 중에서 정밀 제조 분야에서 폭넓게 활용되는 위상

접수일: 2006년 7월 3일; 게재승인일: 2006년 11월 23일

㈜솔루션릭스 기술연구소

E-mail minho@solutionix.com Tel. (02) 2193-9600

이동(phase-shifting)을 이용한 광삼각법⁷의 정밀도를 향상시키기 위한 새로운 줄무늬 투영 방법을 제안한다.

2. Active stereo vision 방식의 3 차원 측정

2.1 측정 방법

Active stereo vision 방식에서는 레이저를 사용하여 점 또는 선을 투영하거나, 영사 광학계를 사용하여 다양한 형태의 무늬를 측정 대상물 표면에 투영한 후 카메라로 획득한 영상 정보로부터 3 차원 좌표를 생성한다. 점 레이저를 이용한 측정 장비는 레이저 포인터로 측정 대상물 표면에 점을 투영하고 그 영상을 카메라로 획득하는데, 레이저 포인터에서 나오는 광선에 해당하는 직선을 L_1 이라 하고, 광선이 측정 대상물 표면에서 반사되어 카메라로 들어오는 광선에 해당하는 직선을 L_2 라 할 때, 공간상의 두 직선 L_1 과 L_2 의 교선을 구함으로써 측정 대상물 표면에 있는 점의 좌표를 얻는다.² 측정 대상물의 전체적인 형상을 측정하기 위해서는 레이저 점을 이동시키면서 측정을 반복하여야 한다.

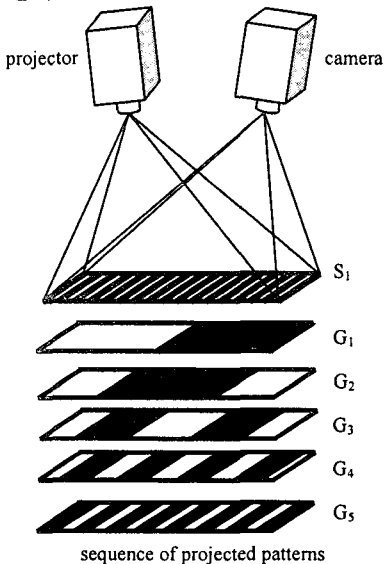


Fig. 1 3D scanner with Graycode pattern

슬릿 레이저(slit laser beam)를 이용하는 측정 방법은 실린더 렌즈(cylindrical lens)를 활용하여 점 레

이저를 선 레이저로 변환하여 측정 대상물 표면에 투영시킨 후, 측정 대상물 표면에 슬릿 레이저가 투영되어 만들어진 3 차원 곡선의 좌표를 측정한다. 슬릿 레이저를 이용하면 점 레이저를 이용할 때보다 한 번에 더 많은 좌표를 측정할 수 있지만, 슬릿 레이저를 이용한 방식도 측정 대상물의 전체적인 형상을 측정하기 위해서는 슬릿 레이저를 이동시키면서 측정을 반복하여야 한다.

Fig. 1 에서와 같이 영사 광학계를 이용하여 다수의 줄무늬가 있는 패턴 S_1 을 투영하면 한 번에 더 많은 측정 좌표를 얻을 수 있는데, 이때 줄무늬들을 서로 구별하기 위하여 G_1, G_2, G_3, G_4 와 같이 이진화된 Graycode 패턴을 연속적으로 투영한다. Graycode 패턴을 이용하면 작은 수의 패턴을 투영하여 많은 줄무늬를 투영한 효과를 얻을 수 있는데, N 개의 패턴을 투영하면 2^N 개의 곡선의 좌표를 측정할 수 있다.⁶

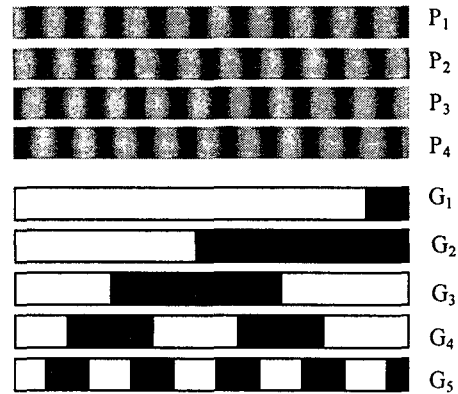


Fig. 2 Phase-shifting pattern and Graycode pattern

Fig. 2 에서와 같이 Fig.1 의 패턴 S_1 대신에 밝기가 가로 방향으로 정현파형의 분포를 갖는 줄무늬 패턴을 90° 씩 위상을 이동시킨 위상 이동(phase-shifting) 패턴 P_1, P_2, P_3, P_4 를 연속적으로 투영하면, 보다 높은 해상도의 측정 데이터를 얻을 수 있다. P_1, P_2, P_3, P_4 의 패턴이 투영되었을 때 카메라로 촬영한 이미지상의 임의의 픽셀에서 얻은 밝기 값(intensity)이 각각 I_1, I_2, I_3, I_4 라고 할 때, 그 픽셀의 위상각(phase angle)은 식(1)과 같은 4-bucket 알고리즘을 이용하여 구할 수 있다.^{1,7,8} 이 위상각을 이용하면, 카메라의 모든 픽셀에 대하여 3 차원 좌표를 얻을 수 있다.^{7,8}

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

2.2 사각 파형의 위상 오차

위상 이동 패턴을 투영에 사용되는 영사기로는 LCD 프로젝터, DLP 프로젝터, 회전다면경을 이용한 레이저 영사기, Fig. 3 과 같은 크롬으로 줄무늬 패턴이 증착된 유리를 사용하는 영사기 등이 활용된다.^{7,8,9} LCD 프로젝터와 DLP 프로젝터는 픽셀 단위로 밝기 값을 조절할 수 있기 때문에 손쉽게 정현파의 밝기 분포를 갖는 줄무늬 패턴을 투영하는데 유리한 장점이 있으나, 픽셀들 사이에 존재하는 틈에 의하여 검정색 격자 무늬가 발생하는 단점이 있다. 회전다면경을 사용하는 방법과 크롬으로 줄무늬가 증착된 유리를 사용하는 방법은 패턴의 밝기를 ON 과 OFF 의 두 가지 상태로만 제어할 수 있기 때문에 줄무늬의 밝기를 임의로 분포로 조절하기 어려운 단점이 있다.

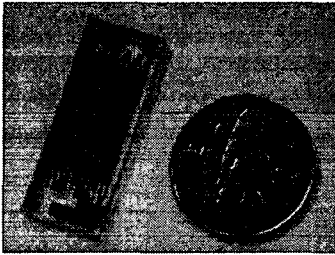


Fig. 3 Glass with chrome plated stripe pattern

밝기 분포가 정현파가 아닌 줄무늬를 투영하고, 식 (1)을 이용하여 위상각을 계산하는 경우 발생하는 오차의 양을 다음과 같은 실험을 통하여 확인하였다. 크롬 증착 유리를 이용하여 Fig. 4(a)와 같이 ON 과 OFF 의 경계가 뚜렷한 패턴을 90° 씩 위상을 이동하면서 백색 평면에 투영하고 카메라를 이용하여 영상을 획득하면, Fig. 4(b)와 같이 줄무늬에 수직인 방향으로의 밝기 분포가 사다리꼴로 나타난다. 프로젝터와 카메라에 사용되는 렌즈 분해능의 한계, 빛의 회절 현상 등의 도움으로 줄무늬의 경계 부분이 불분명해져서 사각형의 모서리가 완만해지는 사다리꼴의 밝기 분포를 얻을 수 있지만, 정현파의 밝기 분포와는 차이가 크다. 줄무늬의 밝기 분포가 사다리꼴일 때, 줄무늬에 수직인 방향으로 이동하면서 식(1)을 이용하여 각 픽셀에

대한 위상각을 계산하면, Fig. 4(c)와 같이 위상각이 선형적으로 증가하지 않고 물결 무늬가 나타난다. 이 그래프에서 주기 별 불연속점을 제거 (unwrapping)한 후 선형 성분을 제거하면, Fig. 4(d)와 같이 규칙적인 오차의 분포를 보이며, 실험에서 얻은 위상각의 오차의 표준 편차는 0.112 rad 이었다.

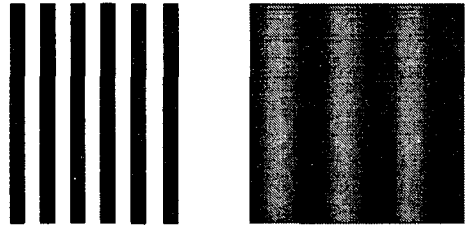


Fig. 4(a) Rectangular pattern and its projected image

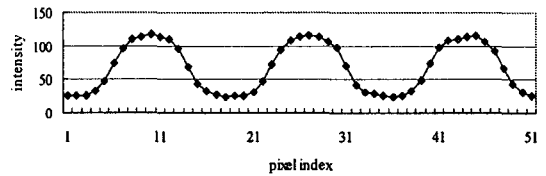


Fig. 4(b) Intensity profile of rectangular patterns

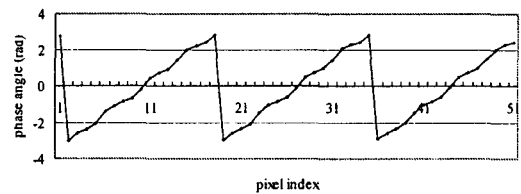


Fig. 4(c) Phase angle of rectangular patterns

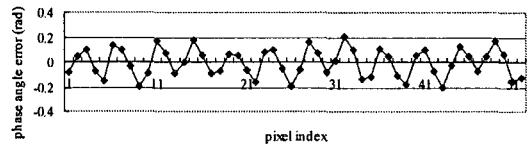


Fig. 4(d) Phase angle error of rectangular patterns

3. Motion blurring 현상을 이용한 줄무늬 투영

사각파형의 줄무늬의 패턴을 사용하는 경우에도 광학계의 분해능을 인위적으로 낮춤으로써 손쉽게 정현파에 가까운 밝기 분포를 갖는 패턴을 투영할 수 있다. 하지만 이러한 방법은 하나의 광

학계에서 위상 이동 패턴과 함께 Graycode 패턴을 투영하여야 하거나 서로 다른 주기를 갖는 위상 이동 패턴을 투영하여야 하는 경우, 투영하는 패턴에 따라 광학계의 분해능을 조절하는 별도의 장치를 필요로 한다. 따라서, 본 논문에서는 광학계의 분해능을 조절하지 않고 정현파의 줄무늬를 투영하는 방식을 제안하고자 한다.

3.1 줄무늬 투영 장치의 구성

본 논문에서 제안하는 줄무늬 투영 장치는 Fig. 5 와 같이 렌즈와 광원 사이에 위상 이동 패턴과 Graycode 패턴을 크롬으로 증착한 유리를 위치시키고, 이 패턴 유리를 줄무늬 방향으로 이동시키면서 패턴을 투영한다. 이때, 카메라의 노출 시간을 길게 설정하고 영상을 획득하면 motion blurring 현상에 의하여 줄무늬에 번짐 현상이 발생되는데, 줄무늬의 모양을 변화시키면 줄무늬와 수직한 방향으로 패턴의 밝기 분포를 자유롭게 조절할 수 있다.

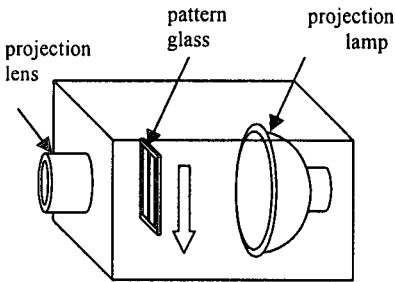


Fig. 5 A device that projects stripe patterns

예를 들어, 패턴 유리에 있는 하나의 줄무늬가 Fig. 6 과 같이 불룩한 단위 형상이 반복되는 경우, 줄무늬를 화살표 방향으로 이동시키면서 영상을 획득하면 motion blurring 현상에 의하여 줄무늬의 중앙 부분은 어둡고 좌우로 점차 밝아지는 밝기 분포를 보인다. 이때, 카메라의 노출 시간 동안 충분히 많은 단위 형상이 지나가고, CCD 카메라의 영상 소자의 밝기 값이 빛에 노출된 시간에 비례하고, CCD 카메라의 영상 소자의 크기가 매우 작다

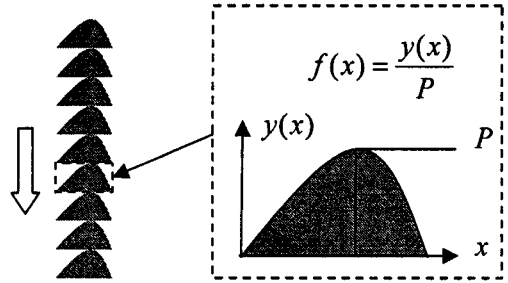


Fig.6 Shape of a single stripe

고 가정하면, 임의의 위치 x 에서의 밝기는 식 2 와 같은 비례식으로 표현할 수 있다. 식(2)에서 I_{ON} 은 투명한 패턴이 투영되었을 때의 밝기, I_{OFF} 는 검은 패턴이 투영되었을 때의 밝기, $f(x)$ 는 패턴의 검정 부분이 차지하는 비율이다.

$$I(x) = (1 - f(x))I_{ON} + f(x)I_{OFF} \quad (2)$$

3.2 다이아몬드 모양의 줄무늬의 투영

Fig. 7(a)의 왼쪽 그림과 같은 다이아몬드 모양의 패턴을 위 아래 이동하면서 영상을 획득하면 motion blurring 현상에 의하여 7(a)의 오른쪽 그림과 같이 밝은 부분과 어두운 부분의 경계가 흐릿한 영상이 얻어진다. 다이아몬드 모양의 패턴을 90° 씩 위상을 이동시키면서 2.2 절과 동일한 환경에서 실험을 반복하여 위상각의 오차를 계산하면 Fig. 7(c)와 같고, 이때의 오차의 표준 편차는 0.039 rad 이었다. 이 실험으로 다이아몬드 모양이 줄무늬를 투영하면 사각형의 줄무늬를 투영하는 경우에 비하여 위상 오차의 양이 약 65 % 감소함을 확인하였다.

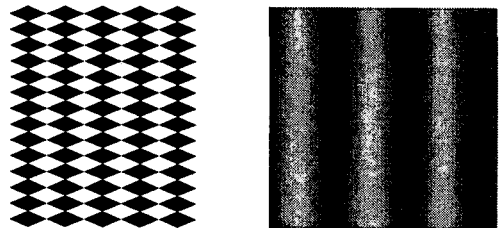


Fig. 7(a) Diamond pattern and its projected image

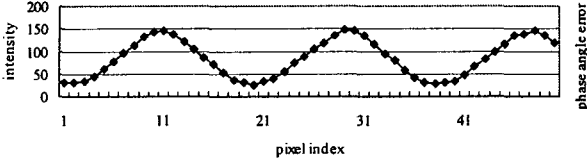


Fig. 7(b) Intensity profile of diamond patterns

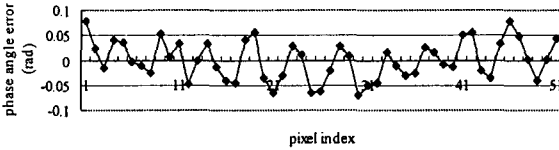


Fig. 7(c) Phase angle error of diamond patterns

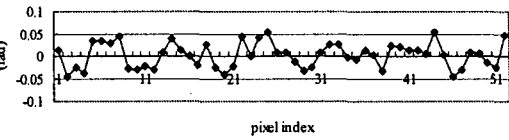


Fig. 8(c) Phase angle error of sinusoidal patterns

3.3 정현파형의 줄무늬의 투영

Fig. 8(a)에서와 같이 줄무늬에 수직한 방향으로 정현파의 밝기 분포를 갖는 줄무늬를 사용해서 3.2 절과 동일한 실험을 반복하여, Fig. 8(c)와 같은 위상각의 오차 분포를 얻었다. 이때, 위상각 오차의 표준 편차는 0.028 rad 으로 사각파형의 패턴에 비하여는 약 74 %, 다이아몬드 패턴에 비하여는 약 26% 감소하였다.

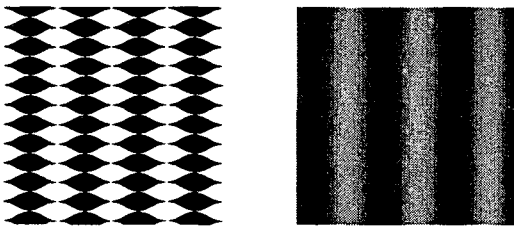


Fig. 8(a) Sinusoidal pattern and its projected image

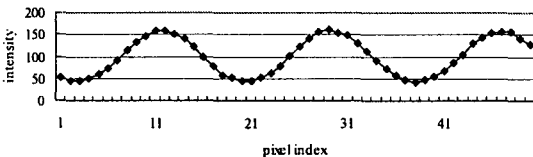


Fig. 8(b) Intensity profile of sinusoidal patterns

위상각의 오차는 측정 데이터에서 물결 무늬를 발생시키며, 위상각의 오차를 줄임으로써 측정 데이터에 나타나는 물결무늬를 줄일 수 있다. Fig. 9는 사각파형의 줄무늬를 이용하여 측정한 3 차원 데이터와 정현파의 줄무늬를 이용하여 측정한 3 차원 데이터를 비교한 그림이다. Motion blurring 현상을 이용하여 정현파의 밝기 분포를 갖는 줄무늬를 투영할 경우, 사각파형의 줄무늬를 투영할 때와 비교하여 위상 오차가 감소하였고, 결과적으로 측정 데이터에서 위상 오차로 인한 물결 무늬가 감소함을 확인하였다.

4. 결론

본 논문에서는 motion blurring 현상을 이용하여 밝기 분포가 정현파인 줄무늬 패턴을 투영하는 방법을 제안하였다. 프로젝션 광학계를 사용해서 사각 모양, 다이아몬드 모양, 정현파 모양의 패턴을 각각 줄무늬 방향으로 이동시키며 투영시킴으로써 motion blur 현상을 발생시키고, 각각의 경우에 위상값의 변화를 비교하였다. 실험 결과에서 정현파의 파형을 투영하였을 때 위상각의 오차가 가장 적게 발생하였고, 측정 데이터에 위상 오차로 인한 물결 무늬가 감소하는 효과를 보았다. 본 논문에서 제안하는 줄무늬 투영 방법은 줄무늬의 모양을 변화시킴으로써 밝기 분포를 변화시킬 수 있음을 실험을 통하여 확인하였고, 이러한 특성을 활용하면 줄무늬의 주기, 영사 광학계의 특성, 또는 카메라의 특성이 바뀌어도 적절한 줄무늬의 모양을 설계함으로써 정현파의 밝기 분포를 갖는 줄무늬를 투영할 수 있는 장점이 있다.

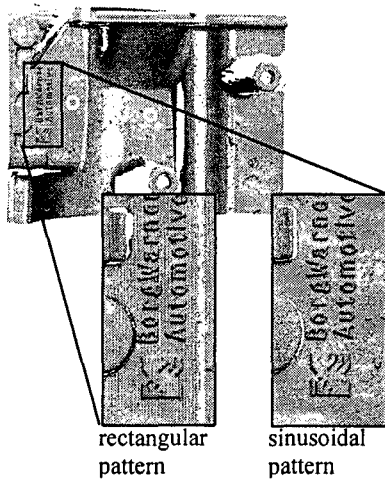


Fig. 9 Comparison of 3D measurement data with rectangular pattern and sinusoidal pattern

후 기

본 연구는 산업자원부 중기거점기술개발사업 중 하나인 “full 3D 자동 측정 기술 개발”과제로 수행 되었다.

참고문헌

1. Gasvik, K., “Optical Metrology,” John Wiley & Sons, pp. 254 – 263, 1995.
2. Trucco, E. and Verri, A., “Introductory Techniques for 3-D Computer Vision,” Prentice Hall, pp. 139 - 175, 1998.
3. Ma, Y., Soatto, S., Kosecka, J. and Sastry, S., “An Invitation to 3-D Vision,” Springer, pp. 110 - 116, 2004.
4. Curless, B. and Levoy, M., “Better Optical Triangulation through Spacetime Analysis,” IEEE International Conference on Computer Vision, pp. 987 – 994, 1995.
5. Guring, J., Brenner, C., Bohm, J. and Fritsch, D., “Data processing and calibration of a cross-pattern stripe projector,” IAPRS, Vol. 33, 2000.
6. Valkenburg, R. and Melvor, A., “Accurate 3D Measurement using a Structured Light System,” Image and Vision System, Vol. 16, No 2, pp. 99 - 110,

- 1998.
7. Wiora, G., “High Resolution Measurement of Phase-Shift Amplitude and Numeric Object Phase Calculation,” In Proceeding of Vision Geometry IX, Vol. 4117, pp. 289-299, 2000.
8. Sansoni, G., Biancardi, L., Minoni, U. and Docchio, F., “A Novel, Adaptive System for 3-D Optical Profilometry Using a Liquid Crystal Light Projector,” IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, Vol. 43, No. 4, pp. 558 – 566, 1994.
9. Park, Y., Jeong, K., Jang, S. and Park, K., “A Study on the Grating Projection Method using Polygon Mirror,” Journal of the Korean Society of Precision Engineering, Vol. 18, No. 6, pp. 159 – 165, 2001.