

◆특집◆ 광학식 3차원 형상측정기술

무아레현상을 응용한 형상측정법

유원재*, 강영준**

Shape Measurement Method by using Moiré Phenomenon

Weon-Jae Ryu*, Young-June Kang**

Key Words : Interference fringe(간섭무늬), Moiré fringe(무아레 무늬), Phase shifting(위상이동), Shadow moiré(그림자무아레), Projection moiré(영사식 무아레)

1. 무아레 현상

“무아레(Moiré)”란 단어는 프랑스인들이 고대 중국에서 수입된 비단 위에 나타나는 물결무늬를 일컬었던 말로, 요즘에는 두 개 이상의 주기적인 물결무늬를 일컬었던 말로, 요즘에는 두 개 이상의 주기적인 패턴(periodic pattern)이 겹쳐져 생기는 간섭무늬(interference fringe)를 지칭하는 단어로 사용된다. 무아레 무늬가 발생하는 원인을 살펴보면, 우선 맥놀이(beating) 현상에 대한 이해가 필요하다. 맥놀이 현상이란 주파수가 비슷한 두 개의 파동이 서로에게 영향을 미쳐 두 주파수의 차이에 따라 주파수 폭이 일정한 주기로 변하는 현상을 말한다. 범종을 쳤을 때 뒤로 갈수록 종소리가 커졌다 작아졌다 하면서 그 여운을 남기는 것을 그 예로 들 수 있다. 타종되는 종의 부위와 두께가 정확하게 일치하지 않기 때문에 종을 쳤을 때 유사한 두 개 이상의 음이 발생하게 된다. 서로 비슷한 주파수를 가진 소리들은 상대방 주파수에 상쇄와 보강을 일으켜 일정한 주기를 형성하게 된다.

바로 이 주기에 따라 종소리가 커졌다 작아지는 것처럼 들리게 되고, 두 주파수가 일치하게 되면 이러한 현상은 사라지게 된다.

무아레 현상은 맥놀이 현상이 시각적으로 발생하는 것으로, 일정한 간격을 갖는 물체 사이에 발생하는 간섭무늬를 말한다. 예를 들어 햇빛이 비치는 날 모기장이나 커튼이 겹쳐져 있으면 물결무늬가 생기는 것을 볼 수 있다거나, 줄무늬 옷을 입고 촬영한 사진 등에 나타나는 무늬에서 확인할 수 있다.

아래의 Fig. 1 에서는 그물이 겹쳐진 상태에서 굵은 물결 무늬가 생기는 것을 확인할 수 있다.

이 무아레 무늬는 디지털 카메라 촬영 때, 또는 모니터 업계 및 인쇄업계에서는 피해야 할 현상으로 여겨지고 있지만, 1874 년 Lord Rayleigh

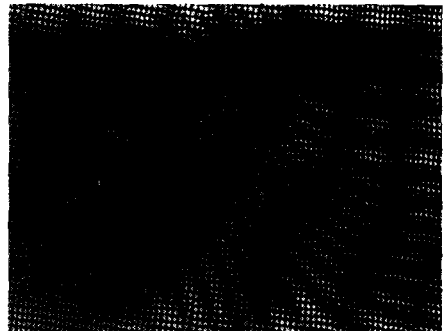


Fig. 1 Moiré pattern on nets

* (재)전주기계산업리서치센터

Tel. 063-213-2335, Fax. 063-213-2337

Email maverick@jmrc.re.kr

** 전북대학교 기계항공시스템공학부, 원사력기초공동연구소

Tel. 063-270-2453, Fax. 063-270-2460

Email yjkang@chonbuk.ac.kr

광계측을 전공하였으며 ESPI, 무아레등을 이용하여 레이저 및 광학기술의 산업적 응용에 관심을 두고 있다.

에 의해 무아레 현상을 과학적 도구로 사용하는 제안이 실현된 이래, 무아레 현상을 이용한 미세한 물체의 움직임 관찰이나 의료용 사진 촬영 등에 사용되는 등 다양한 분야에서 활용되고 있다.

2. 무아레 현상 응용의 역사적 연구배경¹

1874년에 Lord Rayleigh가 무아레 현상이 임의의 형상(Diffusive object)을 가진 물체의 미세한 움직임의 측정에 유용한 수단으로 사용할 수 있음을 제안했고,¹ 그 뒤 많은 사람들에 의해서 연구가 수행 되어 왔다. 1887년 Right¹ 등에 의해서 격자의 형태에 대한 연구가 이루어 졌으며, 원형모양의 격자에 의해서 원운동의 해석에도 무아레 현상이 이용될 수 있음이 밝혀졌다. 그러나 그 이후 측정 분야에서 오랜 기간 동안 무아레 무늬 현상이 가지는 여러 가지 장점과 우수성에도 불구하고 별로 관심을 끌지 못했다. 그런 후 무아레 현상에 대한 연구는 1920 년대에 이르러 Ronchi, Raman, Datta 등에 의해서 이론적으로 정립이 되었다. 1940 년대에 이르러 드디어 무아레 현상은 물체의 평면변위(In-plane displacement)를 측정하는데 이용되면서부터 본격적으로 기계공학분야에서의 스트레인(Strain)해석에 응용되어 그 적용범위를 공학전반으로 넓혀 갔다. 1956 년 Guild 등에 의해서 무아레는 격자해석(Grating analysis)의 훌륭한 도구로써 스트레인 해석에 있어서 강력한 방법으로써 정립이 되었다. 이렇듯 평면 변위의 측정에만 사용되던 무아레 현상은 Theocaris² 등에 의해서 임의의 형상을 가지는 물체(Diffusive object)의 3 차원 변위 측정에 적용될 수 있음이 제안 되었다. 이를 이어 1970 년에 Meadows 와 Takasaki 등^{3,4,5}에 의해서 의학적인 목적으로 사람 몸의 3 차원형상측정에 응용되고 난 후 무아레에 관한 연구는 일대 전기를 맞이하게 된다. 2 차원적인 미소 변위의 측정에서부터 큰 물체의 3 차원형상측정에 이르기까지 그 응용범위는 계속 확대되어 갔다. 그 이후 Nishijima 등에 의해서 무아레는 렌즈와 같이 투명하면서 굴절률을 가지는 위상물체(Phase object)의 성질 연구에까지 그 응용범위를 넓혔다. 무아레 현상을 이용한 측정은 그 적용대상에 따라 크게 두 가지로 분류할 수 있다. 평면 변위 측정을 위한 평면 무아레(In-plane moire)와 물체의 3 차원 변위(Out-of-plane

displacement)측정을 위한 입체 무아레(Out-of-plane moire)가 그것이다.

3. 무아레 현상을 이용한 3 차원 형상측정

3.1 필요성

현대에는 제품에 대한 소비자의 요구가 다양해지고 다품종 소량생산이 날로 증가하고 생산된 제품의 수명(Life cycle)도 점점 짧아져서 제품개발에 필요한 기간이 짧아지고 있는 실정이다. 생산 현장에서 생산되는 제품의 불량률 감소 및 소비자들의 욕구충족을 위한 제품검사, 제품의 고정밀화, 소형화로 인한 요소부품의 3 차원 초정밀검사, 소비자들의 다양한 요구에 빠르게 대응하기 위한 쾌속시작품제작(Rapid prototyping)에서의 3 차원형상 측정기술, 전체 생산공정에 있어서 마지막 생산품의 품질검사를 통한 전체 생산라인의 여러 요인들을 제어하는 통합생산시스템(CIM)구축 등에서 핵심기술인 3 차원 형상측정에 대한 수요는 갈수록 증가하고 있는 추세이다. 이런 측정자동화의 기술은 가공물의 최종적인 합격여부를 판정하기 위한 목적으로 쓰이고 있을 뿐만 아니라 공정 중(In-process) 검사를 가능케 하여 제품의 품질 향상과 원가 절감에 직접적인 영향을 미치게 된다. 이와 더불어 이런 3 차원 형상측정기술이 공학분야에만 국한되지 않고 의학, 영화산업, 오락(Entertainment) 산업, 의복산업 등 한층 더 우리 생활과 밀접한 관계를 갖는 분야로 그 응용범위를 확장하고 있는 실정이다.

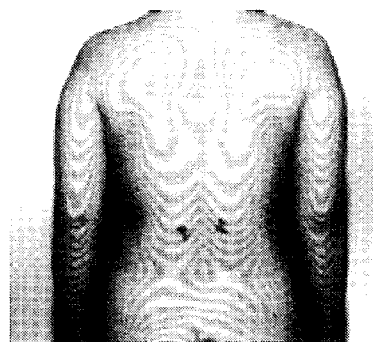


Fig. 2 The moiré fringe of human

그 좋은 예로 먼저 의학분야에서 인체의 3차

원 형상측정을 통해서 몸의 이상유무를 검사하기도 하고, 뼈에 손상을 입은 큰 사고에서 뼈 모양의 완벽한 복원을 위해서도 3 차원 형상측정기술은 유효하게 사용되고, 영화산업에서도 사람이 직접 하기에 불가능하거나 많은 위험이 따르는 고난도의 연기에는 과거에 스텐트맨의 이용한 연기대신 배우의 몸을 3차원 형상측정을 통해 그 모습을 측정하고 이를 기초로 하여 모델을 생성한 다음 컴퓨터 그래픽 상에서 처리를 함으로써 많은 문제점들을 해결하고 있다. 또한 오락이나 캐릭터산업에서 보다 인간의 모습에 가깝고 자연스러운 동작이나 모습을 위해서 3차원 형상측정기술을 유효하게 사용하고 있다. 최근 들어서는 의복산업이나 신발산업에까지 그 범위를 확대해서 소비자의 체형을 3차원형상을 측정하고 소비자에게 가장 적합한 옷이나 신발을 추천하는 등 그 응용범위가 증가하고 있다.

특히 3차원 형상측정기술의 발전방향은 고정밀화, 고속화 그리고 비 접촉화이다. 이러한 3차원 형상측정기술은 과거에는 접촉식 3차원 좌표측정기(CMM : Coordinate Measuring Machine)에 전적으로 의존하다 광전자 복합기술의 현격한 발달로 인해 물리학에서의 광학이론이 실제 측정시스템에 손쉽게 구현되어지면서 급속하게 발전하게 되었다. 특히 비전을 이용한 비접촉 3차원 형상 측정법 사용에 있어서의 편리성과 측정대상에 손상을 입히지 않는 등 많은 장점들로 인하여 활발히 연구가 수행되어 왔다.

광을 이용하는 비접촉식으로 물체의 표면을 측정하는 기존의 방법들은 광 삼각법(Optical Triangulation), 광 측침법(Optical Profilometry), 공 초점 현미경(Con-focal Microscopy), 파동광학을 이용한 홀로그래피 간섭법(Holographic Interferometry), 스테레오 비전(Stereo Vision), 무아레 토포그래피(Moiré Topography)등 다양한 분야에서 많은 연구가 진행되어 왔다.

그 중 특히 무아레 방법은 측정영역대비 높은 측정 분해능을 가질 수 있는 장점을 가지고 있어 많은 사람들의 관심을 끌었다. 하지만 실제 구현을 함에 있어서 수평방향으로의 낮은 측정 분해능, 간섭무늬 해석의 어려움 등이 뒤따르고 있었다. 이에 다음 절에서는 이런 무아레 방법이 최근에는 어떻게 사용되고 있는지 소개한다.

3.2 그림자식 무아레(Shadow moiré)

Fig. 3 은 그림자식 무아레의 간단한 예를 보여 주고 있다. 측정대상물 바로 앞에 규칙적인 줄무늬격자를 두고 한 쪽에서 빛을 비추면 격자의 그림자가 측정물 표면에 생기게 된다. 이 그림자는 측정물의 형상에 따라서 형성된다.

이때, 다른 한 쪽에서 측정물을 바라보면, 변형되지 않은 줄무늬 격자와 이 격자의 그림자가 겹쳐져서, 물결모양의 등고선 무늬가 보이게 되며, 이 무늬를 분석하여 높이 값을 얻게 된다.⁶

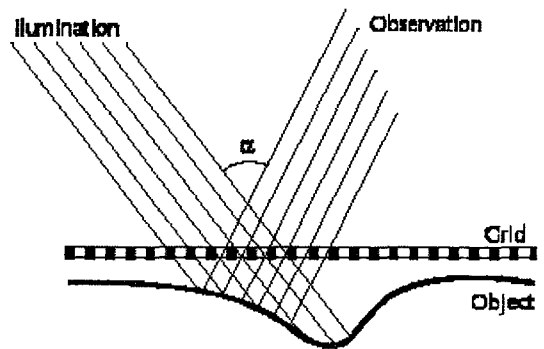


Fig. 3 Scheme of the shadow moiré



Fig. 4 Moiré fringe by shadow moiré

Fig. 4 는 격자 바로 뒤쪽에 마네킹을 설치하여 얻어진 무늬를 보여주고 있는데, 형성된 무아레 무늬는 산악지도에서와 같은 등고선 형태로 나타나고 있음을 볼 수 있다.

이러한 무아레 무늬에서 형상정보를 추출하기

위해서는 이 간섭무늬를 해석해야만 한다.

초기에 무아레 무늬 해석 방법으로는 단순히 간섭무늬를 추종하는 프린지 추적(Fringe contouring)기법이 사용되었다. 하지만 이 간섭무늬 추적 방법은 낮은 측정분해능 및 낮은 정밀도로 인해서 점차 사용빈도가 줄어들게 되었고, 이 방법이 가지는 단점들을 보완하기 위해서 무아레 무늬 해석에 관한 많은 연구가 수행되었다. 많은 연구 중에 푸리에변환을 이용한 프린지 해석 기법은 격자의 주파수성분과 무아레 무늬의 주파수성분을 각각 분리하고 상대적으로 높은 주파수를 가지는 격자에 의한 주파수성분을 제거함으로써 역 푸리에 변환을 통하여 무아레 무늬의 콘트라스트를 향상시키는 동시에 프린지의 위치를 정확히 알아내는 방법으로 널리 연구되었다. 그러나 무아레 무늬 해석에 있어서 가장 괄목할만한 발전은 위상 이동방법(Phase shifting method)의⁷ 무아레 무늬 해석에 적용이라고 말할 수 있다. 무아레 무늬의 광축 방향으로의 광각도 분포가 가간섭성이 높은 두 광파의 간섭에 의한 광각도 분포와 같다는 가정에서 출발하는 위상 이동 무아레 간섭법(Phase shifting moire interferometry)이라고 지칭되는 이 알고리즘을 사용하면 기존의 프린지 추적에 비해서 수십 내지는 수백배의 측정분해능 및 정밀도 향상을 가져올 수 있다. 최근의 3차원형상측정 분야에 있어서 위상이동 무아레는 많은 주목을 받고 활발한 연구가 진행되고 있다

Fig. 5 는 이러한 위상이동 그림자 무아레방법을 이용하여 동전표면을 측정한 결과이다.



Fig. 5 Measurement result by shadow moiré

3.3 영사식 무아레(Projection moiré)

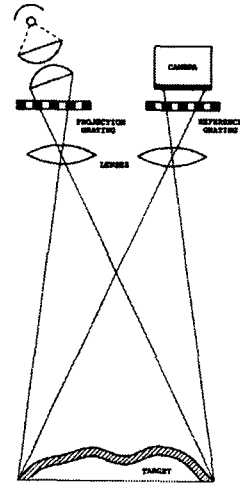


Fig. 6 Scheme of the projection moiré

Fig. 6 은 영사식 무아레 구현을 위한 가장 보편적인 광학계의 구성을 나타낸다. 영사기를 이용하여 측정하고자 하는 물체면에 격자를 투영시킨다. 그리고 측정물체에 투영된 변형격자의 영상을 결상렌즈를 이용하여 기준격자위에 결상시켜 두 격자가 겹쳐져서 발생하는 무아레 무늬를 카메라로 획득하게 된다. Fig. 7 에 영사식 무아레방법에 의한 획득된 영상이 나타나 있다.

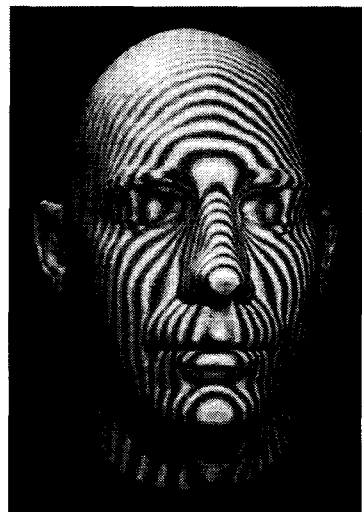


Fig. 7 Moiré fringe by projection moiré

이러한 영사식 무아레 방법도 위상이동 방법을 적용하여 전통적인 영사식 방법에 비해 훨씬 좋은 측정결과를 얻을 수 있다.⁸ 그러나 조명광 앞에 다중 직선 줄무늬가 새겨진 물리적인 투영격자를 설치하고 이를 일정량씩 이송시켜 각각의 영상들을 이용하여 측정물체의 형상정보를 추출하기 때문에 격자이송 장치가 필요하고, 또한 CCD 카메라 앞에 투영격자와 동일한 기준격자를 설치하여 무아레 무늬를 얻으므로 기준격자를 제거해야 하는 번거로움이 있다. 따라서 최근에는 LCD 및 DLP 프로젝터와 PC 를 이용하여 기준격자를 PC 내에서 생성하여 영사하는 방법을 많이 채택하고 있다. Fig. 8 에 이러한 시스템 개략도가 나타나 있다.⁹

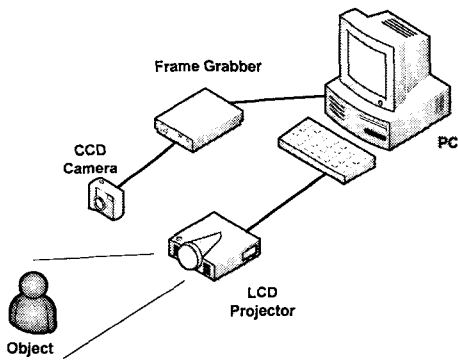
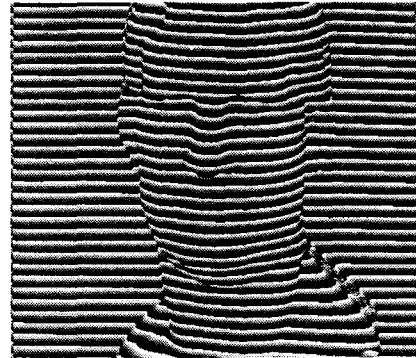


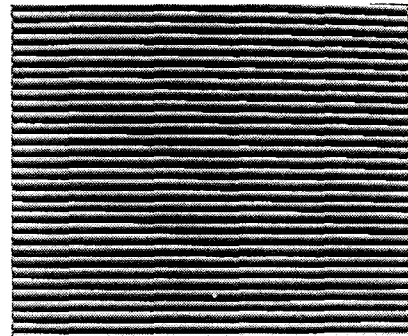
Fig. 8 Scheme of the projection moiré by using LCD Projector

투영계와 결상계 광축이 평행하고 카메라와 조명광 앞에 물리적인 격자를 사용하지 않고 컴퓨터를 사용하여 가상의 기준격자를 만들어 프로젝터를 사용하여 측정 물체에 투영하고 물체의 형상에 따라 변형격자를 획득하는 영사식 모아레방법은 물체의 등고선에 해당하는 무아레 무늬를 얻을 수 있고, 격자이송 장치가 필요없기 때문에 시스템이 간단한 장점이 있다.

측정 알고리즘 면에서도 개선의 움직임이 활발한데, 무아레 무늬를 획득한 후 위상이동을 할 경우 기준격자의 제거로 인한 영상의 질 저하를 가져오지만, 기준격자와 변형격자의 위상도를 각각 구한 후에 무아레 무늬를 획득하게 되면 보다는 나은 결과를 얻을 수 있다.¹⁰ Fig. 9에 이런 과정으로 획득된 각 격자의 위상도가 나타나 있다.



(a) Transformation grating phase map



(b) Reference grating phase map



(c) Moiré fringe phase map

Fig. 9 The phase maps of Agrippa statue

Fig. 10 에 형상측정결과를 나타내었고, Fig. 11 에 인체의 두상을 측정된 결과를 보이고 있다.



Fig. 10 Measurement result of Agrippa statue by projection moiré

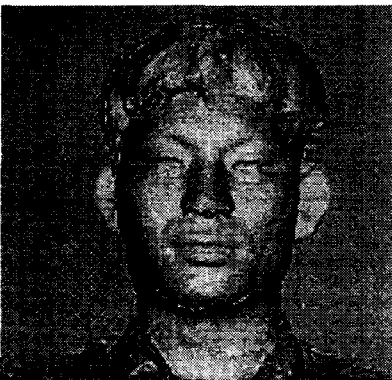


Fig. 11 Measurement result of human head by projection moiré

4. 결 론

본 글에서는 무아레 현상을 이용한 3 차원 형상측정에 관한 방법과 실제 측정한 결과에 대해 간략히 설명해보았다. 무아레 현상을 이용한 측정 기술 분야는 계속적으로 신 기법이 등장하고 있는 상황이며, 그에 따라 응용분야도 급속히 확대되고 있기 때문에 향후에도 관련 기술에 종사하고 있는 연구자들이 계속 주목하리라 예상된다

참고문헌

1. Park, Y. C., "The Principle and Applications of Moiré Phenomenon," KSPE, Vol. 17, No. 6, pp.25-31, 2000.
2. Theocaris, P. S., "Moiré Fringes in Strain Analysis," Pergamon Press, New York, 1969.
3. Takasaki, H., "Moiré Topography," Applied Optics, Vol. 9, No. 6, pp.1467-1472, 1970.
4. Meadows, D. M., Johnson, W. O. and Allen, J. B., "Generation of surface contours by moiré patterns." Applied Optics, Vol. 9, No. 942, 1970.
5. Meadows, D. M., Allen, J. B., "Removal of Unwanted Patterns from moiré Contour Maps by Grid Translation Techniques." Applied Optics, Vol. 10, No.1, pp. 210-212, 1971.
6. Kang, Y. J., Ryu, W. J. and Kwon, Y. K., "A Study on the Improvement of Accuracy of Surface Measurement in the Phase-Shifting Shadow Moiré Method," J. of the KSPE, Vol. 15, No. 10, pp. 96-102, 1998.
7. Creath, K., "Phase-measurement interferometry : BEWARE these errors," SPIE, Vol. 1553, pp. 213-220, 1991
8. Kim, S. W., Oh, J. T., Jung, M. S., Choi, Y. B., "Two-wavelength Phase-shifting Projection Moiré Topography for Measurement of Three-dimensional Profiles with High Step Discontinuities," KSME, Vol. 23, No. 7, pp. 1129-1138, 1999.
9. Ryu, W. J., Choi, J. P., An, J. K. and Kang, Y. J., "A Study on the Virtual Grating Projection Moiré Topography for the Shape Measurement of Human Face," Proc. of KSPE, pp. 49-52, MAY 2001.
10. Park, Y. C., Jung, K. M., Park, G. G., "A Study on the Phase Measuring Profilometry with Parallel-optical-axes," KSPE, Vol. 17, No. 6, pp. 210-217, 2000.