

Digital Moire 를 이용한 임의의 영사면에 대한 투영보정에 관한 연구

유원재*(전북대 원), 김도훈(전북대 원), 강영준(전북대 기계항공시스템공학부),
백성훈(한국원자력연구소)

A Study on Projective Calibration for Arbitrary Display Surface using Digital Moire Method.

W. J. Ryu(Graduate school of Chonbuk Nat'l Univ.), D. H. Kim(Graduate school of Chonbuk Nat'l Univ.),
Y. J. Kang(Chonbuk Nat'l Univ.), S. H. Baik(KAERI)

ABSTRACT

Moire topography method is a well-known non-contacting 3-D measurement method. the automatic 3-D measurement by moire topography has been required since the method was frequently applied to the engineering and medical fields. 3-D measurement using digital projection moire topography is very attractive because of its high measuring speed and high sensitivity.

In this study, digital two-wavelength phase shifting moire is applied to the entertainment fields. recently, as promoting the growth of the VR-Game, display devices which attract public attention such as HMD or Projector are being appeared in order to deliver effectively the absorption sense. this study realized the Auto-calibrating system for arbitrary display surface using digital moiré method which satisfied the shape measurement of display surface and the request of FOV(Field of View) output. also when large screen wasn't prepared, this auto-calibrating system was applied to enjoy games or movies at home with a projector and walls

Key Words : Non-contacting 3-D Measurement Method(비접촉 3 차원 측정법), Projection Moire Topography(영사식 무아래 측정법), Virtual Grating(가상격자), Two-wavelength Method(2 중 파장법), Phase Shift(위상이동)

1. 서 론

3 차원 형상측정기술(3-D Profile Measurement Method)은 가공품의 치수검사 및 형상측정 등의 공학분야뿐만 아니라 최근에는 의류산업 및 의학산업은 물론 오락산업의 가상현실 구현 등 여러 분야로 점차 사용이 확대되고 있다. 이러한 요구를 만족시킬 수 있는 광학을 바탕으로 한 비접촉 3 차원 형상측정방법(Non-contacting 3-D Profile Measuring Method)으로 영사식 무아래 형상 측정 방법이 있다. 또한 3 차원 형상정보를 포함하는 무아래 무늬 해석 방법으로 광 간섭무늬 해석에 사용되는 위상 이동법[1][2]을 사용함으로써, 측정 분해능이 향상되어 무아래 무늬 형태에 영향을 받지않고 측정이 가능하게 되었다. 이러한

Digital Moire 를 3 차원 형상측정에만 국한하지 않고, 적용분야를 넓혀 오락이나 영화산업에 적용하였다. 최근들어 VR 게임의 성장이 가속화 됨에 따라 몰입감 효과적으로 전달하고자 HMD 나 프로젝터와 같은 디스플레이 장치가 등장하고 있다. 이러한 디스플레이 장치를 이용하여 영사면의 형상을 측정하고, 광역의 FOV(Field of View) 출력의 요구에 부응하기 위해서 전통적인 무아래 방법을 탈피하여 Digital Moire 방법을 응용하여 임의의 형태의 영사면에 대한 프로젝션 시스템을 구현하여 스크린 형태에 관계없이 자동으로 캘리브레이션이 가능한 시스템을 구현하였다. 또한 이러한 프로젝션 시스템은 대형 스크린이 준비되어 있지 않은 일반 가정에서 프로젝터와 임의의 형태의 벽면을 이용하여 비교적 큰 화면에서 오락이나 영화를 즐길 수 있도록 응용하였다.

2. 이론

2.1 형상측정

Fig. 1 Digital Moire 의 광학계의 구성을 나타낸다.

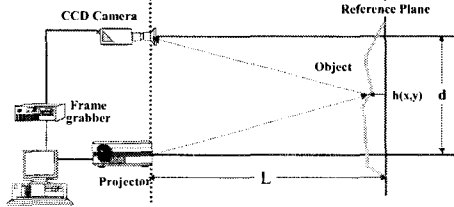


Fig. 1 Optical Geometry of Digital Moire

측정하고자 하는 물체 위에 가상격자를 투영시켜 물체의 형상에 따라 형성되는 변형 격자와 기준 격자의 이미지를 획득하여, 화상처리를 통하여 무아래 무늬를 만든다. 이런 무아래 무늬의 광강도는 다음과 같다

$$I_p(x, y) = I_0(x, y) \{1 + \gamma(x, y) \cos[\phi(x, y) + \Delta]\} \quad (1)$$

여기서, $I_p(x, y)$: 측정점의 광강도, $I_0(x, y)$: 평균 광강도, $\gamma(x, y)$: 간섭무늬 가시도, Δ : 위상 이동량, $\phi(x, y)$: 측정하고자 하는 위상 식(1)에서 광강도를 4 Frame 위상이동을 하여 얻은 위상은 다음과 같다.

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

여기서, 식(2)에 의해 구해지는 초기 위상값은 \tan^{-1} 의 연산의 특징으로 인하여 $-\pi \sim +\pi$ 사이의 위상값만을 가진다. 이는 2π 모호성(2π -ambiguity)이라 문제점을 발생한다. 위상이동법의 2π 모호성의 문제는 무아래 무늬의 차수(Order)를 추출하지 못하기 때문에 일어나는 문제이다. 이에 2중파장(Two-Wavelength)의 원리를 사용하면 무아래 무늬의 차수 추출이 가능해져 위상이동법의 2π 모호성의 문제를 해결할 수 있다.[3][4]

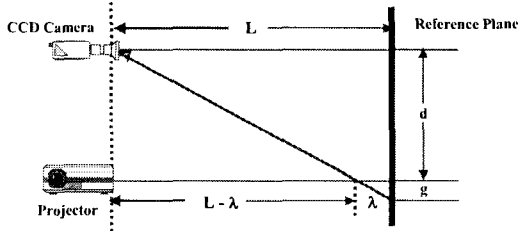


Fig. 2 Basic Concept for Calculating Wavelength

Fig. 2 는 파장을 구하는 기본원리를 나타낸다.

$$\lambda = \frac{gL}{g+d} \quad (3)$$

여기서, λ : 파장, g : 가상의 기준격자의 피치
L: Camera Lens 부터 기준평면까지의 거리
d: Camera 광축과 Projector 광축사이의 거리

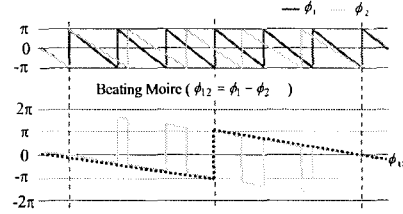


Fig. 3 Basic Concept of Two-Wavelength Moire

Fig. 3 은 이중파장 간섭의 기본원리를 나타낸다. 각각 g_1, g_2 피치의 가상 기준격자를 만들어 각각에 대해 위상을 측정하면 이중파장의 기본원리를 영사식 무아래 방법에 사용할 수 있다. g_1, g_2 인 가상의 격자를 사용해서 얻어진 위상도를 사용해서 맥놀이 효과를 얻는 방법은 다음과 같다.

$$\phi_{12} = \phi_1 - \phi_2 = \frac{2\pi h}{\lambda_1} - \frac{2\pi h}{\lambda_2} = \frac{2\pi h}{\lambda_{12}} \quad (4)$$

여기서, $\lambda_{12} = \frac{\lambda_1 \lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_1}$: 맥놀이로 형성된 파장,

ϕ_{12} : 맥놀이로 형성된 파장을 기준한 위상 식(4)에서 보는 것처럼 g_1, g_2 의 피치의 비를 적절히 조절함으로써 매우 큰 등가파장을 사용하는 측정하는 것과 같은 효과를 얻을 수 있다. 측정물체의 높이를 두 가지 파장 λ_1, λ_{12} 로 표현하면 짧은 파장을 기준으로 하는 무아래 무늬 위상의 차수(m)를 추출할 수 있다.

$$h(x, y) = \frac{\phi_{12}}{2\pi} \lambda_{12} = \frac{\phi_1}{2\pi} \lambda_1 = \frac{\phi_{1p} + 2m\pi}{2\pi} \lambda_1 \quad (5)$$

$$m = \frac{1}{2\pi} \left[\frac{\lambda_{12}}{\lambda_1} \phi_{12} - \phi_{1p} \right] \quad (6)$$

위 식(6)에서 차수 m 은 이론적으로 정수이다. 그러나 위상 이동법으로 계산되는 무아래 무늬 위상값에는 오차 성분이 포함되어 있어 무아래무늬의 가시도가 떨어져 차수 m 은 정확한 정수값을 가지지 못하기 때문에 정수화 연산을 통하여 값을 구한다. 위에서 추출한 m 을 이용해서 높이정보를 추출하는 식은 다음과 같다.

$$h(x, y) = \frac{\lambda}{2\pi} (\phi_{1p} + 2m\pi) \quad (7)$$

여기서, ϕ_{1p} : 위상정렬을 거치지 않은 위상 이동법에 의해서 구한 주위상값, m: 무아래 무늬 차수, $h(x, y)$: 측정물체의 높이

따라서 2중 파장 위상이동법을 사용하여 높은 분해능은 그대로 유지하면서 2π 모호성의 문제를 극복할 수 있다.

2.2 투영보정

2.1 을 통해서 추출한 형상 데이터를 DirectX 에서 제공하는 World, View, Projection Matrix Library 를 이용하여 2Pass Rendering 알고리즘을 적용하여 투영 보정을 하게 된다.[5]

2.2.1 전역변환(World Transformation)

전역변환은 모델의 로컬원점으로 관련된 vertices 들의 모델 공간에서 scene 에서 모든 물체 들이 공통된 원점으로 정의되는 전역공간 (world space)으로 좌표를 바꿔준다. 필수적으로 전역 변환은 모델이 전역에 내에 위치해야 한다.

이 전역변환에서 3-D transformation matrix 는 다음과 같이 4x4 Matrix 를 사용하여, 점(x,y,z)에서 새로운 점 (x',y',z')로 변환한다.

$$[x' y' z'] = [x y z] \begin{bmatrix} M_{11} & M_{12} & M_{13} & M_{14} \\ M_{21} & M_{22} & M_{23} & M_{24} \\ M_{31} & M_{32} & M_{33} & M_{34} \\ M_{41} & M_{42} & M_{43} & M_{44} \end{bmatrix} \quad (8)$$

대부분의 전역변환은 크기, 회전, 이동의 조합 을 포함 하고 있다.

2.2.2 시점변환(View Transformation)

시점변환은 카메라 공간내의 vertices 를 변환 하면서 전역공간 내에 뷰어(viewer)를 위치시킨 다. view matrix 는 전역공간 에서 물체를 카메라의 위치 (카메라공간의 원점) 주변으로 재위치 시킨 다. 여러 가지 방법으로 view matrix 를 만들어 진다. 이런 경우들 모두 카메라는 로컬위치와 상(scene) 내의 모델들에 적용되는 view matrix 를 만드는 시작점으로 사용되는 전역공간 내의 원점을 가진다. view matrix 는 물체를 회전 과 이동을 하여 카메라 공간내에 물체를 위치 시킨다. view matrix 를 만드는 한 가지 방법은 각 축에 대해 회전 Matrix 를 가진 이동 Matrix 의 조합으로 만들 수 있다.

$$V = T \cdot R_x \cdot R_y \cdot R_z \quad (9)$$

여기서 V 는 View matrix , T 는 전역공간에서 재 위치된 물체의 이동 matrix 이고, R 은 각 축에 대한 회전 matrix 이다. 위의 이동과 회전 matrix 는 카메라의 로컬위치와 전역공간의 원점을 기준으로 하고 있다.

2.2.3 투영변환(Projection Transformation)

투영변환은 스케일과 투시 투영이다. 이 투영 변환은 viewing frustum 을 육면체 모양으로 변환 한다. viewing frustum 의 끝 근처는 멀리 있는 끝보다 작기 때문에 카메라와 가까운 거리에 있는 물체를 팽창시키는 영향을 준다.

시점변형(viewing transformation) 공간의 원점에서 카메라와의 거리는 D 이다. 다음과 같이 투영변환 은 projection matrix 와 시점을 - D 에 의해 Z 방향으로 이동하여 카메라에서 원점으로 이동시키는 Translation Matrix 의 복합형태로 표현 된다. 복합 projection matrix(T*P)는

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1/D \\ 0 & 0 & -D & 1 \end{bmatrix} \quad (10)$$

식(10)의 Matrix 는 카메라와 가까운 Clipping plane 과의 거리에 바탕을 둔 물체에 대하여 이동과 크기에 대한 것이다. 그러나 식(10) Matrix 는 fov(field of view)를 고려하지 않았으며, 먼 거리에서 물체의 Z 값은 거의 동일해서 높이(depth)를 비교하기 어렵다. 이러한 문제들에 역점을 두어, 시계(viewport)의 종횡비(the aspect ratio)를 사용하여 정점들(vertices)들을 조정하여 다음의 투시투영 Matrix 를 쓸 수 있다.

$$\begin{bmatrix} w & 0 & 0 & 0 \\ 0 & h & 0 & 0 \\ 0 & 0 & Q & 1 \\ 0 & 0 & -QZ_n & 0 \end{bmatrix} \quad (11)$$

여기서 Z_n 은 가까운 Clipping plane 의 z 값이며, w , h , Q 는 다음과 같다. fov_w 와 fov_h 는 시계(viewport)의 수평과 수직의 Field of view 이다.

$$w = \cot\left(\frac{fov_w}{2}\right), h = \cot\left(\frac{fov_h}{2}\right), Q = \frac{z_f}{z_f - z_n} \quad (12)$$

3. 실험

Fig 4 은 실험환경을 나타내고 있다.



Fig. 4 Experimental Setup

CCD 카메라를 통해서 기준격자와 변형격자의 이미지를 획득하며 와 projector 은 Contents 를 영상 하는 동시에 가상의 격자를 뿌려주는 역할을 한다. Viewer 로 사용되는 캠코더는 보정전후의 콘텐츠를 보기 위하여 장착하였다. 임의의 형상의 스크린은 일반적인 평면 스크린이 아닌 좌측은 반원모양을 하고 있으며, 우측은 코너 모양을 하고 있다.

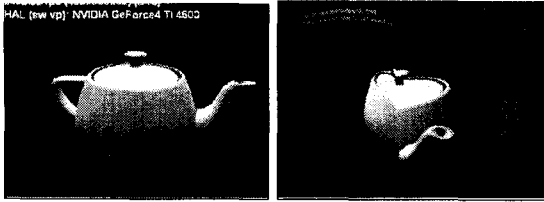


Fig 5 The display Contents & The distorted contents for User'viewport

Fig.5 는 컴퓨터 모니터 상이나 프로젝터로 영사하는 콘텐츠의 상과 Fig.4 에서의 Viewer (사용자 시점)의 관점에서 본 왜곡된 콘텐츠를 나타내고 있다.

Fig. 7 은 Digital Moire 를 이용하여 프로젝터로 영사하는 부위 전체를 측정된 임의의 형태를 갖는 스크린의 형상 Data 이다.

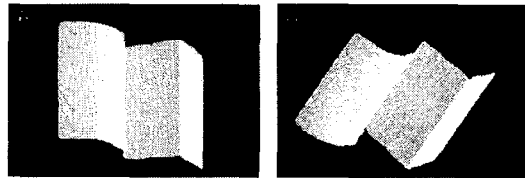


Fig. 7 The data extraction of Arbitrary display surface

Fig.7 에서 보는 바와 같이 얻은 Data 를 이용하여 영사되는 콘텐츠(Fig.5)에 2pass rendering 알고리즘을 적용하여 임의의 스크린에 대하여 콘텐츠를 보정하므로써 프로젝터로 콘텐츠를 영사하였을 때 Viewer 의 시점에서 올바른 콘텐츠를 얻을 수 있다. Fig.8 은 2Pass rendering 알고리즘을 적용하여 임의의 스크린에 대해서 보정된 콘텐츠와 Viewer 시점에서의 보정된 Display 를 나타내고 있다.

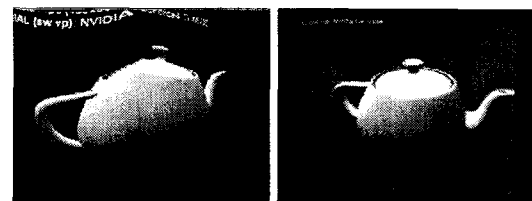


Fig. 8 The calibrated contents for arbitray display surface & The calibrated contents for User'viewport

Fig. 9 와 Fig.10 은 벽면의 코너부에 적용한 예와 실제 게임에 적용한 예를 나타내고 있다.

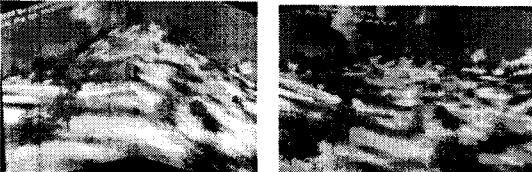


Fig. 9 The display contents before and after calibration at the corner



Fig. 10 the display contents before and after calibration in games

4. 결 론

임의의 형태의 스크린에 영사하였을 때 사용자 시점에서 발생하는 왜곡현상을 보정하기 위하여 보여주하고자 하는 콘텐츠를 DirectX 그래픽 라이브러리를 이용해서 렌더링을 한다. 그리고 이렇게 렌더링된 결과를 텍스처로 저장하여, 이 저장된 텍스처로 Projective Mapping 을 이용해서 2 중 과정 Digital Moire 로 얻은 2.5 차원 스크린 모델에 사용자의 시점에서 투영하게 된다. 이렇게 투영된 모델은 다시 렌더링하게 되어 프로젝터로 뿌려준다. 이렇게 2Pass Rendering 알고리즘을 적용을 하면 사용자의 시점에서는 평면의 스크린에서 보는 것과 같은 효과를 얻게 된다. 따라서 이러한 프로젝션 시스템은 대형스크린이 준비되어 있지 않은 일반가정에서 프로젝터와 임의의 형태의 벽면을 이용하여 비교적 큰 화면의 오락이나 영화를 즐길 수 있다.

참고문헌

1. Kevin G. Harding and Albert Boehlein., "Absolute measurement using field shifted moire," SPIE, Vol. 1614, pp. 259-264.
2. Zhong Jinggang and Wang Ming., "Tracking of carrier coded fringe pattern for the automatic measurement of 3-D object shapes," SPIE, Vol. 2899, pp. 192-196, 1996.
3. 김승우, 오정택, 정문식, 최이배, "고단차 불연속 형상의 3 차원 측정을 위한 이중파장 위상천이 영사식 무아래," 대한기계학회논문집 A 권, 제 23 권, 제 7 호, pp. 1129-1138, 1999.
4. Jie-Lin, Hong-Jin Su, and Xian-Yu Su., "Two-frequency grating used in phase-measuring - profilometry", Applied Optics, Vol. 36, No. 1, pp. 277-290, 1997.
5. Microsoft Corporation. DirectX 8.1 programming reference, <http://www.microsoft.com/windows/directX>