

다파장 위상 측정 형상측정법에서의 고주파 노이즈 해결에 관한 연구

박 윤 창 (선문대학교 기계 및 제어공학과), 장 현 재 (선문대학교 대학원 기계 및 제어공학과), 김 호 열 (선문대학교 대학원 기계 및 제어공학과)

- 1. 서론

1). 위상 측정 형상 측정법

위상 측정 형상측정법(Phase Measuring Profilometry, PMP)은 카메라 앞의 기준 격자를 사용하지 않고 물체형상에 따라 변형된 격자 무늬만을 획득하여 형상 정보를 추출하는 방법으로 생체임상의학(biomedicine), machine vision, solid modeling같은 분야에서 3차원 형상을 얻기 위한 기술로 잘 알려져 있다. 일찍이 많은 연구가 효과적인 위상 측정 알고리즘(Phase-shifting)법은 간섭무늬를 얻기 위한 매우 유용한 방법으로 알려져 있다. 모든 위상천이법을 사용하는 방법에는 위상이송오차가 생기게 되고 보정(compensation)이나 평균화하는 방법에는 위상이송오차가 생기게 되고 보정(compensation)이나 평균화하는 방법들이 해결방법으로 제안되고 있다. 단일격자(단일 파장)를 사용하면 위상천이 모라레 법이나 위상천이PMP법은 깊이 방향 측정범위에 한계를 가지게 된다. 그래서 이를 해결하기 위해 다파장을 이용한 PMP법이 Jie-Lin Li,의 2명에 의해 연구되었다. A.Asundi and C.S.Chan는 간섭무늬 획득에 필요한 격자가 오차를 줄이기 위해 가져야할 특성에 대해 논의하고 있다.

기존의 격자를 만들고 이송하는 방법은 단일 피치를 갖는 격자를 유리판에 새겨 넣어 사용함으로써 인해서 측정 대상에 따른 다양한 피치의 유리격자를 필요로 했고 또한 다파장 위상천이법을 적용시키기 위해서는 서로 다른 피치의 격자를 하나의 유리판에 새겨넣어, 정밀한 모터로 이송시켜주어 다파장 위상천이를 구현하게 되므로 이송계와 광학계가 복잡해지는 문제가 있었다. 그러나 회전 다면경을 이용한 격자 생성장치가 개발되면서, 능동적으로 다양한 물체에 대한 격자를 대처할 수 있게 되었고 모터대신에 간단한 Timer/Counter회로로 위상이송과 격자피치변경이

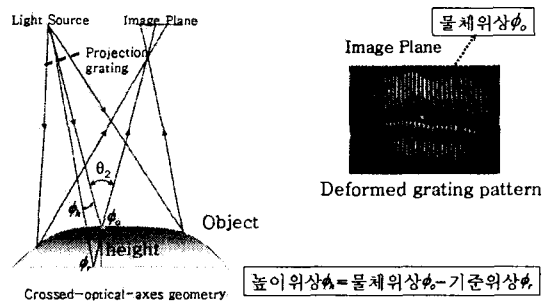
가능하게 되었다.

본 연구에서는 앞서 PMP법이 가지는 오차 요인 중에서 고주파 노이즈를 해결하기 위하여 다음과 같은 연구를 수행하고자 한다.

- 2.본론

1). PMP알고리즘의 개관

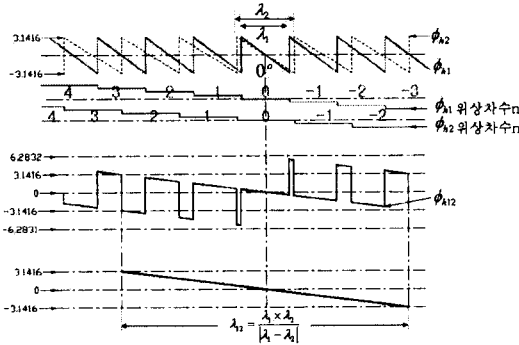
PMP법은 변형격자 무늬의 밝기로부터 물체의 높이를 직접 추출하는 방법이다. 즉 격자가 변형되지 않는 참조면의 위상(ϕ_r)과 격자가 변형되는 물체면의 위상(ϕ_o)과의 차이로 높이위상(ϕ_h)을 구한다. 단 파장을 이용해서 높이위상(ϕ_h)을 구하게 되면 측정 높이차가 $\frac{\lambda}{4}$ 이상이면 절대위



[그림 2-1 : 물체위상]

상을 알 수 없게 된다. 이를 해결하기 위해 다 파장의 사용이 필요하게 된다. 원리는 비슷한 파장을 가지는 두 파장을 사용함으로써 두 파의 맥놀이 현상을 이용해 훨씬 길어진 파장을 이용해 측정 한계를 넓히는 방법이다. 피치가 λ_1, λ_2 이고 각각의 주 위상값 $\phi_1(x, y), \phi_2(x, y)$ 은 일반 버킷알고리즘을 이용하여 산출한다.

$\phi_1(x, y), \phi_2(x, y)$ 가 각각 λ_1, λ_2 에 대한 위상이라 할때 관계가 성립된다.



[그림 2-2 : 높이위상, 맥놀이현상, 위상차수 개념도]

$$\phi_{12}(x, y) = \phi_1(x, y) - \phi_2(x, y)$$

$$= 2\pi \frac{\phi_h}{\lambda_{12}} \left(\lambda_{12} = \frac{\lambda_1 \lambda_2}{|\lambda_1 - \lambda_2|} \right)$$

측정점의 주위상차 값 $\phi_h(x, y)$ 를 두 개의 위상값 $\phi_{12}(x, y)$, $\phi_{11}(x, y)$ 에 대해서 표현해 보면 다음과 같다.

$$\phi_h(x, y) = \phi_{12} \frac{(x, y)}{2\pi} \lambda_{12} = \frac{\phi_{12}(x, y) + 2m\pi}{2\pi} \lambda_{12}$$

$\phi_{12}(x, y)$ 는 위상정렬을 거치지 않은 주 위상값을 나타낸다. m 은 임의의 정수(위상차수)를 나타낸다. 다시 m 에 대해서 표현을 하면,

$$m = \frac{1}{2\pi} \left(\frac{\lambda_{12}}{\lambda_1} \phi_{12}(x, y) - \phi_{12}(x, y) \right)$$

두 번째 파장의 m 에 대해서 표현을 하면,

$$m = \frac{1}{2\pi} \left(\frac{\lambda_{12}}{\lambda_2} \phi_{12}(x, y) - \phi_{12}(x, y) \right)$$

와 같이 된다. m 은 애초 정수로 정의된 수였지만 측정과정에서의 오차 -이미지 센서의 비선형, 회로의 전기적 잡음, 주변광 잡음 등-로 인해서 실수를 포함한다. 따라서 위상차수(m)의 실수의 양에 해당하는 위상오차를 보정하여 정수화함으로써 오차를 줄이려고 한다.

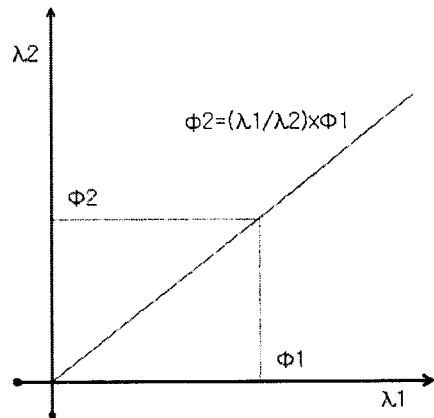
2). 보정을 위한 벡터의 개념

두개의 파장으로 측정된 높이 위상 값은 각각 다른 두개의 위상 값을 가진다. 첫 번째 파장 (λ_1)으로 측정된 높이 위상 (ϕ_1)과 두 번째 파장 (λ_2)으로 측정된 높이 위상 (ϕ_2)들로 측정된다. 하나의 실체를 두개의 측정자로 측정하여 두개의 결과를 갖는데, 이들의 관계는

$$\phi_2 = \frac{\lambda_1}{\lambda_2} \phi_1$$

이와 같은 1차식으로 표현된다. 좌표평면에서 X축을 λ_1 로 놓고, Y축을 λ_2 로 놓고 그래프를 그린다면 기울기가 $\frac{\lambda_1}{\lambda_2}$ 인 직선을 그릴 수 있다. ϕ_1 과 ϕ_2 의 교점이 실제 측정점이고 ϕ_1 , ϕ_2 로 나타낸 것이다. 2차원 평면에서 X축으로 ϕ_1 , Y축으로 ϕ_2 인 벡터를 그릴 수 있는 것이다. 그러나 이미지 센서의 비선형, 회로의 전기적 잡음, 주변광 잡음 등으로 인하여 측정된 위상 값(ϕ_1 , ϕ_2)은 위의 관계식을 만족하지 못한다. 또한 ϕ_1 , ϕ_2 로 구한 모아레 차수(m)는 실수부를 포함하고 있다. 이러한 부분이 고주파 노이즈를 발생시키고, 측정정밀도에 영향을 주게 되는 것이다.

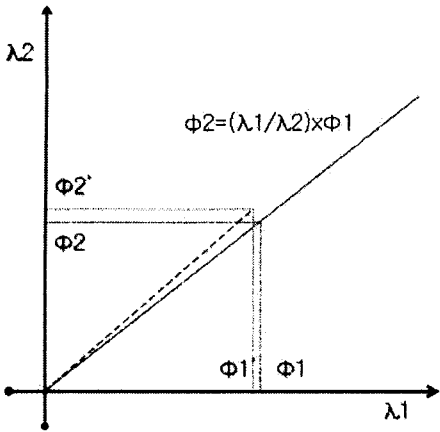
2차원 평면상에 X, Y 두 축에서 각 파장별 위상 값의 교점과 원점을 잇는 직선을 벡터라 하면 벡터는 기울기가 $\frac{\lambda_1}{\lambda_2}$ 인 직선을 약간 벗어나 있다. 이론적으로는 이 직선상에서 측정 위상 값이 정해져야 하지만, 위에서 언급한 것과 같은 이유로 인하여 직선에서 벗어나 있는 것이다. 그래서 벗어난 벡터를 직선에 속하도록 하는 보정방법을 제시할 것이다.



3). Cauchy-Schwarz 부등식을 이용한 정사영 벡터

Cauchy-Schwarz 부등식을 이용한 정사영 벡터 구하기.

$$|F \cdot G| \leq |F| |G|$$



만일 F 또는 G가 0이라면 부등식은 $0 \leq 0$ 이 되어 명백하다. 만일 $F \neq 0$ 이고 $G \neq 0$ 이며 θ 가 F와 G의 사이의 각이면

$$-1 \leq \cos(\theta) = \frac{F \cdot G}{\|F\| \|G\|} \leq 1 \text{이다. 따라서}$$

서

$$-\|F\| \|G\| \leq F \cdot G \leq \|F\| \|G\| \text{이다.}$$

또다시 쓰면

$$|F \cdot F| \leq \|F\| \|G\| \text{이다.}$$

어떤 벡터에 정사영 벡터를 구하기 위해서

$$\cos(\theta) = \frac{F \cdot r}{\|F\| \|r\|}.$$

$$\cos(\theta) = \frac{\|H\|}{\|F\|}.$$

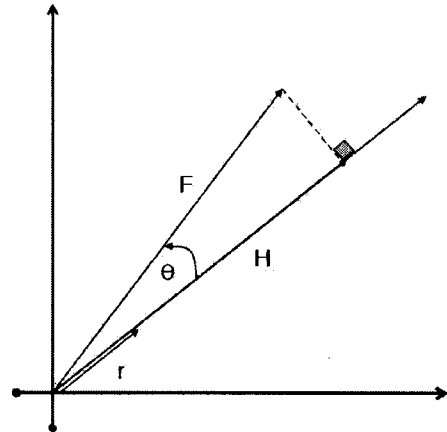
$$\frac{\|H\|}{\|F\|} = \frac{F \cdot r}{\|F\| \|r\|}.$$

$$\|H\| = \frac{F \cdot r}{\|r\|}.$$

$$H = \left(\frac{F \cdot r}{\|r\|^2} \right) r.$$

를 이용한 것이다.

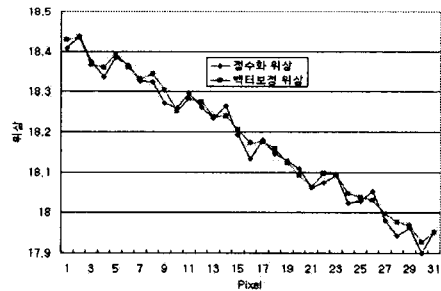
실수부 오차를 포함한 위상 값 ϕ_1', ϕ_2' 로 이뤄진 벡터 F와 이론적인 위상 값 ϕ_1, ϕ_2 로 이뤄진 벡터 H, 그리고 λ_1/λ_2 의 기울기를 가진 유닛벡터 r로 나타낼 수 있다. 벡터 H는 벡터 F의 정사영 벡터이다. 종래에는 모아레 차수를 강제로 정수화하는 방법(반올림)을 통하여 보정을



하였지만 본 논문에서 제시하는 방법은 모아레 차수를 정수화한 위상 값을 벡터의 정사영벡터를 구하는 방법을 통하여 보정하는 것이다.

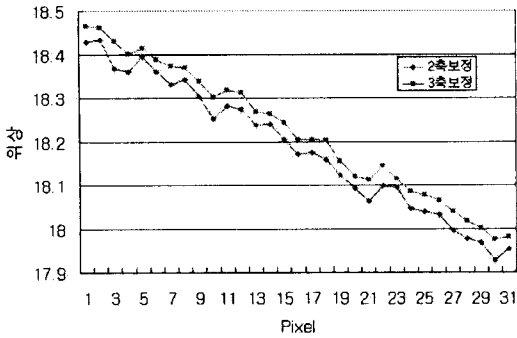
- 3. 결론

평면을 측정하고 측정된 결과 위상과 반올림으로 강제 정수화한 위상과 벡터의 정사영벡터를 구하는 방법을 통하여 보정한 위상을 비교하여 보면 강제 정수화한 위상보다 정도가 향상되었음을 알 수 있다. (픽셀의 개수는 지면상 32개



로 줄었다.)

정수화 위상의 편차는 0.037455904 이고 벡터 보정 위상의 편차는 0.031811162 이다. 3축보정에서는 편차가 0.030624034까지 내려간다. 위의 실험으로 볼 때 벡터의 정사영벡터 방식을 이용한 보정으로 고주파 노이즈 성분을 줄이게 되는 효과를 얻게 되었다.



참고 문헌

[1] (주)Cad&Graphics, "리버스 엔지니어링 기술의 현재와 미래," 창간8주년 기념 세미나집 (2001)

[2] Yi-Bae Choi, "Three Dimensional Human Face Profile Measurement System Using Projection Type Multi-Slit Beam Topography," 한국과학기술원 석사학위 논문, 1993

[3]Yi-Bae Choi. "Phase-shifting Moire Topography for Precision Measurement Of 3-Dimensional Profiles", 한국과학기술원 박사학위 논문,1997

[4]Kyeng-Gun Park. "A Study on the Moire Fringe Acquisition Method Using the Programmable Grating Mechanism" 선문대학교 석사학위 논문,2000

[5]K.M. Jeng and Y.C. Park, "A Study on the Phase Measuring Profilometry with Parallel-optical-axes," 한국정밀공학회, Vol.17, No.6 (2000)

[6]J.L.Li,H.J.Su and X.Y.Su, "Two-frequency grating used in phase-measuring profilometry," App.Opt.36,277-280(1997)

[7]V.Srinivasan, H.C.Liu and M.Halioua, "Automated phase-measuring profilometry : a phase mapping approach," App.Opt.24, 185-188(1985)

[8] Ming Chang, Der-Shen Wan, "On-Line Automated Phase-Measuring Profilometry," Optics and Laser in Eng.15,127-139(1991)

[9]P. carre, "Installation et utilisation du comparateur photoeetrique et Interferentiel du

Bureau International des poids et Measures," Metrologia 2, 13-23(1966)

[10] J. E. Greivenkamp, " Generalized data reduction for heterodyne interferometry," Opt. Eng. 23, 350-352(1984)

[11] Wansong Li, Xiznyu Su, "Real-time calibration algorithm for phase shifting phase measuring profilometry," Opt. Eng. Vol.40 No.5 (2001)

[12] Parameswaran Hariharan, "Phase-shifting interferometry: minimization of systematic errors," Opt. Eng. 39(4) 967-969(2000)

[13]D.W.Manthey and D.Lee, "Calibration of a laser range-finding coordinate-measuring machine," Opt.Eng.33,3372-3380(1994)

[14]A.Asundi and C.S.Chan, "Phase shifting applied to non-sinusoidal intensity distribution -an error simulation," Optics and Laser in Eng.21,3-30(1994)

[15]김승우,오정택,정문식,최이배, "고 단차 불연속 형상의 3차원 측정을 위한 이중 파장 위상천이 영사식 모아레," 대한 기계학회 논문집 A권, 제23 권, 제7호 pp.1129-1138, 1999

[16]김승우,최이배,오정택,정문식, "위상천이 격자를 이용한 영사식 모아레," 대한 기계학회 논문집 A권, 제22권, 제5호 pp.850-857, 1998

[17]J. Schwider, R. Burow, K. -E. Elssner, J. Grzanna, R. Spolaczyk, and K. Merkel, "Digital Wave-Front Measuring Interferometry : Some Systematic Error Sources," Appl. Opt. 22, 3421-3432(1983)

[18]M.Suganuma and T.Yoshizawa, "Three-dimensional shape analysis by use of a projected grating image,"Opt.Eng.30,1529-1533(1991)

[19]M.Gruber,G.Hausler, "Simple, robust and accurate phase-shifting triangulation," Optik 89(3),118-122(1992)

[20]M.Chang, "Phase measuring profilometry using sinusoidal grating," JAPAN/USA Symposium on Flexible Automation -volumn 2 ASME , 1089-1096(1992)