한국공작기계학회 2003 춘계학술대회 논문집 pp.240~244

다파장 위상 측정 형상측정법에서 정도향상에 관한 연구

박윤창(선문대학교), 장석준(인텍플러스), 이태용(선문대학교 기계공)

1. 서론

현재에는 산업의 급속한 발전으로 생산현장에서 제품의 품질검사 내지는 조립라인에서의 불량품검출 등에 부분적으로 사용되었던 3차원 형상측정기술들이 단지 공학분야에만 국한되지 않고 의학·영화산업·오락(entertainment)산업·의복산업 등 그 응용범위를 확장하고 있다. 근래에 들어서 비젼을 이용한 비접촉식 3차원 측정법이 빠른 측정 시간, 사용에 있어서의 편리성, 측정대상에 손상을 입히지 않는 등 많은 장점을 가지고 광삼각법(optical triangulation), 광촉침식(optical profilometry), 동촛점현미경(confocal microcsopy), 모아레토포그라피(moire topography), PMP(Phase Measuring Profilometry)등 다양한 분야에서 많은 연구가 진행되고 있다. 모아레 현상을 이용한 3차원 측정법은 측정영역 대비 높은 측정 분해능과 빠른 측정속도로 실제 구현에 있어서의 문제점인 간섭무늬해석의 문제점, 복잡한 광학계등의 문제를 해결하기 위한 많은 연구가 행해져 왔다. 간섭무늬 해석에 위상천이법[1]을 적용함으로써 간섭무늬 형태에 영향을 받지 않는 측정이 가능해 졌고 변형 격자무늬의 밝기로부터 물체의 높이정보를 직접 추출하는 방식인 PMP법은 투영광축과 카메라광축사이의 각도를 평행광축계로 하면서 경사 광축계의 단점인 해석의 복잡함을 극복하고[2] PMP법에 위상측정방법으로 위상천이법을 적용, 여러 오차요인에 강인한 방법들이 연구되고 있다.[3] 본 연구에서는 격자의 광강도분포가 정현파을 갖지 못하는데에서 생기는 오차를 이를 위상이송Step수를 늘려주어 측정 불확도를 낮추었다. 또한 위상천이법에서는 위상값을 위상값을 구하는 방법인 '일반 버켓 알고리즘[4]' 이 사용됨으로 구해지는 위상값 범위에 한계($\pm\pi$이내)가 생기게 되어 본 위상을 알아내는데 위상차수가 필요하게 되고 이는 정수가 된다, 그러나 이미지센서의 비선형성, 회로의 전기적 노이즈, 주변광 잡음 등으로 인해 위상차수에 포함된 소수부 양 만큼의 위상오차를 보정하여 측정 불확도를 낮추고자 한다.

2. 본 론

2.1 위상차수의 비 정수화와 보정

PMP법은 변형격자 무늬의 밝기로부터 물체의 높이를 직접 추출하는 방법이다. 즉 격자가 변형되지 않는 참조면에서의 위상(ϕ_r)과 격자가 변형되는 물체면에서의 위상(ϕ_o)과의 차이로 높이위상(ϕ_h)을 구한다. 단 파장을 이용해서 높이위상(ϕ_h)을 구하게 되면 위상이송법에 의해 구해진 각각의 주위상값들이 $-\pi < \phi_{(r,o)} \leq \pi$범위내에서 구해지기 때문에 중첩된 위상이 구해지고 높이값의 연속성을 가정하고 위상정렬(Phase Unwrapping)과정을 통해 절대위상을 구하게 된다. 그러나 인접점화소의 측정 높이차가 이상이면 절대위상을 알 수 없게 된다. 이를 해결하기

위해 다 파장의 사용이 필요하게 된다. 원리는 비슷한 파장을 가지는 두 파장을 사용함으로써 두 파의 맥놀이현상을 이용해 훨씬 길어진 파장을 이용해 측정 한계를 넓히는 방법이다.

피치가 λ_1, λ_2이고 각각의 주위상값 $\phi_1(x,y)$, $\phi_2(x,y)$은 일반 버켓 알고리즘[4]을 이용하여 산출한다. $\phi_1(x,y), \phi_2(x,y)$가 각각 λ_1, λ_2에 대한 위상이라 할 때

$$\phi_{12}(x,y) = \phi_1(x,y) - \phi_2(x,y) = 2\pi \frac{\phi_h}{\lambda_{12}}$$

$$\lambda_{12} = \frac{\lambda_1 \lambda_2}{|\lambda_1 - \lambda_2|} \qquad (1)$$

관계가 성립된다.

측정점의 주위상차 값 $\phi_h(x,y)$를 두 개의 위상값 $\phi_{12}(x,y), \phi_1(x,y)$에 관해서 표현해 보면 다음과 같다.

$$\phi_h(x,y) = \frac{\phi_{12}(x,y)}{2\pi} \lambda_{12} = \frac{\phi_{1b}(x,y) + 2m\pi}{2\pi} \lambda_1 \qquad (2)$$

$\phi_{1b}(x,y)$는 위상정렬을 거치지 않은 주위상값을 나타낸다. m은 임의의 정수(위상차수)를 나타낸다. 다시 m에 대해서 표현을 하면,

$$m = \frac{1}{2\pi}\left(\frac{\lambda_{12}}{\lambda_1}\phi_{12}(x,y) - \phi_{1b}(x,y)\right) \qquad (3)$$

와 같이 된다. m은 애초 정수로 정의된 수였지만 측정과정에서의 오차-이미지센서의 비 선형성, 회로의 전기적 잡음, 주변광 잡음 등-로 인해서 소수를 포함한다. 따라서 위상차수(m)의 소수의 양에 해당하는 위상오차를 보정하여 정수화함으로써 오차를 줄이려고 한다.

2.2 위상차수 보정

'PMP법' 을 이용해서 위상을 구하게 되면 atan2계산에 의해서 $\pm\pi$ 범위내의 위상(ϕ_h)이 구해지게 된다. Fig.1은 파장(λ_1, λ_2)과 구해지는 위상값(ϕ_h)영역, 위상차수에 대한 개념, 다 파장의 경우 맥놀이파장(λ_{12})의 개념을 나타내고 있다. Fig.1에서처럼 위상차수는 사용된 각각의 파장별로 위상이 0° 인지점을 기준으로 0, $\pm1, \pm2, \pm3, .., \pm n$인 정수가 된다. 단파장을 이용할 경우 서두에 설명한 높이위상(ϕ_h) 측정구간의 한계 때문에 식(3)에서처럼 다파장을 이용해 측정구간의 한계를 넓힌 맥놀이파장의 이용이 필요하게 된다. Fig.1에서 4번째 그래프는 맥놀이파장을 이용해 넓혀진 측정구간을 나타낸다. 짧은 파장(λ_1)에 대한 위상차수를 m이라하면 Fig.2은 위상차수(m)와 파장과의 관계를 나타내고 있다. 위상차수가 같은 $\pm\pi$구간 (m:0,1,2..) 내에서의 위상변화는 직선을 이루게 된다. 즉, 원점을 지나는 직선은 이론적으로 위상차수가 0이고, p1을 지나서 y축 대칭인 p2에서 p3까지의 직선은 위상차수가 1, 이렇게 p3을 지나서 x축 대칭인 p4에서 p5까지의 직선도 위상차수가 1인 직선이 된다. 같은 방법으로 p5를 지나서 y축 대칭인 p6에서 p7까지의 직선은 위상차수가 2가된다. 이렇게 같은 위상차수내에서 위상변화의 분포는 직선으로 나타난다. 다시 말해서 Fig.2는 Fig.1에서 차 위상 ϕ_{12}가 위치하는 분포를 두 파장의 평면에서의 위상변화로 표현된 것이다. 하지만 실측된 한 점의 위상값은 Fig.3과 같이 직선 분포도에서 벗어나게 된다. 이렇게 벗어난 정도를 보정해 주기 위해서 직선1)과 이에 수직인 직선2)와의 교점 P를 구해야 한다. 수

식은 다음과 같다.

먼저 점p1($\pi, \frac{\lambda_1}{\lambda_2}\pi$)과 점p2($-\pi, \frac{\lambda_1}{\lambda_2}\pi$)를 지나는 직선1)과 직선2)를 구하면,

$$w_2 = \frac{\lambda_1}{\lambda_2}\pi \qquad (4)$$

$$w_2 = -\frac{\lambda_2}{\lambda_1}w_1 + \frac{\lambda_1^2-\lambda_2^2}{\lambda_2\times\lambda_1}\pi \qquad (5)$$

'일반 버켓 알고리즘[4]' 을 w_1, w_2에 대해 정리하면,

$$w_1 = \frac{\lambda_1^2-\lambda_2^2}{\lambda_1^2+\lambda_2^2}\pi \qquad (6)$$

$$w_2 = \frac{\lambda_1}{\lambda_2}\times\frac{\lambda_1^2-\lambda_2^2}{\lambda_1^2+\lambda_2^2}\pi \qquad (7)$$

따라서 실측된 비 정수인 위상차수(m)가 직선2) 상의 어느 한 점(mp (w_1', w_2'))이 될 때, 직선1)과의 직교인 점P로의 이동 량 $(\triangle w_1', \triangle w_2')$, 즉 보정량은 다음과 같이 구해진다.

i) W_1의 방향 거리 보정

$$W_1 = w_1 + \triangle w_1' \times err$$

$$W_1 = w_1 + \frac{\lambda_1^2}{\lambda_1^2+\lambda_2^2}\times 2\pi\times err \qquad (8)$$

ii) W_2의 방향 거리 보정

$$W_2 = w_2 - \triangle w_2' \times err$$

$$W_2 = w_2 + \frac{\lambda_1\times\lambda_2}{\lambda_1^2+\lambda_2^2}\times 2\pi\times err \qquad (9)$$

(단, $\Delta w_1' = \frac{\lambda_1^2-\lambda_2^2}{\lambda_1^2+\lambda_2^2}\times\pi - (-\pi)$,

$\Delta w_2' = \frac{\lambda_1}{\lambda_2}\times\frac{\lambda_1^2-\lambda_1^2}{\lambda_1^2+\lambda_1^2}\times\pi - \frac{\lambda_1}{\lambda_2}\times\pi$)

여기서 err는 이론적인 위상차수와 실측된 위상차수와의 차이로서 다음과 같다. err는 다음과 같이 산출된다.

$$err = Merr - iMerr \qquad (10)$$

(단, Merr : 실측된 위상차수, iMerr : Merr를 반올림(정수화))

최종항의 w_1, w_2는 각각의 파장에서 구한 높이위상(ϕ_h)이고 W_1, W_2는 보정한 높이위상(Φ_h)이다. 위의 과정을 통해 일반화된 식8)과 식9)을 이용하면 파장별로 구해진 모든 위치의 높이위상(ϕ_h) 값이 보정된다.

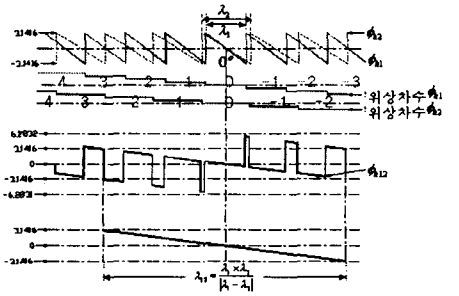

Fig.1 Concept ofbeat phenomenon and pahse number

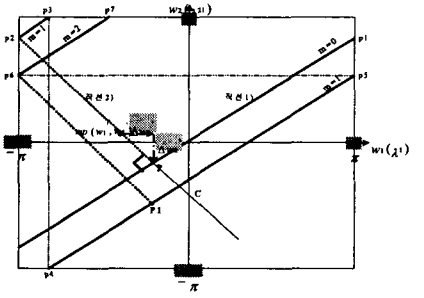

Fig.2 Theoretical relation of frequency and phase number

p1($\pi, \frac{\lambda_1}{\lambda_2}\pi$) , p2($-\pi, \frac{\lambda_1}{\lambda_2}\pi$)

직선1) $w_2 = \frac{\lambda_1}{\lambda_2}w_1$

직선2) $w_2 = -\frac{\lambda_2}{\lambda_1}w_1 + C$

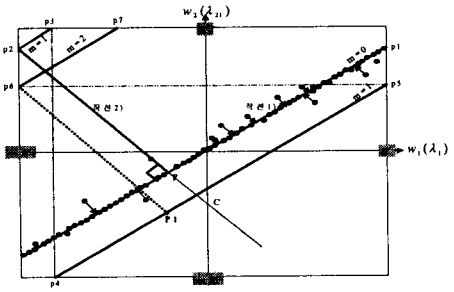

Fig.3 Measured phase number values

2.3 실험 방법

Fig.4는 본 연구에 사용 된 측정 시스템의 개략적인 구성을 보여주고 있다. 본 시스템은 크게 격자 발생부와 이미지 획득부로 나뉘어져 있고 결상렌즈의 중심으로부터 L만큼 떨어진 거리에 참조면이 놓이게 된다. 격자 발생부를 자세히 살펴보면일정한 속도로 회전하는 회전다면경(polygon mirror), 광원으로 사용되는 레이저다이오드(laser diode:LD), 레이저다이오드에서 나오는 레이저를 집광시키는 집광렌즈(condensing lens), 점광원을 슬릿빔(slit beam)으로 변환시키는 실린더 렌즈(cylinder lens) 그리고 회전다면경의 회전 각위치를 검출하는 포토다이오드(photo diode:PD)로 이루어져 있으며, 회전다면경의 회전속도와 LD의 On/Off를 제어하기 위해서 기준 클럭(main clock)과 타이머(timer)가 사용되고 있다.

본 시스템에서의 높이정보($H(X_0)$)는 렌즈의 중심으로부터 측정면상의 한점 (X_0)까지의 직선(직선B)과 회전다면경의 반사면으로부터 측정면상의 한점 (X_0)을 지나는 직선(직선C)이 이루는 교점으로부터 구해진다. 직선C는 회전다면경에서 반사되어 펼쳐진 광(Laser slit-beam)이 영사되면서 만들어내는 평면상의 한 직선이 된다. λ_1은 주기가 400Khz이고 λ_2의 주기는 333.333Khz이다. 위상이송Step수는 종래 방법과 비교를 위해 4번으로 한다. 위상을 보정해 주는 방법은 먼저 참조위상(ϕ_r)과 물체위상(ϕ_o)을 구한 후 차위상을 이용해서 구한 높이위상(ϕ_h)에 적용해 본다.

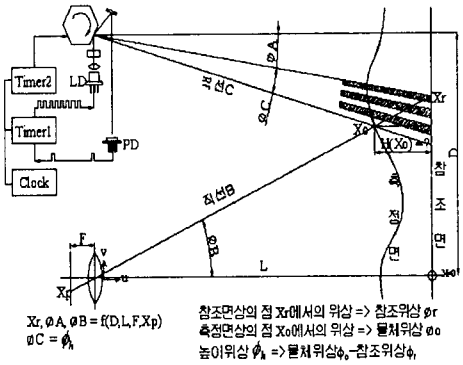

Fig.4 Optical geometry of grating projection.

(L :광원과 참조면 사이거리, 또는 Lens 초점중심과 참조면 사이거리, D :Lens 중심과 광원 사이거리, F :초점 거리.)

2.4 실험 결과

Fig.5는 종래의 사용되고 있는 방법(4step phase shift)으로 측정한 높이값의 평균값을 나타내고 있다. Fig.7은 위상 이송 수를 증가 시키면서 측정된 값들의 표준편차(Standard Deviation: σ(mm))를 나타내고 있다. y축은 표준편차(σ)이고 x축은 위상이송Step수(Bucket number)를 나타낸다. 결론적으로 위상이송Step수를 늘리게 되면 격자의 광강도분포가 비 정현파인 것으로 인한 오차가 감소하고 이에 따른 높이오차도 줄어들게 된다.

Fig.8은 일반 버켓알고리즘[4]을 이용해 위상이송Step수가 위와 동일한 4일 경우 획득된 주

위상값(ϕ_r, ϕ_o)의 차(ϕ_h)에 위의 이론을 적용시켜 얻어낸 결과로 보정을 하지 않았을 때다 약 41.54%의 오차감소율을 보여 주고 있다. 결론적으로 이미지센서의 비선형성이나, 회로의 잡음, 외부광의 잡음등에 의해서 위상차수가 비 정수가 되어 생기는 오차는 위상차수 소수부에 포함된 양만큼을 위상보정시켜줌으로써 줄일 수 있게 된다.

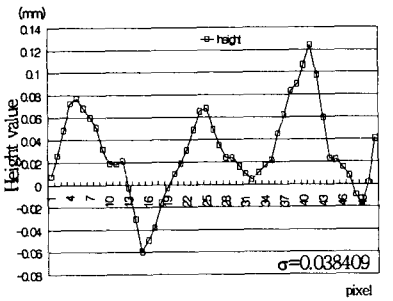

Fig.5 Hight profile applied 4step phase shift(200th y-profile 300~350pixels data)

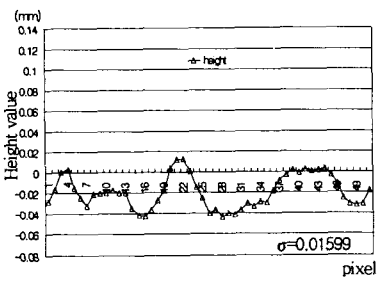

Fig.6 Applied 12-phase step and phase number calibration

3. 결 론

본 다파장 위상 측정 형상측정법에서의정도 향상에 관한 실험 및 연구에서 격자의 광강도분포가 정현파을 갖지 못하는데에서 생기는 오차를 위상이송Step수를 늘려주고 위상차수에 포함된 소수부 양 만큼의 위상오차를 보정하여 측정 불확도를 낮출수 있었다. 그 내용들을 정리해 보면 다음과 같다.

1)종래에 많이 사용되던 4스텝보다 위상이송 스텝을 증가시켜 위상측정오차의 감소율을 정량(正量)적으로 비교해 보았다.

2) 위상차수와 파장과의 관계가 정립을 통해 위상차수를 보정함으로써 위상차수가 정수로 됨을 확인하였으며, 이렇게 보정된 위상값이 적용되면 측정오차가 4step의 경우에 41.542%로 감소됨을 확인하였다.

3) 위상 스텝수 증가와 위상차수 보정에 따른 측정오차를 비교 분석해 보았다.

참고문헌

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

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

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

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