

레이저 간섭계를 이용한 드릴링 머신의 틸트 측정

이승수, 손영지(동아대학교 대학원 기계공학과),
김순경(동의공업전문대학 자동차과),
전언찬(동아대학교 공과대학 기계공학과)

Tilt Measurement of Drilling Machine Using the Laser Interferometer

Sung Su Lee, Young Gi Son, Soon Kyung Kim, Eon Chan Jeon

Abstract

This paper describes a method of measuring tilt motion. This method measures the tilt motion of drilling machines using a laser interferometer, a simple sliding linear bearing, measurement of the probe and the LSC(least square center) method. The next order of business is discussing the procedure of measurement.

First, The measured position is considered to be the point of contact between the drill shank and the probe. The revolution of the drill axis delivers the point of contact to the probe. Second, because the laser interferometer is attached on the sliding linear bearing, any movement of probe influences laser reflector. Thus, the laser program displays the moving factor of laser reflector. Namely, this is tilt factor. Third, the points of measurement are a full circle which has 8 points (each are 45°), After it is finished measuring the 8 points, let the spindle of the drilling machine move down about 5 cm. Repeating this procedure three times, we can get tilt motion's values which are calculated by LSC method. Many error factors affect the accurate measurement of tilt motion. However in this paper we ignore some error factors because they are less significant than tilt motion.

1. 서론

공작기계는 현재의 반도체를 비롯한 광학부품, 정밀기계, 정보 및 항공우주 산업의 부품 등 소위 하이테크 산업에서 그 성능의 최고 정밀도를 요구하고 있다. 즉, 부품은 소형화, 고기능화되어 가고 있기 때문에 공작기계의 정밀도¹⁾는 서브미크론 단위를 넘어 나노미터(nm)단위를 필요하게 되었으며 이것을 정밀하게 측정하는 기술은 Stylus instrument method, SIM²⁾, SEM²⁾, 공간섭법^{3)~6)} 등의 발달에 따라 현저한 진보를 이루었다. 그러나, 드릴링 머신의 운동 정밀도를 측정할 수 있는 방법은 아직까지 큰 성과를 얻지 못하고 있다. 드릴링 머신의 운동정밀도에서는 1축 공작기계의 운동오차요소⁷⁾인 요(yaw), 롤(roll), 피치(pitch) 등으로 나타낼 수 있는데 사실상은 틸팅(Tilting)⁸⁾⁹⁾의 정밀도도 드릴링 머신에서 평가되어야 하는 항목중의 하나이다. 틸팅은 드릴이 회전할 때에 드릴날의 끝점이 일정한 궤적을 그리면서 회전운동

을 하는 것을 의미하며, 이것은 드릴링 머신의 회전축이 벨트장력의 영향을 받을 경우와 드릴 척에 드릴을 장치할 경우 척과 드릴이 일치하지 않을 때 발생한다. 이런 상태로 드릴링 작업을 수행하면 드릴링 머신의 자체 틸팅에 의해서 사실상 가공하려는 직경보다 큰 직경을 가공하게 되는데 이것은 가공오차의 요소로 작용하기 때문에 반드시 그 정밀도를 확인해 둘 필요가 있다.

따라서, 본 연구는 공작기계의 드릴링 작업시 틸팅 정밀도를 측정하기 위해서 비교적 오차가 심하다고 생각되는 탁상용 드릴링 머신을 대상으로 공작기계의 성능 측정방법중 공간섭법과 간단한 기구를 이용하여 드릴링머신의 드릴 작업시 틸트각을 측정해 내고자 한다.

2. 이론적 고찰

2.1 레이저 간섭계를 이용한 거리 측정의 원리

레이저 측정기에 의한 거리차 측정원리를 Fig. 1에 나타내었다. 레이저 측정기의 광원은 파장 안정화 He-Ne이고 레이저로부터 주파수가 f_1, f_2 로 서로 약간 다르고 그 편광면이 서로 직교하는 2개의 직선 편광광이 사출된다. 기준 비트신호를 얻기 위해 광속분리기(Beam splitter) BS로 광속의 일부분을 반사시키고 이를 광검출기 D1에 입사시켜 두 주파수 차이의 비트신호를 검출하고 증폭과정을 거친후 주파수 카운터에서 계수된다. 한편 광속 분리기를 통과하여 반사경이 부착된 간섭계(Interferometer)로 향한 빛은 간섭계에서 편광방향에 대응하여 투과광(f_2 성분)과 반사광(f_1 성분)으로 분리되어 반사광은 C2(반사경)에서 반사되고, 투과광은 C1(간섭계)에서 반사된 후 광속은 서로 합쳐져서 광소자 D2에 입사된다. 이때 C2를 속도 V 로 이동시키면 주파수 f_1 의 빛은 도플러 효과(Doppler shift)에 의해 $f_1 + \Delta f_1$ 으로 변조되고, 이렇게 바뀐 주파수 $f_1 + \Delta f_1$ 과 f_2 사이

에 맥놀이(beat)가 일어나 이 비트주파수 $|f_1 + \Delta f_1 - f_2|$ 이 광소자 D2에서 검출된다. 여기서 검출된 신호는 증폭과정을 거쳐 주파수 카운터에서 계수된 후 기준 비트신호 $|f_1 + \Delta f_1 - f_2|$ 와 비교하여 차이 Δf_1 을 구한다.

그런데 Δf_1 은 도플러 효과에 따라 발생한 변조량이므로 도플러 효과에서의 주파수(f_1)와 속도(V)에 대한 관계식은 식(1)과 같다.

$$\Delta f_1 = \frac{2Vf_1}{c} \quad (1)$$

여기서 c 는 빛의 속도(Beam speed)이다. 그리고 미소거리 L 은 식(2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$L = \int_0^t V dt = \int_0^t \frac{c}{2f_1} \Delta f_1 dt \quad (2)$$

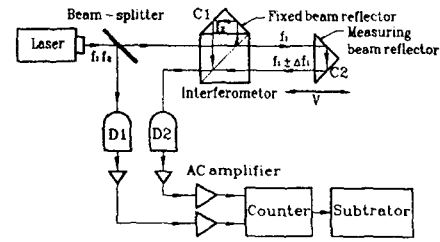


Fig.1 Principle of a laser interferometer applying to the measurement of differential distance

2.2 레이저를 이용한 드릴링 머신의 틸트각 검출원리

2.1에서 설명한 것처럼 레이저의 도플러 효과로 임의의 거리를 측정할 수 있다. 여기서는 LSC(Least Squares Center)¹⁰법을 이용한다. 즉 벨트와 방향에 원점을 지정한 후 측정 지점을 총 40개지점으로 8지점을 한 위치에서 측정하고 드릴링머신을 수직하방으로 이동하여 각각 8지점을 측정한다. 여기서 얻은 데이터를 기준으로 측정 드릴링머신의 운동오차를 측정한다. 우선 원의 궤적 $x^2 + y^2 = r^2$ 에서 오차성분을 얻기위한 원의 궤적울 식 (3)과 같이 둔다.

$$(x+a)^2 + (y+b)^2 - R^2 = E_i \quad (3)$$

식 (3)에서의 오차성분을 각각 편미분하면 식 (4)와 같이 된다.

$$\begin{aligned} \frac{E_i}{\partial a} &= \frac{(x+a)^2 + (y+b)^2 - R^2}{\partial a} \\ \frac{E_i}{\partial b} &= \frac{(x+a)^2 + (y+b)^2 - R^2}{\partial b} \\ \frac{E_i}{\partial R} &= \frac{(x+a)^2 + (y+b)^2 - R^2}{\partial R} \end{aligned} \quad (4)$$

- 여기서 a : x방향의 오차성분
- b : y방향의 오차성분
- R : 오차성분이 포함된 반경
- E_i : 오차성분

식 (4)에서 미지수 3개를 얻어내어 표시를 하면 식 (5)와 같은 드릴링머신의 원 궤적에서 오차성분이 포함된 오차 궤적을 얻을 수 있다.

$$(x+a)^2 + (y+b)^2 = R^2 \quad (5)$$

그런데 Fig. 2와 같이 틸트를 유발하는 요소는 두가지 있는데 그 하나는 측정시 얻어지는 중심의 변화에 의한 틸트각(θ_1)이고 또 하나는 직경의 변화에 의한 틸트각(θ_2)이다. 이들 각 성분은 수직으로 이동한 거리와 중심의 변화 그리고 직경의 변화로 틸트각을 유도할 수 있다.

$$\theta_1 = \tan^{-1} \frac{\sum_{n=1}^4 \Delta cd}{4 \cdot dl}, \quad \theta_2 = \tan^{-1} \frac{\sum_{n=1}^4 \Delta(r-R)}{4 \cdot dl}$$

(6)

여기서

Δcd : 원점에서 변화된 중심까지의 거리

θ_1 : 중심의 변화에 의한 틸트각

θ_2 : 반경의 변화에 의한 틸트각

dl : 계측한 위치 사이의 간격

$\Delta(r-R)$: 위치에 대한 직경의 차이이다.

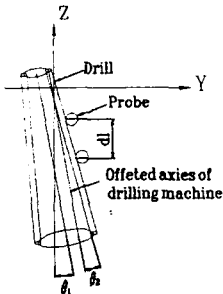


Fig. 2 Measuring principle of tilt angle for drilling machine

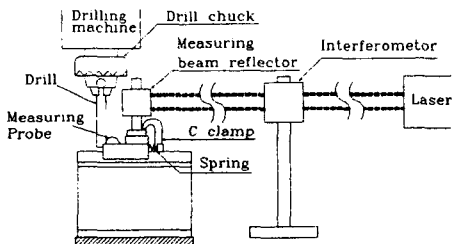


Fig. 3 Principle of the laser interferometer applying to the measurement of tilt angle for drilling machine

3. 오차의 검토

3.1 스프링의 탄성에 의한 오차

측정에 사용된 드릴링머신의 드릴 직경은 $\phi 5$ 로 이 드릴의 틸팅을 측정하기 위해 반사경을 부착시킨 기구에 스프링 1개를 연결하여 사용하였다. 스프링 탄성에 의한 오차는 식 (7)과 같이 구할 수 있다.

$$\delta = \frac{Pl^3}{3EI} \quad (7)$$

여기서

P : 스프링 탄성에 의한 하중

l : 측정지점의 드릴이 하중을 받는 거리

E : 드릴강의 영계수

I : 측정지점의 드릴 직경의 관성 모멘트

식 (7)에 의해 스프링의 탄성에 의한 처짐은 약 $0.074 \sim 1.028 \mu m$ 가 된다.

3.2 대기(온도, 습도, 기압)의 변화에 의한 오차

레이저 간섭계는 기온이 $1^\circ C$ 변화할 때, 기압이 $2.5mmHg$ 변화할 때 그리고 상대습도의 측정오차가 30% 변화할 때 측정길이의 변화는 $1 \mu m$ 정도이다. 즉, 측정 장소의 공기온도, 습도, 구성성분, 기압의 변화 등은 공기의 굴절률 변화를 유발하여 측정정밀도에 직결되는 레이저 파장의 변화를 일으키므로 이를 보정할 필요가 있다. 굴절과 파장의 관계식에서

$$n_0 \lambda_0 = n \lambda \quad (8)$$

여기서, n_0 : 진공중의 굴절률

λ_0 : 진공중의 파장

n : 측정 매질중의 굴절률

λ : 측정 매질중의 파장

으로 나타내어진다. 여기서 $n_0 = 1$ 이므로

$$\lambda = \frac{\lambda_0}{n} \quad (9)$$

이다.

He-Ne레이저의 진공중의 파장 632.991nm로부터 Edlen식¹¹⁾에 의한 굴절률 n 을 구하면 식(10)과 같다.

$$(n-1) \times 10^6 = [51.1475 \cdot P \times \left(\frac{1+1.33322 \times 10^{-4} \cdot P(0.817-0.0133 \cdot T)}{1+0.0036610 \cdot T} \right) - 7.47715 \cdot f_0 \cdot H \cdot 10^{-2}] \quad (10)$$

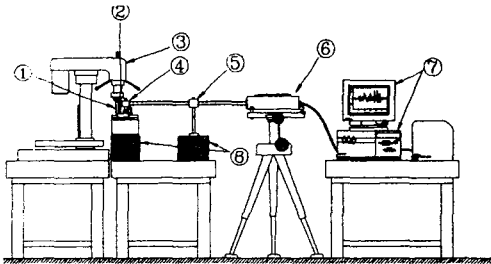
- 여기서, P : 기압(Pa)
- T : 온도(°C)
- f_0 : 포화수증기압(Pa)
- H : 상대습도(%)

이다. 그러나 위의 요소들은 레이저 장비에서 보정 파라메타로 보정할 수 있는 요소들이다.

4. 실험장치 및 방법

4.1 실험장치

Fig. 4는 탁상용 드릴링 머신의 틸트각을 측정하기 위한 실험장치의 개략도이다. 여기서, 측정장치로 사용된 것은 휴렛팩커드 5519A형 레이저이고, 측정용 프루브는 SUS304 스테인레스 환봉(φ9)이며 드릴과 점 접촉시 일어나는 마멸을 방지하기 위하여 스테인레스 환봉은 폴리싱하였다. 그리고 프루브를 고정시키는 간단한 기구의 직선 왕복운동은 직선베어링을 사용하여 측정기구에 장치하였다. 반사경은 직선 왕복운동을 하는 측정장치 위에 C클램프로 고정시키고, 간섭계는 진동을 피하기 위해서 제진장치 위에 고정시켰다. 측정 대상물은 다소 오차가 심한 탁상용 드릴링 머신으로 측정하였다.



① Drill ② Probe ③ Drilling machine ④ Reflector

- ⑤ Interferometer ⑥ Laser head ⑦ Computer
- ⑧ Damper system

Fig. 4 Schematic experimental equipment for measurement of drilling machine's tilting angle

4.2 실험방법

실험 방법은 Fig. 4와 같이 제진대 위에 직선 왕복운동을 할 수 있는 베어링을 고정 시키고 이 베어링 위에 측정용 프루브를 설치하였다. 그리고 탁상용 드릴링 머신의 척에 φ5짜리 드릴을 삽입하고 이 드릴의 shank부분에 측정용 프루브를 설치하여 8개의 측정 지점에서 측정된 값을 LSC법으로 한번 계산한 다음 측정위치를 수직하방으로 5mm내린 뒤 다시 같은 방법으로 측정한뒤 측정값을 식(4)와 식(6)에 대입하여 틸트각을 측정해 낸다.

5. 실험결과 및 고찰

본 실험에서는 한 위치에서 8점의 데이터를 얻고 5mm씩 수직으로 드릴 척을 이동시킨 뒤 같은 실험을 반복하였으며 여기서 얻은 결과는 Table 1과 같다.

Table 1 Value of measurement Unit : μm

| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
|------|------|-----|------|------|------|------|------|------|
| 8mm | 0 | 0.9 | 19.7 | 42 | 70.8 | 59.2 | 43.3 | 17.4 |
| 13mm | -2.4 | 0.8 | 24.2 | 44.3 | 75.3 | 64.6 | 43.6 | 16.2 |
| 18mm | -3.7 | 1.3 | 24.6 | 47.5 | 77.2 | 58.9 | 47.3 | 15.2 |
| 23mm | -5.2 | 2.8 | 29.1 | 52.2 | 79 | 58.1 | 42.0 | 14.3 |
| 28mm | -6.5 | 6.2 | 32.2 | 57.9 | 79.3 | 54.9 | 40.8 | 13.7 |

Table 1에서 얻은 결과치를 도식화하면 Fig. 5~9와 같다.

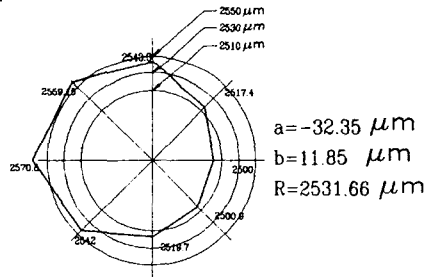


Fig. 5 Value of measurement at position 8mm

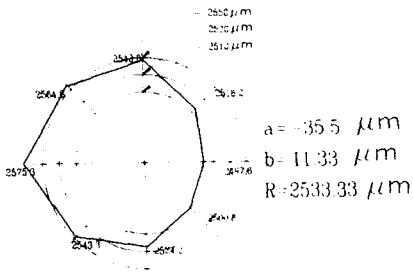


Fig. 6 Value of measurement at position 13mm

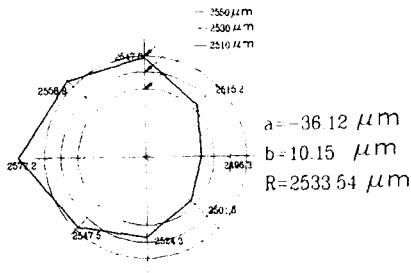


Fig. 7 Value of measurement at position 18mm

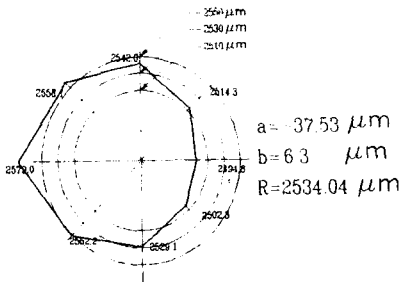


Fig. 8 Value of measurement at position 23mm

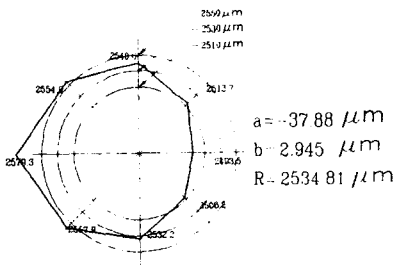
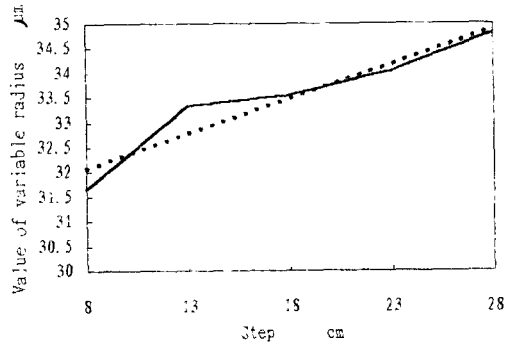


Fig. 9 Value of measurement at position 28mm

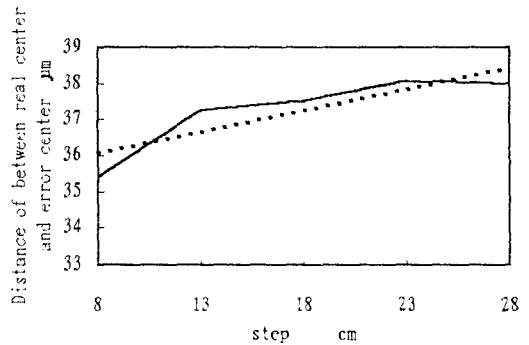
Fig. 5~9를 중심점의 변화와 반경의 변화를 도식화 하면 Fig. 10과 Fig. 11이 된다. Fig. 10은 반경의 변화를 도식화한 것으로 측정된 간격과 반경의 변화에 의해 θ_2 의 값을 얻을 수 있고, Fig. 11은 중심점의 변화를 도식화한 것으로 측정된 간격과 중심점의 변화에 의해 θ_1 의 값을 얻을 수 있다.



실선 : 얻은 데이터 값

점선 : 데이터의 경향선

Fig. 10 Value of variable radius for continuous step



실선 : 얻은 데이터 값

점선 : 데이터의 경향선

Fig. 11 Distance of between real center and error center for continuous step

Fig. 10과 Fig. 11에서 얻은 값을 식 (6)에 대입하면 θ_1 은 0.0056° (20.16 (arc) sce)이고 θ_2 는 0.009° (32.4 (arc) sec)이다. 여기서 θ_1 은 축이 수

적선상을 기준으로 기울어진 각도를 의미하고 θ_2 는 드릴이 척에 물리는 상태가 불안정하기 때문에 발생하는 것으로 유추되며 이결과를 도식화하면 드릴링 머신은 Fig. 12와 같은 운동을 한다고 생각된다.

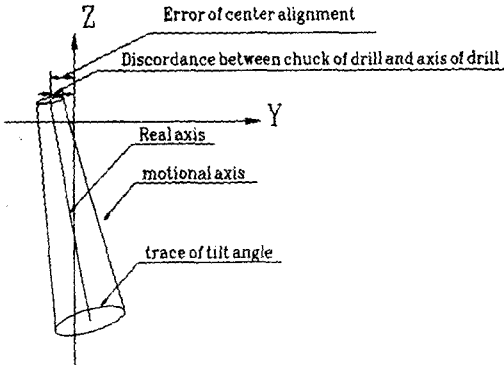


Fig. 12 Tilt angle of drilling machine and motional error

6. 결론

드릴링 머신의 틸트각을 측정하기 위하여 측정용 프루브와 레이저 측정장비를 이용하여 실험을 하였으며 그 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 레이저 간섭계를 이용하여 드릴링 머신의 틸트각을 검출할 수 있는 시스템을 개발하였다.
2. 드릴링 머신의 틸트성분에는 벨트의 장력에 의한 축의 휨과 드릴 축과 드릴 척이 불일치된 상태 즉, 중심정렬이 일치되지 않는 상태에서 회전하는 현상까지 동시에 작용한다는 것을 알 수 있었다.
3. 본 측정 시스템을 이용하면 수직방향으로 운동하는 각종 회전축 및 수평방향으로 운동하는 공작기계의 틸트량을 쉽고 간단하게 측정할 수 있다.

참고 문헌

1. 강철희, "공작기계기술의 현재와 미래(4)", 한국정밀공학회지, vol. 12, No 7, pp. 5~18, 1995.
2. 市ノ川竹男, "SEMとSTMの複合機", 精密工學會誌, pp. 1835~1840, 1987. 12
3. 植木正明, 大岩彰, "ヘテロダイン干渉法による油マノメータの液位差の精密測定", 精密工學會誌, vol. 58, No. 1, pp. 120~126, 1992
4. 안근식, 장경영, 문화관, "광간섭법을 이용한 절대높이 측정 정밀도 향상에 관한 연구", 한국정밀공학회 추계학술대회논문집, pp. 493~498, 1994
5. 정종수, 신동수, "NC 공작기계를 위한 레이저 이용 자동오차 측정 및 보상", 한양대학교 기계기술연구소 논문집, vol. 1, pp. 103~118, 1995.
6. C. R. Steinmets, "Sub-micron Position Measurement and Control on Precision Machine Tools with Laser Interferometry", Precision Engineering, vol. 12, No. 1, pp. 12~24, 1990.
7. 박준호, "정밀측정시스템공학", 야정출판사, pp. 205~206, 1993
8. Ernest O. Doebelin, "Measurement Systems Application and Design", McGraw-hill International Editions, pp. 344~345, 1990.
9. 이승수, 손영지, 전언찬, "레이저 간섭계를 이용한 드릴의 틸팅에 관한 연구", 대한기계학회 부산지부/공기조화 냉동공학회 부산·경남지부 춘계학술대회논문집, pp. 110~117, 1996.
10. 이징구, 이종대, "정밀측정학", 기전연구소, pp. 302~303, 1995.
11. Hewlett Packard user meeting catalogue, "Laser Measurements in the Shop", Hewlett Packard, pp. 35~36, 1996.