

원호검사법을 이용한 진원도 측정 방법의 개선에 관한 연구

이승수*, 김민주*, 전언찬**

A Study on the Improvement of Circularity Measurement Using Circular Test Method

Seung-Su Lee*, Min-Ju Kim*, Eon-Chan Jeon**

Abstract

A study for the circularity of machine tool is classified into two ways. One is to measure the circularity of machine tool by a existing measuring device. The other is to measure the circularity by remodeling the existing measuring device.

We will improve on measurement of circularity using circular test method by a two-dimensional probe and a master ring for machining tools and investigate influence of trigger method, acceleration, data sampling.

Key Words : Circularity(진원도), Machine Tool(공작기계), Two-dimensional Probe(2차원 프루브), Master Ring(기준원반), Circular Test Method(원호검사법)

1. 서론

공작기계의 정밀도 측정에 관한 연구는 대단히 많이 이루어지고 있다⁽¹⁻³⁾. 그 중 진원도의 측정에 관한 연구는 크게 두가지로 나눌 수 있는데, 하나는 기존의 측정기를 이용하여 공작기계의 진원도를 측정하는 것이다. 그리고 또 하나는 기존의 측정기(1차원 프로브)를 개조 혹은 특수 제작하여 진원도를 측정하는 형태로서 진원도 측정방법을 개선하는 것이다. 전자의 방법은 서울대학교 박희재 교수팀에 의해 진행되고 있고^(4,5), 후자의 경우는 일본 동경농공대 Tsutsumi

교수팀에 의해 진행되고 있으며⁽⁶⁾ 어느 정도의 성과를 거두고 있다. 특히 Tsutsumi 교수팀의 연구에서는 로타리 엔코더를 공작기계의 스피indle에 삽입하여 원호보간에 따른 진원도를 측정하고 있다.

ISO 230-1 및 230-2에서 규정해 놓고 있는 진원도 측정에 관한 방법은 1차원 프로브에 의한 방법, 2차원 프로브와 기준원반에 의한 원호검사법(Circular test method)⁽⁷⁾ 및 Double Ball bar법(MBB법⁽⁸⁾ 또는 DBB법이라 한다)등 세가지가 있다. 그리고 일본의 Tsutsumi 교수가 개발한 $r\theta$ 법이 진원도 측정에 사용되고 있다⁽⁶⁾.

* 동아대학교 대학원 기계공학과
(이승수 matisses@lycos.co.kr)

** 동아대학교 기계·산업시스템공학부

1차원 프로브에 의한 방법은 X-Y 테이블 위에 고정된 물체와 주축에 고정된 물체 사이를 암(arm)으로 연결하고, 이 암에 변위계를 설치하여 주축을 중심으로 회전하는 테이블의 변위를 측정하는 방법이다. 이것은 측정방법이 간단하여 범용 변위계로 이용한다는 장점이 있으나 회전각의 검출이 어렵다. 그리고 원호 검사법은 주축에 고정시킨 2차원 프로브를 기준원반에 접촉·회전시켜 X, Y방향의 변위를 검출하는 것으로서 임의의 직경을 측정할 수 있는 장점이 있다. 한편 MBB법은 양단에 강구(steel ball)를 장착시킨 신축이 자유로운 바(bar)와 강구를 지지하기 위하여 영구자석이 내장된 소켓으로 구성된다. 두 개의 강구 사이에 생기는 상대거리의 변화를 바에 내장된 변위계로 검출한다. 이 방법은 X-Y 평면뿐만 아니라 Y-Z 평면 및 Z-X 평면도 측정가능한데 측정반경에 제한이 있는 단점이 있다. 이것을 보완하기 위하여 최근에는 바를 연장할 수 있도록 하였다. 그리고 $r\theta$ 법은 1차원 프로브에 의한 측정방법을 개량한 것으로서 축에 로타리 엔코더를 부착시켜 회전각을 검출할 수 있게 하였다.

본 연구에서는 2차원 프로브와 기준원반을 이용한 원호 검사법을 이용하여 기존 진원도 측정법과 다른 새로운 측정법에 대하여 연구하고, 그 유효성을 검증하고자 한다.

2. 이론적 해석

2.1 진원도에 관한 이론적 해석

스위스의 W. Knapp에 의하여 제안된 원호 검사법⁽⁴⁾은 2차원 프로브와 기준원반에 의하여 진원도를 측정한다. 하지만 이 방법은 회전각의 검출이 되지 않는 것과 초기 변위(보통 40 μm) 보다도 큰 변위가 생기면 기준원반과 스타일러스(stylus)가 떨어져 버리는 결점이 있다.

2차원 프로브에 의한 일반적인 측정시스템은 Fig. 1과 같다. 즉, 기준 원반에 접촉한 프로브의 변위는 증폭기에서 증폭된 다음 저 대역 필터(Low pass filter)를 거쳐서 A/D 컨버터로 변환시킨 후 컴퓨터에 입력되어 데이터가 처리된다. 이후 측정결과는 CRT화면에 나타나고 프린터로 출력 가능하다. 여기서 문제가 되는 것은 이송운동과 데이터 샘플링(data sampling)의 동기를 어떻게 행하느냐는 것이다. 동기 타이밍이 맞지 않으면 원호형상이 원주 방향으로 치우쳐서 그려진다든지, 상한변환시에 일어나는 스틱모션(stick motion)의 위치가 한쪽으로 기울어져서 그려진다. 이러한 문제점을 해결하기 위하여 리미트 스위치(limit switch)를

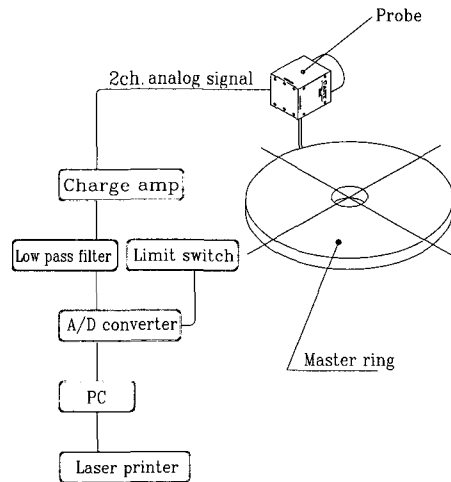


Fig. 1 Measuring system

사용하여 이송운동의 개시와 종료 시간을 정기적으로 검출하여 동기시킨다. 그런데 이 방법은 프로브의 스타일러스와 기준원반이 접촉한 상태에서 리미트 스위치가 ON으로 되는 사이의 데이터는 입력되지 못한다. 따라서 이것이 오차에 포함되어 정확한 데이터를 얻지 못한다.

2.2 레이저를 이용한 거리-속도 측정의 원리

레이저 측정기에 의한 미소거리의 측정원리를 Fig. 2에 나타내었다. 기준 비트신호를 얻기 위하여 광속분리기(beam splitter)로 광속의 일부분을 반사시키고 이를 광검출기 D1에 입사시켜 두 주파수차이($f_1 - f_2 = 2.204 \text{ MHz}$)의 비트신호를 검출하고, 간섭계와 반사경을 거처 주파수는 반사경의 전후운동에 따라 도플러 효과에 의해 위상차를 가진 채로 D2에 입사되어 거리를 구할 수 있다.

그런데 Δf_1 은 도플러 효과에 따라 발생한 변조량이므로 도플러 효과에서의 주파수와 속도에 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.

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

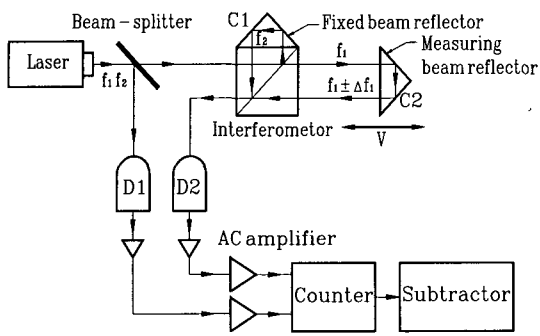


Fig. 2 Principle of a laser interferometer for the measurement of differential distance

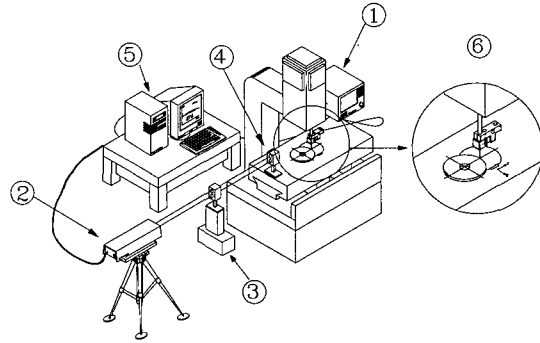


Fig. 3 Schematic of measurement system

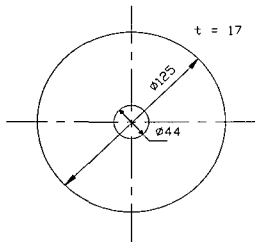


Fig. 4 Master ring

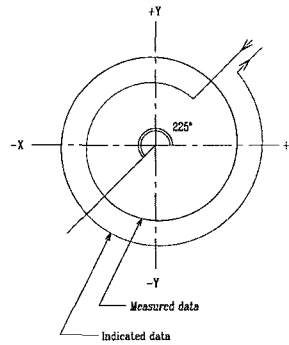


Fig. 5 Visual indication of measuring method

위 식들에서 구해지는 미소거리 L 을 시간으로 나누어 속도를 구할 수 있으며, 이를 다시 미분하여 가속도를 구할 수 있다.

3. 실험장치 및 방법

3.1 실험장치

본 실험의 실험장치는 Fig. 3에 나타난 바와 같다. ①은 측정 대상인 머시닝센터로서 일본 도시바의 것을 사용하였고, ②는 테이블의 가속속을 측정하기 위하여 사용한 휴렛 팩커드사의 HP5529A 레이저 측정기이며, ③은 측정 킷트인 레이저 인터페로메터이고 ④는 리니어 리트로리플렉터(Linear retroreflector)이다. 그리고 ⑤는 측정된 데이터를 분석, 저장, 디스플레이할 수 있는 컴퓨터 시스템, ⑥은 진원도를 측정하는 장치이다.

진원도 측정에 사용된 기준원반은 Fig. 4에 나타난 바와 같이 내경 $\phi 44$, 외경 $\phi 125$ 그리고 두께 $t = 17\text{mm}$ 로 셋팅하였다.

3.2 실험방법

본 연구에서는 기계의 이송운동의 시작과 측정 개시의 동기를 리미트 스위치를 사용하지 않고 2차원 프로브에서 나오는 아날로그 신호를 트리거(trigger)에 이용하여 동기시켰다.

그리고 가속도에 의한 원호 형상의 일그러짐을 없애기 위하여 2차원 프로브를 720° 회전시켰다. 그 가운데 가속도의 영향을 받지 않을 것으로 생각되는 360° 분의 데이터를 표시하는 프로그램을 작성하였다. 이때 상한변환에 따른 backlash의 영향이 있을 것으로 생각되어 Fig. 5에서와 같이 45° 의 위치에서 2차원 프로브를 접촉시켜 측정을 시작하고 225° 의 위치에서 360° 분의 데이터를 표시하는 방법을 취하였다.

4. 실험결과 및 고찰

4.1 새로운 시스템의 적용

본 측정시스템은 2차원 프로브에서 검출된 아날로그 신호를 트리거 신호로 이용하였다. 그렇기 때문에 Fig. 6에 나

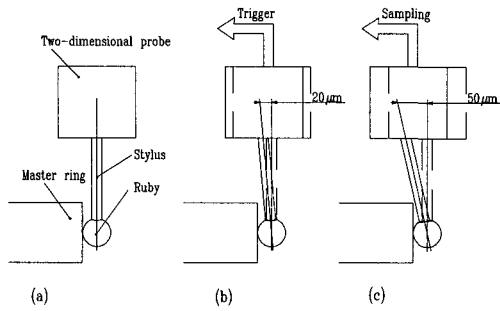


Fig. 6 Movement of stylus

타넨 주축에 부착시킨 2차원 프로브는 NC프로그램에 의해 초기변위량이 50µm 변위하고 나서 원운동을 행하도록 하였으며, 2차원 프로브의 변위가 20µm가 넘으면 트리거가 걸리며 측정을 하도록 하였다. 그 이후는 기계가 등속도 운동을 하고 있다고 가정하여 일정시간마다 데이터를 샘플링하였다.

그런데 기계의 이송운동은 가속속을 하기 때문에 가속할 때와 감속할 때는 등속도 운동을 한다고 할 수 없다. 그러나 기존의 CT법에서는 기계가 등속도 운동하고 있는 것으로 가정하고 샘플링 시간을 설정하였다. 그러나 실제 이송운동은 가속속의 영향에 의해 산출된 시간보다 많은 시간이 걸리므로 Fig. 7에 나타낸 바와 같이 여분으로 걸린 시간의 데이터는 없애버린다.

이와 같이 없애버린 데이터를 보충하기 위하여 데이터를 연장하여 360°로 전개한다. 따라서 동기는 정확하게 이루어지지만 상한변환에 따른 스틱모션(stick motion)의 표시 위치가 약간 뒤쪽으로 나타나며, 원호형상이 조금은 일그러져서 나타난다. 이러한 문제점을 해결하기 위하여 본 측정

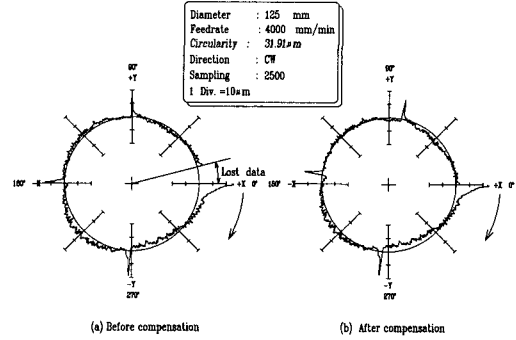


Fig. 7 Lost data by acceleration

시스템에서는 원운동을 720°시켜 그 가운데 가속속의 영향을 받지 않을 것으로 생각되는 부분에서 360°분의 데이터를 취하는 것으로 하였다.

본 측정시스템에 의한 측정결과를 Fig. 8에 나타내었다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이 스틱모션의 위치가 각 좌표축에서 약간씩 벗어나서 원주방향으로 치우쳐있다.

따라서 스틱모션의 위치가 각 좌표축과 일치하지 않는 원인으로서는 트리거의 영향, 가속속의 영향 등을 열거할 수 있으며 이들에 대한 해석과 그 보정방법에 대하여 논하였다.

4.2 트리거의 영향

본 시스템은 2차원 프로브가 20µm 변위하면 트리거가 걸려서 샘플링을 시작한다. 그런데 이 경우 트리거가 걸리고 나서 2차원 프로브가 초기변위량 50µm에 도달할 때까지의 30µm 구간에서 이미 데이터를 샘플링하고 있다. 이 구간에서 샘플링한 데이터는 버려야 하므로 이 때 샘플링한 갯수는 알아야 한다.

n 을 트리거에 의해 잃어들은 데이터의 수라고 하면

$$n = \frac{t_0 \cdot N}{L} F \quad (3)$$

여기서 n : 트리거의 영향으로 잃어들은 데이터의 수

t_0 : 프로브가 30µm 이동하는 동안의 시간(s)

N : 샘플링 수

L : 기준원판의 원주길이 (mm)

F : 이송속도 (mm/min)

식 (3)과 같이 트리거의 영향으로 잃어들은 데이터의 수는 이송속도에 관한 1차식으로 되며, 이것은 원호보간 운동

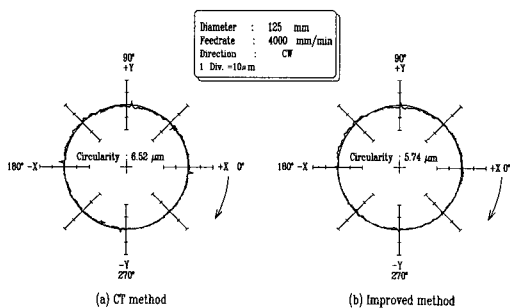


Fig. 8 Comparison of CT method and improved method

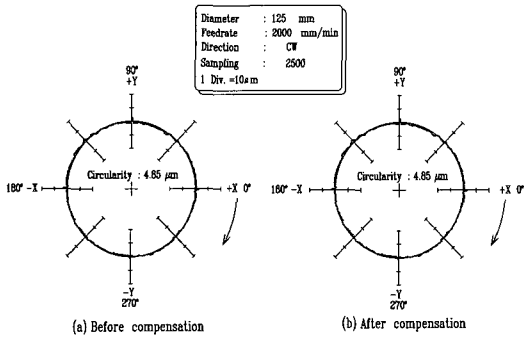


Fig. 9 Result of compensation

하기 이전의 데이터이다. 따라서 측정에 의해서 얻어진 N개의 데이터 가운데 처음부터 n개까지의 데이터를 없애고 360° 분에 해당되는 데이터를 표시하도록 보정하였으며 그 결과를 Fig. 9에 나타내었다. 그림에서와 같이 트리거에 의한 영향은 원호형상이 원주방향으로 치우치는데 그다지 큰 영향을 미치지 않음을 알 수 있다.

4.3 가감속에 의한 영향

기존의 원호검사법에서는 기계가 등속도운동을 하고 있다고 가정하였으나 실제 기계의 이송운동에는 가감속이 있으므로 원호형상이 일그러진 형태로 나타난다. 이것을 조사하기 위하여 공작기계의 X축과 Y축에 관한 직선운동의 속도와 가속도를 측정하였으며 그 측정방법은 Fig. 3과 같다. 즉, 공작기계의 테이블에 간섭계를 부착시키고 주축에 반사경을 부착시켜 1축만을 20mm씩 직선보간운동시켜 시간에

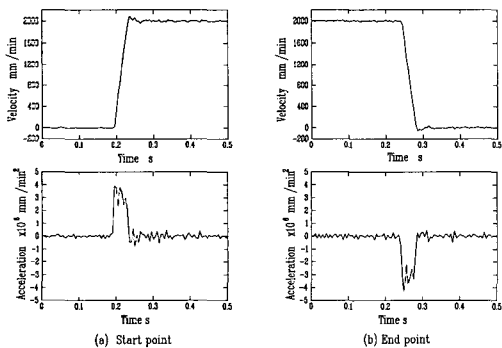


Fig. 10 Velocity and acceleration in linear motion (Feedrate : 2000 mm/min, X axis)

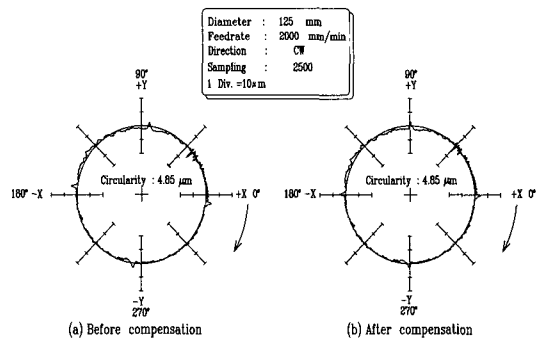


Fig. 12 Result of compensation

대한 거리를 측정하였다. 얻어진 데이터는 시간에 대하여 미분하여 속도를 구하고, 이렇게 하여 얻은 결과를 Fig. 10과 Fig. 11에 나타내었다. 그림에서와 같이 기계는 가감속하는데 시간이 걸리므로 등속도운동이라고 가정한 것과는 차이가 나며 이 차이가 보정해야 할 값이다.

이송속도에 따른 보정해야 할 데이터의 수는 Table 1에 나타난 바와 같으며 측정하여 얻어진 데이터 수에 여기서 구한 데이터 수를 빼면 가감속에 의한 영향을 배제시킨 결과가 된다. 가감속에 의한 영향을 배제한 결과를 기준원상에 전개하면 Fig. 12와 같다. 그림에서와 같이 스틱모션의 위치가 각 좌표축에 거의 일치하고 있다. 따라서 진원도의 측정결과가 원주방향으로 회전하여 그려지는 원인은 가감속에 의한 영향이 크다는 것을 알 수 있다. 따라서 축의 단위시간당 이동량을 알고 기계의 속도와 가속도를 구하면 가감속의 영향을 줄일 수 있다고 생각된다.

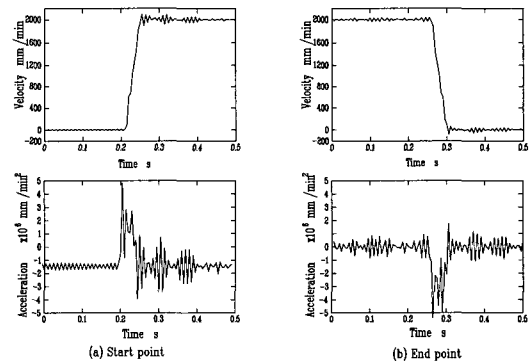


Fig. 11 Velocity and acceleration in linear motion (Feedrate : 2000 mm/min, Y axis)

Table 1 가속시간과 가감속에 의한 보정데이터수

F(mm/min)	X		Y	
	Δt (s)	n	Δt (s)	n
2,000	54.95	3	54.95	3
4,000	89.66	10	89.66	10

F : 이송속도(mm/min)
 Δt : 가속시간(s)
 n : 보정 데이터 수

4.4 다른 방법과의 비교

Fig. 13은 일반적인 원호 검사법에 의한 것과 본 측정시스템을 이용한 결과를 비교한 것이다. 진원도의 크기가 일반 CT법에서는 8.39 μ m인데 비하여 본 측정시스템을 이용한 것은 4.25 μ m로서 작다. 그리고 일반 CT법은 스틱모션의 위치가 원주방향으로 치우쳐있으며, 측정개시 위치에 생긴 돌기가 진원도에 큰 영향을 미치고 있음을 알 수 있다.

Fig. 14는 $r\theta$ 법과 본 측정시스템에 의한 결과를 비교한

것이다. 그림에서와 같이 진원도의 형상과 크기가 비슷하게 나타났다. 따라서 진원도의 측정에서는 본 시스템과 $r\theta$ 법이 거의 유사한 성능을 가지고 있다고 할 수 있다.

5. 결론

원호 검사법을 기준으로 하여 머시닝센터의 진원도 측정 방법에 대하여 새로운 측정방법을 연구하였으며, 여기서 연구된 측정방법을 이용하여 진원도에 관한 측정을 한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 기존의 원호검사법에서 아날로그 신호를 트리거 신호로 이용함으로써 진원도를 정확하게 측정할 수 있었다.
- (2) 원호보간운동을 720° 시킨 가운데 360° 분의 데이터만 취하는 것에 의해 가감속의 영향에 의한 진원도 형상의 변형을 막을 수 있었다.
- (3) 본 측정시스템은 다른 측정시스템과 비교하여 동등 이상의 신뢰도를 얻을 수 있었다.

참고 문헌

- (1) 김영석, "NC공작기계의 운동정도 측정에 관한 연구," 한국공작기계학회지, Vol. 7, No. 1, 1998. 2.
- (2) 박정보, 김민주, 전언찬, "레이저를 이용한 테이블의 처짐 측정과 시뮬레이션에 관한 연구," 한국공작기계학회지, Vol. 8, No. 6, 1999. 12.
- (3) 이승수, 전언찬, 김민주, "CNC 공작기계용 볼스크류의 열팽창 억제에 관한 연구," 한국공작기계학회지, Vol. 7, No. 4, 1998.
- (4) Heujae Pahk, Jonghoo Kim, "Application of Micro-computer for Assessing the Probe Lobing Error and Geometric Errors of CMMs Using Commercial Ring Gauges," Int. J. of Adv. Manuf. Tech., Vol. 10, pp. 208 ~ 218, 1995.
- (5) 박희재, "정밀도 성능 평가를 위한 3차원 측정기 수치 모델 개발," 대한기계학회논문집, Vol. 20, No. 3, 1996.
- (6) 堤正臣, "NC工作機械の運動の新しい測定方法," 日本機械學會論文集, Vol. 58, No. 545, pp. 271 ~ 276, 1992.
- (7) W. Knapp, "The Circular Test for Testing NC-Machine Tools," Zurich, Switzerland, 1986.
- (8) J. B. Bryan, "A Simple Method for Testing Measuring Machines and Machine Tools, Part1: Principles and Application," Precision Engineering, Vol. 4, No. 2, pp. 61 ~ 69, 1982.

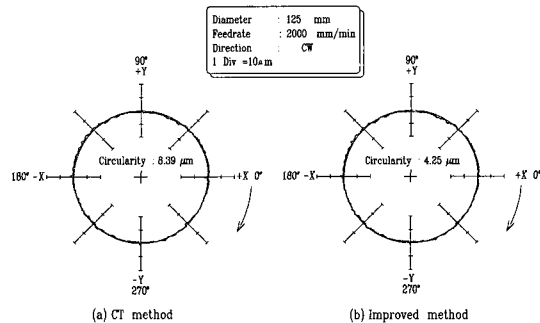


Fig. 13 Comparison of CT method and improved method

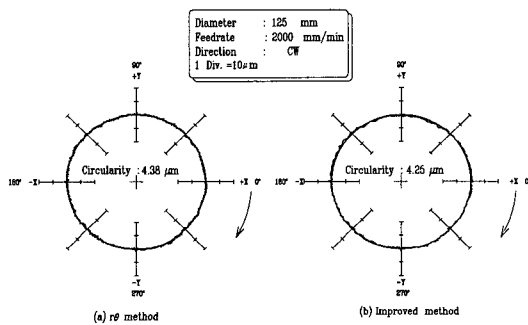


Fig. 14 Comparison of $r\theta$ method and improved method