

반복학습에 의한 CNC 머시닝 센터의 원호 보간 오차 보정

최종호, 유경열, 장태정

서울대학교 제어측정공학과, 제어측정기술연구소, 자동화시스템공동연구소

Circular Interpolation Error Reduction of a CNC Machining Center by Iterative Learning

Chong-Ho Choi, Kyeong-Yeol Yu, and Tae-Jeong Jang

Dept. of Control & Instrumentation Eng., Seoul National University,
Automation and Systems Research Institute, ERC-ACI by KOSEF

Abstract

The errors in machining process by CNC machining center are due to many elements, such as the delay of the servo drivers, friction and the gain mismatch between x-axis and y-axis motors and so on. We made a counter circuit to measure the output of motor encoders for the motion error analysis of a CNC machining center, and have measured the errors experimentally when the CNC performs a circular interpolation. We have also used an iterative learning method to reduce the radius errors and stick motion errors generated by the CNC machining center performing a circular interpolation. The proposed learning scheme worked well and the circle obtained has smaller error.

1. 서론

NC 공작기계는 1960년대에 이르러 NC 장치의 신뢰도가 크게 증가됨으로써 이루어질 수가 있었으며 현재의 정밀한 공작 기계에는 거의 사용되고 있다.

그러나, 지금까지의 CNC 공작 기계에서는 고정밀도와 고속 가공을 동시에 실현시키는데 있어서 여러가지 문제가 있었다. 가공 속도를 올리면 가공속 회로와 서보 기구 구동계의 지연량이 증가하여 가공 형상의 오차가 발생한다[1]. 가공의 정밀도를 향상시키기 위하여 앞먹임(feedforward) 제어[2,3], 예견 제어(모서리 부분의 자동 가공속 제어, 선행정도 제어), 적응 제어, self tuning(기계 특성의 시간 경과에 따른 변화 보정), 속도 관측자(observer), 외란 관측자(disturbance observer)에 의한 견실(robust) 제어, 비선형 보상 제어(정지 마찰 보정에 의한 원호, 상한 절환부의 고속 응답성 확보), 학습제어 등의 방법들이 실용화 또는 연구되고 있다.

오차의 보정을 위해서 ZPETC(zero phase error tracking controller)를 앞먹임 필터로 사용하는 경우도 있다[2,3]. CNC 머시닝 센터의 원호 보간 오차 측정에는 1차원 프로브(probe)나 DBB(Double ball bar)를 이용하여 측정하는 법이 소개되

었다[4,5]. 본 연구에서는 CNC 머시닝 센터의 원호 보간 오차 측정을 위해 모터의 인코더 펄스를 세는 간단한 측정 장치를 제작하여 이를 TNV-40 머시닝 센터에서 원호 보간을 수행하여 오차를 측정하였다. 사용한 TNV-40 머시닝 센터의 주요 제원은 다음과 같다.

- 최소 이송 단위 : 0.001 mm
- 이송 속도 단위 : 1 - 10000 mm/min.
- Step 이송 : 0.001, 0.01, 0.1, 1 mm/min.
- Controller : FANUC Series 0-M
- AC servo motor : A06B-0314-B032 (Standard type absolute pulse coder with 2500 pulse/rev.)

위와 같은 방법으로 오차를 측정한 후 반복학습에 의해 오차를 보정한다. 반복학습[7-10]은 제어대상 플랜트에 대하여 유한한 시간 동안 임의의 원하는 출력이 있다고 할때 이러한 원하는 출력을 정확하게 따라가게 할 수 있는 플랜트의 입력을 구하는 것이다. 즉 k번째 가한 입력에 대한 플랜트 출력과 원하는 출력과의 오차를 가지고 k+1번째 가할 입력을 구하는 것이다. 이 논문에서는 FANUC controller 내부의 제어 신호를 다루는 것은 어려우므로, 원호 보간시 가장 정확한 원형 가공할 수 있는 경로를 반복학습에 의해 구하여 CNC 머시닝 센터의 지령으로 넣어주는 방식을 취한다. 이렇게 하여 원호 보간시의 오차가 줄어들 수 있음을 실험에 의해 확인하였다.

2. 정도측정기의 구성

현재 TNV-40 머시닝 센터는 반폐루프 제어기(semi-closed loop type)이다. 이것은 거리를 측정하는 것이 아니라, 모터의 인코더에서 나온 신호로 경로 오차를 계산하여 새로운 지령을 넣어주는 방식이다.

본 연구를 위해 개발된 원호 보간 측정장치는 CNC의 X축과 Y축의 인코더에서 나오는 신호를 카운터에서 세어 실제 모터의 회전정도를 알아내는 방식이다. 실제로 반폐루프 제어기에서는 이 신호를 읽어 제어 신호를 만들고 있기는 하지만 외부의 컴퓨터에서도 이 신호를 사용하기 위해서는 별도의 회

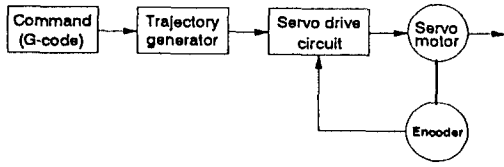


그림 2.1 반폐루프 제어기의 구조

로가 필요하다. 그림 2.2에서와 같이 인코더의 A상과 B상은 90도의 위상차가 있고 이를 인코더 카운트 전용 IC인 HCTL-2020의 입력으로 넣어주면 그림 2.2에서의 4x 펄스가 발생하여 이를 세게 된다. 실험대상 CNC 머시닝 센터의 모터는 AC 서보모터(모델명:A06B-0914-B032)로 1회전당 2500개의 펄스가 발생하지만 IC내에서 이를 4배한 펄스가 만들어지므로 실제로는 10000 pulse/rev.이 되며 TNV-40의 볼 스크류 피치가 10mm/rev.이므로 1 펄스는 1 μm의 이송을 의미하게 된다. 전체적인 반복학습 제어기의 구성은 그림 2.3과 같다:

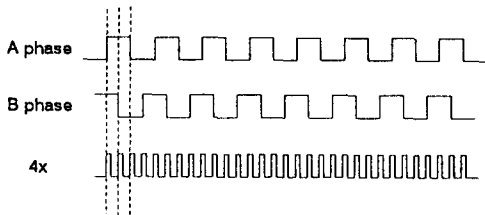


그림 2.2 인코더의 A상 B상 펄스 및 4x 펄스

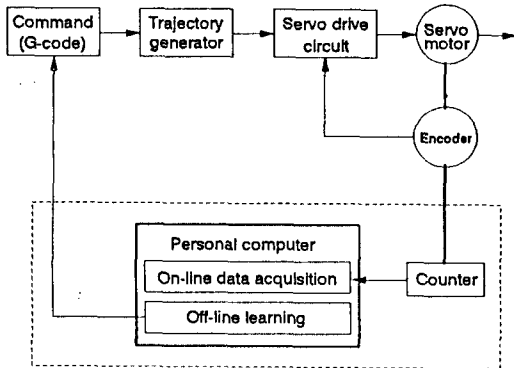


그림 2.3 반복학습 제어기의 구성

3. 원호 보간시의 운동오차

3.1 원호 보간시의 반경 감소

원호 보간시는 그림 3.1에서 보는 것과 같이 가공시 실제 지령치보다 더 작은 원호 가공하는 반경 감소가 일어난다. 원호 보간시의 반경 감소는 가속속 회로와 서보 기구 구동계의 뒤처짐 요소가 원인이 된다. 가속속 회로와 서보 기구 구동계

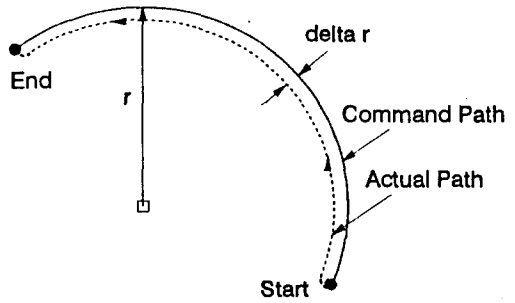


그림 3.1 원호 보간시의 반경 감소

를 1차 지연 시스템으로 볼 때 블록 선도(block diagram)는 그림 3.2와 같다.

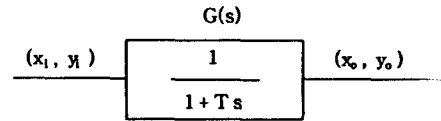


그림 3.2 가속속 회로와 서보 기구 구동계의 블록 선도

여기에서 T는 전체 시스템의 시정수(time constant)이고 (x_1, y_1) 는 입력, (x_0, y_0) 는 출력, 그리고 G(s)는 폐루프 전달함수(closed-loop transfer function)를 각각 나타낸다. R을 지령 반경, ω 를 각속도 라고 하며 시간에 따른 X축 Y축의 입력이 다음과 같을 때 원호 가공하게 된다.

$$\begin{aligned} x_1(t) &= R \cos(\omega t), & y_1(t) &= R \sin(\omega t) \\ x_1(0) &= R, & y_1(0) &= 0 \\ x_1'(0) &= 0, & y_1'(0) &= 0 \end{aligned} \quad (1)$$

이 때의 실제 출력은 전체 시스템을 통과한 후의 출력이므로 다음과 같이 나타난다.

$$X_0(s) = G(s)X_1(s) = \frac{1}{1 + Ts} \frac{Rs}{s^2 + \omega^2} \quad (2)$$

따라서 반경 감소량 ΔR 은

$$\Delta R = R[1 - (T^2\omega^2 + 1)^{-1/2}] \quad (3)$$

로 주어지며 [1] 이를 테일러 전개식(Taylor series)으로 전개하여 1차항만 취하면 다음과 같다.

$$\Delta R \approx \frac{F^2 T^2}{2R} \quad (4)$$

여기서 F은 이송 속도(feedrate)를 나타낸다. 이로부터 반경 감소량 ΔR 은 이송 속도의 제곱에 비례하고 가공 반경 R에 반비례함을 알 수 있다.

3.2 실험 결과

위에서 보인 반경 감소량을 몇가지 경우에 대해 실험적으로 측정해 보았다.

3.2.1 이송 속도에 따른 원호 보간시의 오차

같은 크기의 원(반지름 50mm인 경우)을 서로 다른 이송 속도로 가공을 하였을 때의 오차를 그림 3.3 - 3.5에 나타내었다. 3.1절에서 보인 바와 같이 이송 속도에 따라서 오차가 커짐을 볼 수 있다. 그림 3.6에서는 이때의 평균 반경 오차(원하는 반경과 점착운동(stick motion)을 뺀 부분의 평균 오차)와 점착운동시의 오차(오차가 최대 되었을 때에서 가장 작은 부분을 뺀 오차)를 보인 것이며 거의 이송 속도의 제곱에 비례하여 오차가 커짐을 볼 수 있다. 그림 3.7은 점착운동이 생기는 구간의 각도 크기를 이송 속도에 따라서 보여준 것이다.

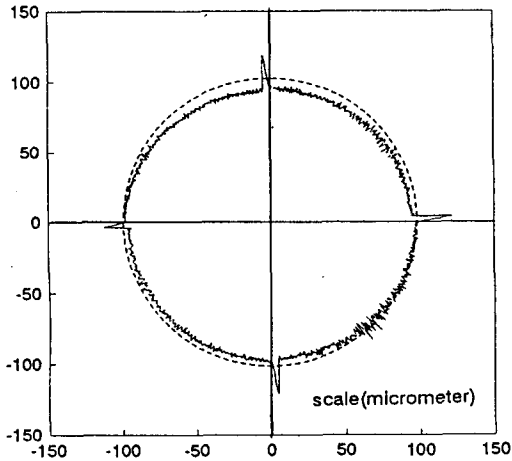


그림 3.3 이송 속도 500 mm/min.인 경우의 반경 오차

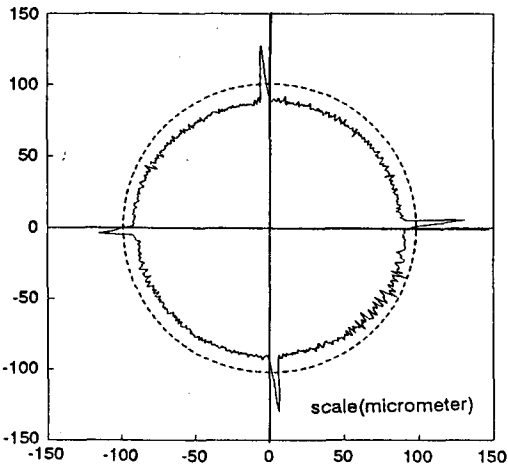


그림 3.4 이송 속도 1000 mm/min.인 경우의 반경 오차

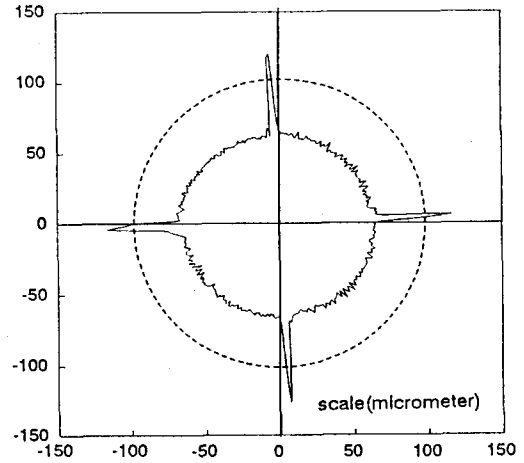


그림 3.5 이송 속도 2000 mm/min.인 경우의 반경 오차

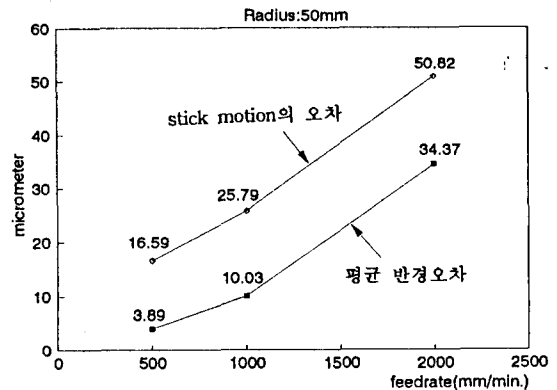


그림 3.6 이송 속도에 대한 반경 오차 및 점착운동의 오차

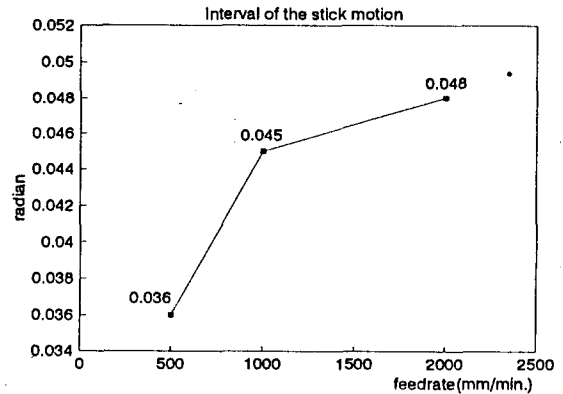


그림 3.7 이송 속도에 대한 점착운동 구간의 각도

3.2.2 가공 반경에 따른 원호 보간시의 오차

서로 다른 크기의 원을 동일한 이송 속도(이송 속도 500mm/min.인 경우)로 가공을 하였을 때의 오차 특성을 그림 3.8 - 3.10에 나타내었다. 역시 3.1절에서 밝힌 바와 같이 반경 감소량은 가공 반경 R에 반비례함을 볼 수 있다. 그림

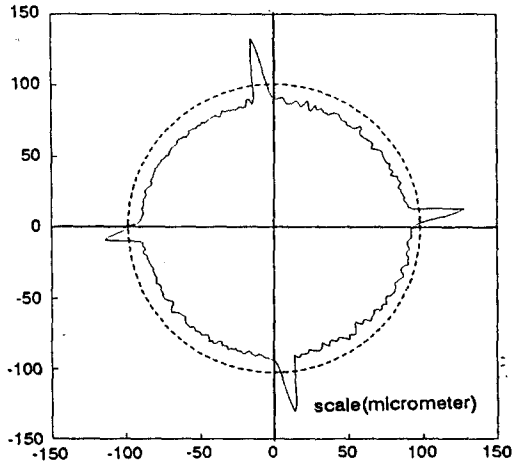


그림 3.8 반경 10 mm인 경우의 반경 오차

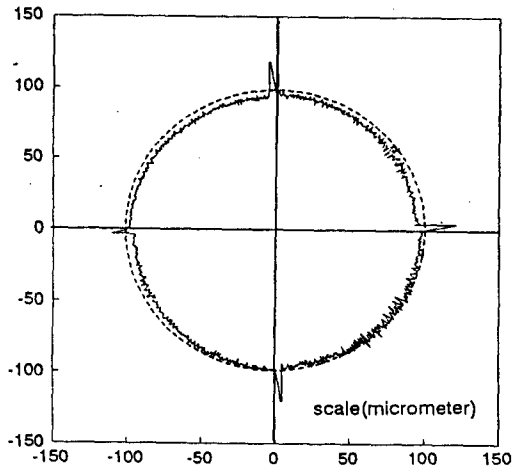


그림 3.9 반경 50 mm인 경우의 반경 오차

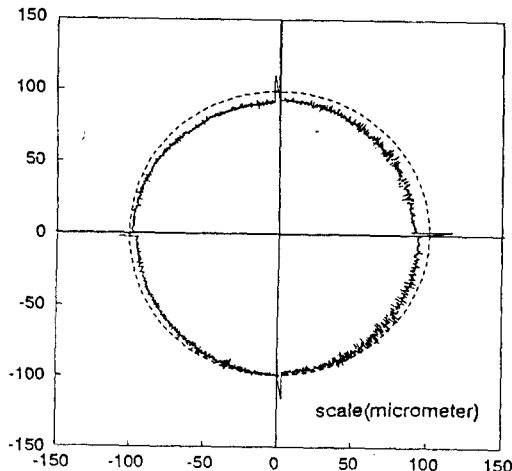


그림 3.10 반경 100 mm인 경우의 반경 오차

3.11은 그림 3.6과 같이 계산된 오차를 가공 반경 R에 따라서 나타낸 것이고, 그림 3.12는 그림 3.7과 같이 점착운동이 생기는 구간의 각도를 가공 반경 R에 따라서 나타낸 것이다.

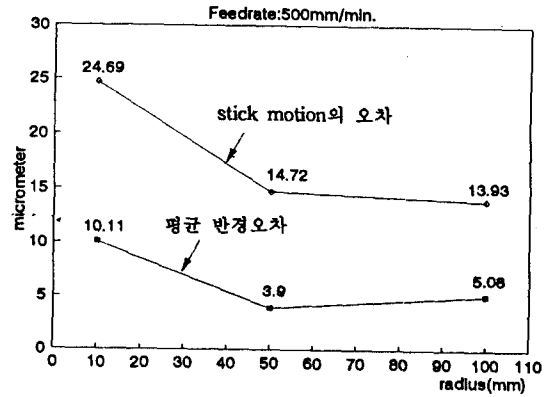


그림 3.11 가공 반경에 대한 반경감소 오차 및 점착운동 오차

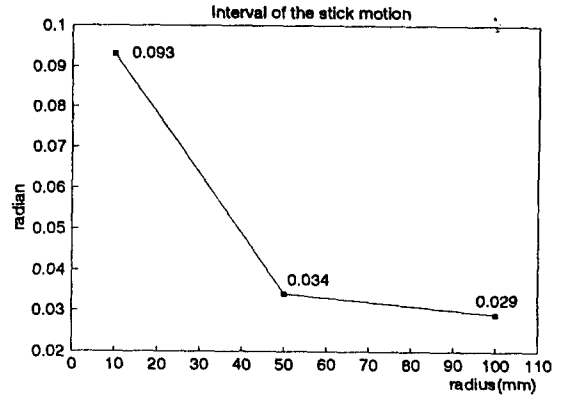


그림 3.12 가공 반경에 대한 점착운동 구간의 각도

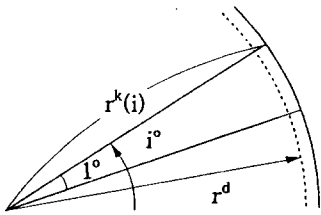
4. 반복 학습을 이용한 오차 개선

CNC 머시닝 센터에서의 원호 가공은 보통 한 명령어에 의해 자체적으로 경로를 계산해서 원을 가공하게 된다. 하지만 이렇게 해서 만들어진 경로는 앞서도 고찰하였듯이 실제 원하는 경로와 다른 결과를 낳게 된다. 이를 극복하는 방법으로 반복학습기법[7-10]을 적용해 보았다. 원호보간시 실제 적용해 본 반복학습 제어과정은 다음과 같다.

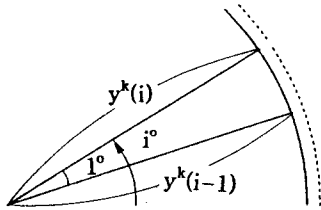
(1) 원하는 크기의 하나의 원을 1° 단위로 360개의 원호 가공명령으로 나누어서 연속적으로 실행하여 실측데이터를 얻는다. (그림 4.1 (a),(b))

(2) 이렇게 하여 얻어진 데이터와 원하는 크기의 가공반경과 비교하여 그 오차만큼 보정하여 새로운 원호 가공명령을 만든다. (그림 4.1 (c))

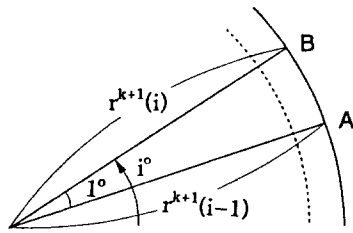
(3) (2)에서 구한 새로운 원호 가공 명령을 실행하여 실측데이터를 얻는다. (그림 4.1 (a),(b))



(a) 지령



(b) 실제 가공 경로



(c) 새로운 지령

그림 4.1 원호 가공시의 가공 경로

(4) 오차가 원하는 크기 이내로 줄어들때까지 (2)와 (3)의 과정을 반복한다.

이 때 새로운 입력의 갱신식은 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$r^{k+1}(i) = r^k(i) + \alpha \cdot (r^d - y^k(i)) \quad (5)$$

α : 학습율(learning rate)

r^d : 원하는 가공 반경

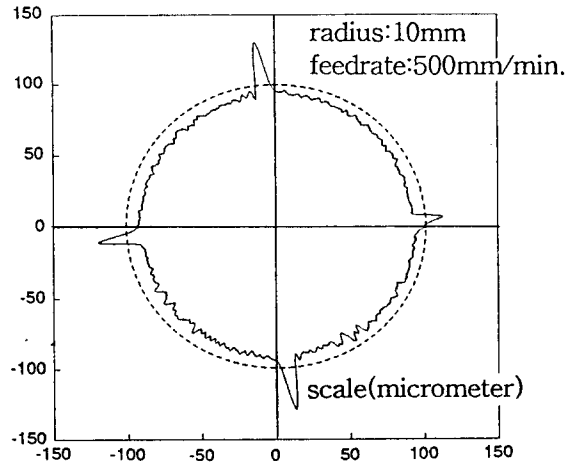
$r^k(i)$: i° 에서의 가공 명령 반경(k번째 학습시)

$y^k(i)$: i° 에서의 실제 측정 반경($r^k(i)$ 가 명령일때)

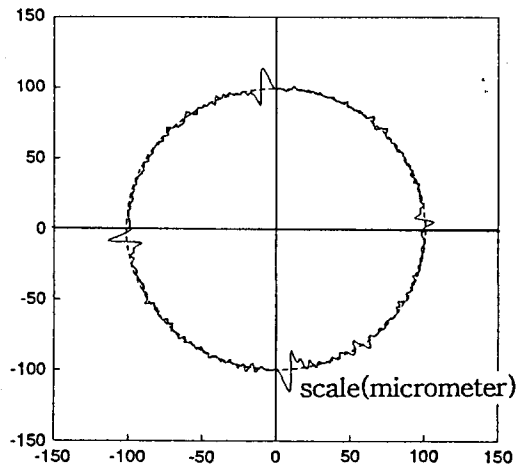
그리고, 그림 4.1 (c)에서 A점과 B점 사이의 원호 가공시 새로운 가공 반경 $r(i)$ 는

$$r(i) = \frac{1}{2} (r^{k+1}(i) + r^{k+1}(i-1)) \quad (6)$$

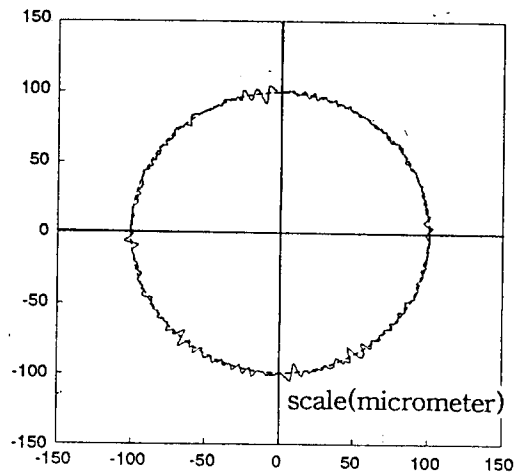
로 한다. 실제 실험에서 학습율은 $\alpha=1$ 로 하였다. 위의 반복학습 방법에 의해 학습된 결과를 CNC 머시닝 센터의 입력으로 주었을 때의 오차를 학습 이전의 것과 비교한 결과를 그림 4.2에 나타내었다. 제시한 학습 방법으로 반경 감소 오차뿐만 아니라 점착운동 부분의 오차도 크게 줄일 수 있음을 알 수



(a) 학습 이전의 원호 가공시의 오차



(b) 1번 학습후의 오차



(c) 5번 학습후의 오차

그림 4.2 반복 학습에 의한 원호 가공시의 오차 보정

있다. 그림 4.3은 측정된 원에서 반경이 가장 커졌을 때와 반경이 가장 작아졌을 때의 값을 학습 횟수에 따라서 나타낸 그림이다. 그림에서 보는 바와 같이 처음에는 가장 커졌을 때의 오차가 31 μ m이고, 가장 작아졌을 때의 오차가 -14 μ m이었지만 학습 횟수에 따라서 크게 줄어감을 알 수 있다. 그러나, 5회 이상 학습시켜도 결과가 크게 나아지지 않았으므로 5회 정도만 학습시켜도 무방할 것으로 생각된다. 그림 4.4는 5번 학습시켰을 때의 CNC 머시닝 센터의 원호 가공 명령을 나타낸 것이다. 즉, 그림 4.4와 같은 입력을 CNC 머시닝 센터의 원호 가공 명령으로 주었을 때 그림 4.2의 (c)와 같은 오차가 생긴다.

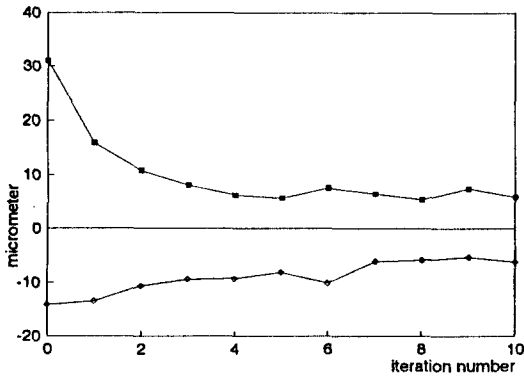


그림 4.3 학습 횟수에 따른 오차 감소 추이

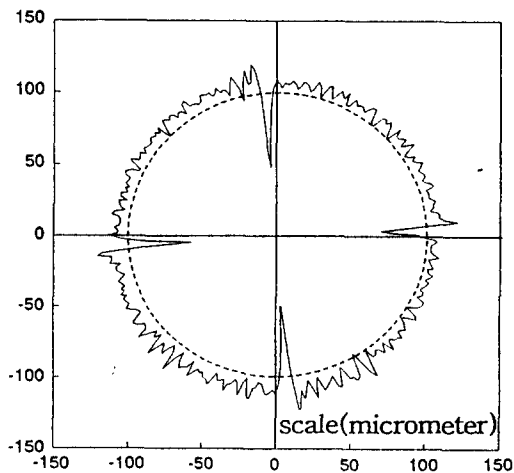


그림 4.4 5번 학습후의 원호 가공 명령

5. 결론

CNC 머시닝 센터는 마찰, 기계 자체 내의 오차와 서보모터의 가감속 회로 등 여러가지 원인 때문에 여러가지 오차가 발생한다. 현재 CNC 머시닝 센터의 오차보정은 가공시 매개변수(parameter)값을 변경시킴으로써 원하는 정밀도를 유지하는

것이 대부분이다. 그러나 이런 방법을 쓰더라도 원호 보간시 반경이 실제의 지령치보다 작게 되는 등, 매개변수만으로는 보정할 수 없는 오차도 있다.

본 연구에서는 CNC 머시닝 센터의 정도를 측정할 수 있는 인코더 카운터법을 소개하고 그 방법에 의해 실제 원호 보간시의 운동오차를 측정하였고, 측정된 데이터를 이용하여 반복 학습에 의해 원호 보간의 반경 감소 오차 및 점착운동의 오차를 크게 개선시킬 수 있음을 보였다. 앞으로의 과제는 점착운동 이외의 오차를 감소시킬 수 있는 새로운 입력 갱신식을 찾아보고, 한번 학습시킨 데이터를 가지고 다른 반경, 다른 이송속도의 원호가공시에 이용할 수 있게 하는 방법을 연구해 보는 것이 필요하다.

6. 참고 문헌

- [1] 垣野義昭 外, NC工作機械の運動精度に關する研究(第4報): 圓弧補間時の半徑減少のNC補正, 1988, 일본정밀기계학회지, 54권 6호, 1113-1118.
- [2] E. D. Tung, Y. Urushisaki, M. Tomizuka, "An Algorithm for High-Speed Control of Machine Tools," Proceedings of the American Control Conference, San Francisco, California, June, 1993.
- [3] E. D. Tung, Y. Urushisaki, M. Tomizuka, "Low Velocity Friction Compensation for Machine Tool Feed Drives," Proceedings of the American Control Conference, San Francisco, California, June, 1993.
- [4] 이후상, NC 공작 기계의 원호 보간 정도 측정법, 한국 기계연구소 세미나, 1991.5.
- [5] 박화영, '92년 수치제어(NC) 기술사업, 한국기계연구원, 1992.
- [6] Yoram Koren, Jong-Jin Park, Chih-Ching Lo, "A New Architecture for CNC Servo Controllers," NST Report, 1992.
- [7] S. Arimoto, S. Kawamura and F. Miyazaki, "Bettering Operation of Robots by Learning," *Journal of Robotic Systems*, vol. 1, no. 2, pp. 123-140, 1984.
- [8] T. Sugie and T. Ono, "An Iterative Learning Control law for Dynamical Systems," *Automatica*, vol. 27, no. 4, pp. 729-732, 1991.
- [9] G. Heinzinger, D. Fenwick, B. Paden and F. Miyazaki, "Stability of Learning Control with Disturbances and Uncertain Initial Conditions," *IEEE Trans. Aut. Control*, vol. 37, pp. 110-114, 1992.
- [10] H. Ahn, C. Choi and K. Kim, "Iterative Learning Control for a Class of Nonlinear Systems," to appear in *Automatica*