

전용 LSI를 이용한 2축동시제어 시스템 설계

강용근 김일환 정광조

한국기계연구소 자동제어실.

System design for simultaneous 2-axis control using custom LSI

Yong-Geon Kang, Il-Whan Kim, Gwang-Jo Chung

Automatic control lab. Korea Institute of Machinery & Metals.

Abstract

In this paper, we designed simultaneous 2-axis control system using commercialized custom ICs for positioning and interpolation that is very compact and high reliable.

This system is primarily designed for NC system, we verified it is more complete than the other hardware & software based system in its function, control accuracy and cost. Also, this system can be expanded for multi-axis control, it can be applied to the control of more complicated mechanism such as articulated robot.

1. 서 론

2축 이상의 동시제어가 요구되는 NC머신이나 로봇 등의 서보시스템은 위치 및 속도제어에서 높은 정밀도를 유지하여야 하고 보간(interpolation) 등의 특수기능을 처리할 수 있는 구조가 되어야 한다. 국내에서 NC 제어방식을 택한 시스템 분야의 연구는 최근까지 마이크로프로세서(microprocessor)와 많은 논리소자(logic IC)를 활용한 기술개발이 이루어 지고 있으나 제어장치의 규모가 크고 사양 및 기능변경이 용이하지 않다.

외국의 경우 이러한 제어장치 기능이 부분적으로 전용IC화되어 신뢰도가 높고 소형화된 제어장치를 생산하고 있을 뿐만 아니라 이들 전용IC들이 보편화되어 최근에 몇종류가 시판되고 있다.

본 연구에서는 이러한 종류의 전용화된 IC가운데 보간기능을 수행하는 LSI K3701과 위치제어기능을 수행

하는 LSI K3702를 활용하여 NC머신이나 로봇등에 적용할 수 있는 2축동시제어 시스템을 설계하고 이에따라 실험결과를 제시하였다.

2. 본 론

(1) 시스템의 구성과 기능

일반적으로 NC제어방식을 택한 시스템의 구성은 그림1과 같이 NC제어장치, operating panel, interface, servo 장치 그리고 NC기계의 5부분으로 크게 나누어진다.

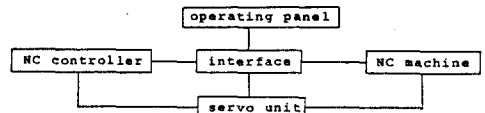


그림1. NC시스템의 구성.

이러한 구성은 모든 NC제어방식의 기계장치에 대하여 공통적으로 가지는 구성이라고 할 수 있다.

본 연구에서는 그림1의 기능 가운데 NC제어장치에 해당하는 부분의 일부로서 보간 및 위치제어기능을 수행하는 부분을 전용LSI를 활용하여 설계하였다. 설계된 제어장치의 블록도를 그림2에 나타내었다.

이 시스템에서 보간기능은 K3701에서 수행하고 이와 관련된 모든 처리는 CPU(18085)에 의해 처리된다. 펄스 분배를 위해 K3701을 씬으로써 직선, 원호보간은 물론 포물선, 대수 그리고 지수보간이 가능하다. 보간에 대한 함수치와 좌표치가 CPU에 의해 세트되고나면 feed pulse(FP)가 입력될 때 마다 인터플레이터는 내부 연산을 실행하고 연산결과에 따라 보간펄스를 X축, 또는 Y축으로 분배하는 형식으로 보간이 실행된다. 펄스 분배가 완료되었을 때 새로운 데이터를 CPU에 요구

하는것은 인터럽트(interrupt)로 처리된다. 보간펄스 분배율은 클럭펄스(CP)와 내부연산 시간에 대응된다. 본 연구에서는 CP를 1MHz로 했으므로 최대 feed펄스는 다음과 같다.

:직선보간 ; 90.0 K/sec(max.)

:원호보간 ; 47.6 K/sec(max.)

위치제어용 LSI K3702는 CPU에 의해 지시된 조건하에서 코멘드펄스( $\pm COM$ )와 피이드백 펄스( $\pm FB$ )의 입력차를 출력한다.

설계된 제어장치로부터 발생하는 아날로그 전압은 서보모우터(AC,DC가능)를 구동할 수 있는 드라이브로 전달되며 모우터 엔코더로부터 피이드백되는 펄스를 엔코더 인터페이스 회로와 조합시키는 때루우프를 형성하고 있다. 다시 말해서 CPU로부터 각 축에 대한 위치및 속도에 관한 정보들 보간기에 입력시키면 이 정보가 펄스열로 변환되어 위치제어 부분으로 입력된다. 위치제어기에 입력된 펄스와 모우터 엔코더로부터 피이드백된 펄스의 차이가 D/A변환기를 통하여 서보증폭기에 아날로그 전압을 입력시키는 형태로 되어있다.

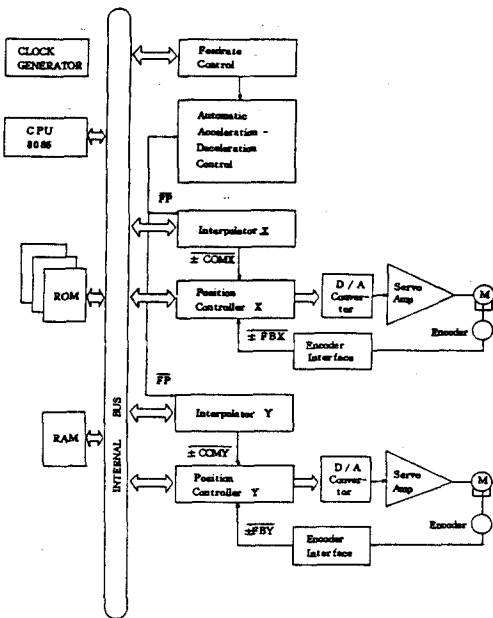


그림2. 시스템 전체 블록도.

CPU에 의해 조절되는 모든 데이터는 준비된 I/O포트를 통해 출력된다. 속도에 대한 지령은 가감속회로를 거친 feedrate로 결정된다. 가감속을 행하는 위치는 보간을 행하기 전에 가감속하는 방법과 보간

을 행한뒤에 가감속을 행하는 두 가지 방법이 있으나 본 연구에서는 보간전에 가감속을 실현했다.

서보모우터를 구동하기 위한 아날로그 전압은 위치제어용 LSI K3702의 에러카운터 출력을D/A변환기를 거쳐  $\pm 10V$ 로 바꾸어 power amplifier에 공급된다. 에러카운터는 인터플레이터로부터의 보간펄스와 서보모우터에 접속된 엔코더로부터의 피이드백되는 펄스의 차를 계산하여  $2^8 \sim 2^5$  레벨의 값을 D/A변환기를 통하여 아날로그 전압으로 출력한다.(그림3참조) 즉 K3702 내부에 들어있는 에러카운터의 내용은 코멘드값에 대한 실제위치의 편차(position error)가 된다.

$$(\text{실제위치}) = (\text{코멘드카운터}) - (\text{에러카운터})$$

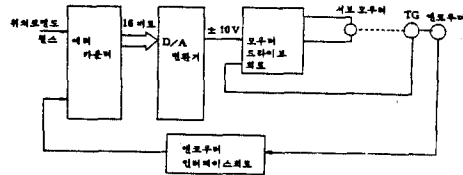


그림3. 서보시스템의 블록도.

모우터 엔코더와 컨트롤 하드웨어와의 접속은 리시버, 방향판별회로를 중심으로 구성된다. 리시버는 위치검출기(pulse coder)의 피이드백 펄스를 받아들이는 부분으로 각 축에 대해 A,  $\bar{A}$ , B,  $\bar{B}$ 의 위상을 필요로 한다. 위상이 서로 다른 신호를 필요로 하는 이유는 모우터의 회전방향(normal/reverse) 판별을 정확히 하도록 하기위함이다. 즉 하나의 신호에 대해 서로 반대되는 신호를 전송함으로써 정확성을 기할 수 있다.

모우터가 어느 방향으로 회전하는지를 피이드백되는 위상 A,B로부터 판별하여 위치제어용 LSI K3702의 에러카운터에 입력시켜 주어야 한다. 회전방향 검출은 모우터가 회전할때 회전방향에 따라 위상 A가 B보다  $90^\circ$  앞서거나 혹은  $90^\circ$  뒤지는 것을 이용하여 모우터가 어느 방향으로 회전하는지를 검출한다. 본 연구에서는 위상 A가 B보다  $90^\circ$  앞설때 CCW(normal)방향으로 모우터가 회전하고 반대로 위상 B가 A보다  $90^\circ$  앞설때 CW(reverse)방향으로 회전하고 있는것으로 판별하도록 했다.

:CCW ;  $+\overline{FB}$  normal rotation

:CW ;  $-\overline{FB}$  reverse rotation

(2) 가감속 및 feedrate 컨트롤

가감속 조절은 모우터가 기동할 때와 정지할 때 발생하는 쇼크를 흡수하기 위하여 필수적이다. 다시 말해서 동작의 처음과 끝점에서 각각 가감속이 이루어져야 전체 서보시스템에 무리를 가하지 않게 되고 또한 실제로 컨트롤되는 기계장치의 진동도 방지할 수 있다. 가감속 시간의 결정은 축이 많을 때는 가장 많은 시간이 필요한 축을 기준으로 결정하는 것이 보통이나 여기서는 2축제어이므로 X, Y 축을 동일하게 가감속 시간을 채택했다. 그리하여 두 축이 동시에 가속을 하고 같은 시점에서 정상속도에 도달해서 같은 시간에 동작을 멈출 수 있도록 하였다. 본 연구에서 행한 가감속 실현 방법은 업다운 카운터와 레이어 멀티플라이어를 사용하여 하드웨어적으로 실현하였다. CPU로부터 I/O 포트를 통해 필요한 feedrate가 결정되어 감속제어 부분에서 목표지점(X, Y 좌표)에 도달했는지의 여부에 따라 업다운 카운터의 입력 분리 및 glitch 방지회로를 거쳐서 fi를 공급한다. fi 및 fa에 따라 가감속시점이 결정되고 업다운 카운터의 두 입력 주파수가 일치할 때 일정한 속도의 fo를 인터플레이터에 입력한다. 이 fo가 실질적인 속도에 대한 값이 된다. 가감속 곡선은 지수곡선(exponential curve)의 형태를 취한다.

이론적으로 가감속제어의 출력식은 (1)과 같다.

$$F_o = F_i (1 - \exp(-F/Z^2 t)) \quad (1)$$

Fo ; output pulse frequency

Fi ; input pulse frequency

F ; reference input frequency

본 연구에서 편의상 고정시킨 시정수  $\tau$ 는

$$\tau = \frac{Z^2}{F} = \frac{2^{15}}{109.227 \times 10^3} \approx 300(\text{msec})$$

가감속제어를 실현함에 있어서 보간속도를 결정하는 FF 펄스를 제어하는 경우 인터플레이터 내부에서 수행하는 계산치와 CPU에서 실행한 계산치가 일치하지 않는 경우가 발생할 수도 있으므로 정확한 펄스 갯수를 계산하는 알고리즘이 필요할 것으로 생각된다.

feedrate는 인터플레이터가 내부 알고리즘에 의해

보간펄스 갯수를 계산하는 속도를 결정하게 되며 실질적으로 이 값이 모우터의 회전속도를 결정하게 된다. feedrate 컨트롤 알고리즘은 그림4.와 같고 fo(가감속회로의 입력)는 식(2)와 같이 주어진다

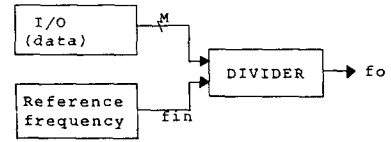


그림4 Feedrate 제어

$$f_{out} = \frac{M f_{in}}{64} \quad (2)$$

$M = F 2^E + E 2^D + D 2^C + C 2^B + B 2^A + A 2^0$   
 본 연구에서는 divider로 레이어 멀티플라이어를 사용하여 실현하였으며 I/O 포트를 통해 출력된 값이 레이어 멀티플라이어에 의해 분주되어 feedrate가 조절된다. 레이어 멀티플라이어를 cascade로 접속함으로써 feedrate를 조절할 수 있는 분해도를 높일 수 있을 것이다. 여기서는 2<sup>6</sup>의 분해능을 갖도록 설계되었다.

(3) 인터플레이터 K3701

인터플레이터란 설정된 좌표계에서 임의의 두 점 사이를 주어진 경로를 따라서 임의의 어떤점이 움직이는 것을 생각하여 이를 도와주는 역할을 한다. 인터플레이터는 feedrate에 대한 명령을 받아 각 축으로 feedrate에 비례하는 펄스 열을 보간 방식에 따라 X축과 Y축으로 분배한다. K3701은 보간 펄스를 분배 중일 때, 즉 내부 연산을 수행 중일 때는 BUSY 신호를 출력하여 연산 중임을 알린다. K3701이 필요로 하는 데이터는 직선 보간일 경우 종점의 X, Y 좌표 원호 보간일 경우 중심의 X, Y 좌표값을 내부레지스터에 로드시킨다. 또한 보간 형태, 방향,  $\sqrt{2}$ 컨트롤, 종점사분면의 파라미터를 프로그램 입력할 수 있는 컨트롤 워드를 갖고 있다. 좌표값을 스토어하는 내부 레지스터는 24비트 길이를 갖고 있으므로 8비트 크기의 CPU를 사용하는 경우 3차례에 걸쳐서 필요한 데이터를 로드해야한다. K3701의 주요 특징을 살펴보면 다음과 같다.

① 데이터 길이

$$-(2^3 - 1) \leq \text{데이터} \leq 2^3 - 1$$

따라서 최대 표시 가능한 좌표치는 1LSB=1 $\mu$ m일때

$$8388607\mu\text{m} = 8.388607\text{m}$$

② 현재위치 표시

K3701의 내부레지스터 가운데 X,Y레지스터가 현재 위치와 종점의 거리에 대한 데이터를 갖고있다.

그림 5에서 종점의 좌표가 PE(Xe, Ye)이고 X,Y레지스터의 값이 Pi(Xm, Ym)이라고 가정하면 초기원점 O에서 현재위치는 다음과 같이 계산된다.

$$Xi = Xe - Xm$$

$$Yi = Ye - Ym$$

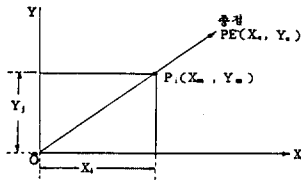


그림5 현재위치표시

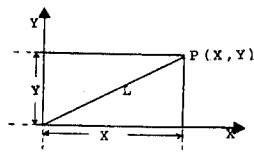


그림6 직선보간일 때 FP계산

③  $\sqrt{2}$ 컨트롤

주속제어를 위한 기능이다. 주속제어란 X축 또는 Y축으로만 보간펄스가 발생할 경우 1펄스당 이동거리를 1이라고 하면 X축과 Y축 동시에 펄스가 발생할 경우 이동속도가 2배가되므로 알정한 속도를 얻기 위하여  $\sqrt{2}/1.5$ 의 형태로 보상을 해준다.

④ FP펄스 갯수

• 직선보간

X가 장축이고, 종점의 거리 = X + Y 기울기 K=Y/X, FP주파수=f라할때(그림 6 참조)  $\sqrt{2}$ 컨트롤이 유효할때 종점에 이르는 데 필요한 전체 FP갯수는 다음식으로 주어진다.

$$\begin{aligned} \text{FP갯수} &= X + 2/Y \\ &= X + (1 + K/2) \end{aligned}$$

$\sqrt{2}$ 컨트롤이 유효하지 않을때 FP갯수는 다음식으로 주어진다.

$$\text{FP갯수} = X$$

• 원호보간

원호보간일 경우 45도를 지날때마다 기울기가 변한다. 보간펄스는 언제나 장축으로 분배되고 FP펄스를 계산하는 식은 표1과 같다.(그림 7 참조)

표1. 원호보간일 때 FP계산

$\theta$	FP	$\sqrt{2}$ 컨트롤유무	$\sqrt{2}$ 컨트롤유무
$0^\circ < \theta_1 < 45^\circ$	$R \cdot \sin \theta_1$		$R \cdot (\sin \theta_1 + 1 - \cos \theta_1 / 2)$
$45^\circ$	$\sqrt{2} / 2 \cdot R$		$(1/2 + \sqrt{2}/4) \cdot R$
$45^\circ < \theta_2 < 90^\circ$	$R(\sqrt{2} - \cos \theta_2)$		$R(1 + \sqrt{2}/2 + \sin \theta_2 / 2 - \cos \theta_2)$
$90^\circ$	$\sqrt{2} \cdot R$		$(1 + \sqrt{2}/2) \cdot R$

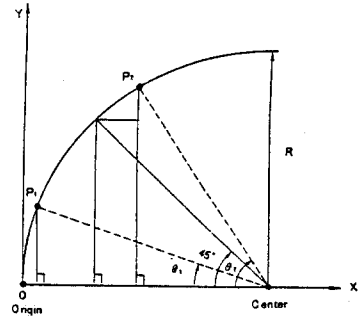


그림7. 원호보간일 때 FP계산

(4) 위치제어용 LSI K3702

K3702는 코멘드 펄스와 피어드백 펄스를 검사하기 위하여 두개의 24비트 업.다운 2진 카운터를 갖고있다.

코멘드 카운터 ;  $\overline{\text{FCOM}}$ 값

에러 카운터 ;  $\overline{\text{FCOM}}$ 값과  $\overline{\text{FPB}}$ 의 차

코멘드 카운터는  $\overline{\text{FCOM}}$  혹은  $\overline{\text{COM}}$ 펄스 입력에 의해 카운터되고 어느 위치에서 코멘드 카운터를 클리어(clear)시키면 그 위치를 원점으로하는 절대 좌표계에 있어서 위치 지령치를 알 수 있다.

에러 카운터는  $\overline{\text{FCOM}}$  혹은  $\overline{\text{COM}}$ 펄스 입력에 의해 가.감산되고  $\overline{\text{FPB}}$ 에 의해 감산되고  $\overline{\text{FB}}$ 에 의해 가산된다. 이들 카운터의 동작은 K3702의 클럭과 동기되어 클럭의 falling edge에서 카운터의 값들이 변화도록 되어있다. 특정한 출력 형식으로 에러 카운터의 내용이 D/A변환기를 거쳐서 출력된다.

(그림 8 참조)

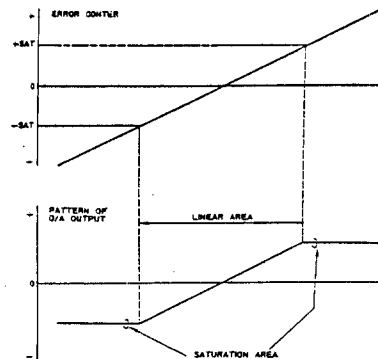


그림8. 에러 카운터 출력

CPU로부터 지시된 조건에 따라 에러 카운터에 상응하는 내부상태가 다음과 같이 나타난다.

saturation zone ; D/A변환기에 대한 출력비트수(8~16비트 선택가능)  
+SAT, -SAT플래그

position zone ; nearly zero detect

alarm zone ; overrange(alarm detect)

에러 카운터가 CPU에 의해 세트된 값을 초과하면 alarm "0"가 출력되고 이것은 인터럽트 처리된다. 위에 부가하여 에러 카운터의 내용이 음수(negative)라는 것을 알리는 기능도 있다.

카운터의 입력펄스는 N클럭만큼 "0"를 유지하면 N만큼 카운터한다.

K3702에 의해 표시 가능한 데이터의 길이는 다음과 같다.

$$-2^{23} \leq \text{데이터} \leq 2^{23} - 1$$

따라서 1LSB=1 $\mu$ m일때 8388607 $\mu$ m(=8.388607m)까지 카운터가 가능하다. 주의할 점은 overflow와 underflow가 감지되지 않는다. 즉

카운터 업

Max. positive value  $\xrightarrow{+1}$  Max. negative value

(011-----11) (100-----00)

카운터 다운

MAX. negative value  $\xrightarrow{-1}$  Max. positive value

(100-----00) (011-----11)

### 3. 실험 및 고찰

설계된 컨트롤 시스템을 슬레이브(slave)로 하고 MDS(Microcomputer Development System) HP64000의 8085 에뮬레이터(emulator)를 호스터(host)로 가상하여 슬레이브 시스템의 가감속 특성 및 직선보간과 원호보간을 예제 프로그램을 실행시켜 실험하였다. 실험을 위해 사용된 서보 증폭기와 모우터는 일본 FANUC사의 AC 서보 모우터 모델5와 서보 유니터 H003을 이용하였다.

실험을 위한 전체 시스템의 구성을 그림 9에 보였다. 실험에 사용된 예제 프로그램의 flow chart를 그림 10에 나타내었다.

그림 10의 flow chart에서 인터럽트 처리루틴은 인터폴레이터로부터의 새로운 데이터 요청 또는 위치제어기로부터의 alarm신호를 처리하기 위한 루틴이다.

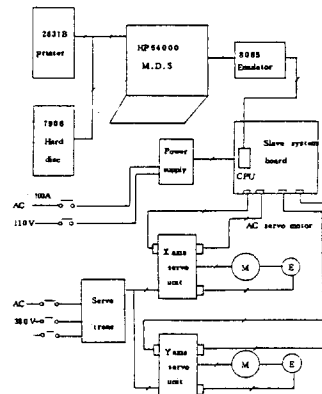


그림9 실험장치의 구성도

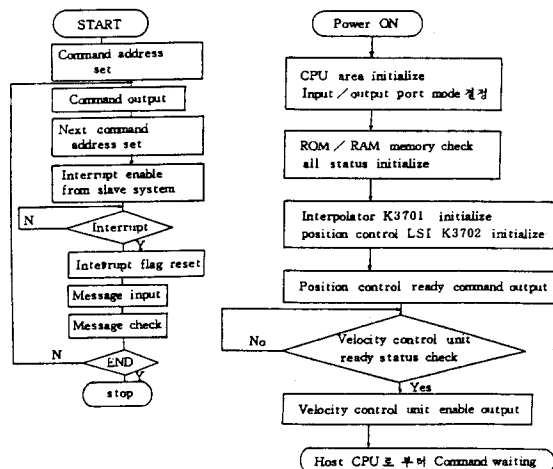


그림10. 예제 프로그램의 flow chart.

예제 프로그램을 실행시키기 위해서 호스트 시스템에서는 시스템의 정상적인 동작을 위해 필요한 모든 스테이츠(status)를 클리어시키고 모드(mode)를 결정하고 인터폴레이터와 위치제어기를 initialize한뒤 코멘트를 받아 프로그램을 실행시킨다.

인터폴레이터 클럭펄스를 제어하는 방법과 FP펄스를 제어하는 2가지에 대한 실험결과를 제시한다. 실험에서 가감속시정수는 300msec로하여 exponential형태로 실행시켰으며 실제위치 피이드백을 포함하지 않았을때 위치지령에 의한 D/A변환기의 출력전압은 사진1과 같다. 사진1에서 시정수를 보면 정상상태의 63%에 이르는 지점에서의 시간은 약300msec로 계산치와 거의 일치함을 볼 수 있다.

모우터 엔코더로부터의 위치 피이드백을 포함시켰을 때 가감속 곡선을 사진2에 나타내었다.

인터폴레이터의 출력펄스를 제어하는 경우 FP펄스의 수를 계산할 필요없이 실현이 간단하나 feedrate를 바

르게 할 경우 path에러가 발생한다. 직선보간일 경우 오실로스코프로 확인이 곤란하나 원호보간일 경우 path에러를 확인할 수 있다. 위치지령을 동일하게 하였을 때 feedrate를 달리함으로써 발생하는 path에러를 사진3과4로 설명한다.

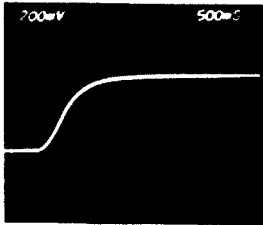


사진1 지수형태의 가속곡선.

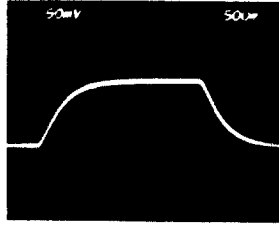


사진2 가감속 곡선.

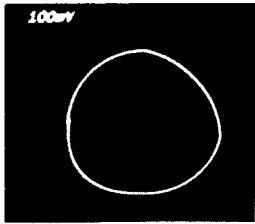


사진3. feedrate;61695 펄스/min.

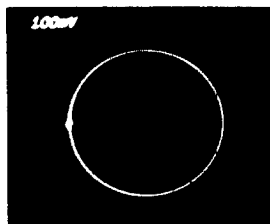


사진4. feedrate;255 펄스/min.

사진3에서 2상한을 제외하고는 path에러가 발생함을 볼 수 있다. 특히 1상한은 사분면을 지나 보간곡선이 형성되어 있다. path에러가 발생하는 원인은 장축(long axis)이 바뀌는 경우 가감속회로의 입력펄스와 위치제어기 입력펄스의 race불일치로 생각되며 특히 path에러를 발생시킬수 있는 가감속회로가 X축 Y축에 각각 구성되어야 하므로 에러발생폭은 더큰것으로 생각한다. 이러한 path에러는 속도를 느리게 할 경우 훨씬 줄어들게되고 FP펄스를 제어하는 경우 발생하지 않는다. FP펄스를 제어하여 직선보간과 원호보간을 행한 결과를 사진5와 6에 나타내었다.

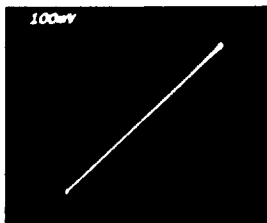


사진5. 직선보간

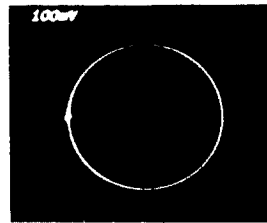


사진6. 원호보간

## 5. 결론

본 연구에서 실현한 전용 LSI를 이용한 2축 동시제어 시스템은 주제어장치와 슬레이브 시스템 간에 병렬로 데이터를 처리함으로써 처리속도가 빠르고 여러사양의 주제어장치에의 적용도 가능할 것으로 생각된다.

전용 LSI를 사용함으로써 전체 시스템의 소형화와, 용이한 기능변경의 잇점이 있음도 확인할 수 있었다.

동시제어 가능한 축의 수를 확장시킨다면 다관절형 로봇등에도 이용가능 하리라 생각된다.

따라서 동시제어 축의 수를 늘일 경우 적용 가능한 시스템 확장성에 관한 연구와 축수를 늘일 경우 예상되는 path에러의 처리방법이 연구되어야 할 것으로 생각된다.

## 참고문헌

- (1) "공작기계용 NC장치 개발", 1986. 한국기계연구소 자동제어실.
- (2) TOKO, INC., "KM3701 operation manual", DEC.1981.
- (3) TOKO, INC., "KM3702 operation manual", FEB.1983.
- (4) FANUC LTD., "FANUC AC servo unit maintenance manual", 1986.
- (5) James J. childs, "Numerical control part programming", Industrial press, 1973.