

<技術論文>

2축 윤곽제어를 위한 소프트웨어 보간자 개발에 관한 연구

김 교 형* · 이 기 설*

(1987년 7월 8일 접수)

Development of Software Interpolator for Two-Axis Contouring Control

Kyo-Hyoung Kim and Ki-Sul Lee

Key Words : Interpolation(보간), Contouring Control(윤곽제어) Reference Pulse Type(기준 펄스 방식), Start Stop Pulse Rate(자기동 주파수) Digital Differential Analyzer(계수형 미분해석기)

Abstract

Microprocessor-based software DDA interpolator is developed and applied to two axis contouring control of X-Y table. Developed assembly program is composed of feedrate, linear and circular DDA interpolation routines. Reference-pulse type of open-loop stepping motor control system in which the micro-computer produces a sequence of reference pulses for each axis of motion is adopted. To test performance of the developed program, X-Y table drive system based on stepping motor and shaft encoder is designed. Contouring error of the system in linear and circular path is within $\pm 0.2\text{mm}$ under start stop pulse rate of stepping motor.

1. 서 론

수치제어(Numerical Control: NC)에서 공구와 가공물 사이의 상대운동은 각 축을 독립적으로 구동시켜 줌으로써 얻을 수 있으며, NC에서 축 구동에 필요한 신호는 기계제어장치(Machine Controller Unit; MCU)에서 보내어 준다. 기계제어장치는 가공부품의 기하학적 형상 및 공구 이송속도를 입력으로 하여 공구 이동에 필요한 보간과정, 이송율 및 감속 제어를 수행한다. 보간과정은 몇개의 주어진 점으로부터 가능한 원만한 곡선을 발생시키는 과정으로 공구의 도중경로와 이송속도가 고려되는 윤곽

제어(contouring control)의 경우에는 이 과정이 꼭 필요하다. NC에서 보간 과정은 보간자(interpolator)에 의하여 이루어지며, 보간자는 구조에 따라 보간계산을 고정된 전자회로에 의해 수행하는 하드웨어 보간자와 컴퓨터 프로그램에 의해 수행하는 소프트웨어 보간자로 나눌 수 있다. 재래의 NC에서는 보간과정 및 이송율 계산을 하드웨어에 의존해 왔으나 근래 CNC(Computer Numerical Computer)의 등장과 함께 점차 기계제어장치에서 하드웨어에 의한 의존도가 낮아지는 추세에 있다^(1,2). 본 연구에서는 가공부품 데이터 처리, 이송율 계산 및 보간계산은 마이크로컴퓨터를 이용한 소프트웨어 방식을 사용하였다.

CNC의 축 제어에는 기준 펄스(reference-pulse) 방식과 샘플치(sampled-data) 방식이 있으며, 기준펄

* 정회원, 영남대학교 공과대학 기계공학과

스 방식에서는 컴퓨터가 축 구동을 위해서 기준펄스를 발생시키며, 이때 구동위치는 발생된 펄스수의 합계로 나타나고, 속도는 펄스 주파수에 의해 결정된다. 기준펄스 방식에서 보간자는 외부 인터럽터 클럭에 의해 보간루프가 실행되며 이때 축 구동을 위한 펄스를 출력시키게 되므로 최대속도는 보간루프의 실행시간에 반비례하게 된다. 그러나 샘플치 방식에 있어서의 최대속도는 컴퓨터에 좌우되지 않기 때문에 기준펄스 방식보다 높은 속도를 얻을 수 있지만 원호보간에서 정밀도가 낮아진다. 본 연구에서는 윤곽제어를 위하여 기준펄스 방식을 제어시스템을 설계하였다.

기준펄스 방식에 적합한 소프트웨어 보간 알고리즘으로는 계수형 미분해석기(Digital Differential Analyser, DDA)방식, 대수 연산(stairs approximation)방식 및 최소오차경로 추적(direct search)방식들이 있다⁽²⁾. 윤곽제어에서 가장 중요한 것은 경로에서 공구 이송속도의 균일성이며, 특히 절삭가공에서 공구의 이송속도의 균일성은 직접적으로 가공면의 표면조도에 영향을 미치기 때문에 본 연구에서는 위의 세가지 보간 알고리즘 가운데서 가장 속도의 균일성이 좋은 DDA방식을 채택하였다. 그리고 윤곽제어에서 가공경로는 대개 직선과 원호 구간의 조합으로 구성되어질 수 있기 때문에, 본 연구에서는 직선 및 원호보간만 고려하기로 한다.

2축 윤곽제어를 위한 제어시스템에서 구동모우터는 스텝핑모터를 사용하였으며, 스텝모터에서 축 구동거리 및 속도는 펄스수 및 펄스율에 비례하기 때문에 위치 및 속도제어는 개회로 제어 방식을 택하였으며, 지령위치 및 속도와 테이블의 출력위치 및 속도를 서로 비교 검토하기 위하여 X 및 Y축에 디지털 엔코더를 사용하여 제어시스템의 성능을 검사하였다.

2. 계수형 미분 해석기(Digital Differential Analyzer, DDA) 보간 방식^(2,7)

보간과정에서 DDA방식은 수치적분의 원리를 이용하는 것으로 수치제어에서는 직사각형 근사방법이 사용된다. 수치적분은 DDA적분자에 의해서 외부 클럭 펄스에 따라 반복모드(iterative mode)로 작동되며, DDA적분자는 두개의 n비트 레지스터 p 및 q와 하나의 2진 가산기로 구성되어 진다. DDA적분자에서는 매클럭펄스마다 2진 가산기에 의해 p 및 q레지스터의 값을 합산하고, 2진 가산기의 오우버플로우가

출력 증분으로 모터를 구동하는 신호가 된다. 2축 윤곽제어에서 가공경로는 직선 및 원호로 근사화 될 수 있으므로 본 연구에서는 직선 및 원호보간만 고려하기로 한다.

2.1 직선 보간

2차원 평면에서 직선보간은 공구가 시점과 종점사이의 직선을 따라서 상대운동하도록 X 및 Y축 모우터를 구동시켜야 하며, 공구가 상대 직선운동을 하게 하기 위해서는 X 및 Y축에 각각 일정수의 펄스를 보내주어야 하며, 출력 주파수는 X 및 Y축 증분거리에 비례하여야 한다. Fig. 1에서 직선 AB의 X 및 Y좌표는 식 (1)과 같이 표현된다.

$$X_i = X_A + \left[\sum_0^i \frac{X_B - X_A}{n} \right]$$

$$Y_i = Y_A + \left[\sum_0^i \frac{Y_B - Y_A}{n} \right]$$
(1)

여기에서 n은 직선거리 AB를 스텝거리로 나누어준 값이 된다.

직선운동을 위해서는 X 및 Y축마다 하나의 DDA 적분자가 필요하므로 Fig. 2와 같이 두개의 적분자가 필요하게 된다.

두개의 적분자는 2축 동시제어를 위해서 공통클럭에 의해서 작동되며, 각 적분자의 p레지스터 값은 X

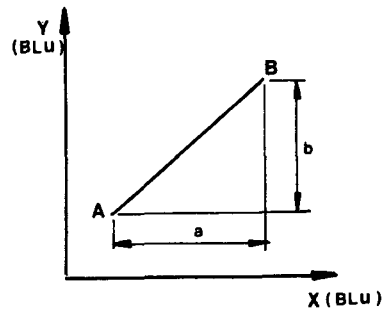


Fig. 1 Straight-line path

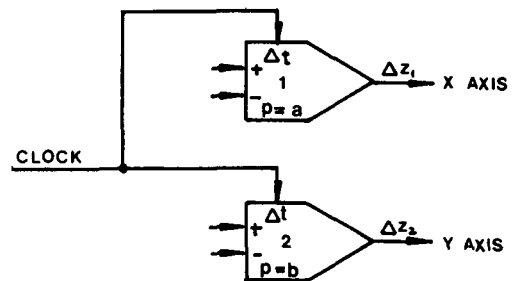


Fig. 2 Linear DDA interpolator

및 Y축 증분거리, 즉 a 및 b 의 값이 된다. 여기에서 a 와 b 의 단위는 BLU(Basic Length Unit), 즉 최소 이동단위가 된다. 2진 가산기의 오우버플로우 펄스 출력은 스텝핑 모터 제어기에 지령신호로 공급되고, 공급펄스의 수와 주파수에 따라 축의 위치와 이동속도가 결정된다.

X 및 Y축의 속도비는 a/b 가 되고, 일정한 경로 속도를 유지하기 위해서는 두개의 DDA적분자에 공급되는 클럭주파수를 제어 할 수 있는 제 3의 DDA적분자, 즉 이송율 보간자가 필요하다. 이송율 보간자는 두개의 m 비트 레지스터를 갖고 있는 p 레지스터의 값은 식 (2)에서 구해지는 이송율수(Feed Rate Number, FRN)의 값이 된다.

$$FRN = 10 \frac{V}{L} \quad (2)$$

여기에서 V 는 분당 움직인 거리, 즉 평균속도이며, L 은 V 와 같은 거리단위로써 직선이동 거리를 나타낸다. DDA적분자를 이용한 보간과정에서 보간자의 효율은 적분자내의 레지스터의 비트수가 n 일 경우 2^n 에 반비례하게 된다. 즉 비트수가 큰 경우에 있어서는 움직이는 거리가 작으면 주어진 경로속도에서 이송율보간자의 출력 주파수는 아주 높은 값이 되어야 한다. 그러므로 적분자 레지스터의 비트수가 고정되는 하드웨어 보간자의 경우에는 효율이 낮아지나, 소프트웨어보간자의 경우에는 주어진 거리에 대해서 효율값이 1이 되도록 비트수 n 을 변화시켜 줌으로써 경로속도는 이송율보간자의 출력 주파수 f_o 와 같은 값이 되고 식 (3)과 같이 된다.

$$f_o = \frac{FRN}{S_o} f \quad (3)$$

여기에서 S_o 는 최대 이송율수이며, f 는 이송율보간자에 가해지는 클럭주파수로 식(4)와 같이 구해진다.

$$f = \frac{S_o}{BLU} \quad (4)$$

2.2 원호 보간

부품의 원호경로를 가공하기 위해서는 원호보간 과정이 필요하다. 원호보간에서 원호경로를 발생시키기 위해서는 원호를 따라서 보간점들을 취하지 않고, 원호의 시점과 종점 및 원호반경의 값들만 요구된다. 본 연구에서 원호경로는 한개의 상환에 있는 경우만 고려한다. 긴 원호의 경우는 여러개의 부분으로 분할하여야 하며, 분할된 원호의 시점과 종점은 반드시 같은 상환에 있어야 한다. Fig. 3에서 원호 AB상의 X 및 Y축 좌표는 식(5)와 같이 표현된다.

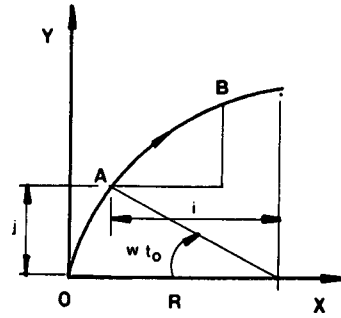


Fig. 3 Circular arc

$$\begin{aligned} X_i &= X_A - \left[\sum_0^i \frac{Y_{i-1} - Y_m}{n} \right] \\ Y_i &= Y_A + \left[\sum_0^i \frac{X_{i-1} - X_m}{n} \right] \end{aligned} \quad (5)$$

여기에서 n 은 반경 R 을 스텝거리로 나누어진 값이 되며, X_m 및 Y_m 는 원호 중심의 좌표값이 된다. 원호 보간은 Fig. 4와 같이 두개의 DDA적분자로 구성되며, X축 출력은 DDA 1의 $-\Delta P$ 값으로 제환되고, Y축 출력은 DDA 2의 $+\Delta P$ 값으로 제환된다. 적분자내의 p 레지스터는 Fig. 3에 나타난 바와 같이 시점 A의 X 및 Y축 성분 값이 된다. 평면에서 원호케치는 Fig. 5와 같이 동일 시점에서 8가지의 다른 케적을 그릴 수 있다.

원호 a, b, c 및 d 를 발생시키기 위해서는 Fig. 4와 같은 보간자의 구조가 필요하며, 각 케적의 차이점은 X 및 Y축 구동 모우터의 회전 방향을 제어부에서 조절하면 원하는 케적을 구할 수 있다. 예를 들어 b 의 원호를 그리고자 하면 a 의 경우에서 X축 모터를 역회전시키면 된다. 그러나 원호 e, f, g 및 h 의 경우는 Fig. 5에 나타난 바와 같이 $P_1 = i$ 및 $P_2 = j$ 가 된다. 원호보간에서 이송율수는 직선보간의 경우와 같으며 식(2)에서 분모의 값은 L 대신 R 이 된

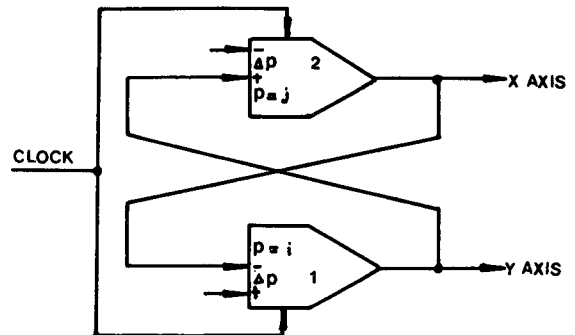


Fig. 4 Circular DDA interpolator

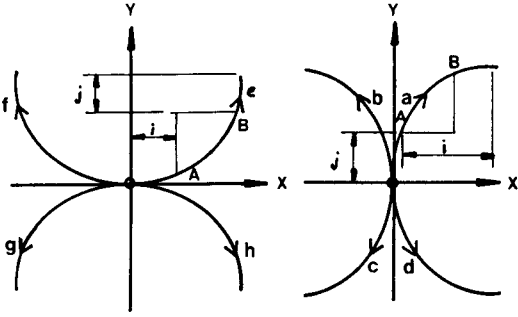


Fig. 5 Eight possible circular arcs

다. 이송율보간자의 출력주파수 및 클럭주파수는 직선보간의 경우와 같은 값이 된다.

2.3 소프트웨어 DDA 보간자

앞절에서 설명한 직선 및 원호보간은 프로그램 수

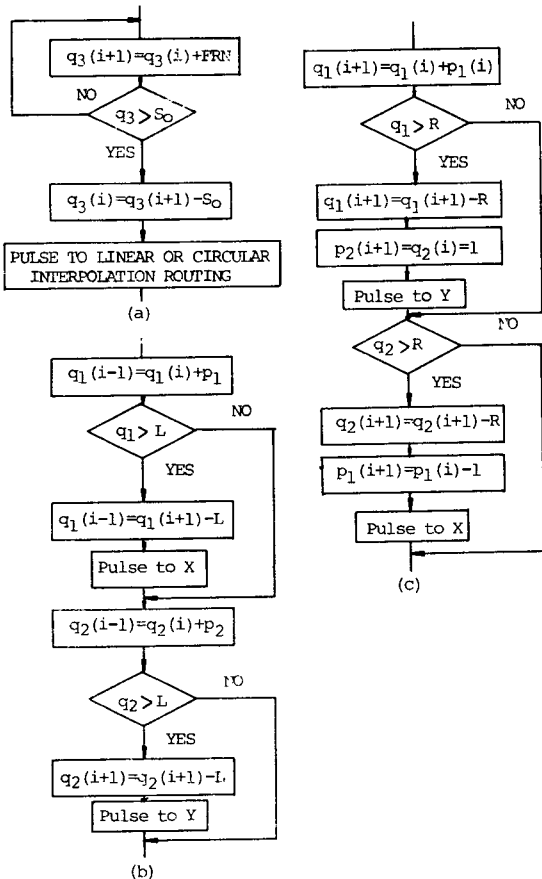


Fig. 6 Flowcharts of a software DDA interpolator. (a) Feederate subroutine (b) Linear interpolator (c) Circular interpolator.

행에 의한 소프트웨어 방식이나 전용조직 회로에 의한 하드웨어 방식에 의해 수행할 수 있다. DDA보간자는 적분과정이 필요하고, 어셈블리 프로그램에 적합하기 때문에 본 연구에서는 2축 윤곽제어를 위한 소프트웨어 보간방식을 채택하였다. Fig. 6은 이송율, 직선 및 원호보간자들의 프로그램 유통 흐름도를 나타낸다.

3. 제어시스템의 구성

수치제어 장치에서 제어시스템은 구동축의 위치와 속도를 제어하는 역할을 한다. 각 축은 제어시스템을 구성하고 있는 보간자의 명령신호에 따라 독립적으로 구동하여 원하는 궤적을 발생시킨다. 제어시스템은 NC시스템의 성능사양과 제작비용을 고려하여 개회로나 폐회로 시스템으로 구성된다. 본 연구에서 X-Y테이블 구동모터는 스텝모터를 사용하였으며, 스텝핑모터에서 축 구동거리 및 속도는 압력펄스수 및 펄스율에 비례하기 때문에 제어시스템은 개회로를 채택하였다. Fig. 7은 2축 윤곽제어를 위한 개회로 제어시스템을 나타낸다.

테이블 이송은 THK사의 리드길이 5mm의 정밀리드 나사를 사용하여 얻었으며, X 및 Y축 최대이송거리는 각각 300mm와 200mm가 된다. 스텝핑모터의 구조는 큰 토오르크에서 작은 스텝각을 얻을 수 있는 바이파일러 권선을 가진 유니플러 4상 하이브리드형을 사용하였으며, 스텝각은 1.8°이다. Fig. 8은 X-Y축 스텝핑모터의 속도-토크 곡선을 나타낸다.

스텝핑모터는 단계적인 동작을 반복하면서 회전하므로, 관성부하의 크기에 따라 특성이 바뀐다. 관성부하가 커지면, 자기동주파수(start stop pulse rate)가 저하되고 자기동영역이 좁아진다. 특히 관성부하가 커질 경우 슬루우 영역(slew region)에서의 운전이 필요할 경우에는, 가감속 제어가 필요하게 된다. 관성부하에 대한 자기동 주파수의 최대치 값은 식(6)과 같이 구할 수 있다.

$$f_1 = \frac{f_s}{\sqrt{1 + \frac{J_L}{J_R}}} \tag{6}$$

여기에서, f_s : 모터의 최대자기동 주파수

J_R, J_L : 로터 및 부하의 관성 모멘트

Fig. 7의 제어시스템에서 X축 스텝모터의 관성부하가 있는 경우의 자기동 주파수의 최대치는 200PPS (Pulse Per Second)가 되고 Y축 모터는 500PPS가

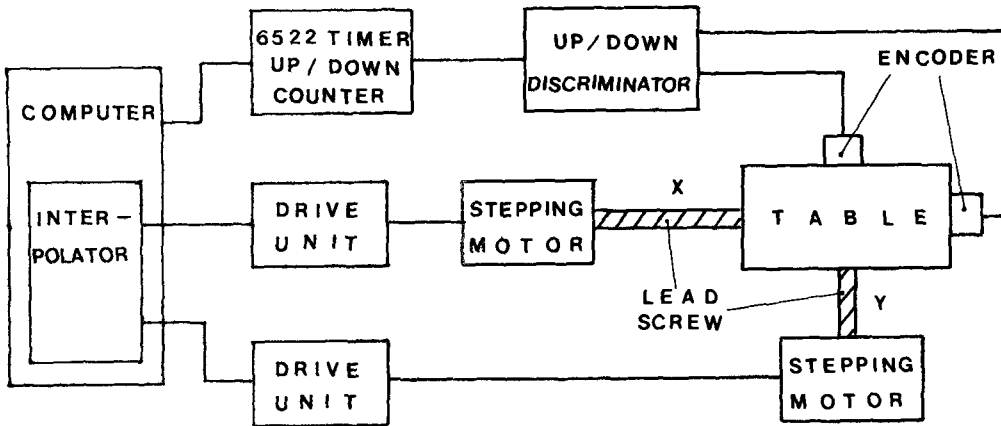


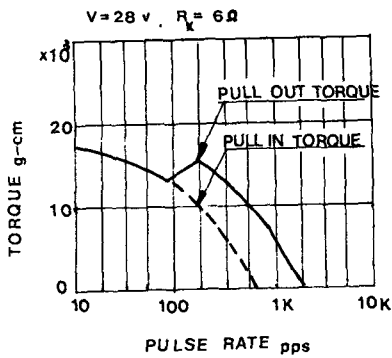
Fig. 7 Schematic diagram of control system

된다. 즉, 본 제어시스템에서 가감속제어를 하지 않을 경우 X축 및 Y축 최대이송속도는 각각 30cm/min과 75cm/min가 된다.

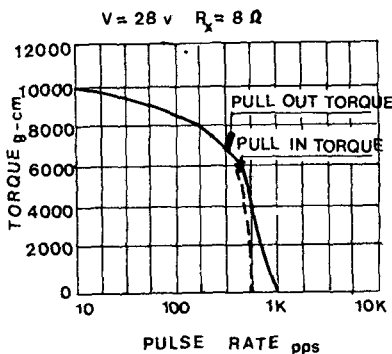
구동회로는 모터 고정자 권선에 여자순서를 결정하는 논리회로(사이퀀서)와 전류를 공급하는 전력제

어회로(변환기)로 구성되어 있다. 논리회로는 스텝핑모터 전용 컨트롤러 PMM8713을 사용하여 Fig. 9와 같이 회로를 구성하였다. 이 IC는 C-MOS이며 18VDC의 광범위 전원으로 사용할 수 있다. 4상 모터에서 ϕ_C , E_A 및 E_B 단자의 입력설정에 따라 4상여자나 3-4여자방식을 설정할 수 있으며, 본 제어시스템에서는 댐핑효과가 우수하고 토크변동이 적어 보다 안정화된 회전특성을 얻을 수 있는 4상 여자방식을 택하였다.

소프트웨어 보간자의 출력신호에 따라 스텝핑모터가 일정위치 및 속도로 구동되는지의 여부를 확인하고 X-Y테이블의 좌표 설정을 위하여 리드 나사의 끝에 엔코더를 부착하였다. 엔코더는 1회전당 1000개의 2상 펄스와 1개의 원점 신호 펄스가 나오는 광전식 인크리멘탈형을 사용하였다. 회전시 회전방향에 따라 2상 신호를 정전 및 역전 신호로 변환하기 위하여 Fig. 10과 같은 회로를 사용하였다. 2상 신호 출력의 전진 및 지연신호 사이에는 각 신호의 1사이클(T)에 대하여 T/4의 위상차가 있게 되는데, 이 차는 입력축의 회전방향에 따라서 전진패턴이 되거나 지연패턴이 되어 출력된다. Fig. 10의 회로에서는 2상신호 A와 B에 의해 각 패턴의 에지(edge) 변화를 포착하여 축의 회전방향이 반시계방향(CCW)의 경우는 업펄스를 출력하고, 시계방향(CW)의 경우는 다운펄스를 출력하도록 되어 있다. 업/다운 반별회로의 출력은 속도측정과 위치검출을 위하여 6522타이머와 업/다운 카운터회로를 거쳐 컴퓨터와 연결된다. 컴퓨터는 6502중앙처리 장치와 48KB의 RAM과 12KB의 ROM을 가진 마이크로 컴퓨터를 사용하였다. Fig. 11은 Fig. 7의 제어시스템을 나타낸다.



(a) X-axis motor



(b) Y-axis motor

Fig. 8 Velocity and torque characteristic

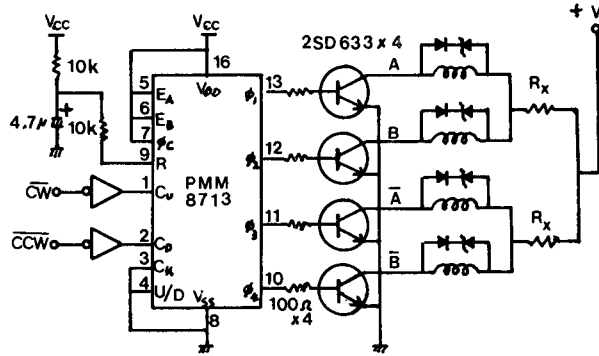


Fig. 9 Circuit daigram of drive unit

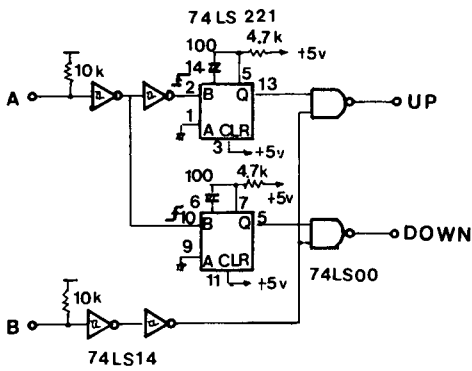


Fig. 10 Up/Down discriminator

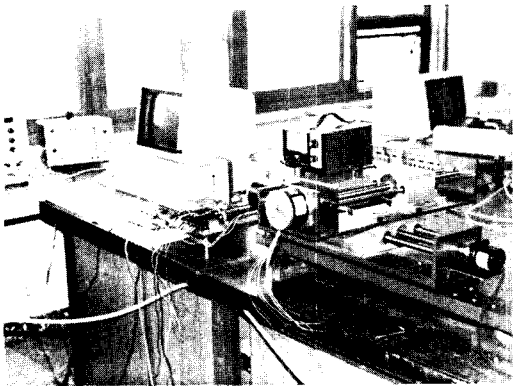


Fig. 11 View of experimental set-up

4. 제어시스템 구동 및 고찰

본 절에서는 구성된 제어시스템을 소프트웨어 DDA보간자를 적용하여 구동함으로써 2축 윤곽 제어 시스템의 성능을 검사하고자 한다. Fig. 12는 소프트웨어 DDA보간자를 이용한 2축 윤곽 제어시스템 구동을 위한 제어프로그램의 유통 흐름도를 나타낸다. 프

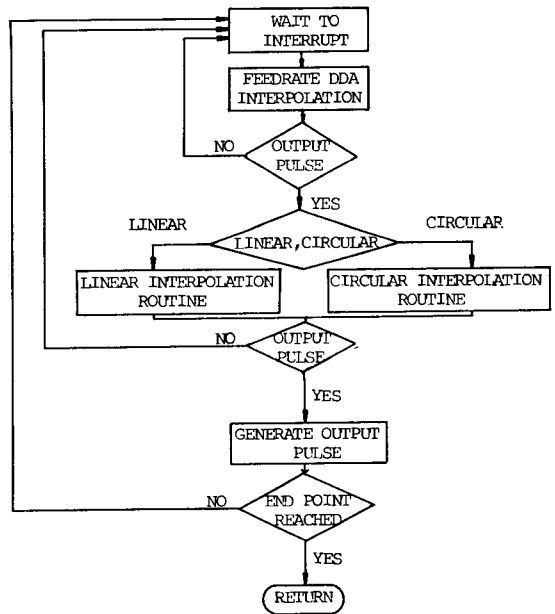
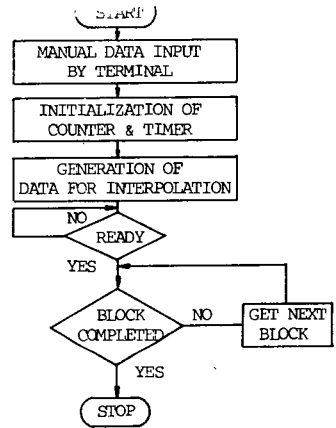


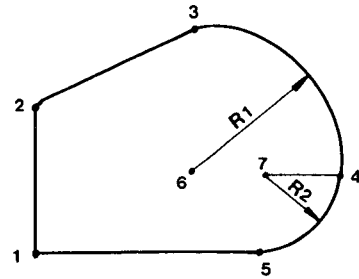
Fig. 12 General flow-chart of control system

로그래밍은 크게 서비스, 이송을 보간, 직선 및 원호 보간 서브프로그램들로 구성되어진다. 프로그램은 모두 6502 CPU를 위한 어셈블리 언어로 작성되었다. 어셈블리프로그램의 메모리 용량은 고급 언어 프로그램의 반정도 밖에 소요되지 않으므로 어셈블리 언어를 사용하면 메모리 용량을 절약할 수 있고, 프로그램 실행이 있어서도 어셈블리 프로그램의 실행속도는 컴파일된 프로그램보다 4배정도 빠르다⁽³⁾. 특히 소프트웨어 DDA보간자의 성능은 프로그램 실행속도에 따라 크게 좌우되기 때문에 어셈블리 언어에 의한 프로그램 작성은 필수적이라 할 수 있다. 효과적인 소프트웨어 DDA보간 과정을 위해서는 전체 프로그램에서 보간 반복과정은 프로그램 수행중 필요할 때는 언제든지 수행되어야 하고, 기다리는 시간에는 다른 프로그램을 수행하여 전체 프로그램 실행 시간을 줄이도록 하여야 한다. 이러한 방법은 컴퓨터에서 인터럽트 기능을 이용함으로써 가능하다. 어셈블리 언어는 이러한 인터럽트 기능의 수용과 외부와의 신호 교환면에 있어서도 고급언어의 사용 경우보다 매우 용이한 장점을 가지고 있다.

가공품의 기하학적 정보는 블록단위로 입력되며, 서비스 프로그램에서는 소프트웨어 DDA보간계산에 필요한 모든 데이터들을 준비하는 과정이 된다. 이 과정에서는 기하학적 정보가 사용자와 대화형식으로 키보드에 의해 10진수로 입력되고, 입력된 10진정보는 BLU단위로 환산되어 16진수로 메모리에 저장시 키게 된다. 준비완료 키가 압력되면, 첫번째 블록의 데이터들이 처리되고 마지막 블록이 처리될 때까지 반복루틴이 진행되며, 블록정보가 처리될 때 인터럽트 기능에 의해 보간프로그램이 수행된다.

스텝모터에 의한 위치제어에는 자기동영역에서 비교적 낮은 일정속도로 구동하는 방법과 슬로우 영역(slew region)을 이용한 고속 가감속 구동방법이 있다.

고속 가감속 구동에서는 가동시 비교적 낮은 주파수에서 서서히 가속시켜서 어느 상한 주파수로 정속 구동하며, 그 후 서서히 감속시켜 위치 결정을 하게 된다. 소프트웨어 방식에 의한 제어시스템에서는 하이드웨어에 의한 제어방식과 다르게 가감속 구간 및 주파수 결정에 많은 시간이 소요되므로, 본 연구에서 모터 구동방식은 자기동 영역내에서 일정속도로 구동하도록 하였다. 구동장치의 최대이송 속도는 X축 자기동주파수의 최대값 200PPS에 해당하는 30 cm/min가 된다. X-Y테이블의 최소 이동거리



Data point	X co-ordinate	Y co-ordinate
1	0mm	0mm
2	0	50
3	50	75
4	100	25
5	75	0
6	50	25
7	75	25

R1=50mm
R2=25mm

Fig. 13 Test component

(BLU)는 0.025mm이므로 이송을 보간자의 외부클럭 주파수 f 는 200ppm가 된다. 외부클럭펄스는 6522 타이머의 프리런닝 모드(free-running mode)를 이용하여 펄스를 발생시켰으며, 발생된 펄스는 보간프로그램을 수행하기 위한 인터럽트 신호로 사용된다. 인터럽트 신호에 따라 이송을 보간과정에서 출력 펄스가 발생되고, 출력펄스마다 직선 혹은 원호보간 과정이 수행된다. 직선 및 원호보간에서의 출력펄스수가 목표치와 일치되면 다음 블록의 정보를 수행하게 된다.

Fig. 13은 2축 윤곽제어 시스템의 성능검사를 위한 시험편의 기하학적 형상을 나타낸다. 시험편은 7개의 블록데이터로 구성되며, 3개의 직선보간 구역과 2개의 원호보간 구역으로 나누어져 있다. 주어진 시험편에서 직선 및 원호경로에서의 윤곽 오차는 ± 0.2 mm정도가 되었다.

5. 결 론

본 연구에서는 6502 마이크로 컴퓨터를 이용하여

2축 윤곽제어를 위한 직선보간 및 원호보간 기능을 가진 소프트웨어 DDA보간자를 개발하였다. 프로그램은 실행시간이 단축되고, 외부신호들과 연결이 용이한 어셈블리 언어로 작성되었으며, 서비스를, 이송을 보간, 직선보간 및 원호보간 서브프로그램으로 구성하였다.

개발된 소프트웨어 DDA보간자의 성능검사를 위하여 스텝핑 모터를 이용한 X-Y 테이블 구동장치와 제어회로를 설계 및 제작하였으며, 제어방식은 DDA 방식에 적합한 기준펄스 방식을 택하였다. 스텝핑 모터의 자기동 영역내에서 제어시스템의 성능은 직선 및 원호경로에서 윤곽오차가 $\pm 0.2\text{mm}$ 정도 되었다.

참 고 문 헌

- (1) Koren, Y., 1979, "Design of Computer Control for Manufacturing System", Trans. ASME, J. of Engineering for Industry, Vol. 101, pp. 326~332.
- (2) Koren, Y., 1983, "Computer Control of Manufacturing Systems", McGraw-Hill New York, pp. 115~141.
- (3) Kipiniak, W., and Quint, P., 1968, "Assembly vs. Compiler Languages", Control Eng., pp. 93~98.
- (4) Plas, J., and Blammear, J., 1972, "A Stepping Motor Drive Assembly Especially Designed for CNC Systems", Thirteenth International M. T. D. R. Conference, Birmingham, pp. 183~190.
- (5) Vigour, H. E., 1963, "Effect of Servomechanism Characteristics on Accuracy of Contouring Around a Corner", Trans. Amer. Inst. Electric Eng., Vol. 82, No. 66, pp. 120~124.
- (6) Pfeffer, T., and Derenbach, T., 1973, "Report on a Special CNC System", Fourteenth International M. T. D. R. Conference, Manchester, pp. 134~140.
- (7) Simon, W., 1973, "The Numerical Control of Machine Tools", Edward Arnold, pp. 292~318.