

산업용로봇과 CNC 공작기계를 위한 소프트웨어 가감속 방법

Software Acceleration/Deceleration Methods for Industrial Robots and CNC Machine Tools

金 東 日* · 宋 鎮 一** · 金 成 權***
(Dong-Il Kim · Jin-Il Song · Sungkwun Kim)

Abstract - In this paper, we propose software algorithms which provide acceleration/deceleration characteristics essential to high dynamic performance at the transient states where industrial robots or CNC machine tools start and stop. Software acceleration/deceleration methods are derived from the mathematical analyses of typical hardware systems controlling acceleration/deceleration. These methods make servo motors, which drive axes of motion, start and stop smoothly without vibration in the repeated motion or movement along a desired path of industrial robots or CNC machine tools. The path error, which is one of the most significant factors in the performance evaluation of industrial robots or CNC machine tools, is analyzed for linear, exponential, and parabolic acceleration/deceleration algorithms in case of circular interpolation. The analyses show that path error consists of the distance between the required path and generated one through acceleration/deceleration, and that between the generated one through acceleration/deceleration algorithm and the actual one of the end effector of the industrial robot or tool of the CNC equipment.

In experiments, the control algorithm including path planning, position control loop, the proposed acceleration/deceleration algorithms is executed on the motion control system with a floating point digital signal processor(DSP) TMS320C30 as a CPU. The experimental results demonstrate that the proposed software acceleration/deceleration methods and the motion control system are very effective in controlling axes of motion of the industrial robot or CNC machine tool with the desired acceleration/deceleration characteristics.

Key world: Linear, exponential, and parabolic acceleration/deceleration algorithms(직선, 원호, 파라볼릭가감속 알고리즘), Industrial robot(산업용로봇), CNC machine tool(CNC공작기계), Path error(경로오차), Digital signal processor(디지털신호처리기)

1. 서 론

산업용 로봇과 CNC공작기계 제어장치로 대변되는 산업계에서의 자동화는 컴퓨터와 반도체기술의 발전과 더불어 크게 활성화되고 있다. 특히 디지털제어기술과 고성능마이크로프로세서의 출현으로 인하여 주위환경의 변화에 더욱 유연성있게 대처할 수 있는 산업용 로봇과 CNC공작기계 제어장치의 개발이 가능하게 되었으며, 그 결과 생산제품의 종류가 변경되는 경우에도 단시간내에 이의 생산이 가능하게 되었다. 뿐만 아니라, 이러한 제어기에 의해 종래의 아날로그형태의 제어기로써는 해결할 수 없었던 기능, 성능상의 한계점들이 극복되고 있다[1].

산업용로봇과 CNC공작기계의 운전에 있어 가장 중요한 것은 각축의 운동을 조합제어하여 End Effector를 원하는 경로를 따라 이동시키거나, 원하는 형상을 가공하기 위하여 공구를 이동시키게 하는 것이다. 이를 위해서 먼저 원하는 경로를 나타내는 궤적데이터를 발생시켜야 하고, 이 값을 입력으로 산업용로봇과 CNC공작기계를 제어하여 End Effector나 공구가 궤적데이터를 추종하게 만들어야 한다.

실제로 이러한 동작을 수행하기 위한 궤적데이터는 보간과 가감속을 통하여 생성된다. 산업용로봇과 CNC공작기계에서는 원하는 경로를 따라 지정된 작업을 행하는 동작은 대부분 직선과 원호로 구성되기 때문에 직선과 원호보간이 필수적이고, 또한 강성이 작은 몸체가 동작을 시작하거나 정지할 경우 발생하는 진동을 방지하기 위해서 가감속이 필수적이다. 특히 공작기계의 경우 직선과 원호보간만으로도 3차원공간에서의 가공이 가능하지만, 가공의 형상이나 종류에 따라 직선과 원호보간이외에도 Helical, Hypothetical Axis, Polar Coordinate, Cylindrical 보간기능 등이 사용된다.

그리고 수행하고자 하는 작업의 종류에 따라 직선, 지수함수 및 파라볼릭 가감속등이 사용되고 있다[2].

원하는 작업을 수행하기 위해서 요구되는 동작을 일련의 명령어들로써 프로그램하여 이를 수행시키면, 인터프리터나 컴파일러가 이를 해석하여 보간을 행하게 되고 보간된 궤적데이터는 가감속을 통한후 서보제어시스템에 입력되어 산업용로봇나 CNC공작기계를 움직이게 된다. 한편 보간된 궤적데이터와 작업이 수행된 궤적사이에는 소위 경로오차라고 하는 피할 수 없는 오차가 존재한다. 이 경로오차는 가감속의 종류와 서보제어시스템의 제어방법에 크게 영향을 받기 때문에, 오차의 크기를 줄이기 위해서는 작업의 종류에 따라 적합한 가감속과 제어방법을 선택하여야 한다. 최근들어 서보시스템제어를 위하여, 피이드포워드제어, 학습제어, 신경망제어이론등이 사용되고 있다 [3].

한편 산업용로봇과 CNC공작기계 제어기의 설계에 있어 중요한 고려사항으로 소프트웨어 개발장비, 연산속도, 하드웨어구조설계의 용이성등을 들 수 있다. 특히 디지털제어의 경우 원하는 경로 추종성능과 추종속도는 앞서 설명한 보간, 가감속, 제어알고리즘의 연산속도, 즉 샘플링주기에 의해 결정되기 때문에 DSP등과 같은 고속연산속도를 가진 마이크로프로세서의 사용이 불가피하다. 이러한 고속마이크로프로세서들은 대부분 산업용로봇과 CNC 공작기계 제어기가 요구하는 설계사양을 만족시킬 수 있게 개발되어 있어 제어기의 디지털화를 가속시키고 있다.

본 논문에서는 주로 가감속방법들과 경로오차 및 위치제어기에 관한 연구결과를 제시하고자 한다. 이를 위하여 산업용로봇과 CNC 공작기계 제어기들에 사용되고 있는 가감속방법들을 소프트웨어로 실현하는 방법을 도출하고, 보간기능 중 가장 중요한 원호보간에 대하여 경로오차를 분석한다. 그리고 보간, 가감속, 제어알고리즘을 효과적으로 수행하기 위하여 설계된 32비트 부동점연산 DSP TMS320C30을 CPU로 사용하는 운동제어 시스템(Motion Control System)에 대하여 언급하고, 제안한 가감속방법과 운동제어시스템이 산업

*正 會 員 :三星電子 生産技術本部 制御技術開發 팀長・工博
**正 會 員 :三星電子 生産技術本部 制御技術開發 팀 先任研究員
***正 會 員 :三星電子 生産技術本部 副本部長・工博
接受日字 :1991年 10月 22日
1 次修正 :1992年 3月 6日

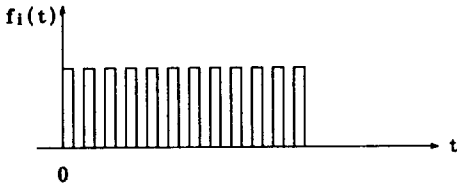


그림 1 가감속알고리즘의 입력
 Fig. 1 The input to acceleration/deceleration algorithms.

용로보트와 CNC공작기계의 제어에 효과적으로 사용됨을 보인다.

2. 소프트웨어 가감속

소프트웨어 가감속방법은 디지털 컨볼루션(Convolution)에 의해서 얻을 수 있다. 먼저 소프트웨어 가감속알고리즘에 입력되는 제적데이터를 그림1과 같이 일정시간 계속되는 등간격펄스의 개수로서 주어진다 가정하자. 단위펄스 즉 펄스 1개는 물리적으로 End Effector나 공구가 원하는 경로를 따라 움직일 때 단위위치증가분의 지령값을 나타낸다.

2.1 직선가감속

(Linear Acceleration/deceleration)

그림1의 제적데이터입력 f_i 를 그림2와 같이 컨볼루션하면 직선가감속특성을 가진 출력 f_o 가 주어진다. 한편 z 영역에서 그림2의 임펄스전달함수(Impulse Transfer Function) $H(z)(F_o(z)/F_i(z))$ 를 표시하면 다음과 같다.

$$H(z) = (1 - z^{-m}) / m(1 - z^{-1}) \quad (1)$$

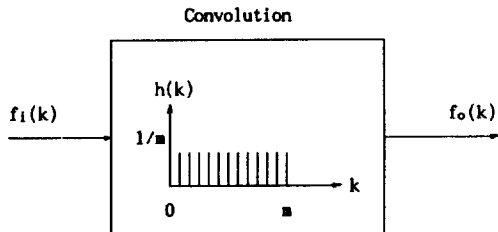


그림 2 직선가감속의 블록선도
 Fig. 2 The block diagram of linear acceleration/deceleration.

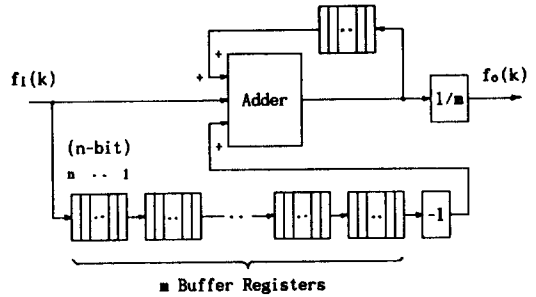


그림 3 직선가감속을 위한 하드웨어구조
 Fig. 3 The hardware structure of linear acceleration/deceleration.

따라서 f_i 와 f_o 의 관계는 다음의 리컬시브방정식(Recursive Equation)으로 나타낼 수 있다.

$$f_o(k) = [f_i(k) - f_i(k - m)] / m + f_o(k - 1) \quad (2)$$

이 경우 샘플링주기가 T_s 로 주어지면 가감속시간 $t_{acc/dec}$ 는 다음의 관계식에 의해 결정된다.

$$t_{acc/dec} = mT_s \quad (3)$$

식(2)는 소프트웨어 직선가감속을 실현하기 위한 기본식이 되며, 이를 기본으로 그림3과 같은 하드웨어를 구성하여 직선가감속을 하드웨어로 실현할 수 있다. 그림3에서 m 개의 버퍼레지스터(Buffer Register)들은 지연요소들로서 동작한다[4, 5].

2.2 파라볼릭가감속

(Parabolic Acceleration/deceleration)

파라볼릭가감속특성은 Central Limit Theorem (CLT)으로부터 구할 수 있다[6]. CLT의 특성에 의하면, 다음의 특성을 가지는 함수들

$$f_j(t) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} a_{jk} \delta(t - kT_s), \quad \sum_{k=-\infty}^{\infty} a_{jk} = 1 \quad (4)$$

$\delta(t)$: Delta function
 $j = 1, \dots, p$

연속적으로 컨볼루션할 경우 Envelope이 Gaussian함수 즉 파라볼릭 Envelope을 가지는 함수에 수렴하는 다음의 함수가 주어진다.

$$f_{con}(t) = \exp[-(t - \eta)^2 / 2\sigma^2] s_r(t) / (\delta\sqrt{2\pi}), \quad p \rightarrow \infty \quad (5)$$

여기서

$$s_r(t) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} \delta(t - kT_s)$$

$$\eta = \eta_1 + \eta_2 + \dots + \eta_p$$

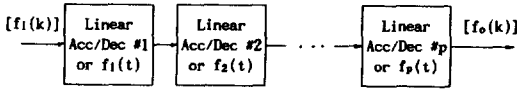


그림 4 파라볼릭가속도의 블록선도
 Fig. 4 The block diagram of parabolic acceleration/deceleration.

$$\sigma = \sigma_1 + \sigma_2 + \dots + \sigma_p \quad (6)$$

$$\eta_j = \sum_{k=-\infty}^{\infty} k T_s a_{j,k}$$

$$\sigma_j = \sum_{k=-\infty}^{\infty} k T_s a_{j,k}, \quad \sigma_j = \sum_{k=-\infty}^{\infty} (k T_s - \eta_j)^2 a_{j,k}$$

이다. 이러한 과정을 블록선도로 나타내면 그림4와 같이 표시할 수 있다.

실제로 직선가속도를 위한 그림2에서의 임펄스 전달함수는 식(2)로부터 식(4)의 특성을 가지고 있음을 알 수 있으므로 그림1의 제적데이터 입력 f_i 를 식(4)의 특성을 가지도록 표준화(Normalize) 시킨 후 그림4의 시스템에 인가하면, CLT에의해 한 차수위의 파라볼릭 Envelope을 가지는 함수에 수렴하는 출력이 발생되며 이 출력에서 표준화하기 위해 사용된 값의 영향을 제거하면 파라볼릭가속도특성을 구할 수 있다.

따라서 직선가속도를 알고리즘들을 직렬로 수행하면 파라볼릭가속도특성이 얻어 짐을 알 수 있다. 이러한 특성으로부터 소프트웨어 파라볼릭가속도특성을 구현하기 위한 기본식들은 다음과 같이 주어진다.

$$f_{o1}(k) = [f_i(k) - f_i(k - m_1)] / m_1 + f_{o1}(k - 1)$$

$$f_{o2}(k) = [f_{o1}(k) - f_{o1}(k - m_2)] / m_2 + f_{o2}(k - 1) \quad (7)$$

$$\vdots$$

$$f_{op}(k) = [f_{o(p-1)}(k) - f_{o(p-1)}(k - m_p)] / m_p + f_{op}(k - 1)$$

식(7)에서 $m_j, j=1, \dots, p$ 는 각 직선가속도블록에서의 버퍼레지스터들의 수를 나타낸다.

식(7)로부터 그림4와 같이 직선가속도특성을 얻기 위한 하드웨어들을 직렬로 연결하면, 파라볼릭가속도특성을 하드웨어로 실현할 수 있음을 알 수 있다. 한편 식(5)는 p 의 크기와 m_j 들의 크기를 적당하게 조합함으로써 원하는 파라볼릭가속도특성을 얻을 수 있음을 보이고 있다.

2.3 지수함수가속속 (Exponential Acceleration/deceleration)

그림1의 제적데이터입력 f_i 를 그림5와 같이 컨볼루션하면 가속속 지수함수의 특성을 가진 출력 f_o

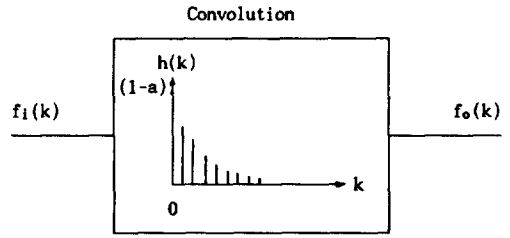


그림 5 지수함수가속속의 블록선도
 Fig. 5 The block diagram of exponential acceleration/deceleration.

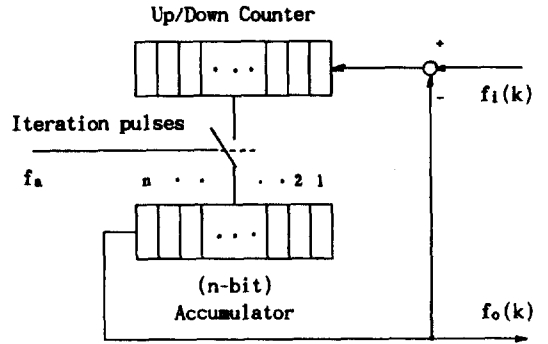


그림 6 DDA방식의 지수함수가속속을 위한 하드웨어구조
 Fig. 6 The hardware structure of exponential acceleration/deceleration based on DDA method.

가 주어진다. 그림5의 임펄스전달함수를 z 영역에서 나타내면 다음과 같이 주어진다.

$$H(z) = z(1-a)/(z-a) \quad (8)$$

따라서 f_i 와 f_o 의 관계는 다음의 방정식으로 주어진다.

$$f_o(k) = (1-a)[f_i(k) - f_o(k-1)] + f_o(k-1) \quad (9)$$

식(9)는 소프트웨어 지수함수가속속을 실현하기 위한 기본식이 되며, 직선가속속과 파라볼릭가속속의 경우에서와 같이 이를 기본으로 지수함수가속속을 실현하기 위한 하드웨어를 구성할 수 있다.

그러나 실제로 CNC 공작기계 제어장치에서 지수함수가속속을 실현하기 위한 하드웨어는 그림6과 같이 DDA(Digital Differential Analyzer)로써 구성된다[7]. 이와 같이 구성된 하드웨어시스템을

수학적으로 분석하면 a 가 다음과 같이 주어지는 식(9)를 얻게 된다[4, 8]

$$a = 1 / (1 + f_a T_s / 2^n) \quad (10)$$

식(10)에서 f_a 는 DDA에서의 Iteration펄스의 주파수를 나타낸다.

2.4 임의의 가감속 (Arbitrary Acceleration/deceleration)

실제로 현장에서 산업용로봇과 CNC 공작기계가 사용될 경우, 앞서 설명한 가감속 방법들이외에도 원하는 동작의 특성에 따라 여러가지 가감속 방법들이 요구될 수 있다. 예를 들면 산업용로봇과 CNC공작기계의 축들을 구동하는 서보모터들을 직선으로 가속하고 지수함수로 감속하는 경우나 그 반대의 경우가 발생할 수 있으며, 이 경우 앞서 설명한 직선가감속과 지수함수가감속을 직렬 연결하거나 그 반대로 연결함으로써 그러한 특성들을 얻을 수 있다. 그 이외에도 앞서 설명한 직선, 지수함수, 파라볼릭가감속방법들의 조합들로부터 새로운 가감속방법들을 도출할 수 있다. 그러나 이러한 방법으로는 실현할 수 없는 새로운 형태의 가감속방법이 요구될 경우가 있다.

이제 현재까지 설명한 가감속 방법들을 포함하는 일반적인 가감속특성의 발생방법에 대하여 설명한다. 그림1에 주어진 입력에 대하여 임의의 원하는 가감속특성을 가진 출력률 f_0 라고 하면, f_0 는 다음과 같이 표시되는 컨볼루션식으로부터 발생시킬 수 있다[9, 10].

$$f_0(k) = \sum_{n=0}^k f_i(n) a_{k-n} \quad (11)$$

여기서 a_{k-n} 은 $k-n$ 순간에서의 원하는 가감속파형의 기율기를 나타낸다. 실제로 원하는 임의의 가감속 파형 f_0 가 결정되면 f_i 는 그림1과 같이 미리 알려져 있으므로, 각 k 순간들에서의 a_k 의 값은 쉽게 결정할 수 있다.

식(11)의 관계로부터 z 영역에서 다음식을 얻을 수 있다.

$$A(z) = F_0(z) / F_i(z) \quad (12)$$

여기서 $A(z)$ 는 a_k 의 z 변환을 나타낸다. 식(12)를 직접제산방법(Direct Division Method), 부분분수 방법(Partial Fraction-Expansion Method), 컴퓨터 연산방법(Computational Method)에 의하여 역 z 변환하면 a_k 의 값들이 유일하게(Unique) 구해진다.

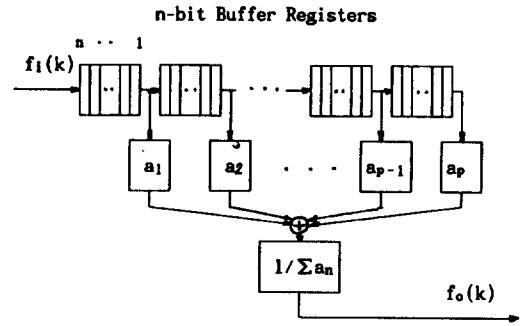


그림 7 임의의 가감속을 위한 하드웨어구조
Fig. 7 The hardware structure of arbitrary acceleration/deceleration.

다. 임의의 가감속의 경우 가감속시간 $t_{acc/dec}$ 는 다음의 관계식에 의하여 결정된다.

$$t_{acc/dec} = T_s \sum_{n=0}^k a_n \quad (13)$$

앞서 설명한 가감속방법들은 이 방법의 특별한 경우에 대한 예로서 설명된다. 식(11)로부터 임의의 가감속을 실현하기 위한 하드웨어구조에 대한 정보를 얻을 수 있으며, 그림7과 같이 식(11)을 실현하기 위한 하드웨어 구조를 구성할 수 있다 [5].

이제 식(11)의 컨볼루션식으로부터 원하는 가감속을 얻기 위한 알고리즘을 설명한다. 이를 위하여 먼저 다음의 변수들을 정의한다.

- f_{ij} : j 번째 축에서의 변위량
- f_{oj} : j 번째 축에서의 가감속출력
- V_{jmax} : j 번째 축에서의 최대속도
- $Q(a, b)$: 정수 a 를 정수 b 로 나누었을 때의 몫
- $R(a, b)$: 정수 a 를 정수 b 로 나누었을 때의 나머지
- K_{ap} : 가속구간수

그리고, a_k 는 K_{ap} 의 시간길이를 가지며, $\sum a_k$ 의 값이 1인 특성을 가지는 함수라고 하자.

j 번째 축에서의 변위량 f_{ij} 로부터 진폭이 V_{jmax} 인 신호 $f_{ji}(k)$ 를 만들면, 신호 $f_{ji}(k)$ 는 진폭이 V_{jmax} 인 신호 $Q(f_{ij}, V_{jmax})$ 개와 진폭이 $R(f_{ij}, V_{jmax})$ 인 신호 1개로 구성된다. 신호 $f_{ji}(k)$ 에서 $R(f_{ij}, V_{jmax})$ 를 제외한 신호를 $f_q(k)$ 라고 하면, $f_q(k)$ 는 아래와 같이 표현할 수 있다.

$$f_q(k) = V_{jmax} [u(k) - u(k - Q(f_{ij}, V_{jmax}))] \quad (14)$$

여기서 $u(k)$ 는 단위계단함수(Unit Step Function)

를 나타낸다. $f_q(k)$ 와 a_k 를 컨볼루션하면 다음의 관계식이 주어진다.

$$\begin{aligned} f_{\omega_j}(k) &= \sum_{n=0}^k f_g(n) a_{k-n} \\ &= \sum_{n=0}^k V_{j\max}(a_{k-n} - a_{k-n-g}), \quad g = Q(f_{ij}, V_{j\max}) \\ &= f_{\omega_j}(k-1) + V_{j\max}(a_k - a_{k-g}) \end{aligned} \tag{15}$$

식(15)에서 a_k 는 각 축에서의 가속도계적 즉 토오 크계적, $f_{\omega_j}(k)$ 은 속도계적을 나타낸다. 따라서 j 축에서의 위치계적데이터명령값은 다음과 같이 계산된다.

$$\begin{aligned} P_{\omega_j}(k) &= \sum_{n=0}^k f_{\omega_j}(n) \\ &= P_{\omega_j}(k-1) + f_{\omega_j}(k), \quad f_{\omega_j}(0) = 0 \end{aligned} \tag{16}$$

한편 고려되지 않은 값 $R(f_{ij}, V_{j\max})$ 은 위치계적 데이터명령값의 구간 수 $Q(f_{ij}, V_{j\max}) + K_{ap}$ 로 나눈 값 $Q(R(f_{ij}, V_{j\max}), Q(f_{ij}, V_{j\max}) + K_{ap})$ 를 위치계적 데이터 명령값의 전 구간에서 산포하여 처리한다. 그러면 f_{ij} 는 원하는 가감속특성을 가진 변위량이 된다.

이제 설명한 방법을 이용하여 다축동기제어하는 방법을 설명한다. 각 축의 변위 f_{ij} 들중 가장 큰 값을 f_{\max} 라 하고 f_{\max} 를 V_{\max} 에 대하여 정규화하면 $Q(f_{\max}, V_{\max})$ 를 얻을 수 있고, 나머지 축들의 변위를 $Q(f_{\max}, V_{\max})$ 로 나누면 진폭이 V_{\max} 보다 같거나 작고 시간 길이가 $Q(f_{\max}, V_{\max})$ 인 각각의 신호를 얻는다. 이렇게하여 얻은 신호 f_{ij} 들을 a_k 와 컨볼루션하면 다축동기제어를 위한 위치계적데이터명령값들이 계산된다.

3. 경로오차해석

3.1 원호보간

산업용로봇과 CNC공작기계에서 보간된 위치계적데이터값과 작업시 발생하는 실제 궤적사이의 경로오차를 분석하기 위하여 가장 널리 알려진 2차원 원호보간방법에 대하여 간략하게 소개한다 [1], [11]. 원호보간에 있어 2축 즉 x, y 축들을 동시에 제어할 경우 최종 End Effector나 공구는 일정한 크기의 점진속도 혹은 피이드레이트(Feedrate)로서 원호를 추종하게 된다. 이 경우 원호보간기는 x, y 축에 대한 속도명령 값 V_x, V_y 를 발생하게 되고 이 값들은 가감속연산기에 입력되게 된다. 실제로 원호보간 V_x, V_y 를 발생하게

되고 이 값들은 가감속연산기에 입력되게 된다. 실제로 원호보간된 값들을 직선원소들로서 구성된다. 각 이산시스템에서의 원호의 각도증가분을 α 라고 하면 원호보간기는 다음의 식과 같이 주어지는 x, y 축에 대한 속도명령값 V_x, V_y 를 발생한다.

$$V_x(k) = -[2R \sin(\alpha/2) / T_s] \sin(\omega T_s k + \omega T_s / 2) \tag{17}$$

$$V_y(k) = [2R \sin(\alpha/2) / T_s] \cos(\omega T_s k + \omega T_s / 2)$$

여기서 R 은 원호의 반경을 나타내고 ω 는 다음과 같이 주어진다.

$$\omega = V / R \tag{18}$$

식(17)에서 V 는 일정한 크기의 점진속도이거나 피이드레이트를 나타낸다. 이와 같이 계산된 $V_x(k), V_y(k)$ 값들은 산업용로봇이나 CNC공작기계가 동작을 시작하거나 정지할 경우 발생하는 진동을 방지하기 위하여 사용되는 가감속연산기에 입력되어, 앞서 설명한 특성들을 가진 f_0 를 출력시킨다.

3.2 경로오차

원하는 작업을 수행하기 위해서 요구되는 동작을 일련의 명령어들로써 프로그래머가 이를 수행시키면, 인터프리터나 컴파일러가 이를 해석하여 보간을 행하게 되고 보간된 궤적데이터는 가감속을 통한 후 서보제어시스템에 입력되어 산업용로봇이나 CNC공작기계의 축들을 움직이게 된다. 그러나 보간된 궤적데이터와 작업이 수행된 궤적사이에는 소위 경로오차라고 하는 피할 수 없는 오차가 존재한다. 경로오차는 크게 가감속에 의하여 발생하는 오차와 서보제어시스템의 특성에 의하여 발생하는 오차로 나뉘어진다. 그리고 각 오차의 크기는 가감속방법과 제어방법의 종류에 영향을 받는다. 이 제2장에서 설명한 원호보간에 대한 직선, 지수함수, 파라볼릭가감속에 의한 경로오차와 서보제어시스템에 의한 경로오차에 대하여 논한다.

3.2.1 가감속에 의한 경로오차

원호보간연산에 의해 발생하는 식(17)의 x, y 축에 대한 속도명령값 V_x, V_y 는 가감속연산을 위한 입력이 된다. x, y 축에 대한 속도명령값 V_x, V_y 와 가감속을 통한 출력 값사이에는 오차가 존재한다. 이제 이 오차를 가감속에 의한 경로오차라고 정의한다. 그리고 이 오차를 분석하기 위하여 $R_c = 2R \sin(\alpha/2) / T_s$ 와 V_x, V_y 가 가감속을 통한 출력 $Y_x,$

Y_y 이 값으로부터 생성되는 원호의 반경 R_c' 를 정의한다.

실제로 산업용로봇이나 CNC공작기계의 작업에 있어 가장 중요한 것은 작업이 끝난 후의 가공상태이기 때문에 여기서는 정상상태에서의 가감속에 의한 오차의 분석을 행한다. 따라서 $\Delta R_{a/d}(\infty) = R_c(\infty) - R_c'(\infty)$ 를 정의한다.

앞으로 제시될 가감속에 의한 경로오차에서 샘플링주기가 매우 작다고 가정할 경우 경로오차 $\Delta R_{a/d}(\infty)$ 는 가감속시정수 (Acceleration/deceleration Time Constant)를 기본으로 한 식으로서 표현할 수 있다[2]. 그러나 여기서는 일반적인 수식으로 전개한다.

1) 직선가감속

V_x, V_y 에 대한 출력 Y_x, Y_y 는 다음과 같이 계산된다.

$$\begin{aligned} Y_x(k) &= -[2R\sin(\alpha/2)/T_s] \quad (19) \\ &\quad [\cos(\omega T_s/2) Y_s(k) + \sin(\omega T_s/2) Y_c(k)] \\ Y_y(k) &= [2R\sin(\alpha/2)/T_s] \\ &\quad [\cos(\omega T_s/2) Y_c(k) - \sin(\omega T_s/2) Y_s(k)] \end{aligned}$$

여기서

$$\begin{aligned} Y_w(k) &= [(\cos(\omega T_s k + \phi_w)/(\sqrt{2-2c_o}) \quad (20) \\ &\quad + (1-c_o)/(2-2c_o))u(k) \\ &\quad - (\cos(\omega T_s k - \omega T_s m + \phi_w)/(\sqrt{2-2c_o}) \\ &\quad + (1-c_o)/(2-2c_o))u(k-m)]/m \\ Y_s(k) &= [(\sin(\omega T_s k + \phi_w)/(\sqrt{2-2c_o}) \\ &\quad + s_i/(2-2c_o))u(k) \\ &\quad - (\sin(\omega T_s k - \omega T_s m + \phi_w)/(\sqrt{2-2c_o}) \\ &\quad + s_i/(2-2c_o))u(k-m)]/m \\ c_o &= \cos(\omega T_s), \quad s_i = \sin(\omega T_s) \\ \phi_w &= \text{atan}[-s_i/(1-c_o)] \end{aligned}$$

이다. 따라서

$$Y_x(\infty) = -[2R\sin(\alpha/2)/T_s][2\sin(m\omega T_s/2)\sin(\omega T_s k + \omega T_s/2 + \phi_w + \pi/2 - \omega T_s m/2)/m(\sqrt{2-2c_o})] \quad (21)$$

$$Y_y(\infty) = -[2R\sin(\alpha/2)/T_s][2\sin(m\omega T_s/2)\cos(\omega T_s k + \omega T_s/2 + \phi_w + \pi/2 - \omega T_s m/2)/m(\sqrt{2-2c_o})]$$

이고, 경로오차는 다음과 같이 표시된다.

$$\Delta R_{a/d}(\infty) = R_c[1 - P_1/mP_2] \quad (22)$$

여기서

$$P_1 = \sin(m\omega T_s/2), \quad P_2 = \sin(\omega T_s/2) \quad (23)$$

이다.

2) 지수함수가감속

앞서와 같은 방법에 의해

$$\begin{aligned} Y_x(\infty) &= -[2R\sin(\alpha/2)/T_s] \\ &\quad [G_w\sin(\omega T_s k + \omega T_s/2 + \phi_w)] \quad (24) \\ Y_y(\infty) &= [2R\sin(\alpha/2)/T_s] \\ &\quad [G_w\cos(\omega T_s k + \omega T_s/2 + \phi_w)] \end{aligned}$$

이 주어진다. 여기서

$$G_w = (1-a)/(\sqrt{a^2-2ac_o+1}) \quad (25)$$

이고, 경로오차는 다음과 같이 표시된다.

$$\Delta R_{a/d}(\infty) = R_c[1 - 1/\sqrt{1+2a(1-c_o)/(a-1)^2}] \quad (26)$$

3) 파라볼릭가감속

p 가 2인 경우에 대하여 경로오차를 분석한다. 앞서와 같은 방법에 의해 경로오차는 다음과 같이 주어진다.

$$\Delta R_{a/d}(\infty) = R_c[1 - (P_1/mP_2)^2] \quad (27)$$

3.3 서보제어시스템에 의한 경로오차

먼저 산업용로봇과 CNC공작기계의 End effector나 공구가 지령된 궤적데이터를 추종하게 하기 위하여 그림8의 가장 전형적인 서보제어시스템을 고려한다. 그림8은 산업용로봇이나 CNC공작기계의 축들 사이에 존재하는 결합항들을 무시한 선형시스템으로 가정한 경우의 1축에 대한 등가서보제어시스템을 나타내고 있다.

원호보간연산의 최종값 V_x, V_y 의 가감속을 통한 출력 Y_x, Y_y 는 서보제어시스템의 입력이 되고, 서보제어시스템의 출력들로부터 생성되는 즉 실제 작업으로부터 형성되는 원호와 Y_x, Y_y 로부터 생성되는 원호사이에는 경로오차가 발생한다.

이 오차를 분석하기 위하여, 실제작업에서 생성되는 원호의 반경을 R_{sv} 라 정의하고 경로오차 $\Delta R_{sv}(\infty) = R_c'(\infty) - R_{sv}(\infty)$ 를 정의한다.

그림8의 서보제어시스템의 전달함수를 z 영역에서 나타내면 다음과 같이 표시된다.

$$H_{sv}(z) = \frac{c_1 z + c_2}{z^3 + b_1 z^2 + b_2 z + b_3} \quad (28)$$

여기서

$$b_1 = d_1 K_p [d_2 T_s - 1 + \exp(-d_2 T_s)]$$

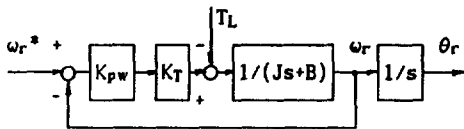
$$\begin{aligned}
 & -\exp(-d_2 T_s) - 2 \\
 b_2 = & 1 + 2\exp(-d_2 T_s) + d_1(K_I - K_P) \\
 & [d_2 T_s - 1 + \exp(-d_2 T_s)] \\
 & + d_1 K_P [1 - (1 + d_2 T_s)\exp(-d_2 T_s)] \quad (29) \\
 b_3 = & d_1(K_I - K_P) [1 - (1 + d_2 T_s)\exp(-d_2 T_s)] \\
 & - \exp(-d_2 T_s) \\
 c_1 = & d_1 K_I [d_2 T_s - 1 + \exp(-d_2 T_s)] \\
 c_2 = & d_1 K_I [1 - (1 + d_2 T_s)\exp(-d_2 T_s)] \\
 d_1 = & J K_{pw} K_T / (B + K_{pw} K_T)^2 \\
 d_2 = & (B + K_{pw} K_T) / J
 \end{aligned}$$

로 주어진다[12]. 그림8에서 K_I, K_P 는 위치제어루우프에서의 비례 및 적분이득, K_{pw} 는 속도제어루우프에서의 비례이득, K_T 는 모터의 토크상수, J 는 축의 등가 Momentum of Inertia, B 는 댐핑계수, T_s 은 부하토크를 각각 나타낸다. 그리고 θ_r^*, ω_r^* 는 가감속을 통한 위치와 속도제어의 명령값을 각각 나타내며 θ_r, ω_r 은 실제 위치와 속도의 명령값을 각각 나타낸다.

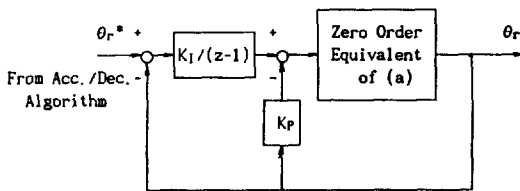
이제 그림8의 서보제어시스템에 의하여 발생하는 경로오차에 대하여 논한다. 앞서와 마찬가지로 정상상태에서의 오차를 고려 하면, 경로오차는 다음과 같이 계산된다.

$$\Delta R_{sv}(\infty) = R_c'(1 - A/B) \quad (30)$$

여기서



(a) 속도제어시스템
(a) Velocity control system



(b) 서보제어시스템
(b) Servo control system.

그림 8 산업용로봇과 CNC공작기계의 서보제어시스템

Fig. 8 The servo control system of industrial robots and CNC machine tools.

$$A = \quad (31)$$

$$\frac{\sqrt{[\cos(3\omega T_s) + b_1 \cos(2\omega T_s) + b_2 \cos(\omega T_s) + b_3]^2 + [\sin(3\omega T_s) + b_1 \sin(2\omega T_s) + b_2 \cos(\omega T_s)]^2}}$$

$$B = \sqrt{[c_1 \cos(\omega T_s) + c_2]^2 + [c_1 \sin(\omega T_s)]^2}$$

식(30)~(31)에서 알 수 있듯이 K_T, J, B 는 상수이므로 서보제어시스템에 의한 경로오차는 샘플링주기 T_s 및 제어이득 K_I, K_P, K_{pw} 들의 영향을 받을 수 있다. 식(30)의 경로오차는 매우 복잡한 형태를 띠고 있어, 식자체로는 제어이득들과 경로오차 사이의 물리적인 의미를 분석하기는 매우 어렵고 시뮬레이션을 통하여 그 의미를 분석할 수 있다. 그러나 이와 같이 산업용로봇과 CNC공작기계의 선형모델링을 토대로 분석된 결과는 제어방법과 경로오차사이의 관계에 관한 추세(Trend)를 제공한다. 실제로 산업용로봇과 CNC공작기계의 경우 엄밀하게는 비선형시스템으로 모델링됨으로 정확한 분석을 위해서는 수치해석방법이 요구된다.

한편 산업현장의 실제작업에서는 그림8의 서보제어시스템이 단위스텝입력에 대하여 임계제동의 특성, 즉 일차이연시스템과 유사한 특성을 가지도록 제어이득들이 조정되기 때문에 식(30)의 경로오차는 서보제어시스템의 시정수를 기본으로 한 식으로 표현 된다[2]. 이 경우 시정수는 제어이득들의 조정을 통하여 변화시킬 수 있으며, 단위계단함수에 대한 서보제어시스템의 출력을 관찰함으로써 알 수 있다. 그리고 시정수와 제어이득들간의 관계는 명확하게는 알 수 없지만 그 추세를 알 수 있다.

실제로 보간된 궤적데이터와 작업이 수행된 궤적사이의 전체오차는 식(22), (26), (27)의 경로오차와 식(30)의 경로오차의 곱으로서 표현된다.

4. 실험결과

제안한 소프트웨어 가감속알고리즘을 산업용로봇과 CNC공작기계에 적용하기 위하여, 32비트 부동점 DSP TMS320C30을 CPU로 채택한 운동제어시스템이 실험에 사용되었다. 사용된 운동제어시스템은 동시 6축제어가 가능하고 다음과 같은 특징을 가지고 있다.

- 1) 운동제어시스템과 산업용로봇주제어기나 CNC사이의 신호전달은 DPR(Dual Ported RAM)을 통해서 이루어진다.
- 2) 직선, 원호 및 각종보간기능과 직선, 지수함수, 파라볼릭 등 각종 가감속기능 및 고속,

고해상도의 엔코더펄스 처리기능을 가지고 있다.

- 3) 위치제어루프내에 축의 Inertia와 댐핑계수의 변화를 보상하기 위한 속도 및 가속도 피이드포워드 제어항을 가지고 있으며, 관측자를 사용하여 속도제어기 입력단에서의 율셋을 적용보상하고 있다[13].
- 4) 제어시 발생할 수 있는 기계진동을 제거하기 위한 대역폭의 조정이 가능한 대역폭 제거 필터를 가지고 있다.
- 5) 필요할 경우 Daisy-chain에 의해 동시제어축 수를 확장할 수 있다.

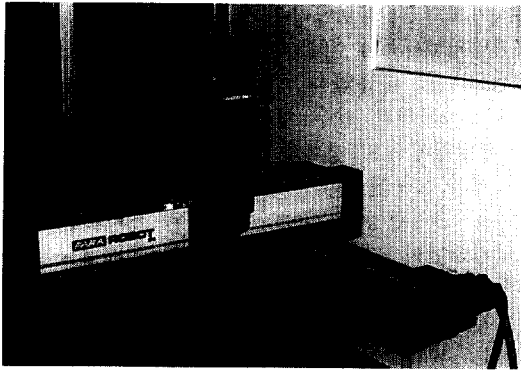


그림 9 직교좌표로봇 FARA-C2의 실물사진
 Fig. 9 The photograph of the FARA-C2 cartesian type robot.

표 1 직교좌표로봇 FARA-C2의 몸체사양
 Table 1 The body specification of the FARA-C2 cartesian type robot.

항 목	사 양	
자 유 도	2~4	
작업영역	X축	200~600mm
	Y축	200~500mm
	Z축	100~200mm
	θ 축	$\pm 180^\circ$
최 대 합 성 속 도	1,400mm/sec	
반 복 정 밀 도	± 0.03 mm	
가 반 중 량	5kgf(4축기준)	
구 동 방 식	AC SERVO DRIVE	
본 체 중 량	52kgf	

본 논문에서는 설계한 운동제어시스템을 통하여 제안한 알고리즘의 특성을 시험하기 위하여 표1의 사양을 가지고 있는 삼성전자의 직교좌표로봇 FARA-C2를 사용하였다[14]. FARA-C2의 실물 사진은 그림9에 보이고 있다.

실험에서는 한 회전당 4096개의 펄스를 출력하는 해상도를 가진 엔코더가 사용되었으며, 직선, 지수함수, 및 p 가 2인 경우의 파라볼릭가속에

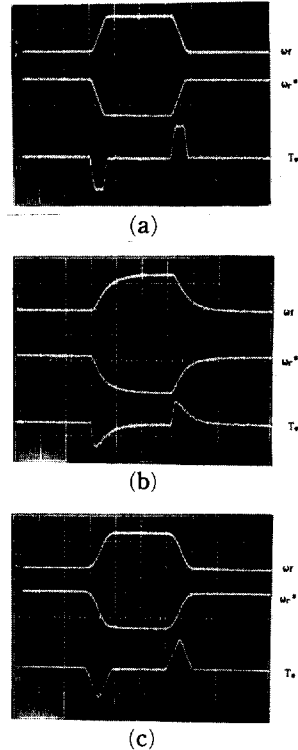


그림 10 가감속방법들의 실험결과(x -축 : 0.5sec/div., y -축 : 상, 중 : 57kpps/div., 하 : 3.9 kgf-cm)

- (a) 직선가감속의 실험결과
- (b) 지수함수가감속의 결과
- (c) 파라볼릭가감속의 결과

Fig. 10 The experimental results for acceleration/deceleration methods. (x -axis : 0.5 sec/div., y -axis : upper, middle : 57kpps/div., lower : 3.9kgf-cm)

- (a) The experimental result for linear acceleration/deceleration.
- (b) The experimental result for exponential acceleration/deceleration.
- (c) The experimental result for parabolic acceleration/deceleration.

대한 결과를 제시하기 위하여 로봇의 X축에 -X방향으로 122880펄스의 위치명령값을 지령하였다. 이제 각 가감속에 대한 소프트웨어알고리즘의 특성을 보이기 위하여 FARA-C2의 X축에 대한 가감속출력파형 즉 모터속도명령파형과 속도피이드백 및 모터의 토오크파형을 보인다. 그림10의 (a), (b), (c)는 각각 직선, 지수함수, 및 파라볼릭가감속에 대한 실험결과를 보이고 있다. 그림10에서 ω_r^* , ω_r , T_e 는 각각 속도명령, 속도피이드백, 및 토오크파형을 나타낸다. 여기서 토오크파형은 속도명령파형을 미분에 가까운 일차지연시스템을 거친 가속도정보의 형태를 가지고 있고, 속도피이드백은 속도명령파형과 일치함을 볼 수 있다. 이 사실은 앞서 설명한 바와 같이 서보제어시스템이 스텝입력에 대하여 임계제동의 특성을 가지도록 제어이득들이 조정되었음을 보이고 있다.

그림10의 실험결과들은 제안한 알고리즘과 설계한 운동제어시스템이 산업용로봇과 CNC공작기계의 제어에 효과적으로 사용될 수 있음을 보이고 있다.

6. 결 론

본 논문에서는 산업용로봇과 CNC 공작기계제어에 필수적인 가감속방법들을 소프트웨어적으로 실현하는 방법을 제시하였다. 특히 널리 사용되고 있는 직선, 지수함수, 파라볼릭가감속방법에 대하여 기술하였고, 또한 이들을 포함한 임의의 가감속방법들이 FIR필터를 통해 실현될 수 있음을 보였다. 그리고 소프트웨어가감속방법들과 하드웨어가감속방법들과의 연관관계를 소프트웨어를 실현하기 위한 기본식들로부터 보였다.

산업용로봇과 CNC공작기계가 원하는 작업을 수행할 경우 보간된 궤적데이터와 작업이 수행된 궤적사이에는 경로오차로 정의되는 오차가 존재함을 보이고, 이 경로오차는 차감속에 의하여 발생하는 오차와 서보제어시스템의 특성에 의하여 발생하는 오차로 나뉘어 짐을 보였다. 그리고 가감속에 의한 오차의 경우 산업계에서 가장 널리 사용되고 있는 직선, 지수함수, 및 파라볼릭가감속에 대하여 오차를 분석하였다.

그리고 제안한 가감속알고리즘과 이를 실현하기 위하여 TMS320C30을 CPU로 채택한 운동제어시스템을 설계하고, 이의 성능을 보이기 위하여 삼성전자의 직교좌표로봇 FARA-C2를 사용하여 실험을 행하였다. 실험결과는 제안한 알고리즘과 설계한 운동제어 시스템이 산업용로봇과 CNC공

작기계의 제어에 효과적으로 사용될 수 있음을 보이고 있다. 실제로 제안한 알고리즘과 설계한 운동제어시스템은 삼성전자의 직교좌표로봇 FARA-C2와 6축 로봇 FARA-AR1에 적용되고 있다.

앞으로 경로오차를 줄일 수 있는 새로운 서보제어방법의 연구가 기대되며, 이와 병행하여 수식적인 오차분석과 실제 가공면의 분석을 통한 제어성능의 향상이 요망된다.

참 고 문 헌

- [1] Y. Koren, Computer Control of Manufacturing Systems, McGraw-hill Inc., 1988.
- [2] FANUC, FANUC Series 15-MA Operator's Manual, 1991.
- [3] L. Rabelo, "Intelligent Control of a Robotic Arm Using Hierarchical Neural Network Systems," Proceedings of IJCNN-91, vol. 2, pp. 747~752, 1991.
- [4] D.I. Kim, J.I. Song, Y.G. Lim, and S. Kim, "Software Linear and Exponential Acceleration/Deceleration Methods for Industrial Robots and CNC Machine Tools," KACC'91, pp. 1904~1909, Seoul, Korea, 1991.
- [5] R. Nozawa et al., Acceleration/Deceleration Circuit, U.S. Patent 4,554,497.
- [6] A. Papoulis, The Fourier Integral and Its Applications, McGraw-Hill Inc., 1962.
- [7] J.R. Armstrong, "Design of a Graphic Generator for Remote Terminal Application," IEEE Trans. Comput., Vol. 22, pp. 464~469, 1973.
- [8] D.I. Kim, J.I. Song, and S. Kim, "Digital Signal Processor System for CNC Systems," IECON'91, pp. 1861~1866, Kobe, Japan, 1991.
- [9] J.I. Song, "Acceleration/Deceleration Control of Servo Motor," Technical Report, Production Engineering Div. Samsung Electronics, 1990.
- [10] S. Kim et al, "Robot Controller with 32-bit DSP Chip," KACC'91, pp. 292~298, Seoul, Korea, 1991.
- [11] O. Masory and Y. Koren, "Reference-Word Circular Interpolators for CNC Systems," Trans. of ASME, Vol. 104, pp. 400~405,

1982.
 [12] K.J. Astrom and B. Wittenmark, Computer Controlled Systems, Ch. 3, Prentice-Hall Inc., 1990.
 [13] D.I. Kim, J.W. Lee, and S. Kim, "Control of

Permanent Magnet AC Servo Motors without Absolute Rotor Position Transducers," PESC'91, pp. 578~585, Boston, U.S.A., 1991.
 [14] Samsung Electronics, FARA-C2 Operator's Guide, 1990.

저 자 소 개



김동일(金東日)

1959년 6월 13일생. 1982년 서울대 공대 제어계측공학과 졸업. 1984년 동 대학원 제어계측공학과 졸업(석사). 1989년 동 대학원 제어계측공학과 졸업(공학박사). 현재 삼성전자 생산기술본부 제어기술개발팀장.



송진일(宋鎭一)

1961년 5월 16일생. 1984년 인하대 공대 전자공학과 졸업. 1986년 서울대 대학원 제어계측공학과 졸업(석사). 현재 삼성전자 생산기술본부 제어기술 개발팀 선임연구원.



김성권(金成權)

1949년 8월 1일생. 1972년 동아대 공대 기계공학과 졸업. 1976년 (주)금성사 근무. 1984년 국방과학연구소 선임 연구원. 1986년 Univ. of Min-nesota 기계공학과 졸업(석사). 1988년 Univ. of Minnesota 기계공학과 졸업(공학박사). 현재 삼성전자 생산기술본부 부본부장.