

## 매니퓰레이터 서보제어와 궤도 계획

°최진태

박상덕

산업과학기술 연구소

## Servo Control of a Manipulator and Trajectory Planning

C.T., Choi

S.D., Park

RIST

## Abstract

In general, the control of robot arms falls into two board categories (position control and force control). The joint interpolated trajectory schemes generally interpolate the desired joint path by a class of polynomial functions and generate a sequence of time based control set points for the control of a manipulator from a initial location to its destination.

A digital position controller was designed and adapted to the industrial balancing manipulator. And also, the joint interpolated trajectory using 3rd order polynomial was generated in this study. The IBM PC used as the main controller and the trajectory planner had enough run-time capabilities.

The 8097BH microcontroller is an integral part of the joint controller which directly controls an axis of motion. The PI servo control system to treat each joint of the robot arm as a independent joint servo mechanism had satisfying performance, and a sequence of time-based intermediate configurations of the manipulator hand showed good continuity and smoothness on position and velocity of the manipulator's joint coordinates along the trajectory.

## 1. 서론

로봇 암의 제어는 대개 두 범위로 나눌 수 있는데, 하나는 정확한 위치제어이고 다른 하나는 로봇 암의 외부환경에 접촉하여 가해지는 힘을 제어하는

것이다. 로봇암은 관성 모멘트, 코리올리 힘, 그리고 원심력의 변화에 따라 바뀌는 동역학(dynamics)를 가지므로, 제어하기가 용이하지 않지만, 고비율 기어를 사용하면 위와 같은 파라메타가 미치는 영향은 상당히 줄어든다[1]. 정확한 위치제어는 로봇 암의 응답이 안정되고, 암이 주어진 궤도를 오차 없이 따라가게 하므로, 궤도계획과 힘제어 에도 중요하다. 궤도계획은 다항식(Polynomial function)을 이용하여 말단 효과기(End-effector)가 주어진 경로를 따라 움직이도록 하는 것으로써, 초기 위치에서 최종 위치까지, 로봇의 위치제어를 위한 제어 위치점(Control set point)을 생성한다.

본 연구에서는 자중대비 가반중량이 큰 전기-공압 복합 로봇에 적용된 다중 프로세서를 이용한, 로봇 컨트롤러 구조와, 서보모터의 위치제어 및 조인트 보간 궤도계획을 고찰하고자 한다.

## 2. 본론

## 2.1 로봇 컨트롤러의 구성

로봇 암이 운동하는 궤도의 제어 위치점을 실시간 내에 생성하고, 주어진 제어 위치점을 위치 제어하기 위해서는, 고속의 컴퓨터가 필요하거나, 혹은 궤도계획을 수행하는 프로세서와, 위치제어를 전담하는 프로세서로 구분되는 다중 마이크로 프로세서 시스템을 사용해야한다.

그림1은 개발된 컨트롤러의 구조를 나타낸다. Intel 계열 16 bit 마이크로 프로세서를 이용한 다중 마이크로 프로세서 시스템을 채택하였는데, 전반적인 로봇 시스템 관리, 작업계획(Task Planning), 외부

환경과의 인터페이스, 궤도 계획은 IBM PC AT에서 이루어지고, 로봇암을 구동시키는 서보 모터의 위치 제어와 파워앰프(Power amp)의 상태 진단 등은 Intel MCS 96계열(8097BH) 마이크로 컨트롤러(Micro controller)를 사용하였다.

8097BH는 데이터 버스와 어드레스 버스를 공유하고 있으며 멀티 플렉싱에 의해 read, write 구간동안 데이터 버스 역할을 하고, 그 전에는 어드레스 버스 기능을 가진다. 데이터 버스가 16bit 이므로 고속의 데이터 처리가 가능하고, 전용 인터럽트 뿐만아니라, 조인트 리미트 스위치와 엔코더 Z상에 의한 인터럽트를 받아들이는 HSI(High Speed Input) pin이 있어서, 별도의 인터럽트 인식 회로가 필요없이 S/W에 의해 처리 된다. 또 마이크로 컨트롤러 자체내에 256 byte의 RAM을 가지고 있어서, 회로 구성시 RAM을 구성하지 않아도 되며, 내부에 16 bit 타이머 2개와 S/W 타이머가 2대 내장되어 있어, 타이머 레지스트를 읽어서 샘플링 구간을 결정하거나 타이머 인터럽트 처리가 가능하다. 그림2는 8097 BH의 구조를 도식적으로 나타내는데, PWM 출력과 시리얼 데이터 전송 기능도 가지고 있어서, 컨트롤러의 회로를 간단하게 꾸밀 수 있다[2].

PC AT와 MCS 96 마이크로 컨트롤러는 PPI를 사용하여 핸드셰이킹(Hand shaking)에 의해 명령을 주고받는데 AT의 80286 프로세서와 MCS96 프로세서가 12.5 MHz 와 12 MHz의 Clock으로 작동되므로 기존의 로봇 시스템에 비해 처리 속도가 매우 빠르다. 위치센서로는 인크리멘탈 엔코더(Incremental Encoder)를 사용하였는데 A, B 상(pluse)은 회전방향과 위치를 판별하는데 쓰이고, Z상은 인터럽트(Interrupt) 처리에 의해 암의 초기 위치를 결정하는데 이용되었다.

## 2.2 제어모델

로봇암의 동역학은 관성모멘트가 관절의 형상에 따라 변하고, 다른 관절이 운동하면서 야기되는 커플링 힘, 그리고 원심력, 코리올리 힘등에 의해 대단히 복잡하므로, 실 적용시에 제어 모델화 하기가 곤란하다. 따라서 직류 서보모터를 조인트 액츄에이터로 사용하고, 각 조인트를 독립된 서보계 (Servo-mechanism)로 간주하여 제어모델을 형성한다[3]. 그림 3은 조인트 서보제어계를 나타내는데, PC에서 보내진 위치 지령치는 마이크로 컨트롤러의 디지털 제어기에 입력되고, DAC에서 방출되는 전압은 파워앰프에 전달되어 서보모터의 속도를 변화시킨다.

모터의 감속비가 n일때 로봇 암이 조인트 모터에 미치는 토크를 구하면[4]

$$\tau_a = \frac{1}{n^2} [J_a \ddot{\theta}_m + B_a \dot{\theta}_m] \quad (1)$$

여기서  $J_a$ : 로봇 암의 관성 모멘트

$B_a$ : 조인트의 점성 마찰 계수

$\dot{\theta}_m$ : 모터의 각 속도

$\ddot{\theta}_m$ : 모터의 각 가속도

$\tau_a$ : 로봇 암이 모터에 미치는 토크

모터와 로봇 암에 의해 모터에 가해지는 총 토크는

$$\tau = (J_m + \frac{1}{n^2} J_a) \ddot{\theta}_m + (B_m + \frac{1}{n^2} B_a) \dot{\theta}_m \quad (2)$$

여기서  $J_m$ : 모터의 관성 모멘트

$B_m$ : 모터의 점성 마찰 계수

$\tau$ : 총 토크

으로 표시되며,  $J_m + \frac{1}{n^2} J_a$  는 모터에 가해지는 총 관성

모멘트이고  $B_m + \frac{1}{n^2} B_a$  는 총 점성 마찰 계수이다.

대개 로봇에서 감속비 n이  $\frac{1}{100}$  정도이므로 암의 관성모멘트  $J_a$ 와 점성 마찰 계수가 모터에 미치는 영향은 상당히 작다. 모터축에 타코메타가 연결되어 있어 회전 속도에 비례하는 전압을 파워앰프에 피드백 하는데, 타코메타 게인  $K_g$ 가 커지면, 댐핑효과가 커지게 되어, 암의 진동이 작아지고, 안정된 제어계를 꾸미기가 용이하다.

제어계의 전달함수를 구하면

$$\frac{\theta(s)}{\theta_d(s)} = G(s) = \frac{AK_T}{s(s\tau_A + 1) [K_E K_T + (sJ_T + B)(R_a + sL_a) + AK_T(sK_g + 1)]} \quad (3)$$

로봇의 조인트에 적용된 감속기는 312:1로 고비율인데, 고비율을 얻기 위해 3:1 기어와 104:1의 RV 감속기를 혼용하였다. 기어를 사용할때 생기는 백래쉬(Backlash)를 최대한 줄이기 위해, 그림 4에서 감속기 기계구조를 나타난 바와 같이 모터와 RV 감속기 사이에 기어를 배치하여, 기어 자체의 백래쉬를 RV 감속기 감속비를 만큼 줄이도록 하였다. 감속기의 백래쉬 량을 구해보면

$$\theta_b = \frac{\theta_g}{N_r} + \theta_r \quad (4)$$

여기서  $\frac{\theta_g}{N_r} \approx 0$  이므로

$$\theta_b = \theta_r \quad (5)$$

$\theta_b$ : 감속기 전체의 백래쉬 량

$\theta_r$ : RV 감속기 백래쉬 량

$\theta_g$ : 기어의 백래쉬 량

$N_r$ : RV 감속기의 감속비

그러므로 스퍼어 기어를 사용하였지만, 조인트 축단에 나타나는 백래쉬는 RV 감속기 백래쉬뿐이다. 고비를 감속구조를 채택하고, 타코메타 피드백을 앰프에서 받아들여 보상하므로, 댐핑효과가 커서 미분제어기를 사용하지 않고 PI 제어기로 컨트롤러를 구성하였다.

### 2.3 궤도 계획

로봇 암이 주어진 시간 동안에 주어진 거리를 움직이게 하려면, 암의 위치를 시간에 따라 표시해 주어야 하는데, 궤도 계획은 정해진 궤도 보간 시간마다 보간 함수의 값을 계산하여, 암이 궤도 내에서 움직여야 하는 위치 점들을 생성시키고, 계산된 점들은 조인트 서보제어계의 위치 제어 입력이 된다.

로봇 암이 진동없이 매끄러운 운동을 하려면 암의 위치, 속도가 연속적이어야 하고, 암의 관성모멘트, 최대 회전속도 등에 따라 적절한 조인트 보간 함수를 사용하는데, 조인트 보간 함수에는 3차, 4차, 5차 다항식 등이 있다. 조인트 궤도를 표시하기 위해 n차 다항식을 사용하면, 계수는 n+1개 되는데, 3차 다항식까지는 로봇 암의 위치와 속도 조건을 대입하여 계수를 구할 수 있지만, 4차 이상이 되면, 암의 각 가속도 조건을 포함시켜야 계수를 계산할 수 있다. 계산시간이 가장 짧은 3차 다항식을 수식으로 나타내면[5]

$$\theta(t) = C_0 + C_1 t + C_2 t^2 + C_3 t^3 \quad (6)$$

여기서  $\theta$ : 로봇 암의 회전 각

$C_i$ : 계수

$t$ : 시간

(6)식으로 표시되며, 암의 초기 위치와 속도 그리고 최종위치와 속도에 의해, 위 식의 계수를 구할 수

있다. 궤도의 조건은 암이 초기와 최종 위치에서 정지하며, 위치와 속도 조건을 나타내면, 위치조건 :

$$\theta(0) = \theta_0 \quad (7)$$

$$\theta(t_f) = \theta_f$$

속도 조건 :

$$\dot{\theta}(0) = 0 \quad (8)$$

$$\dot{\theta}(t_f) = 0$$

이다.

위의 조건을 대입하여 계수를 구하면 아래와 같다.

$$C_0 = \theta_0$$

$$C_1 = 0 \quad (9)$$

$$C_2 = \frac{3}{t_f^2} (\theta_f - \theta_0)$$

$$C_3 = -\frac{2}{t_f^3} (\theta_f - \theta_0)$$

로봇 암이 구동하게 되면 정해진 경로 갱신 시간(Path update interval) 마다 암이 위치 값이 계산되고, 그 값들은 PPI를 통하여 조인트 컨트롤러의 위치 제어 입력으로 전송된다. 궤도 계획은 그림 5의 흐름도에 나타난 순서를 따르며, 궤도 계획의 시간 구간은 로봇의 형태에 따라 상이하지만 본 연구에서는 20 ms이다.

그림 6과 그림 7은 매니퓰레이터가 실제로 초기 위치에서 최종 위치까지 운동하여 시간에 따른 궤도 위치와, 그에 대응하여 제어기를 거쳐 파워 앰프에 보내지는 DAC 출력을 표시하는데, 로봇 암의 속도가 처음과 마지막 구간에서는 느리고 중앙부에서는 가장 빠르다.

### 3. 결론

전기.공압 복합 구동형 매니퓰레이터의 로봇 컨트롤러로서, IBM PC AT와 16 bit 마이크로 컨트롤러를 이용한 다중 프로세서 시스템을 구성하고, 실제 매니퓰레이터에 적용하였다. 로봇 암의 조인트 컨트롤러로 사용된 마이크로 컨트롤러는 자체내에 타이머, 고속 입력처리 및 인터럽트 인식 레지스트 등을 내장하고 있어, 회로를 간단하게 꾸밀 수있고 고속 프로세싱으로 인해 서보 제어 기능이 뛰어나다. 로봇 암의 궤도를 나타내기 위해 3차 다항식을 이용하여 경로 갱신 시간마다 새로운 위치 지령치를 구하

고, 이를 Handshaking 방식에 의해 조인트 프로세서에 전달했다. 프로세서 내의 카운터는 실시간으로 엔코더 펄스의 시간 간격을 측정할 수 있어, 로봇암의 속도를 구할 수 있고, 연산 속도가 빠르므로 향후 보다 나은 제어기의 구성에 보다 많이 사용될 것이다.

참고문헌

- [1] Kenji Tamaki and et al., "Microprocessor based Robust Control of a DC Servo Motor", IEEE Control systems Magazine, pp 30-36, 1986.
- [2] "16bit Embedded Controller Handbook", Intel, pp 2-47, 1989.
- [3] B. C. Kuo, "Automatic Control Systems", Prentice-Hall, pp 348-356, 1987.
- [4] K. S. Fu and et al., "Robotics Control, sensing, Vision and Intelligen", MCGraw-Hill, pp 149-157, 1987.
- [5] J. J. Craig, "Introduction to Robotics", Addison-wesley, pp 191-205, 1986.

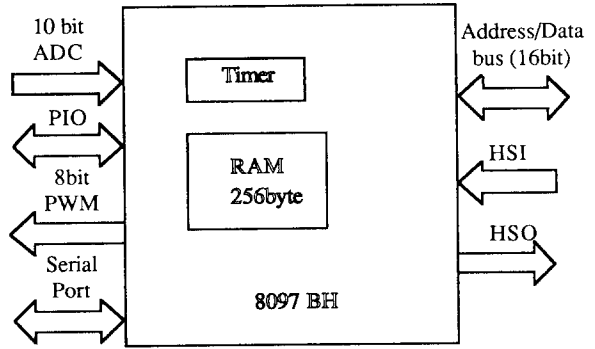


그림 2 8097 BH의 구조

Fig. 2 Architecture of 8097 BH Microcontroller

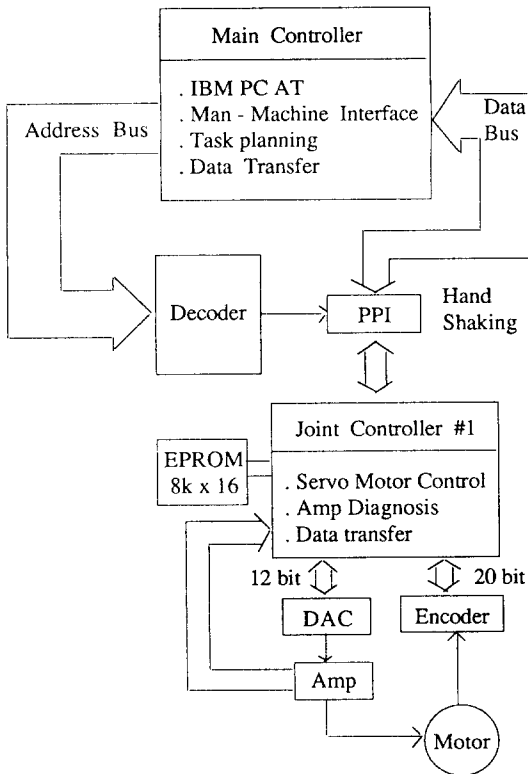


그림 1 로봇 컨트롤러의 구조

Fig. 1 Architecture of Robot Controller

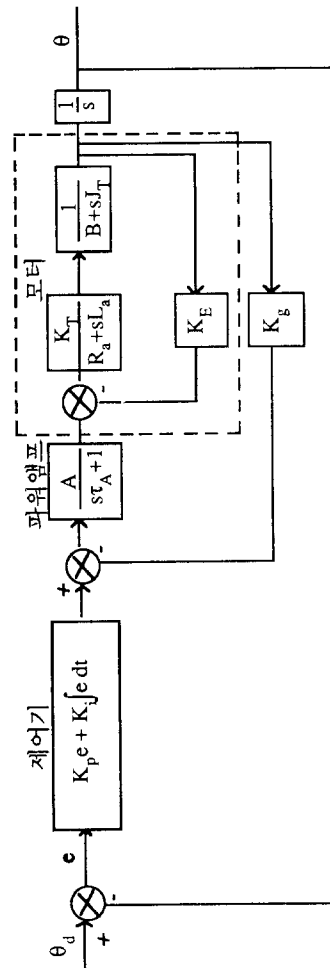


그림 3. 조인트 서보 제어계

Fig. 3 Servo Control System of a Robot Joint

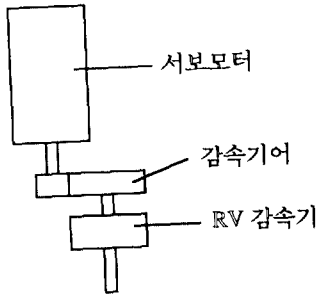


그림 4. 감속기 구조

Fig.4 Mechanism of Reduction Gears

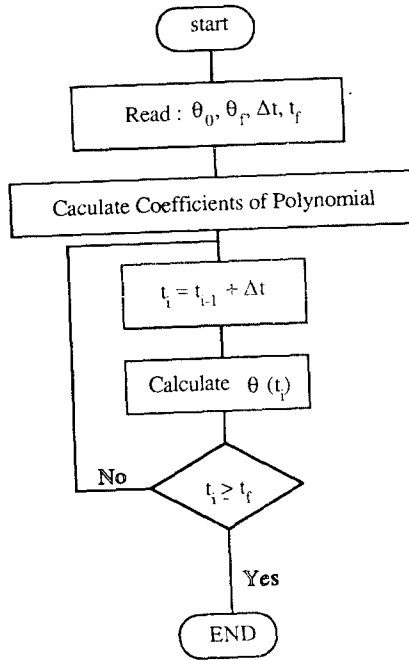


그림 5. 궤도 계획의 흐름도

Fig. 5 Flowchart of Trajectory Planning

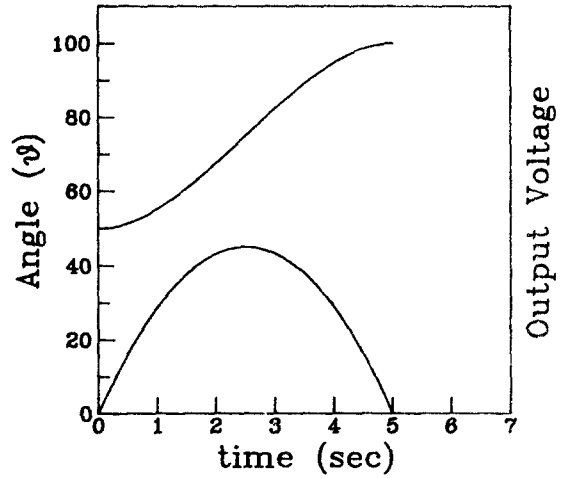


그림 6. 암의 궤도와 디지털-아날로그 컨버터 출력 ( $t_f = 5$ sec)

Fig. 6. Trajectory Profile and DAC output ( $t_f = 5$ sec)

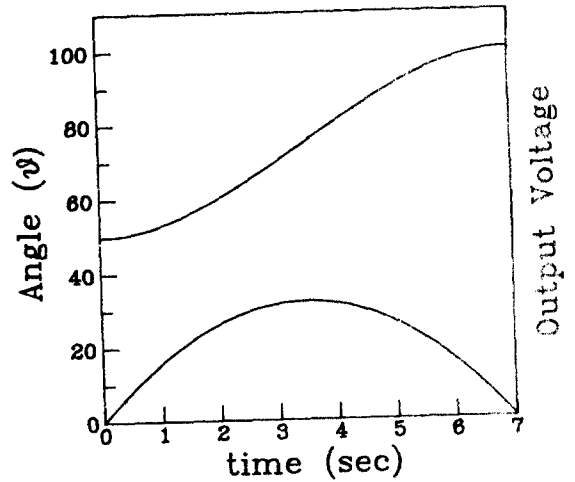


그림 7. 암의 궤도와 디지털-아날로그 컨버터 출력 ( $t_f = 7$ sec)

Fig. 7. Trajectory Profile and DAC output ( $t_f = 7$ sec)