

로봇 매니플레이터(3-축)의 제작과 제어 알고리즘 적용에 관한 연구

이 희 진 김 승 우 사공 성대 박 민 용 이 상 배  
연세대학교 전자공학과

A Study on design of Robot Manipulator and Application of Control Algorithm

Lee, Hee-Jin Kim, Seung-Woo Sagong, Seongdae Park, Mignon Lee, Sang-Bae

ABSTRACT

This paper is to show design of robot manipulator which has 3-link using DC Motor and realization of control algorithm with IBM-XT Micro-computer connected.

Central algorithm is applied by position and pass control using point-to-point method. At first, this paper computes required angles on each joint in order to search desired position or path, and uses a voltage control with feedback from output of encoder and tachometer in real time.

The application of control algorithm on position, velocity and force for each joint of manipulator by using self-tuning control is left for next study.

1. 서론

60년대 들어 산업용 로봇이 등장하기 시작한 이래로 현재는 전 세계적으로 그 이용도가 증가추세에 있다. 다관절 로봇 매니플레이터의 운동방정식은 고전 역학으로부터 유도된 Lagrange-Euler 방정식으로 표현 가능하며, 최근에는 이러한 매니플레이터 시스템의 제어에 관하여 많은 연구가 이루어지고 있다.

산업 현장에서 로봇은 대량 생산을 위한 공장 자동화 분야에서 중요한 역할을 하게 되었으며, 국내에서도 각 대학 및 산업체에서 여러 형태의 산업용 로봇 개발에 박차를 가해왔다.

따라서 본 연구에서는 Robot manipulator system의 실제 구성과 그동안 Computer simulation을 이용한 제어 알고리즘 연구 자료를 실제 system에 적용해 보았다.

2. Robot manipulator system 및 Robot 좌표계의 해석

2-1. Robot manipulator

이 연구에서 제작한 3-축 Robot manipulator는 그림 2.1과 같다.

각 joint는 encoder와 Tachometer가 부착되어 있는 DC motor와 60:1의 감속기로 구성되어 있다.

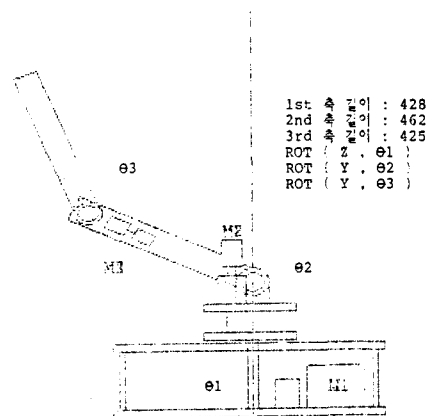


그림 [2-1] 제작한 로봇 매니플레이터

2-2. Manipulator Interface

자유도 3 인 Robot manipulator 를 구동하기 위한 Hardware의 Block diagram은 그림 2-2와 같다.

IBM-XT를 이용한 Robot 의 구동은 Tachometer에서 나온 매니플레이터의 전압을 A/D 변환기를 통해 측정하면서 D/A 변환기를 사용하여 speed 를 제어한다.

정확한 position 측정을 위해 counter 회로를 IBM-XT와 Interface 하였고 여기서 발생한 Error 를 Encoder 의 1 pulse-width 이상 되지 않도록 feedback 시켜 조절하였다.

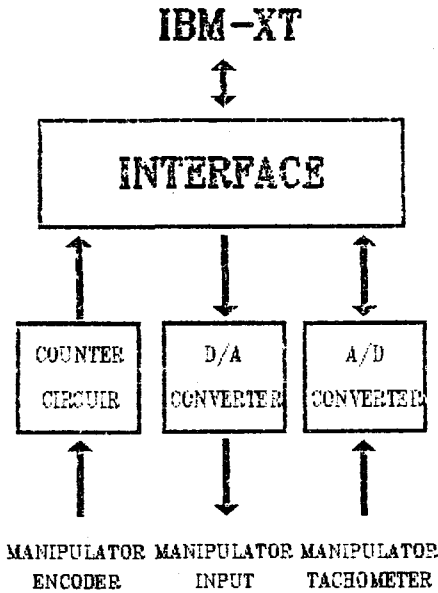


그림 [2-2] CONTROLLER BLOCK DIAGRAM

2-3. 제어 흐름도

Robot manipulator 의 정확한 position 측정을 위한 software flow chart 는 그림 2-3과 같다.

position의 값과 방향을 Input 으로 주면 틀 encoder pulse 수로 전환하여 position 측정을 하게 되며 만일 에러가 발생하면 방향을 전환하여 1 pulse-width 이상의 Error 값을 수정하게 하였다.

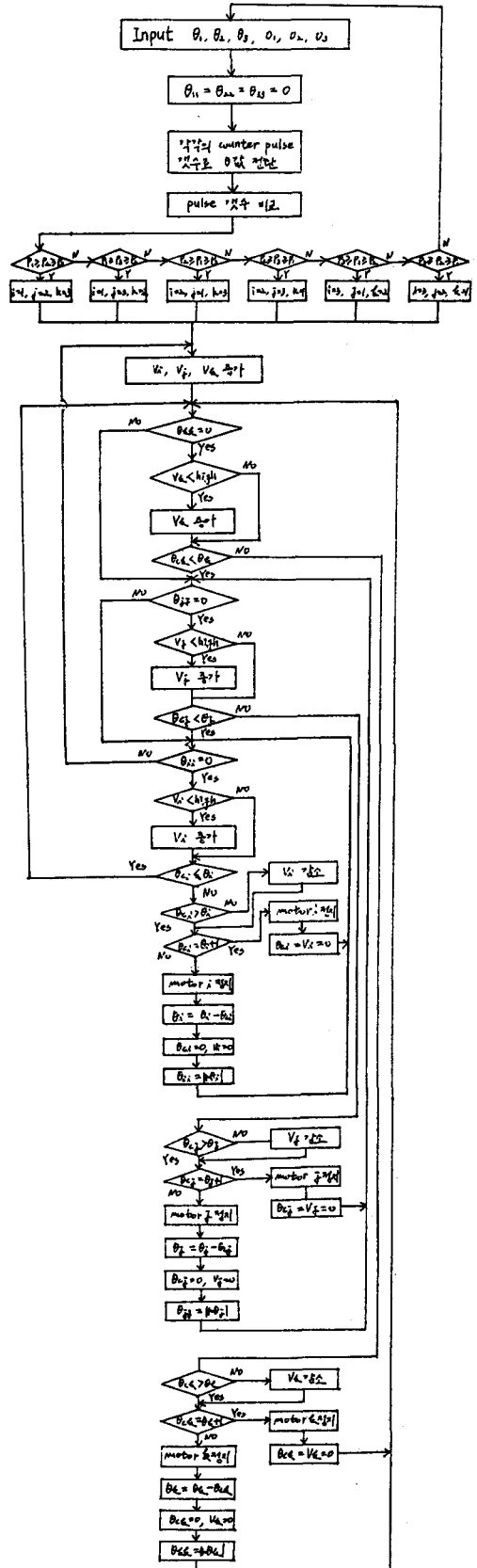


그림 [2-3] FLOW CHART (제어 알고리즘)

2-4 보보트 좌표계

$$T = A1 \times A2 \times A3 \quad \text{-----(1)}$$

$$T = \begin{bmatrix} n_x & o_x & a_x & p_x \\ n_y & o_y & a_y & p_y \\ n_z & o_z & a_z & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad \begin{matrix} \text{: position} \\ \text{matrix} \end{matrix}$$

A1 : 1st축 변환 matrix

A2 : 2nd축 변환 matrix

A3 : 3rd축 변환 matrix

$$A1 \times T = A2 \times A3 \quad \text{-----(2)}$$

$$\begin{bmatrix} n_x \cos \theta_1 & o_x \cos \theta_1 & a_x \cos \theta_1 & p_x \cos \theta_1 \\ +n_y \sin \theta_1 & +o_y \sin \theta_1 & +a_y \sin \theta_1 & +p_y \sin \theta_1 \\ \\ n_z & o_z & a_z & p_z - a \\ n_x \sin \theta_1 & o_x \sin \theta_1 & a_x \sin \theta_1 & p_x \sin \theta_1 \\ +n_y \cos \theta_1 & -o_y \cos \theta_1 & +a_y \cos \theta_1 & -p_y \cos \theta_1 \\ \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$= \begin{bmatrix} \cos \theta_2 \cos \theta_3 & -\cos \theta_2 \sin \theta_3 & 0 & c \cos \theta_2 \cos \theta_3 \\ -\sin \theta_2 \sin \theta_3 & -\sin \theta_2 \cos \theta_3 & -c \sin \theta_2 \sin \theta_3 - b \sin \theta_2 \\ \\ \sin \theta_2 \sin \theta_3 & -\sin \theta_2 \cos \theta_3 & 0 & c \sin \theta_2 \cos \theta_3 \\ +\cos \theta_2 \sin \theta_3 & +\cos \theta_2 \cos \theta_3 & -c \cos \theta_2 \sin \theta_3 + b \cos \theta_2 \\ \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$\theta_1: p_x \sin \theta_1 - p_y \cos \theta_1 = 0$$

$$\theta_1 = \text{Atan } 2(p_y, p_x)$$

$$\theta_{23} = \theta_2 + \theta_3$$

$$\cos(\theta_2 + \theta_3) = n_x \cos \theta_1$$

$$\sin(\theta_2 + \theta_3) = o_y \sin \theta_1$$

$$\tan(\theta_2 + \theta_3) = \tan \theta_1 \quad (\text{현 system 에서는 } n_x = o_y = 1)$$

$$\theta_{23} = \theta_2 + \theta_3 = \theta_1$$

$$\theta_2: p_x \cos \theta_1 + p_y \sin \theta_1 = A$$

$$p_z - a = B \quad (a : 1\text{-축 길이})$$

$$A = c \cos(\theta_{23}) - b \sin \theta_{23} \quad (c : 3\text{-축 길이})$$

$$B = c \sin(\theta_{23}) + b \cos \theta_{23}$$

$$c \cos(\theta_{23}) - A$$

$$\tan \theta_{23} = \frac{c \cos(\theta_{23}) - A}{B - c \sin(\theta_{23})}$$

$$\theta_2 = \text{Atan} \{ c \cos(23) - A, B - c \sin(23) \}$$

$$\theta_3 = \theta_{23} - \theta_2$$

3. 제어 알고리즘

시뮬변 단일입력 단일출력 시스템을 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$A(q^{-1})y(t) = q^{-k}B(q^{-1})u(t) + C(q^{-1})e(t) \quad \text{---(1)}$$

제어 법칙을 유도하기 위하여 다음과 같은 손실 함수를 생각하자.

$$J = E \{ (P(q^{-1})y(t+k) - R(q^{-1})w(t) + Q(q^{-1})u(t)) \} \quad \text{---(2)}$$

이때 보조함수를 다음과 같이 정의하자.

$$\begin{aligned} \phi(t+k) &= P(q^{-1})y(t+k) + Q(q^{-1})u(t) - \\ & R(q^{-1})w(t) \end{aligned} \quad (3)$$

(2) 식을  $u(t)$  에 대하여 최소보 하는 제어를 구하기 위하여 다음식을 생각하자.

$$\frac{C P_0}{A P_f} = E + z^{-k} \frac{F}{A P_0} \quad (4)$$

(3) 식에서 E 와 F 가 유일한 해를 갖으려면 각각  $k-1, n-1 + (\text{deg of PD})$  와 같은 차수가 되어야 한다.

최적 예측기를 구하면

$$C(q^{-1})\phi_{k+1}^*(t+k:t) = F(q^{-1})y^f(t) + G(q^{-1})u(t) \quad (5)$$

$$\phi_{k+1}^*(t+k) = \phi_{k+1}^*(t+k:t) + E(q^{-1})e(t+k) \quad (6)$$

여기서

$$\phi_{k+1}^*(t) = P(q^{-1})y(t) \quad (7)$$

$$P_0 = y^f(t) = y(t) \quad (8)$$

$$G(q^{-1}) = E(q^{-1})B(q^{-1}) \quad (9)$$

(6) 식을 (3)식에 대입하면

$$\phi_{k+1}^*(t) = \phi_{k+1}^*(t) + Q(q^{-1})u(t-k) - R w(t-k) \quad (10)$$

제어신호  $u(t)$  는

$$u(t) = \frac{C R w(t) - F y^f(t)}{G + C Q}$$

(5) 식에서

$$\begin{aligned} \phi_{k+1}^*(t:t-k) &= \frac{F}{P D} y(t-k) + G u(t-k) \\ &- \sum_{i=1}^k C_i \phi_{k+1}^*(t-i:t-k-i) \end{aligned} \quad (11)$$

이것을 다음과 같이 쓰면

$$\phi_{k+1}^*(t:t-k) = x^T(t-k) e y(t) \quad (12)$$

$$x(t) = \left[ \frac{\quad}{P D}; u(t); \phi_{k+1}^*(t-k-1:t-1) \right] \quad (13)$$

$$\bar{e}^T(t) = [f_0; g_0; -c] \quad (14)$$

여기서  $e$  는 순환최소자승추정법에 의해 추정될 수 있다. 3 개의 조인트를 갖는 매니플레이터 운동에 대한 수학적 model 은 Lagrange-Euler eq. 을 이용하여 다음과 같은 다변수 차분 방정식으로 생각할 수 있다.

$$\begin{aligned} y(t) &= A(z^{-1})y(k) + B(z^{-1})u(k-d) + h + e(k) \\ k &= 0, 1, 2, \dots \end{aligned} \quad (15)$$

여기서  $u(t)$  와  $y(t)$  는 각각  $n$  차원 입력, 출력 vector이고,  $e(t)$  는  $n$  차원 vector로 표시되는 백색잡음이다.

$A(z^{-1}), B(z^{-1}), C(z^{-1})$  는 다음과 같이 정의되는 다항식 행렬이다.

$$x(z^{-1}) = x_0 + x z^{-1} + \dots + x z^{-n} \quad (16)$$

이때 최적 예측기는 다음과 같다.

$$\phi_{k+1}^*(t+k:t) = \tilde{C}^T [\tilde{G}y(t) + \tilde{F} B u(t)] \quad (17)$$

4. 실험 및 고찰

로봇 매니플레이터를 제작하여 위치 제어와 경로 제어 알고리즘을 적용하였다. 이에 매니플레이터는 encoder 의 1 pulsewidth 이하의 정확한 위치 제어를 하였다.

매니플레이터 제작상 문제점은 모터의 backlash와 encoder 의 1 pulsewidth 이하의 위치 에러 감지 및 3 축의 시작과 도착 시간을 강제하는 점이 발생하였다.

backlash 문제는 속도를 원하는 위치 펄스의 1 펄스 전에서 속도를 감속시키므로써 해소되었다. 위치 제어에서는 counter 의 펄스값을 computer로 feedback 시킨 후 1 펄스 이상의 에러가 발생하면 위치를 수정하여 1 pulsewidth 이상의 에러를 발생시키지 않게 하였다. 경로 제어에서 발생한 문제점은 아래의 적응 제어 알고리즘을 적용하여 3 축의 시작 도착 시간을 강제 하도록 구상하였다.

다변수 차분 방정식은

$$y(k)=A(Z^{-1})y(k)+B(Z^{-1})u(k-d)+e(k) \quad k=0,1,2,\dots$$

이며  $u(t)$ 와  $y(t)$ 는 각각 3차원 입력 출력 vector이고,  $e(t)$ 는 3차원 백색 잡음 vector이다.

이때 최적 예측기는 다음과 같다.

$$\hat{y}(t+k;t)=\tilde{C}^{-1}[\tilde{G}y(t)+\tilde{F}Bu(t)]$$

5. 결론

자유도가 3 인 극좌표형 로봇 매니플레이터를 제작하고 그 성능실험을 행하였다.

매니플레이터의 동작을 원활히 하기 위하여 서보 모터의 위치와 속도를 소프트웨어적으로 행하였다. 제작한 매니플레이터로 backlash, 관성의 보상 등 기계적인 요소들이 갖고 있는 문제점을 해결하였으며 적응 제어 알고리즘을 이용한 제어를 하므로써 원하는 경로 등의 제어가 가능하리

라 본다.

참고문헌

1. A.J. Koivo, " Force-position-velocity control with Self-tuning for robotic manipulators", Proc. IEEE ,Vol.3,pp.156 - 1568,1986.
2. M.H.Haibert and J.J.Craig, " Hybrid Position / Force control of manipulators", ASME,Vol.102,pp .126 - 133,1981
3. W.E.Snyder,"Industrial Robots : Computer Interfacing and Control", Prence - Hall,1985.
4. H.Goldstein,"Classical Mechanics", Addison - Wesely Pressing Company,1980
5. Richard P.Paul,"Robot manipulators", The Mit Press ,1982.
6. K.J.Åström and B.Wittenmark, " On self-tuning regulatos",Automatica, Vol.9,pp.185-199,1973.
7. T.C.Hsia,"Adative control of robot manipulators", IEEE,1986.