

PID 자기동조기를 이용한 KED-1 로봇 매니플레이터의 위치제어

박흥래 김경수 김낙고 남문현

건국 대학교 전기공학과

A Study on the Position Control of KED-1 Robot Manipulator using PID Self-Tuning Controller

Hong Lae Park Kyung Soo Kim Lark Kyo Kim Moon Hyun Nam  
Konkuk University

ABSTRACT

This paper concerned about a study on the position control of KED-1 robot manipulator using PID self-tuning controller. For two joint manipulator KED-1, KED-1 manipulator is translated into kinematics to control each joints in joint space scheme. Angle displacements of joint coordinate are transformed into reference angle velocity of each subsystem through trajectory planning. Also, time sharing technique is used to control KED-1 manipulator. A series of simulation and experiment are performed for each joint to show the valid of proposed algorithm.

1. 서론

로봇 매니플레이터는 최근의 산업공정 자동화 추세에 따라 그 용도가 날로 증가하고 있으며, 보다 신속한 동작 및 정확한 기동이 요구되고 있다. 이에 따라 로봇 매니플레이터의 제어에 관한 연구가 활발하게 진행되고 있으며, 그 중요한 목적 중의 하나는 미리 계획된 궤적을 따라 매니플레이터가 움직이도록 제어하는데 있다. 이와 같은 제어에 있어서의 문제점은 고도의 비선형 관계를 가지는 매니플레이터 각 요소의 동특성과 매니플레이터에 의해 다루어지고 있는 물체의 부하영향 변화에 따르는 매개 변수 변화를 고려하여야 하는 것이다. 그러나 실제 매니플레이터의 동특성이 매우 복잡한 형태를 취하고 있다는 점이 매니플레이터를 모델링 하는데 매우 중요한 변수로 작용하고, 실제로 그 값을 정확히 모른다는 것이 문제점으로 지적되어 왔다.[5] 그러므로 이 문제점들을 해결하기 위하여 적응제어 이론을 로봇 매니플레이터의 제어에 적용하는 연구가 많이 이루어지고 있다. 이는 복잡한 동적 모델을 직접 다루지 않고 간단한 선형 모델에 관한 적응 알고리즘의 구현을 통하여 효율적인 제어를 할 수 있기 때문이다. 이러한 적응제어 알고리즘은 Dubowsky 와 Desforges 에 의해 로봇 매니플레이터 제어에 처음으로 시도되었다.[1] Dubowsky 는 로봇 매니플레이터 각 관절에 대하여 원하는 특성을 나타내는 선형 2 차 시분별 시스템을 기준 모델(Reference Model)로 하는 기준모델 적응제어(Model Reference Adaptive Control) 방식을 사용하여 간단한 형태의 제어 구조를 제시했으며, 위치 및 속도의 오차에 대한 피드백 이득(Feedback Gain)을 조절하는 데에 Steepest Decent 방법을 사용하였다. 또한 Koivo 와 Guo 는 선형모델의 선형과정에 따라 각 관절의 운동을 독립적으로 보는 경우와 여러 관절을 동시에 고려하는 경우로 나누어 ARMA 모델을 사용한 적응 자기동조기(Adaptive Self-tuning controller)를 제시하였다.[2]

본 논문에서는 2 관절 매니플레이터인 KED-1 을 제어대상으로 하여, 각 각의 관절을 독립적으로 곧, 각 각을 하나의 부 시스템으로 제어하기 위하여 KED-1 매니플레이터를 운동학(Kinematics)적으로 해석하여 공간좌표에서의 위치를 각 각 관절 좌표의 각변위로 변환하고, 그 값을 궤적계획으로 각 부 시스템의 기준 가속도 입력을 발생 시킨다. 또한, 매니플레이터를 제어하기 위하여 각 관절에 독립적인 직접 극배치 자기동조기를 설계하여 각 각의 부 시스템에 대하여 컴퓨터 시뮬레이션과 실험을 하고 각 부 시스템을 연결한 전체 매니플레이터의 작업 좌표에 대한 운동을 시뮬레이션과 실험 하였다.

2. KED-1 의 운동학 해석

일반적으로 로봇 매니플레이터를 모델링하는 방법은 크게 두 가지로 나눌 수 있다. 곧, 매니플레이터의 운동을 야기시키는 토오크를 고려하지 않고 단지 시간의 함수로써 매니플레이터의 기하학적 운동을 해석하는 운동학(Kinematics)과 매니플레이터의 운동에 대한 역학적 표현으로써, 가해진 토오크와 각 관절의 위치, 속도, 가속도 간의 관계를 나타내는 동역학(Dynamics)으로 나눌 수 있다.[5]

본 논문에서는 두 개의 회전(Revolute) 관절들로 구성된 KED-1 로봇 매니플레이터를 대상으로하여 좌표들을 선정하여 정 운동학 과 역 운동학을 구하였다. 그림 1 은 KED-1 매니플레이터의 좌표와

D-II 정의에 의한 링크 매개변수분 나타낸다.

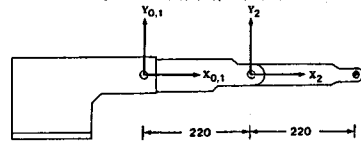


그림 1 KED-1 로봇 매니플레이터

2.1 KED-1 매니플레이터의 정 기구학 해석

그림 1 의 매개변수를 링크 i-1 과 링크 i 좌표 사이의 상호관계를 나타내는 4x4 변환 행렬을 나타내면 다음과 같다.

$${}^0A^1 = \begin{bmatrix} C_1 & -S_1 & 0 & l_1 C_1 \\ S_1 & C_1 & 0 & l_1 S_1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad {}^1A^2 = \begin{bmatrix} C_2 & -S_2 & 0 & l_2 C_2 \\ S_2 & C_2 & 0 & l_2 S_2 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

따라서, 기준좌표에 관한 끝점까지의 위치 및 방향은 다음과 같이 구할 수 있다.

$${}^0T^2 = {}^0A^1 {}^1A^2 = \begin{bmatrix} C_{12} & -S_{12} & 0 & l_1 C_1 + l_2 C_{12} \\ S_{12} & C_{12} & 0 & l_1 S_1 + l_2 S_{12} \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.1)$$

여기서,  $C_{12} = \cos(\theta_1 + \theta_2)$   $S_{12} = \sin(\theta_1 + \theta_2)$

그러므로 각 관절의 각도  $\theta_1, \theta_2$  가 주어지면, 첫 식들로부터 기준 좌표에 대한 끝점 부분까지의 위치 및 방향을 구할 수 있다.

2.2 KED-1 매니플레이터의 역 기구학 해석

본 논문의 실험 대상인 KED-1 로봇의 역 운동학을 구하는 방법은 매니플레이터의 구조가 Planar 2-link 로 되어있기 때문에 대수적인 방법과 기하학적 방법으로 구할 수 있으나, 본 연구에서는 대수적인 방법으로 역운동학의 해를 구한다. 먼저 식 (2.1) 에서의 위치 벡터는 다음과 같다.

$$P_x = l_1 C_1 + l_2 C_{12} \quad (2.2)$$

$$P_y = l_1 S_1 + l_2 S_{12} \quad (2.3)$$

식 (2.2) 와 (2.3) 를 자승하여 더하면 다음과 같이  $\theta_2$  를 구할 수 있다.

$$P_x^2 + P_y^2 = l_1^2 + l_2^2 + 2l_1 l_2 C_2$$

$$C_2 = \frac{P_x^2 + P_y^2 - l_1^2 - l_2^2}{2l_1 l_2}$$

$$S_2 = \pm \sqrt{1 - C_2^2}$$

$$\theta_2 = \text{ATAN2}(S_2, C_2)$$

$\theta_1$  를 구하기 위해 식 (2.2) 와 식 (2.3) 을 다음과 같이 변환한다.

$$P_x = K_1 C_1 - K_2 S_1 \quad (2.4)$$

$$P_y = K_1 S_1 + K_2 C_1 \quad (2.5)$$

여기서,  $K_1 = I_1 + I_2 C_2$   $K_2 = I_2 S_2$

식 (2.4) 와 (2.5)의 해를 구하기 위해  $K_1$  과  $K_2$  를 이용하여 다음과 같이 변수 변환한다.

$$\gamma = \sqrt{K_1^2 + K_2^2}, \quad \delta = \text{ATAN2}(K_2, K_1)$$

따라서,  $K_1 = \gamma \cos \delta$ ,  $K_2 = \gamma \sin \delta$

따라서, 식 (2.4) 와 식 (2.5) 는 다음과 같이 된다.

$$\frac{P_x}{\gamma} = \cos \delta \cos \theta_1 - \sin \delta \sin \theta_1$$

$$\frac{P_y}{\gamma} = \cos \delta \sin \theta_1 + \sin \delta \cos \theta_1$$

또는,  $\cos(\delta + \theta_1) = \frac{P_x}{\gamma}$ ,  $\sin(\delta + \theta_1) = \frac{P_y}{\gamma}$

그러므로, ATAN2 함수의 정의에 따라  $\theta_1$  을 구한다.

$$\gamma + \theta_1 = \text{ATAN2}\left(\frac{P_y}{\gamma}, \frac{P_x}{\gamma}\right) = \text{ATAN2}(P_y, P_x)$$

$$\theta_1 = \text{ATAN2}(P_y, P_x) - \text{ATAN2}(K_2, K_1)$$

그러므로, 끝점의 위치와 방향이 주어지면 그에 해당하는 속 각  $\theta_1$ ,  $\theta_2$  를 구할 수 있다. 여기서 구한 관결 좌표에서의 각각의 위치를 관측 계획 알고리즘으로부터 각 부 시스템의 기준 각속도 입력을 발생 시킨다.

### 3. 직접구배치 PID 자기 동조기의 설계

일반적인 PID 자기 동조기는 개 루우프 시스템과 비교해서 2 개의 여분의 영점이 도입된다. 만일 이러한 여분의 영점들이 단위원 밖에 존재할 경우 자기 동조기의 출력 응답특성은 바람직하지 않은 오버슈트를 갖게 된다. 또한 기준입력이 급격히 변하는 경우 그 영향이 바로 출력 응답 특성으로 나타나므로 큰 오버 슈트가 발생한 다. 본 논문에서는 여분의 영점이 도입되지 않는 기준입력이 적분항에만 포함되는 PID 구조를 제안한다. 일반적인 PID 제어기는 갑작스런 외부변화가 발생할 경우 거의 비례항과 미분항의 영향을 받게 되는는데 본 제어기는 기준입력이 적분항에만 포함되므로 이러한 영향을 피할수 있다.[9][10] 먼저 시스템 다항식  $A(z^{-1})$  과  $B(z^{-1})$  을 아는 것으로 가정하여 다음의 차분 방정식으로 표시한다.

$$A(z^{-1}) y(k) = z^{-1} B(z^{-1}) u(k) \quad (3.1)$$

단,

$$A(z^{-1}) = 1 + a_1 z^{-1} + a_2 z^{-2}$$

$$B(z^{-1}) = b_0 + b_1 z^{-1} \quad : b_0 \neq 0$$

$$y(k) : \text{출력} \quad u(k) : \text{입력}$$

위의 시스템 극을 원하는 대로 임의로 재 배치할 수 있는 선형 제어기를 먼저 구성한 다음 이로부터 시스템 다항식을 모른다고 가정하여 자기동조기를 설계하기 위해 기준 입력이 적분항에만 포함되는 PID 제어기의 구조를 다음과 같이 설정한다.[7]

$$S(z^{-1}) u(k) = \sigma e(k) - R_0(z^{-1}) y(k) \quad (3.2)$$

여기서,

$$S(z^{-1}) = (1 - z^{-1}) (1 + s_1 z^{-1})$$

$$R_0(z^{-1}) = (1 - z^{-1}) (r_0 + r_1 z^{-1})$$

$$e(k) = u_m(k) - y(k)$$

따라서, 독립된 매개변수  $\alpha, s_1, r_0, r_1$  를 가지고 있음을 알 수 있다. 그림 1 은 전체 폐 루우프 시스템 블록 선도이다.

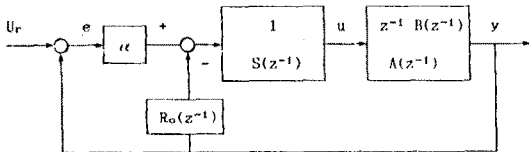


그림 1 전체 폐루우프 시스템 블록선도

따라서 그림 1 의 전체 폐 루우프 전달함수를 구하면 다음과 같다. 여기서 제어기의 해석과 설계를 용이하게 하기 위해서 부분 상태변수  $z(k)$  를 도입하면 식 (3.1) 은 다음과 같이 등가적으로 표시할 수 있다

$$A(z^{-1}) z(k) = u(k)$$

$$y(k) = z^{-1} B(z^{-1}) z(k)$$

여기서  $A(z^{-1}) z(k) = u(k)$  의 양변에  $S(z^{-1})$  을 곱한 식에 식 (3.2) 의 제어 법칙을 적용하면 다음과 같다.

$$S(z^{-1}) A(z^{-1}) z(k) = S(z^{-1}) u(k)$$

$$= -[\alpha + R_0(z^{-1})] z(k) + \alpha u_r(k)$$

$$= -z^{-1} B(z^{-1}) M(z^{-1}) z(k) + \alpha u_r(k)$$

여기서,  $M(z^{-1}) = R_0(z^{-1}) + \alpha$  식을 정리하면 다음과 같다.

$$[A(z^{-1}) S(z^{-1}) + z^{-1} B(z^{-1}) M(z^{-1})] z(k) = \alpha u_r(k) \quad (3.3)$$

좌변의 큰 괄호안의 식은 전체 폐 루우프 시스템의 특성 방정식을 나타내므로 이를 실수항인 1 인  $nc(\leq 4)$  차의 점근적으로 안정한 다항식  $C(z^{-1})$  로 놓으면  $C(z^{-1})$  의 근은 원안에 대한 원하는 폐 루우프 극을 나타낸다. 제어기는 4 개의 독립된 매개변수를 가지므로 이 매개변수를 이용하여 폐 루우프 시스템의 극을 원하는 위치에 재배치 할 수 있다.[4][8] 이를 위해서는 다항식  $S(z^{-1})$  과  $M(z^{-1})$  이 다음의 관계식을 만족시키면 된다.

$$A(z^{-1}) S(z^{-1}) + z^{-1} B(z^{-1}) M(z^{-1}) = C(z^{-1}) \quad (3.4)$$

단,

$$C(z^{-1}) = 1 + C_1 z^{-1} + \dots + C_n z^{-n} : n_0 \leq 4$$

여기서 위식을 만족시키는 다항식  $S(z^{-1})$  과  $M(z^{-1})$  의 계수들을 항상 유일하게 구해지므로 여기서 다항식  $B(z^{-1})$  은  $Z = 1$  인 근을 가질 수 없다. 식 (3.4) 이 성립하면 식 (3.3) 은 다음과 같이 간단히 나타낼 수 있다.

$$C(z^{-1}) z(k) = \alpha u_r(k)$$

$$y(k) = z^{-1} B(z^{-1}) z(k) \quad (3.5)$$

식 (3.5) 를 정리하여 전달함수 꼴로 다시 쓰면 다음과 같다.

$$\frac{y(k)}{u_r(k)} = \frac{\alpha z^{-1} B(z^{-1})}{C(z^{-1})}$$

식 (3.5) 에서 여분의 영점이 도입되지 않는것을 알 수 있고, 제어기의 매개변수를 선형적으로 추정하기 위해 Diophantine 방정식을 도입하면 다음과 같다.[3]

$$A(z^{-1}) K(z^{-1}) + z^{-1} B(z^{-1}) H(z^{-1}) = k_0$$

식 (3.4) 를 다시쓰면 다음과 같다.

$$A(z^{-1}) S(z^{-1}) + z^{-1} B(z^{-1}) M(z^{-1})$$

$$= \frac{1}{k_0} [A(z^{-1}) K(z^{-1}) + z^{-1} B(z^{-1}) H(z^{-1})] C(z^{-1})$$

정리하여  $z(k)$  를 양변에 곱하여 다시쓰면 다음과 같다.

$$A(z^{-1}) S(z^{-1}) z(k) + z^{-1} B(z^{-1}) R_0(z^{-1}) z(k) + \alpha z^{-1} B(z^{-1}) z(k)$$

$$= (1/k_0) z^{-1} B(z^{-1}) M(z^{-1}) C(z^{-1}) z(k)$$

$$+ (1/k_0) A(z^{-1}) K(z^{-1}) C(z^{-1}) z(k) \quad (3.6)$$

식 (3.6) 을  $A(z^{-1}) z(k) = u(k)$ ,  $y(k) = z^{-1} B(z^{-1}) z(k)$  를 적용하여 정리하면 다음과 같다.

$$\alpha y(k) = -S(z^{-1}) u(k) - R_0(z^{-1}) y(k) + (1/k_0) H(z^{-1}) C(z^{-1}) y(k)$$

$$+ (1/k_0) K(z^{-1}) C(z^{-1}) u(k) \quad (3.7)$$

식 (3.7) 을 극배치 방정식과 Biophantine 방정식을 이용하여 전달함수 형태로 나타내면 다음과 같다.

$$y(k) = \frac{k_0 S(z^{-1}) - C(z^{-1}) k(z^{-1})}{C(z^{-1}) H(z^{-1}) - k_0 M(z^{-1})} u(k) \quad (3.8)$$

식 (3.8) 을 식 (3.2) 에 대입하여 정리하면

$$y(k) = \frac{\alpha [k_0 S(z^{-1}) - C(z^{-1}) K(z^{-1})]}{C(z^{-1}) [S(z^{-1}) H(z^{-1}) - M(z^{-1}) K(z^{-1})]} u_r(k) \quad (3.9)$$

이며, 식 (3.9) 를 간단히 다시 표현하면 다음과 같다.

$$y(k) = P^T \Phi(k)$$

여기서,

$$\Phi(k)^T = [\Phi(k)_1^T, \Phi(k)_2^T]$$

$$P^T = [P_1^T, P_2^T]$$

$$\Phi_1(k)^T = [(C(q^{-1}) - 1 + z^{-1}) u(k), (z^{-1} - 1) u(k - 1), (z^{-1} - 1) y(k), (1 - z^{-1}) y(k - 1)]$$

$$\Phi_2(k)^T = [C(q^{-1}) y(k), (C(z^{-1}) y(k - 1), C(z^{-1}) u(k - 1)]$$

$$P_1^T = [1/\alpha, s_1', r_0', r_1']$$

$$P_2^T = [\bar{n}_0, \bar{n}_1, \bar{K}_1]$$

$$s_1' = \frac{s_1}{\alpha}, r_0' = \frac{r_0}{\alpha}, r_1' = \frac{r_1}{\alpha}$$

$$h_0 = \frac{h_0}{\alpha k_0}, h_1 = \frac{h_1}{\alpha k_0}, k_1 = \frac{k_1}{\alpha k_0}$$

벡터  $P_1$  은 제어기 매개변수들이 매개변수  $\alpha$  로 나누어진 값으로 구성되어 있고 벡터  $P_2$  는 Diophantine 방정식의 도입으로 인한 보조 매개변수들이 매개변수  $\alpha$  ko 로 나누어진 값으로 구성되어 있다. 즉 벡터  $P_2$  의 매개변수들은 다항식  $Mo(z^{-1})$  과  $ko(z^{-1})$  의 계수들을 매개변수  $\alpha$  로 나눈것이다. 또한 벡터  $h(k)$  는 시스템의 입력과 출력으로 구성된다. 제어기 매개변수 벡터  $P_1$  은 매개변수  $\alpha$  정규화 되었으므로 이점 바로 제어입력의 매개변수로 사용 하기 위해 식 (3.2) 를 다시 쓰면 다음과 같다.

$$S'(z^{-1})u(k) = e(y(k) - Ro(z^{-1})y(k)) \quad (3.10)$$

여기서,

$$S'(z^{-1}) = (1 - z^{-1})(1/\alpha + s_1' z^{-1})$$

$$Ro(z^{-1}) = (1 - z^{-1})(r_0' + r_1' z^{-1})$$

첫 관계식에서 제어기 매개변수 벡터  $P_1$  만 추정하고 보조 매개변수 벡터  $P_2$  는 방정식(3.10) 부터 구하는 방법을 제안하고자 한다. 제어기 매개변수 벡터 및 보조 매개변수들이 매개변수  $\alpha$  로 나누어지므로 이 매개변수들을 바로 사용할 수 있는 관계식을 유도하기 위해 식 (3.8) 의 전체 폐 루프 전달함수를 다시 쓰면 다음과 같다.

$$y(k) = \frac{ko S'(z^{-1}) - C(z^{-1}) K'(z^{-1})}{C(z^{-1})H'(z^{-1}) - koM'(z^{-1})} u(k) \quad (3.11)$$

단,

$$M'(z^{-1}) = 1 + Ro'(z^{-1})$$

$$H'(z^{-1}) = \frac{ho}{\alpha} + \frac{h_1}{\alpha} z^{-1} = ho' + h_1' z^{-1}$$

$$K'(z^{-1}) = \frac{ko}{\alpha} + \frac{k_1}{\alpha} z^{-1} = ko' + k_1' z^{-1}$$

식 (3.11) 은 식 (3.1) 과 동가식으로  $A(z^{-1}) = C(z^{-1}) H'(z^{-1}) - ko M'(z^{-1})$ ,  $z^{-1} B(z^{-1}) = ko S'(z^{-1}) - C(z^{-1}) K'(z^{-1})$  로 놓으면 위의 두식이 성립하기 위해서는 다항식  $C(z^{-1})$  의 차수가 1 보다 작거나 같아야하므로  $nc(\leq 1)$  이다. 위의 두 식을 한 식으로 표현하면 다음과 같다.

$$S'(z^{-1})H'(z^{-1}) - R'(z^{-1})K'(z^{-1}) = 1 \quad (3.12)$$

식 (3.12) 는 앞으로 추정될  $S'(z^{-1})$  과  $M'(z^{-1})$  을 사용하여  $H'(z^{-1})$  과  $K'(z^{-1})$  을 구하는데 사용된다. 첫식은 해가 존재하며  $A(z^{-1})$  과  $B(z^{-1})$  이 서로 소라는 가정예의해  $ko$  는 0 이 될수없으므로 보조 매개변수 벡터  $P_2$  내의 값들이 존재한다. 그러므로 보조 매개변수 벡터  $P_2$  는 앞으로 추정될 제어기 매개변수 벡터  $P_1$  을 사용하여 위의 방정식으로부터 구할수 있다. 위의 방정식에  $S(z^{-1})$  에 포함된 적분기는 단지 정상상태 오차를 줄이는 본래의 목적외에 (2-49) 식의 유일한 해를 갖기위한 조건을 만족시키기 위해 사용되었다. 따라서 전체 폐 루프 전달함수는 다음과 같다.

$$C(z^{-1}) \begin{bmatrix} y(k) \\ u(k) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} z^{-1}B(z^{-1}) \\ A(z^{-1}) \end{bmatrix} u_m(k)$$

이제까지는 시스템 다항식  $A(z^{-1})$  와  $B(z^{-1})$  을 만나고 가정하여 PID 의 선형 제어기를 설계하였고 다음에는 이를 바탕으로  $A(z^{-1})$  과  $B(z^{-1})$  을 모른다고 가정하여 자기동조기를 설계하겠다. 시스템 다항식  $A(z^{-1})$  와  $B(z^{-1})$  을 모르면 앞에서 유도된 매개변수 벡터  $P$  를 조정가능한 매개변수 벡터  $\hat{p}(k)$  로 놓기로 한다. 매개변수 벡터  $\hat{p}(k)$  는 제어기 매개변수 벡터  $\hat{p}_1(k)$  과 보조 매개변수 벡터  $\hat{p}_2(k)$  로 구성되는데  $\hat{p}_1(k)$  는 적용 알고리즘을 통하여 추정하고  $\hat{p}_2(k)$  는 적용 알고리즘으로 추정된  $\hat{p}_1(k)$  를 이용하여 식 (3.12) 으로부터 구해진다.  $\hat{p}_1(k)$  는 다음과 같이 구성된다.

$$\hat{p}_1(k)^T = [ \hat{\beta}(k), \hat{s}_1'(k), \hat{r}_0'(k), \hat{r}_1'(k) ]$$

단,

$$\hat{\beta}(k) = 1/\hat{\alpha}(k)$$

$$\hat{s}_1'(k) = \hat{s}_1(k)/\hat{\alpha}(k)$$

$$\hat{r}_0'(k) = \hat{r}_0(k)/\hat{\alpha}(k)$$

$$\hat{r}_1'(k) = \hat{r}_1(k)/\hat{\alpha}(k)$$

추정된 계수를 가지는 제어기 다항식은 다음과 같다.

$$\hat{S}(k, z^{-1}) = (1 - z^{-1})(\hat{\beta}(k) + \hat{s}_1'(k)z^{-1}) \quad (3.13)$$

$$\hat{R}_0'(k, z^{-1}) = (1 - z^{-1})(\hat{r}_0'(k) - \hat{r}_1'(k)z^{-1}) \quad (3.14)$$

$$\hat{R}_1'(k, z^{-1}) = 1 + \hat{R}_0'(k, z^{-1}) \quad (3.15)$$

이를 이용하여 다음의 방정식으로부터 보조 매개변수 다항식  $\hat{H}(k, z^{-1})$  과  $\hat{K}(k, z^{-1})$  를 구할 수 있다.

$$\hat{S}'(k, z^{-1}) \hat{H}(k, z^{-1}) - \hat{R}'(k, z^{-1}) \hat{K}(k, z^{-1}) = 1 \quad (3.16)$$

단,

$$\hat{H}'(k, z^{-1}) = \hat{h}_0'(k) + \hat{h}_1'(k)z^{-1} \quad (3.17)$$

$$\hat{K}'(k, z^{-1}) = \hat{R}_0'(k) + \hat{R}_1'(k)(z^{-1}) \quad (3.18)$$

식 (3.17) 과 식 (3.18) 을  $\hat{K}_0'(k)$  로 나누고  $\hat{\beta}(k)$  를 곱하면 보조 매개변수 벡터  $\hat{p}_2(k)$  를 구할 수 있다. 그러므로  $\hat{p}_2(k)$  벡터 내에 있는 보조 매개변수들은 첫식의 여인수로 부터 구할 수 있음을 알 수 있다.  $P_2(k)$  는 다음과 같이 구성된다.

$$\hat{P}_2(k)^T = [ \hat{h}_0'(k), \hat{h}_1'(k), \hat{k}_1'(k) ]$$

단,

$$\hat{h}_0'(k) = \frac{\hat{\beta}(k)\hat{h}_0'(k)}{\hat{K}_0'(k)}$$

$$\hat{h}_1'(k) = \frac{\hat{\beta}(k)\hat{h}_1'(k)}{\hat{K}_0'(k)}$$

$$\hat{k}_1'(k) = \frac{\hat{\beta}(k)\hat{r}_1'(k)}{\hat{K}_0'(k)}$$

식 (3.13) 과 식 (3.14) 의 추정된 계수를 가지는 제어기 다항식으로부터 다음의 제어입력을 구할 수 있다.

$$S'(k, z^{-1})u(k) = e(k) - \hat{R}_0'(k, z^{-1})y(k) \quad (3.19)$$

여기서 제어기 매개변수 추정에는 여러가지가 있으나, 간략성과 효율성이 좋은 순환 최소자승 알고리즘을 도입하면 다음과 같다.[8]

$$\hat{p}(t) = \hat{p}(t-1) + \frac{R(t-1)\hat{\Phi}^T(t-k)}{1 + \hat{\Phi}^T(t-k)R(t-1)\hat{\Phi}(t-k)} [y(t) - \hat{p}(t-1)\hat{\Phi}(t-k)]$$

$$R(t) = \frac{1}{\sigma} \left[ R(t-1) - \frac{R(t-1)\hat{\Phi}(t-k)\hat{\Phi}^T(t-k)R(t-1)}{\sigma + \hat{\Phi}^T(t-k)R(t-1)\hat{\Phi}(t-k)} \right]$$

여기서, 망각인수  $\sigma = 1$  로 하였으며, 위에서 추정된  $P_1(t)$  를 이용하여 식 (3.19) 으로부터  $P_2(t)$  를 구할 수 있다.

#### 4. 전체 시스템 시뮬레이션

로봇 매니플레이터의 끝점이 가야할 목표점에 대한 좌표값을 운동학에 입력하여 각 관절이 움직여야 할 각도를 구하고, 그 각도(각 변위)를 궤적계획에서 속도(각 속도)로 변환하여, 제어기의 기준 입력으로 한다. 이 기준 입력에 대한 제어기의 응답은 각 속도도 나타내며, 각 속도도 단위시간(샘플링 시간)을 곱하여 가중치로 하면 현재의 각 위치가 된다. 여기에 매니플레이터의 미로 길이를 적용하여, 역으로 운동학의 입력한 목표점의 좌표값 구할수 있다.

관절 1 에는  $+90^\circ$ , 관절 2 에는  $-90^\circ$  를 입력으로 사용하며, 시뮬레이션 방법을 사용하여 제어하였고, 제어기는 직접구체 PID 자기동조기를 사용하여 오차를 보정하였다.

그림 2 는 관절 1 에 대한 결과로서 가속구간에서는 약간의 오차가 생겼으나, 가속구간과 감속구간에서는 오차없이 정확히 추종함을 알 수 있었고 관절 2 에 대한 결과인 그림 3 에서도 마찬가지로 현상이 발생함을 알 수 있었다. 여기서, 본 논문의 목적인 위치제어에 대해 살펴보면 전체 위치오차가 0.02 % 의 아주 근소한 오차가 발생하여 양호한 제어가 이루어짐을 알 수 있다.

#### 5. KED-1 매니플레이터에 대한 적용실형

KED-1 매니플레이터의 구조는 기어와 체인구조로 되어 있으며, 전동기와 연결된 기어의 기어비는 1/180이고, 이 기어에 의해 각 관절을 회전시키는 체인의 감쇄비는 9/31 이므로 전체 감쇄비는 1/620 이다. 또한 본 실험의 센서로 사용한 부호기는 회전당 1000 펄스를 발생하므로 한 펄스당 회전각도는  $360^\circ / 620 \times 1000 \approx 5.8 \times 10^{-4}$  이다. 이와 같은 방법으로 공간좌표에서의 위치좌표를 (440, 0) 에서 (0, 440) 으로 주었을 때의 속도 및 위치 출력은 그림 4 에 나타내었다. 그림 4 에서와 같이 속도출력의 진동은 다소 심하였지만 우리가 원하는 위치를 정확히 추종함을 알수있다. 특히 가속구간에서의 진동이 심한 이유는 KED-1 로봇 구조적 특성에 의한 마찰력에 기인된 것이지만 제어기가 오차를 보정 하면서 제어를 수행함을 알 수 있다. 그림 5 는 (0, 440) 에서 (440, 0) 으로 위치 좌표를 주었을때의 속도 및 위치 출력이다. 이 때에도 속도 출력은 약간의 진동이 있었으나 우리가 원하는 위치를 정확히 추종함을 알 수 있다.

#### 6. 결론

본 논문은 작업 좌표에서의 로봇 매니플레이터의 위치를 운동학적으로 해석하여 로봇 매니플레이터 끝점의 위치가 작업 공간내의 어떠한점이라도 관절공간의 각 변위로 나타내는 역운동학과 제어기의 기준입력을 정확히 만들기 위하여 LSPB 궤적계획을 통해 속도 프로파일을 계획하는 알고리즘을 제안하였다. 또한 매니플레이터 제어기로써 기준 입력에 포함된 제어기의 동특성을 구하지 않아서 제어가 제안되었다. 제안된 알고리즘의 타당성 검증을 위해 시뮬레이션과 실험을 통해 원하는 속도 및 위치에 0.02 % 오차 내에서 추종함을 알 수 있었다. 본 논문에서서는복잡한 구조(다관절)를 갖는 매니플레이터라도 각 관절을 하나의 부 시스템으로 제어할 수 있어 수학적 으로 복잡하거나 어려운 결합관절의 동특성을 구하지 않아도 되도록 로봇 언어의 개발을 통해 범용 매니플레이터 제어기의 가능성도 반복 작업용 매니플레이터 제어기의 가능성도 보였다.

참고 문헌

- [1] S. Dubowsky and D.T. DesForges, "The Application of Model Reference Adaptive Control to Robotic Manipulators", Trans. of the ASME, Journal of Dynamics System, Measurement and Control, Vol. 101, pp 193-200, 1979.
- [2] A.J. Koivo and T.H. Kuo, "Adaptive linear controller for robot manipulators", IEEE Trans. on Auto. Contr., Vol. AC-28, No.2, pp 162-171, 1982.
- [3] K.J. Astrom and B. Wittenmark, Adaptive Control. Weseley, Inc., 1989.
- [4] Mei-Hua Lio and Wei Lin, " Pole assignment self-tuning controller for robot manipulators", Int. J. Control, Vol.46, No.4, pp.1307-1317, 1987.
- [5] Richard P. Paul, "Robot Manipulators Mathematics, Programming and control", The Massachusetts Institute of Technology, 1981.
- [6] V. V. Chalam, "Adptive Control System: Technique and Applications", Marcel Dekker INC, 1987
- [7] R. Ortega and R. Kelly, " PID Self - tuners : Some Theoretical and Practical Aspects, " IEEE Trans. Ind. Elec., Vol. IE - 31, No.4, Nov.1984.
- [8] H. Elliott, "Direct Adaptive Pole placement with Application to Nonminimum Phase System" IEEE Trans. Automat. Contr., Vol. AC-27, June 1981.
- [9] 김 중환, "비최소위상 시스템에 대한 직접극배치 PID 자기동조기 및 적응제어기에 관한 연구" 서울 대학교 대학원 박사학위 논문, 1987
- [10] 윤 의성, 이 규영, 정 철, 남 문현, 비 최소 위상 시스템에 대한 직접 극배치 PID 자기동조 제어기의 설계, 대한 전기학회, 전자학회 제어계측 연구회 합동 학술 발표대회 논문집, pp 35-39, 1989, 6

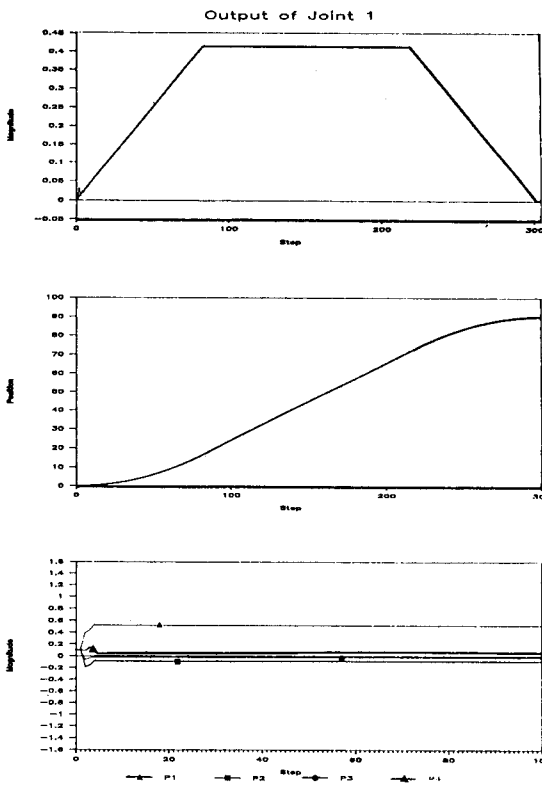


그림 2 (a) 관절 1 에 대한 기준속도 궤적 및 출력  
(b) 관절 1 에 대한 기준위치 궤적 및 출력  
(c) 관절 1 의 매개변수 추정결과

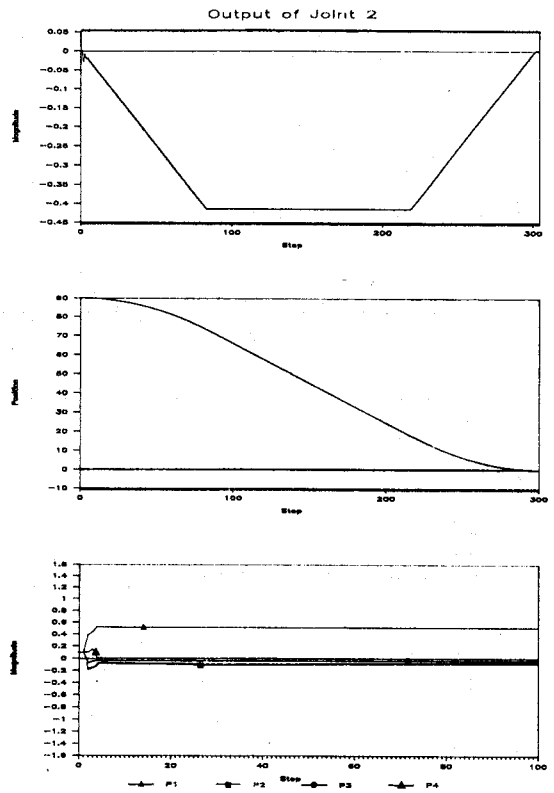


그림 3 (a) 관절 2 에 대한 기준속도 궤적 및 출력  
(b) 관절 2 에 대한 기준위치 궤적 및 출력  
(c) 관절 2 의 매개변수 추정결과

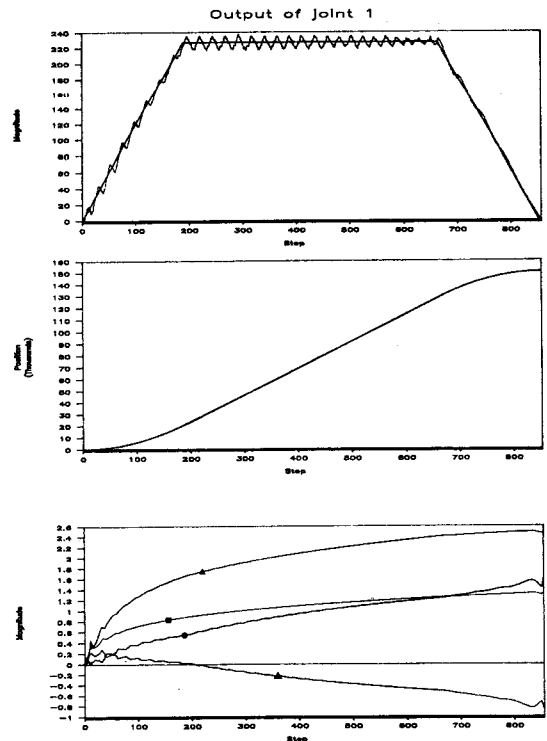


그림 4 (a) 관절 1 에 대한 기준속도 궤적및 출력  
 (b) 관절 1 에 대한 기준위치 궤적및 출력  
 (c) 관절 1 의 매개변수 추정결과

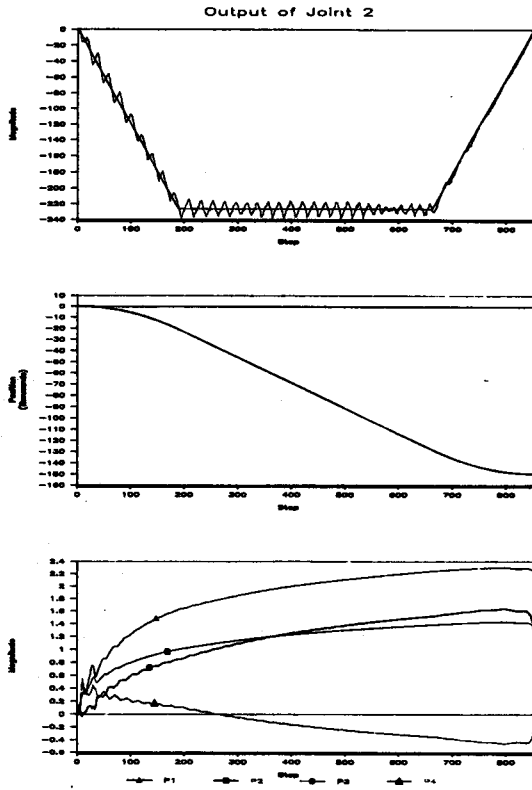


그림 5 (a) 관절 2 에 대한 기준속도 궤적및 출력  
 (b) 관절 2 에 대한 기준위치 궤적및 출력  
 (c) 관절 2 의 매개변수 추정결과