

핸드변수에 의한 로봇 매니플레이터 제어에 관한 연구

정 광 순 배 준 경 박 중 국
 경희대학교 전자공학과

A Study On Robot Manipulator Control by Hand Variables

Kwang S. Jeong and Jun K. Bae and Chong K. Park
 Kyung Hee University

ABSTRACT

In this paper, path planning, modelling, and control of manipulators are described.

The path planning deals with specifying how to define the motion of hand along straight line paths in the minimum amount of time. A new model was developed for the manipulator, which is based on the classical equations of motion of a rigid body. A new control algorithm was developed which controls the manipulator in terms of the position and orientation of the hand.

1. 서 론

매니플레이터의 이용은 1940년대 후반 M/S 제어 시스템으로 부터 시작되어 근래에는 많은 분야에서 매니플레이터 제어에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다. 그 예를 들어보면, 정보 시스템, 맨-머시인 제어 인터페이스, 특수 용용 매니플레이터, 일반적인 기능을 가진 매니플레이터 시스템등이다[1,2]. 본 논문에서는 손의 변수로서 위치의 3 차원과 방향의 3 차원을 가지는 6 차원 실좌표에서 매니플레이터를 제어하는 방법에 관하여 연구하였다.

2. 매니플레이터의 운동학과 역학

2-1. 매니플레이터의 운동학

1) 운동학적 개념

매니플레이터 링크는 0 에서 n 개를 가진다. 링크 0 는 기본좌표로 정의하고, 조인트 j 는 링크 j-1 과 링크 j 사이의 조인트로서 정의한다. 그림 2.1 보 부터 링크 j 에 대해 다음과 같이 정의한다.

$Z_j \approx$ 조인트 j+1 의 회전속(회전운동), 혹은 선형운동의 방향(병진운동).

$$X_j = Z_{j-1} \times Z_j / \|Z_{j-1} \times Z_j\| ,$$

$$Y_j = Z_j \times X_j .$$

$\theta_j = Z_{j-1}$ 에 대한 X_{j-1} 과 X_j 사이의 각.

$r_j = Z_{j-1}$ 에 따른 X_{j-1} 에서 X_j 까지의 거리.

$\alpha_j = X_j$ 에 대한 Z_{j-1} 과 Z_j 사이의 각.

$a_j = X_j$ 에 따른 Z_{j-1} 에서 Z_j 까지의 거리.

j 번째 좌표시스템에서 언급한 r_j 와 j-1 번째 좌표시스템에 대한 r_{j-1} 과의 관계는 다음과 같다.

$$r_{j-1} = j-1T^j r_j \quad \text{---(2.1)}$$

여기서, $j-1T^j$ 는 아래 식으로 주어진다.

$$j-1T^j = \begin{bmatrix} C(\theta_j) & -C(\alpha_j)S(\theta_j) & S(\alpha_j)S(\theta_j) & a_j C(\theta_j) \\ S(\theta_j) & C(\alpha_j)C(\theta_j) & -S(\alpha_j)C(\theta_j) & a_j S(\theta_j) \\ 0 & S(\alpha_j) & C(\alpha_j) & r_j \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad \text{---(2.2)}$$

각 변환행렬 $j-1T^j$ 는 j 번째 조인트 변수로 나타낼수 있는데 조인트가 병진운동을 한다면 $q_j = r_j$ 가 되고, 회전운동을 한다면 $q_j = \theta_j$ 이 된다.

같은 방법으로 기본좌표계에서 r_0 를 구하면,

$$r_0 = 0T^j r_j \quad \text{---(2.3)}$$

가 되고, 여기서 $0T^j = 0T^1 T^2 \dots j-1T^j$ 이다. $0T^j$ 의 처음 세입력은 방향을 나타내고, 마지막 입력은 위치를 지시하고 있다.

$$0T^j = \begin{bmatrix} X_j & Y_j & Z_j & P_j \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad \text{---(2.4)}$$

이 매니플레이터는 6 개의 조인트를 가지므로 $0T^6$ 는 손의 위치와 방향을 나타낸다.

2-2. 매니플레이터 링크좌표의 역학

조인트변수로서 각 링크좌표의 원점의 선형속도화 가속도, 각속도화 각가속도에 관한 방정식을 유도해 보겠다. 매니플레이터 운동학은 병진과 회전 좌표시스템의 연속적으로 볼 수 있다.

1) 동 좌표

그림 2.2 에 나타나 있듯이, 좌표 O 에 바탕을 둔 벡터 r 과 좌표 O* 에 바탕을 둔 벡터 r* 에 의해 표시되는 한 점을 생각해 보자[3].

r 의 선형속도와 가속도는

$$V_r = d^*r^*/dt + W_o \times r^* + V_o \quad \text{---(2.5)}$$

$$\dot{V}_r = d^{*2}r^*/dt^2 + W_o \times (W_o \times r^*) + 2W_o \times (d^*r^*/dt) + \dot{W}_o \times r^* + \dot{V}_o \quad \text{---(2.6)}$$

가 된다. O* 좌표에 대하여 W'의 각속도를 가지고 회전한다고 가정하자.

고정된 O 좌표에 대한 O*좌표의 각속도 W_r은

$$W_r = W_o + W' \quad \text{---(2.7)}$$

$$\dot{W}_r = \dot{W}_o + \dot{W}' \quad \text{---(2.8)}$$

이다.

식(2.5) 로 부터 W'를 구하면 다음과 같다.

$$\dot{W}' = d^*W'/dt + W_o \times W' \quad \text{---(2.9)}$$

따라서,

$$\dot{W}_r = \dot{W}_o + d^*W'/dt + W_o \times W' \quad \text{---(2.10)}$$

가 된다.

2) 링크좌표의 역학

그림 2.2 에서 O 는 기본좌표, O*는 i 번째 링크좌표, O'는 i+1 번째의 링크좌표로 두면, 전형적으로 i+1 번째 링크의 각운동은 i 번째 링크좌표의 Z 축에 관한 것이다.

따라서, 식(2.7) 에서 W' = Ziqi+1이다.

그러므로,

$$W_{i+1} = W_i + Ziqi+1 \quad \text{---(2.11)}$$

이고, 식(2.9) 로 부터

$$\dot{W}' = Zi\dot{q}_{i+1} + W_i \times Ziqi+1 \quad \text{---(2.12)}$$

로 되어, 식(2.10)로 부터

$$\dot{W}_{i+1} = \dot{W}_i + Zi\dot{q}_{i+1} + W_i \times Ziqi+1 \quad \text{---(2.13)}$$

가 된다. 만일 조인트 i+1 이 병진운동만 한다면 각속도와 각가속도는 변하지 않는다.

선형속도와 가속도는 식(2.5) 과 식(2.6) 에서 각각 구할수 있다.

$$V_{i+1} = d^*P_{i+1}^*/dt + W_i \times P_{i+1}^* + V_i \quad \text{---(2.14)}$$

$$\dot{V}_{i+1} = d^{*2}P_{i+1}^*/dt^2 + W_i \times (W_i \times P_{i+1}^*) + 2W_i \times (d^*P_{i+1}^*/dt) + \dot{W}_i \times P_{i+1}^* + \dot{V}_i \quad \text{---(2.15)}$$

여기서, $P_{i+1}^{*'} = P_{i+1} - P_i$ 이다.

식(2.2) 로 부터, d*/dt 와 d*²/dt²항은 조인트 i+1 이 회전운동을 하느냐 혹은 병진운동을 하느냐에 따라 다른 형태를 갖는다.

첫째로 조인트 j+1 이 병진운동을 한다면,

$$d^*P_{i+1}^*/dt = Zi\dot{q}_{i+1} \quad \text{---(2.16)}$$

$$d^{*2}P_{i+1}^*/dt^2 = Zi\ddot{q}_{i+1} \quad \text{---(2.17)}$$

가 된다.

위의 두식을 식(2.14), 식(2.15)에 각각 대입하면 다음과 같다.

$$V_{i+1} = Zi\dot{q}_{i+1} + W_{i+1} \times P_{i+1}^* + V_i \quad \text{---(2.18)}$$

$$\dot{V}_{i+1} = Zi\ddot{q}_{i+1} + W_{i+1} \times (W_{i+1} \times P_{i+1}^*) + 2W_{i+1} \times (Zi\dot{q}_{i+1}) + \dot{W}_{i+1} \times P_{i+1}^* + \dot{V}_i \quad \text{---(2.19)}$$

둘째로 조인트 i 가 W'의 각속도를 가지고 회전운동을 한다면,

$$d^*P_{i+1}^*/dt = W' \times P_{i+1} \quad \text{---(2.20)}$$

$$d^{*2}P_{i+1}^*/dt^2 = (d^*W'/dt) \times P_{i+1} + W' \times (W' \times P_{i+1}^*) = W' \times P_{i+1}^* - (W_i \times W') \times P_{i+1}^* + W' \times (W' \times P_{i+1}^*) \quad \text{---(2.21)}$$

가 된다.

식(2.19)과 식(2.20)을 식(2.14)과 식(2.15)에 각각 대입하면,

$$V_{i+1} = W' \times P_{i+1}^* + W_i \times P_{i+1}^* + V_i = W_{i+1} \times P_{i+1}^* + V_i \quad \text{---(2.22)}$$

$$\dot{V}_{i+1} = \dot{W}_{i+1} \times P_{i+1}^* + W_{i+1} \times (W_{i+1} \times P_{i+1}^*) + \dot{V}_i \quad \text{---(2.23)}$$

을 얻는다.

3) 핸드의 역학

핸드의 위치와 방향의 양으로 토포르팔을 제어하기 위해서는 조인트변수(q_i, \dot{q}_i , \ddot{q}_i)들로 핸드의 역학을 표현할 필요가 있다. 기본좌표는 안정하다고 가정한다. 즉, W_o = 0이다.

식(2.11)로 부터,

$$W_{i+1} = \sum_{j=1}^i b_j q_j \quad \text{---(2.24)}$$

여기서, $b_j = \begin{cases} Z_{j-1} & , \text{회전운동할때.} \\ 0 & , \text{병진운동할때.} \end{cases}$

그러므로,

$$W_6 = \sum_{j=1}^6 b_j q_j \quad \text{---(2.25)}$$

이고, 식(2.14)과 식(2.17)로 부터

$$V_6 = Z_2 \dot{q}_3 + \sum_{j=1}^2 W_{i+1} \times P_{i+1}^* \quad \text{---(2.26)}$$

가 되어, 식(2.18)을 식(2.20)에 대입하면

$$V_6 = Z_2 \dot{q}_3 + \sum_{j=1}^6 (\sum_{i=1}^j b_j q_j) \times P_{i+1}^* \quad \text{---(2.27)}$$

을 얻는다. 위의식을 재정리하면,

$$V_6 = Z_2 \dot{q}_3 + \sum_{j=1}^6 b_j (P_6 - P_{j-1}) q_j \quad \text{---(2.28)}$$

을 얻는다.

새로운 벡터 d 를 다음식과 같이 정의하자.

$$d = \begin{bmatrix} W_6 \\ V_6 \end{bmatrix} = M_6^* \quad \text{---(2.29)}$$

3. 매니플레이터에 대한 운동방정식

3-1. 강체의 운동방정식

강체의 운동방정식은 고전적인 역학으로 부터 얻을 수 있다.

$$F = m\dot{V} \quad \text{---(3.1)}$$

$$N = I \cdot \dot{W} + W \times (I \cdot W) \quad \text{---(3.2)}$$

여기서,

I : 질량중심에 대한 관성모멘트

L : 각운동량 벡터

3-2. 매니플레이터에 대한 운동방정식
매니플레이터의 각 링크에 대해 식(3.1) 과
식(3.2) 를 다시 쓰면

$$F_i = m_i \ddot{V}_i \quad \text{---(3.3)}$$

$$N_i = I_i \cdot \ddot{W}_i + W_i \times (I_i \cdot \ddot{W}_i) \quad \text{---(3.4)}$$

가 된다. \ddot{V}_i 는 질량중심의 선형가속도이다.

식(2.15)로 부터 선형가속도 \ddot{V}_i 를 구하면,

$$\ddot{V}_i = W_i \times (W_i \times \dot{F}_i^*) + \dot{W}_i \times \dot{F}_i^* + \ddot{V}_i \quad \text{---(3.5)}$$

전체 힘 F_i 와 모멘트 N_i 는 $i+1$ 번째 링크와
 $i-1$ 번째 링크 그리고 중력의 효과에 의해서
작용되는 힘과 모멘트이다.

그림 3.1 으로부터, n_i 와 f_i 는 다음과 같이
된다.

$$f_i = f_{i+1} + F_i \quad \text{---(3.6)}$$

$$n_i = n_{i+1} + P_{i+1}^* \times f_{i+1} + N_i + F_i^* \times F_i \quad \text{---(3.7)}$$

여기서, F_i 와 N_i 는 식(3.3) 와 식(3.4) 에 주
어져 있다. 또한, f_7 과 n_7 은 외부물체가 매니플
레이터의 손에 미치는 힘과 모멘트이다.

일반적으로, 조인트 i 가 회전운동을 한다면
그 동작은 $i-1$ 번째 링크좌표의 Z 축에 관련된
것이다. 따라서, 입력 토오크 C_i 는

$$C_i = Z_{i-1} \cdot n_i \quad \text{---(3.8)}$$

이며, 마찬가지로 조인트 i 가 병진운동을 한다면
입력 C_i 는

$$C_i = Z_{i-1} \cdot f_i \quad \text{---(3.9)}$$

이 된다.

지금까지 구한 방정식을 이용해서 매니플레이
터에 대한 완전한 운동방정식을 서술해 보면
다음과 같다.

$$\ddot{V}_i = W_i \times (W_i \times \dot{F}_i^*) + \dot{W}_i \times \dot{F}_i^* + \ddot{V}_i \quad \text{---(3.10)}$$

$$F_i = m_i \ddot{V}_i \quad \text{---(3.11)}$$

$$N_i = I_i \cdot \ddot{W}_i + W_i \times (I_i \cdot \ddot{W}_i) \quad \text{---(3.12)}$$

$$f_i = F_i + f_{i+1} \quad \text{---(3.13)}$$

$$n_i = n_{i+1} + P_{i+1}^* \times f_{i+1} + N_i + F_i^* \times F_i \quad \text{---(3.14)}$$

1> 조인트 $i+1$ 이 회전운동을 할때,

$$\dot{W}_{i+1} = \dot{W}_i + Z_i \dot{q}_{i+1} \quad \text{---(3.15)}$$

$$\ddot{W}_{i+1} = \ddot{W}_i + Z_i \ddot{q}_{i+1} + W_i \times Z_i \dot{q}_{i+1} \quad \text{---(3.16)}$$

$$\ddot{V}_{i+1} = \ddot{W}_{i+1} \times P_{i+1}^* + W_{i+1} \times (W_{i+1} \times P_{i+1}^*) + \ddot{V}_i \quad \text{---(3.17)}$$

$$C_i = Z_{i-1} \cdot n_i \quad \text{---(3.18)}$$

2> 조인트 $i+1$ 이 병진운동을 할때,

$$\dot{W}_{i+1} = \dot{W}_i \quad \text{---(3.19)}$$

$$\ddot{W}_{i+1} = \ddot{W}_i \quad \text{---(3.20)}$$

$$\ddot{V}_{i+1} = Z_i \ddot{q}_{i+1} + W_{i+1} \times (W_{i+1} \times P_{i+1}^*) + 2W_{i+1} \times (Z_i \dot{q}_{i+1}) + \dot{W}_{i+1} \times P_{i+1}^* + \ddot{V}_i \quad \text{---(3.21)}$$

$$C_i = Z_{i-1} \cdot f_i \quad \text{---(3.22)}$$

여기서, $i = 1, \dots, 6$ 이다. 중력의 효과는 식
(3.3) 와 식(3.4) 를 유도할때 무시했는데, 이

중력의 효과는 선형가속도의 항에 포함되어 있
음을 앞의 식들을 통해 알 수 있다.

4. 매니플레이터에 대한 경로 설계

4-1. 손의 궤적 정의

손의 원하는 위치와 방향은 변환행렬 $H(t)$ 로
정의하자.

그림 4.1(a) 로 부터, 변환행렬 $H(t)$ 는

$$H(t) = \begin{bmatrix} X_h(t) & | & Y_h(t) & | & Z_h(t) & | & P_h(t) \\ \hline 0 & | & 0 & | & 0 & | & 1 \end{bmatrix}$$

방향벡터 $X_h(t), Y_h(t), Z_h(t)$ 는 그림 4.1(b) 의
Euler 각 α, β, γ 에 의해서 정의된다. 그림
4.1(b)에서 알수 있듯이, 방향은 Z 축에 관하여
 α rad 회전, X'축에 관하여 β rad 회전, Z'축에
관하여 γ rad 회전을 나타낸다. 따라서, 손 행렬
 $H(t)$ 는 다음과 같이 표현된다.

$$H(t) = {}^aT_6 \text{ROT}(Z, \alpha) \text{ROT}(X, \beta) \text{ROT}(Z, \gamma) \quad \text{---(4.1)}$$

$S(t)$ 를 다음과 같이 정의하자.

$$S(t) = [P_x(t) \ P_y(t) \ P_z(t) \ \alpha(t) \ \beta(t) \ \gamma(t)] \quad \text{---(4.2)}$$

위치 S^1 에서 S^3 로 손을 움직이는데 필요한
 $S(t)$ 는

$$S(t) = S^1 + f(t) \cdot (S^3 - S^1) \quad \text{---(4.3)}$$

여기서, $f(t)$ 는 $f(t_1)=0$ 와 $f(t_2)=1$ 로 되는
적절하게 정의된 시간의 다항식이다.

손의 위치가 영역의 중심에 있을때는 가속도
는 0 가 되게 선택하고, 인접한 영역에서 천이
되었을때는 0 가 아닌 상수 값을 가지게 선택
한다. i 번째 영역의 중심에서 $V_s(t)$ 는

$$V_s(t) = (S^i - S^{i-1}) / T_i \quad \text{---(4.4)}$$

이 되고, 천이되는 동안 가속도는

$$\dot{V}_s(t) = (V_s^{i+1} - V_s^i) / (2C_i) \quad \text{---(4.5)}$$

가 된다. 손의 위치(S) 를 묘사하는 방정식은
다음과 같다.

$$d(S)/dt = V_s$$

$$d(V_s)/dt = \dot{V}_s \quad \text{---(4.6)}$$

$$\text{여기서, } \dot{V}_s = \begin{bmatrix} 0 & , & \text{영역의 중심} \\ \dot{V}_s & , & \text{천이} \end{bmatrix}$$

손의 위치와 속도는 식(4.6) 를 통합함으로써
시간 함수로 계산된다. 한 샘플주기동안에 가속
도가 일정하기 때문에 이 방정식을 차분방정식
으로 변환시킴으로서 디지털 컴퓨터로 쉽게 구
할 수 있다.

따라서, 식(4.6) 을 차분방정식으로 변환하면,

$$S(k+1) = S(k) + V_s(t) \Delta t + 1/2 V_s(k) \cdot (\Delta t)$$

$$V(k+1) = V_s(k) + \dot{V}_s(t) \cdot \Delta t \quad \text{---(4.7)}$$

이 된다.

4-2. 최소시간 경로

완전한 궤적이 최소시간내에 실행되도록 하는데 필요한 몇가지 제약조건이 있다[4].

우선, 최소로 해야할 실행시간 ET는

$$ET = [C1] + [Cm-1] + Ti \quad \text{---(4.8)}$$

가 된다. 이때, 제약조건은 다음과 같다.

$$1. \max(\|V\dot{e}(t)\|) \leq Ka \quad \text{---(4.9)}$$

$$2. \max(\|V\dot{e}(t)\|) \leq Kv \quad \text{---(4.10)}$$

$$3. Ti + [Cj-1] + [Cn] = TI \quad \text{---(4.11)}$$

$$4. Ci \leq Ti/4$$

$$Ci \leq Ti+1/4, \quad i=1,2,\dots,m-1 \quad \text{---(4.12)}$$

$$5. Ti \text{과 } Tm \text{은 주어진다.} \quad \text{---(4.13)}$$

5. 매니플레이터의 위치 제어

매니플레이터의 제어는 토로트랄 조인트에 적용하기 위한 정확한 입력 토오르크와 힘에 관하여 푸는 문제이다.

토로트랄에 대한 운동방정식은 다음과 같다.

$$A(q)\ddot{q} + H\dot{q} + f(\dot{q}, q) + P(q) = C \quad \text{---(5.1)}$$

여기서, $A(P)$: 6x6 관성행렬

H : 6x6 대각 점성계수 행렬

$f(\dot{q}, q)$: 6x1 폴리올리과 원심력

$P(q)$: 6x1 중력항

계산된 토오르크 입력 기법에서, 입력 토오르크는 원하는 조인트 가속도(\ddot{q}_h), 속도(\dot{q}_h), 위치(q_h)와 실제 조인트 속도(\dot{q}), 위치(q)의 함수로서 계산된다.

$$C = A_s(q)(\ddot{q}_h + K1(\dot{q}_h - \dot{q}) + K2(q_h - q)) + H_s\dot{q} + P_s(q) + f_s(\dot{q}, q) \quad \text{---(5.2)}$$

여기서, $A_s(q), H_s, P_s, f_s$ 는 $A(P), H, P, f$ 의 계산된 부분이고, $K1$ 과 $K2$ 는 스칼라 이득상수이다.

식(5.2)를 식(5.1)에 대입하면 다음과 같다.

$$A(q)\ddot{q} + H\dot{q} + f(\dot{q}, q) + P(q) = A_s(q)(\ddot{q}_h + K1(\dot{q}_h - \dot{q}) + K2(q_h - q)) + H_s\dot{q} + P_s(q) + f_s(\dot{q}, q) \quad \text{---(5.3)}$$

이상적으로, 실제 계산부분과 계산된 요소는 정확하게 같아야한다. 즉,

$$A_s(q) = A(q) \quad \text{---(5.4)}$$

$$H_s = H \quad \text{---(5.5)}$$

$$f_s(\dot{q}, q) = f(\dot{q}, q) \quad \text{---(5.6)}$$

$$P_s(q) = P(q) \quad \text{---(5.7)}$$

이러한 식들이 만족하기는 매우 어렵다.

그러나, 만일 식(5.4)에서 식(5.7)까지 만족한다면 다음과 같이 쓸수 있다.

$$\ddot{q} = \ddot{q}_h + K1(\dot{q}_h - \dot{q}) + K2(q_h - q) \quad \text{---(5.8)}$$

오차를 $E_h = q - q_h$ 로 정의한다면, 식(5.8)은 다음과 같이 된다.

$$\ddot{E}_h + K1\dot{E}_h + K2E_h = 0 \quad \text{---(5.9)}$$

그러므로, 원하는 위치와 실제 위치사이의 오차는 $K1$ 과 $K2$ 를 적절하게 선택함으로써 접근적

으로 0에 접근할 수 있다.

5-1. 페루우프 제어

페루우프 시스템에 대하여 위치와 방향 두개에 관한 적절한 오차신호를 명시해 보자. 오차신호의 함수를 q 로 선택했다. 경로 설계 프로그램의 출력은 손의 원하는 위치(Ph), 속도(Vh) 그리고 가속도($\dot{V}h$)이다. 식(5.8)에 의해 $V6$ 를 적절하게 선택할 수 있다.

$$\dot{V}6 = \dot{V}h + K1(Vh - V6) + K2(Ph - P6) \quad \text{---(5.13)}$$

위치 오차($P6 - Ph$)에 관한 방정식은 다음과 같이 주어진다.

$$d^2(P6 - Ph)/dt^2 + K1(d(P6 - Ph)/dt + K2(P6 - Ph) = 0 \quad \text{---(5.14)}$$

따라서, 위치 오차는 $K1$ 과 $K2$ 를 적절하게 선택함으로써 접근적으로 0에 접근할 수 있다.

방향 오차(\hat{A})은 각 0와 단위벡터 n 으로 정의할 수 있다.

$$\hat{A} = \sin(\theta) \cdot n \quad \text{---(5.15)}$$

방향오차를 고정하기 위해 n 과 똑같은 방향에 있는 손의 각속도($\dot{W}6$)를 설정해야 한다.

$$\dot{W}6 = \dot{W}h + K1(Wh - W6) + K2n \quad \text{---(5.16)}$$

앞장에서 정의된 벡터 d 는

$$\dot{d} = \begin{bmatrix} \dot{W}6 \\ \dot{V}6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{W}h + K1(Wh - W6) + K2n \\ \dot{V}h + K1(Vh - V6) + K2(Ph - P6) \end{bmatrix} = \dot{U} + K1(U - d) + K2E \quad \text{---(5.17)}$$

여기서,

$$E = \begin{bmatrix} \hat{A} \\ Ph - P6 \end{bmatrix} \quad \text{---(5.18)}$$

$d = M\dot{q}$ 와 $\dot{d} = M\ddot{q} + (dM/dt)\dot{q}$ 를 식(5.17)을 대입하면,

$$M\ddot{q} + (dM/dt)\dot{q} = \dot{U} + K1U - K1M\dot{q} + K2E \quad \text{---(5.19)}$$

윗식을 q 에 대해 풀면 다음과 같다.

$$\ddot{q} = -K1\dot{q} + M^{-1}(\dot{U} + K1U + K2E - (dM/dt)\dot{q}) \quad \text{---(5.20)}$$

이 페루우프 제어시스템에 대한 블록 다이어그램은 그림 5.1에 나타나 있다.

6. 시뮬레이션 결과

앞장에서 제안한 알고리즘이 이상적이기 위해서는 식(5.4)~식(5.7)이 만족해야 한다. 그러나, 실제적으로 이러한 식들이 만족하기는 매우 어렵다.

본 연구에서는 식(5.5)가 일치하지 않을 경우 즉, $H \neq H_s$ 인 경우를 컴퓨터 시뮬레이션에서 각 조인트에 미치는 효과를 비교하였다. 그 결과, 이 H 와 H_s 의 차이에 따라 각 조인트에 미치는 영향이 각각 다음을 알수 있었다.

REFERENCE

1. Whitney, D.E., "Force Feedback Control of Manipulator Fine Motions," Proceedings of the 1976 Joint Automatic Control Conference, Purdue Uni., July 27-30, 1976.
2. Finkel, R., Russel, T., Bolles, R., Paul, R., and Felman, J., "AI, A Programming System for Automation," Stanford Artificial Intelligence Laboratory, Memo AIM-243
3. Symon, K.R., Mechanics, 2nd ed., Reading, Mass.: Addison-Wesley, 1970.
4. K.S. FU, R.C. Gonzalez, C.E.G. LEE, Robotics, McGraw-Hill Book Company, 1987.
5. Markiewicz, B.R., "Analysis of the Computed Torque Drive Method and Comparison with Conventional Position Servo for a Computer-Controlled Manipulator," Technical Memorandum 33-601, Jet Propulsion Laboratory.

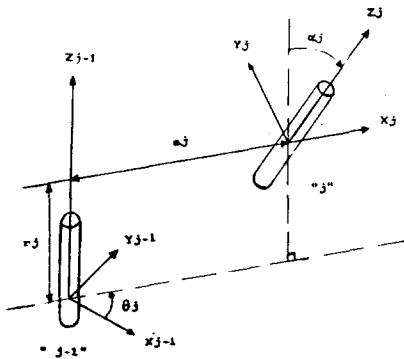


그림 2.1 매니퓰레이터 매개변수들

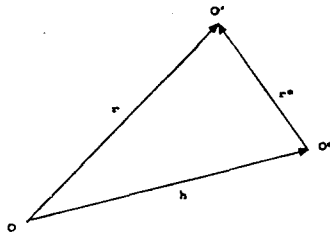


그림 2.2 동 좌표

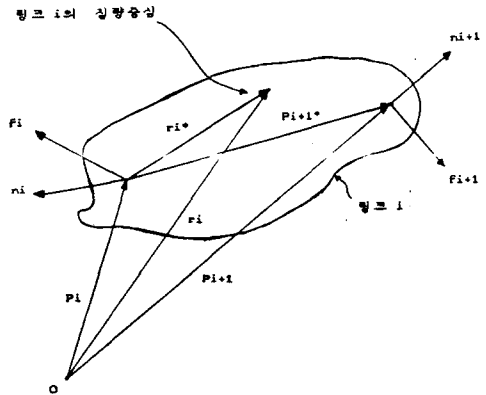


그림 3.1 링크 i에 작용되는 힘과 모멘트

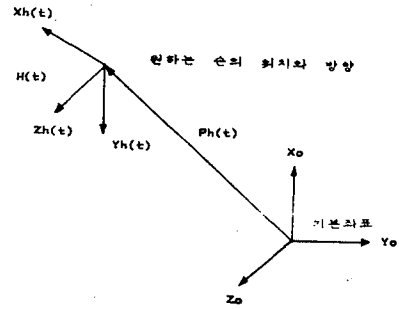


그림 4.1(a) 엔드의 위치와 방향

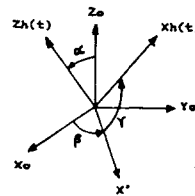


그림 4.1(b) 엔드의 방향벡터와 방향각

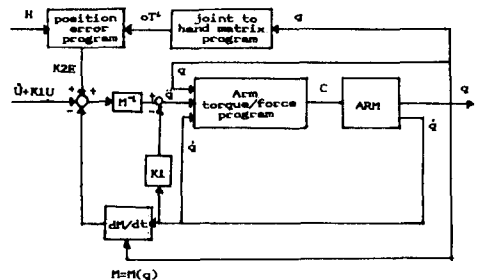


그림 5.1 피드워드 제어기