

고속정밀 서보제어를 위한 직구동 다관절 메니플레이터의 시간제어기 설계

Time Delay Controller Design for the High Speed Precision Servo-Control of the Direct Drive Multi-axis Manipulator

이태경, 김학성, 정상철, 최용제*, 안태영 (국방과학연구소, *연세대학교 공과대학)

ABSTRACT

This paper covers the technology developmental stage work for the automatic ammunition loading system mainly focusing on the controller design of the electro-hydraulic type direct drive multi-axis manipulator. Mathematical model of the plant derived and PIDM servo-controller structured. Comparative study between the analytical and experimental work has been carried out to help understand the response property of the direct drive multi-axis robot. In the direct drive robot, non-negligible amount of disturbance and load induced dynamics variation are transmitted to the drive axis and nonlinearity is highly observed. Thereupon a robust controller implementing time-delay control law is proposed, and computer simulation confirms the possibility for the time-delay control application against the unpredictable disturbance and load-induced dynamics variation.

Key Words : 자동장전, 다관절 조작기, PIDM 제어, 시간지연제어, 전기-유압구동, 정/역기구학적 해석

1. 서론

현대의 무기체계는 생존성과 화력의 증대를 목표로 자동화 되어가는 추세에 있으며, 특히 대중량 탄을 사용하는 경우에는 승무원의 운용성 demoghic과 신속한 사격의 요구가 자동화를 필요로 한다. 탄 자동장전 시스템은 포탑내 공간활용의 효율성을 높이고 신속 정확한 탄 이송이 가능하도록 설계되어야 하며, 이의 실현을 위한 기구형상은 여러 가지의 형태를 고려할 수 있으나 다축 동시제어라는 관점에서 다관절 조작기(multi-axis manipulator)의 사용은 시퀀스 제어 방식을 택하는 기존 장전시스템에 비하여 보다 빠른 속도로 임의 위치로의 탄 이송을 가능케 한다. 또한 다관절 조작기의 이용은 무기체계 개발시 흔히 발생하는 주변장치와의 인터페이스면에서 다른 기구의 형상 변화에 능동적으로 대처할 수 있으며, 독자적인 체계의 신기술 확보는 물론이고 유사 무기체계에도 응용을 가능하게 한다.

다관절 조작기를 탄 자동장전시스템에 응용한 실례를 기초연구 프로젝트인 미국의 ISAS(The Integrated Smart Artillery Synthesis)차량에서 찾아 볼 수 있으며, 현재 파급효과와 더불어 선진국은 많은 관심을 갖고있다.

이러한 다관절 조작기를 이용한 자동화시스템은 신속하고 정확한 사격의 요구로 고속이면서 주위의 환경변화에도 둔감한 제어기술이 요구되고 있다. 그러나 이와같은 시스템은 부하의 변동과 이에 따른 비선형 동특성이 제어능성을 약화시킨다. 부하의 동특성과 예측하지 못한 외란에 둔감한 강인제어기법이 여러 가지로 시도 되어 왔다[2]. 일례로 적응제어기 [1][16], 토크계산법[4], 피드포워드 제어기[4] 등의 제어기법들이 있으나 나름대로의 장단점을 가지고 응용되어 왔다. 이들 제어기 들은 실제 적용시 많은 계산량과 정확한 모델링에 기초로 하기 때문에 큰 외란이나 부하의 변동에는 좋은 제어특성을 기대할 수 없으며 실제 구현상의 문제점을 갖고있어 실제 응용은 PID제어기를 골격으로한 상태변수 피드백의 제어기 구조가 적용되고 있다. 반면에 가변구조 제어기는 실제 응용이 용이하며 강인한 제어특성을 보인다[6].그러나 고주파 영역에서 채터링을 유발시키는 단점을 갖고 있다. 최근에 제안된 시간지연 제어기법은 제어기의 게인조절이나 시스템의 매개변수를 인식하지 않기 때문에 간단하고 계산량이 적어 실제적인 적용이 가능하다[10][19]. 부하의 동특성 변화와 불확실성의 외란은 감속기가 큰 경우에는 기어비 만큼 감소가 되나 직구동 시스템에는 직접구동축에 전달되므로 이러한 강인제어기법을 응용한 제어기 개발이 절실히 요구되어 진다.

본 논문에서는 이러한 다관절 로봇암의 직구동 서보시스템에 대한 동특성을 포함한 수학적 모델링과 실제 적용할 PIDM + 보상필터 제어방식에 대한 특성분석 및 구동특성을 실제 성능실험 및 시뮬레이션을 통하여 알아 보았다. 그리고 직구동 다관절 로봇암이 강인하고 고속이며 정밀하게 제어되기 위해서는 전기-유압 직구동식 서보시스템에서 부하의 동특성과 마찰, 중력 등의 외란을 보상하여 각축이 독립 제어가 되어져야 한다. 따라서, 이러한 심한 외란에 둔감한 독립제어기의 실현을 위하여 PIDM + 보상필터의 제어방식에 강인 제어루프를 첨가 시킨 시간지연 제어방식을 구현하기 위해서 제어법칙을 유도하고, 구동제어 특성을 시뮬레이션 하였다. 이를 통하여 전기-유압식 직구동 로봇에 대하여 시간지연 제어가 부하의 동특성의 변화에 대하여 갖는 강인성을 입증 하였다.

본 논문에서는 1) 다자유도 직구동 조작기의 기구학 해석, 2) 부하의 동특성을 고려한 시스템의 모델링, 3) VME-BUS를 이용한 제어시스템 구성, 4) 서보 인터페이스 모듈 및 설계규격, 5) PIDM + 보상필터의 제어알고리즘을 사용한 시스템에 대한 시뮬레이션, 6) 부하의 외란이나 시스템 매개변수의 변화에 강인한 부하특성 보상을 위한 제어알고리즘의 개발 및 해석 등의 내용에 대하여 설명하고 있으며, 끝으로 대중량탄 자동장전기술의 지속적인 연구활동방향을 제시한다.

2. 기구학적 해석 및 동적 모델링

2.1 기구학적 해석

로봇암의 각 관절변위가 주어졌을 때 손목끝의 위치와 방향을 구하고자 하는 것이 정기구학 해석이며 반대로 손목끝의 위치와 방향이 주어졌을 때 각 로봇암의 링크위치를 결정하는 것이 역기구학 해석이다. 여기서 정기구학 해석은 항상 한값의 유일한 해를 가지나 역기구학 해석은 로봇암의 형상에 따라 여러 가지의 해가 존재 할 수 있다.

2.1.1 정기구학 해석(Forward Kinematics)

일반적으로 정기구학 해석은 식(1)와 같이 D-H (Denavit Hartenberg) 표현식을 사용한다. 이 방법은 연결된 어진 두개 링크간의 기준좌표에서의 회전운동과 직선운동을 조합하여 손목끝(End effector)의 위치(Position) 및 방향(Orientation)을 고정좌표에 대하여 표현 할 수 있는 가장 보편적이고 체계적인 방법이다.

$$T_i^{i-1} = T_z.d \cdot T_z.e \cdot T_x.a \cdot T_x.a$$

$$\begin{bmatrix} C\theta_i & -Ca_iS\theta_i & Sa_iS\theta_i & aC\theta_i \\ S\theta_i & Ca_iC\theta_i & Sa_iC\theta_i & aS\theta_i \\ 0 & Sa_i & Ca_i & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

a : 링크간의 간격 d : 링크간의 이동거리 C : Cos
 α : 비틀림각 θ : 회전각 S : Sin

T_i^{i-1} : i-1번째 링크의 좌표에 대한 i번째 링크의 좌표변환 행렬
 식(1)과 그림1의 D-H링크 변수를 이용하여 각 링크에서의 좌표변환 행렬 $T_1^0, T_2^1, T_3^2, T_4^3, T_5^4, T_6^5$ 및 T_0^5 을 구할수 있으며 손목의 위치 및 방향은 아래와 같다.

$$T_2^1 = \begin{bmatrix} C_2 & -S_2 & 0 & -L_2C_2 \\ S_2 & C_2 & 0 & -L_2S_2 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$T_0^1 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & -L_1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & d_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$T_3^2 = \begin{bmatrix} C_3 & -S_3 & 0 & -L_3C_3 \\ S_3 & C_3 & 0 & -L_3S_3 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$T_3^2 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$T_4^3 = \begin{bmatrix} C_4 & 0 & S_4 & 0 \\ S_4 & 0 & -C_4 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$T_5^4 = \begin{bmatrix} C_5 & 0 & -S_5 & 0 \\ S_5 & 0 & C_5 & 0 \\ 0 & -1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$T_6^5 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & L_5 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$\therefore T_0^5 = T_0^1 T_1^2 T_2^3 T_3^4 T_4^5 =$$

$$\begin{bmatrix} -C_4C_5S_{23} - C_{23}S_5 & S_{23}S_4 & -C_{23}C_5 + C_4S_{23}S_5 & -L_1 - L_2C_2 - L_3C_{23} \\ -C_5S_4 & -C_4 & S_4S_5 & 0 \\ -C_{23}C_4C_5 + S_{23}S_5 & C_{23}S_4 & C_5S_{23} + C_{23}C_4S_5 & L_2S_2 + L_3S_{23} + d \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

따라서 손목끝의 위치는

$$P_0 = [-L_1 \quad -L_2C_2 \quad -L_3C_{23} \quad 0 \quad L_2S_2 + L_3S_{23} + d]^T$$

주어지며 방향은

$$X_6 = [-C_4C_5S_{23} \quad -C_{23}S_5 \quad -C_5S_4 \quad -C_{23}C_4C_5 + S_{23}S_5]^T$$

$$Y_6 = [S_{23}S_4 \quad -C_4 \quad C_{23}S_4]^T$$

$$Z_6 = [-C_{23}C_5 + C_4S_{23}S_5 \quad S_4S_5 \quad C_5S_{23} + C_{23}C_4S_5]^T$$

로 표현된다.

2.1.2 역기구학 해석 (그림2 참고)

역기구학 해석에서는 보편적으로 해석적인 방법(analytical method)과 반복법(iterative method), 기구학적 방법(geometric method)의 3가지 방법이 있다. 여기서는 해석적인 방법과 기하학적인 방법을 병용하여 역기구학 해석을 한다. 다음에 유도과정을 생략하고 1축(d_1), 2축(θ_2), 3축(θ_3), 4축(θ_4) 및 5축(θ_5)의 결과를 제시한다.

$$d_1 : |P_z - d_1| < L_{2E}/2 \quad (2)$$

$$\theta_2 : \theta_2 = \theta_A - \theta_B \quad (3)$$

$$\text{Cos}^{-1} \left[\frac{-L_3^2 + L_2^2 + R^2}{2 \cdot L_2 \cdot R} \right]$$

$$\text{Tan}^{-1}(P_{5y}^1 / P_{5x}^1)$$

$$\theta_3 : \theta_3 = 180 - \text{Cos}^{-1} \left[\frac{-R^2 + L_2^2 + L_3^2}{2 \cdot L_2 \cdot L_3} \right] \quad (4)$$

$$\theta_4 : \theta_4 = \text{Tan}^{-1}(S_4 / C_4) \quad (5)$$

$$\theta_5 : \theta_5 = \text{Tan}^{-1}(S_5 / C_5) \quad (6)$$

2.2 동적 모델링

부하의 운동방정식은 식의 복잡성을 피하기 위하여 2축과 3축만이 서로 비선형성의 변수들이 간섭하는 것으로 모델링하고 나머지 1축, 4축 및 5축은 시스템의 특성 및 구조상 독립적인 것으로 간주하여 모델링 하였다.

2.2.1 유압시스템의 모델링

그림3은 전체 유압시스템의 모델링 구성도이다.

2.2.2 기구부의 모델링

식 2~6는 1~5축의 운동방정식을 나타낸다.

$$(J_m + J_{Lm}) \frac{d\dot{\theta}}{dt} \cdot \frac{L}{2\pi\eta} (F_L \cdot WK) \{ T_f = D_m(P_A - P_B) \} \quad (7)$$

$$\tau_1 = d_{11}\dot{\theta}_1 + d_{12}\dot{\theta}_2 + C_{22}\dot{\theta}_2^2 + \phi_1 \quad (8)$$

$$\tau_2 = d_{21}\dot{\theta}_1 + d_{22}\dot{\theta}_2 + C_{11}\dot{\theta}_1^2 + \phi_2 \quad (9)$$

$$\dot{J}\dot{\theta} + T_f = D_m(P_A - P_B) \quad (10)$$

$$J\dot{\theta} \cdot W L_S \text{Cos}\theta \cdot T_f = D_m(P_A - P_B) \quad (11)$$

3. 제어기 설계

3.1 PIDM/ 시간지연 제어기 구성

본 시스템은 직구동 로봇이므로 부하의 외란이나 동특성이 직접 구동모터에 전달되어 감속기가 있는

로봇시스템 보다 제어가 어려워진다. 그러므로 외부 외란과 부하변동에 강인한 제어시스템이 요구되어진다. 제어기 구성은 첫째로, 그림8의 속도제한 및 압력제한의 내부루프와 PID 위치제어기의 외부루프로 구성되는 PIDM 제어기와 둘째로, 부하의 변동이 크고 로봇암의 변수의 불확실성이 존재하는 시스템에도 항상 좋은 제어성능을 유지할 수 있는 강인한 로봇 제어시스템을 설계 및 구현 하고자 한다.

3.2 시간지연 제어기의 설계

직구동 전기유압식 로봇에 적용할 시간지연 제어기의 알고리즘을 유도하기 위하여 먼저 비선형성의 유압서보 시스템을 선형화하여 선형화된 시스템 모델로부터 제어법칙을 구한다. 그림11에 보인 제어법칙에 따라 서보밸브의 입력전류는 다음과 같다.

$$i_{sv}(\theta) = i_{sv}(t-L) + M_A \dot{\theta}(t-L) + 2\xi\omega_n \dot{\theta} + \omega_n^2(r-\theta) \quad (12)$$

그림9은 PIDM + DTC 제어기의 블록선도를 나타낸다.

3.3 제어기 하드웨어 및 소프트웨어

3.3.1 하드웨어

자동 탄이송 장치는 5축 다관절 로봇암의 구조를 가지며 그림7은 자동 탄이송기의 외형도를 보여준다. 자동 탄이송 제어기 구성은 그림10에서 보는 바와 같이 VME 버스 환경의 개방구조 시스템을 채택하고 있으며 두 개의 프로세스간의 데이터 및 정보의 통신은 VME 버스를 통한 공유메모리를 활용한다. 제어시스템은 두 개의 CPU로 구성되어 있는데, 슬롯 1에는 MVME147SA의 호스트 프로세서 보드로 8MB램 메모리에 68030 CPU, 32MHZ의 클럭 주파수를 갖는 CPU #1이 있다. 호스트 보드에서의 운영 시스템은 UNIX이며 이를 사용하므로써 강력한 UNIX의 편집기능, 사용자 인터페이스 기능 및 네트워킹 기능등이 가능하다. 호스트 보드의 자동 탄이송기에서의 주기능은 사용자 인터페이스, 상위 로봇 제어 명령 루틴 및 계획계획 수행을 담당한다. 슬롯 2에 장착되어 있는 또 다른 한 개의 CPU은 호스트 보드와 같은 성능을 가지며, 호스트 보드에서 개발된 로봇제어 프로그램이 다운로드 된다. 다운로드된 프로그램은 실시간 운영체제인 VMEexec에 의해 실시간으로 동작을 하게되며, 주로 하드웨어와 직접 관련된 서보제어 알고리즘 루틴을 수행한다.

3.3.2 소프트웨어

로봇을 제어하기 위한 소프트웨어는 크게 로봇제어

명령언어부 및 궤적계획과 로봇암의 서보제어를 위한 서보루틴으로 구성되어 있다. 로봇제어 명령부는 사용자가 로봇의 동작을 제어하고 I/O인터페이스 등을 관할하기 위한 명령으로, 사용자가 모니터에 타이핑하거나 파일형태로 입력했을 경우 명령어의 해석과 실행을 지원해 주는 사용자 로봇언어로 대화형 모드를 지원해 준다. 또한 사용자는 오프라인에서 프로그램을 할 수 있는 환경이 제공되며 작성된 프로그램을 토대로 로봇의 목표치를 계산하고 그 값을 CPU #2에 제공하는 궤적 생성기가 지원된다. 궤적 생성기는 매 48ms마다 자신의 루프를 돌면서 사용자 명령 또는 입력된 궤적의 위치를 받아 로봇이 움직여야 할 경로를 기구학 해석 서보루틴에 의해 계산을 하고 매 샘플링 시간에 CPU #2의 보드에 넘겨준다. 하위 CPU #2보드는 각종 I/O보드와의 통신 및 서보루틴을 관장하는 독립된 서보제어 알고리즘을 갖는다. 이들에 대한 개략도는 그림12에 나타나 있다. 디지털 서보제어 알고리즘은 매 8ms 마다 PID 알고리즘을 실행하고 그출력을 아날로그 서보제어기에 입력된다. 그림13은 궤적 제어기의 실행과정을 보여 주는 것으로 운동요구 발생시 궤적 생성기가 활성화되어 운동요구 정보를 분석 및 계산하여 서보 보드에 각 조인트 값을 넘겨준다.

4. 제어성능 예측 및 구동실험

4.1. PID제어의 경우

앞절에서 언급한 시스템 모델링 및 시스템 변수를 바탕으로 자동 탄이송시스템의 구동특성 및 부하의 동특성이 제어성능에 미치는 영향을 각축에 대한 시간응답 특성을 통하여 컴퓨터 시뮬레이션 및 성능실험을 행하였다. 또한, 부하와 무부하 상태에서의 응답특성과 로봇암의 관성변화 및 중력에 대한 제어특성을 직구동 로봇의 PIDM 제어기에 대하여 성능예측 및 실험을 실시하였다. 이를 통하여 50kg의 부하 및 로봇암의 위치에 따른 관성변화의 제어특성을 분석하였다. 대표적인 예로 2축과 4축의 성능예측 결과와 실험결과를 그림14~17에 보여준다.

4.2 시간지연 제어의 경우

앞절에서 유도한 제어법칙으로 부터 부하의 변동과 시스템의 변수가 불확실한 환경에서도 직구동 유압 시스템이 고속정밀의 강인한 제어가 되는지를 알아보기 위하여 컴퓨터 시뮬레이션을 통하여 성능예측을 하였다. 그림9에 성능 예측의 블록선도를 보여주며 기존의 PIDM 제어기에 시간지연 제어 궤환이 첨

가되어 있어 시스템의 동특성 변화를 감지하여 동특성을 보상하는 강인제어루프의 기능을 갖는 구조로 되어 있다. 감속기가 있는 전기구동 시스템에서의 시간지연 제어기의 적용한 실례를 참고문헌[9]에서 찾아 볼 수가 있는데, 이경우는 부하의 외란이 감속기를 통하여 감속비 만큼 제거되는 가반중량이 적은 전기구동 시스템이므로 동특성의 변화가 적고 유압 시스템에 비하여 비선형성이 매우 적은 특징을 갖는다. 따라서, 가반 중량이 50kg의 직구동식의 비선형성이 심한 전기유압 시스템에서의 시간지연 제어기의 특성분석 및 제어기 설계는 매우 큰 의미를 갖는다. 직구동 유압시스템에서 시간지연 제어기의 강인성을 알아보기 위하여 부하의 관성 및 가반중량을 변화시켜 PIDM 제어기와 구동특성을 비교분석하여 그 효용성을 입증하였다. 시뮬레이션은 동특성 변화가 가장 심한 2축 및 3축에 대하여 수행하였다. (그림18 참고)

5. 결론

5자유도 전기-유압식 탄 자동장전의 제어를 위한 서보제어기중 핵심 구성부품을 설계 제작하고, 이의 개발환경인 VME 시스템을 사용하여 전체적인 서보제어기를 구성하였다. 그리고 다관절 이송기의 동적 모델링으로부터 성능을 예측하고 실제 구동실험을 통하여 PIDM 제어기의 기술적 실현성을 입증하는 실험을 수행하여, 그 응답특성을 분석하고 예상된 서보제어기의 성능을 확인하였다. 또한 부하의 변동과 동특성에 나타난 극심한 비선형성의 강인한 제어를 위하여 본 시스템에 대한 시간지연 제어기를 설계하고 성능예측을 통하여, 시간지연 제어기의 기술적 실현성을 고찰했으며 그 결과 설계된 제어기의 본 시스템에 대한 적용성이 매우 유용할 것임을 확인하였다. 추후 시간지연 제어 알고리즘을 실제 개발한 서보제어기에 사용하여 구동특성 실험을 할 것이며 이를 통하여 성능예측과 비교분석 함으로써 그 유용성을 입증 할 예정이다.

참고문헌

1. T.C.Hsia, "Adaptive control of robot manipulators-A review," 1986 IEEE Int.Conf Robotics Automat. (San Francisco), 1986,pp.183-189.
2. Peter Dorato, "A Historical Review of Robust Control ", IEEE Control System Magazine, April, 1987
3. E.G.Gilbert "An approach to nonlinear feedback control with applications to robotics," in Proc. IEEE Conf. Decision Contr, (San Antonio), 1983

4. An, C.H., Atkeson, C.G., Griffiths, "Experimental evaluation of feedforward and computed torque control", Proc. IEEE int. Conf. Robotics and Automation, 1987
5. T.C.Hisa, "Design of PID control for robot manipulator", "Encyclopedia of Robotics. New York :Wiley, 1988
6. K.K.D.Young, "Controlled design for a manipulator using theory of variable structure systems," IEEE Trans. Syst. Man. Cybern. vol. SMC-8, 1978
7. R.G.Morgan, "A decentralized variable structure control algorithm for robot manipulators," IEEE J.Robotics Automat., vo RA-1, 1985
8. T.C.Steve Hisa, "A New Technique for Robust Control of Servo System," IEEE Tran. IE. vol.36, no.1 , 1989
9. T.C.Steve Hisa, "Robust Independent Joint Controller Design for industrial robot manipulator," IEEE Trans. IE. vol.38, 1989
10. Youcef-Toumi,K, "A Time Delay Controller for Systems With Unknown Dynamics", ASME journal of Dynamic Systems, Measurement and Control, vol.112, March 1990
11. H.E.Meritt, " Hydraulic Control System", John Wiley & Sons, Inc, 1967
12. "대부하 전기유압시스템의 부하압력 이피드백에 관한 연구", ASMD-419-87243, 1-1-5
13. Asada H., "Direct Drive Robots Theory and Practice", The MIT press, 1987
14. Asada H., "Robot Analysis and Control", John Wiley & Sons, Inc, 1986
15. R.P.Paul, Robot Manipulators : Mathmatics, Programming and Control, The MIT Press, 1982
16. John.J, Craig, Adaptive control of Mechanical Manipulators, Silma Inc
17. C.H.An,C.G.Atkeson, J.M.Hollerbach, Model-Based Control of a Robot Manipulator, The MIT Press, 1988

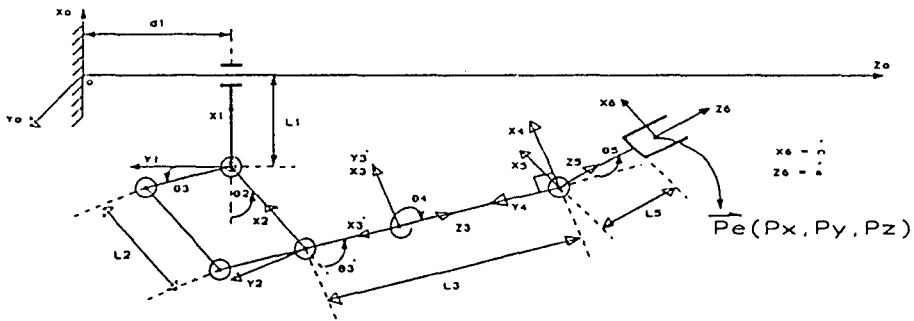


그림1. 로봇암의 기구

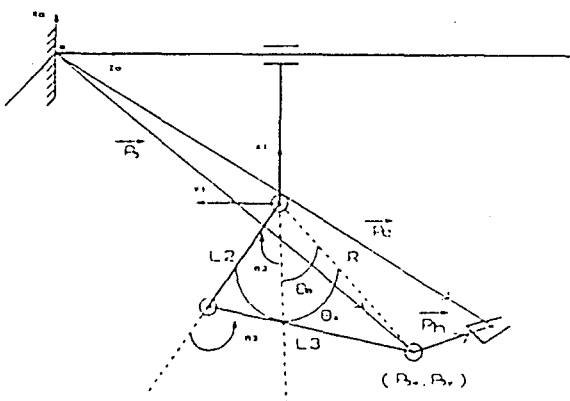


그림2. 2축 및 3축의 역기구학 해

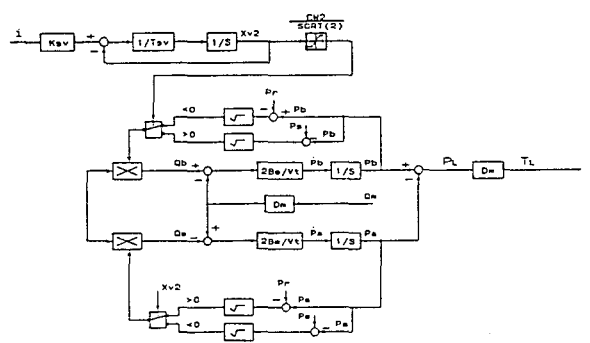


그림3. 유압시스템 모델링

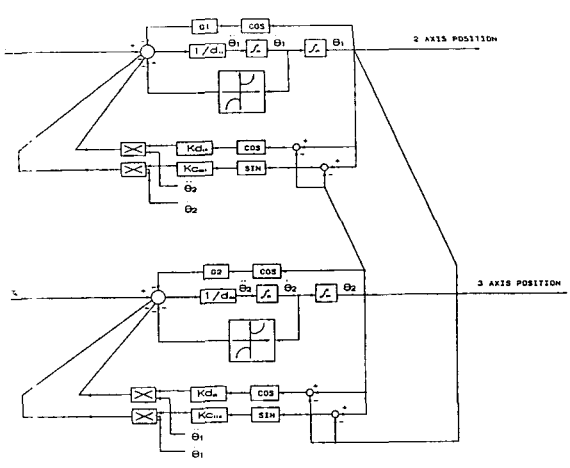


그림4. 2축, 3축의 동역학 모델링

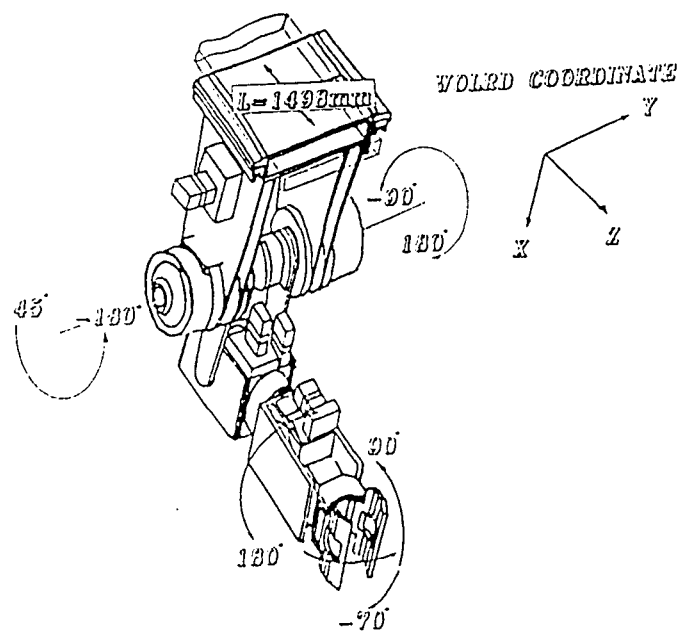


그림7. 자동장전시스템 외형도

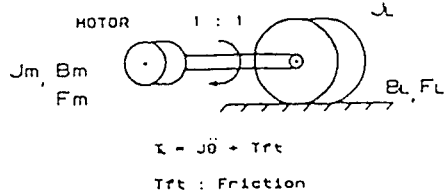


그림5. 4축 운동방정식

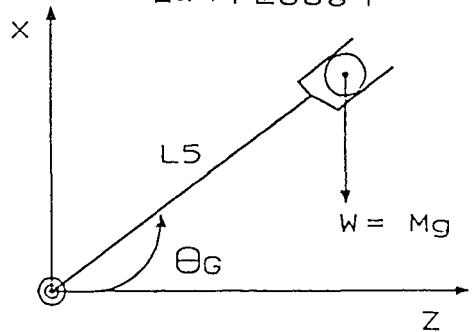


그림6. 5축 부하 운동방정식

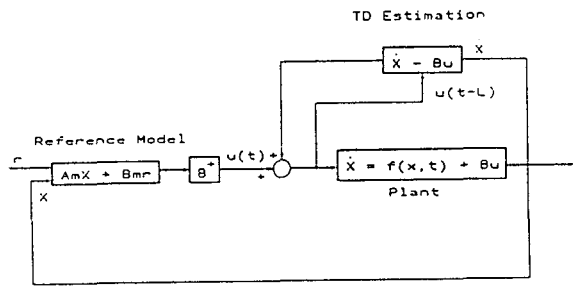


그림11. 시간제어기의 블록선도

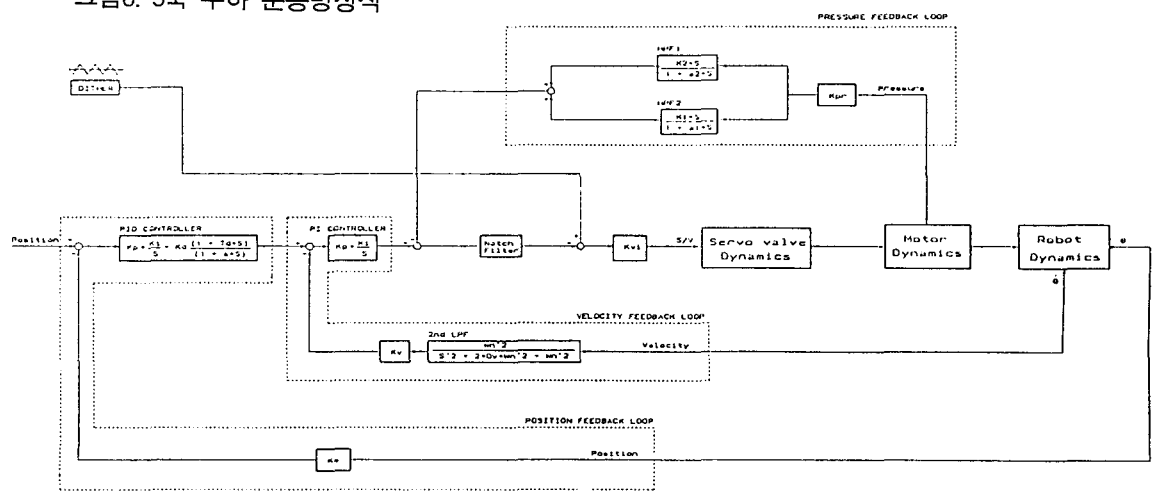


그림8. PIDM 제어기 블록선도

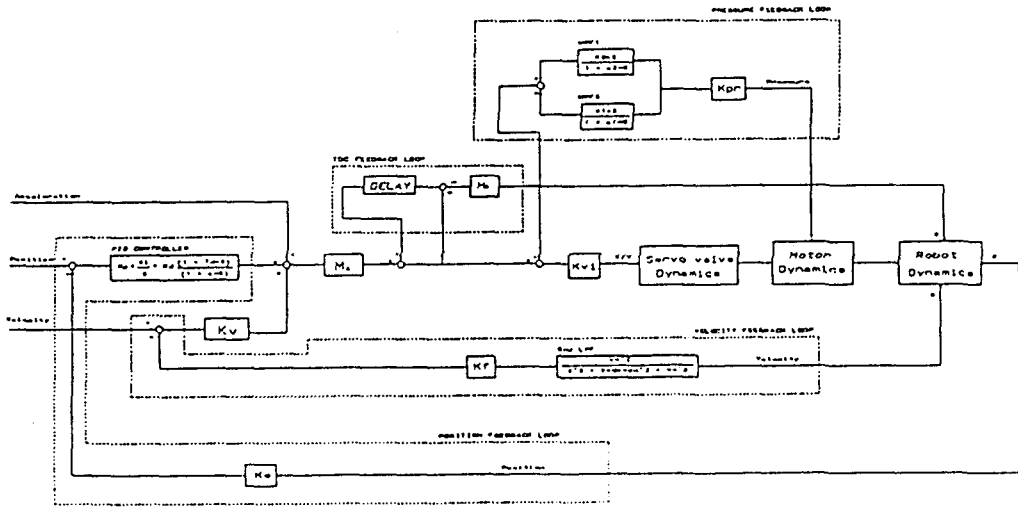


그림9. PIDM TDC제어기 블록선도

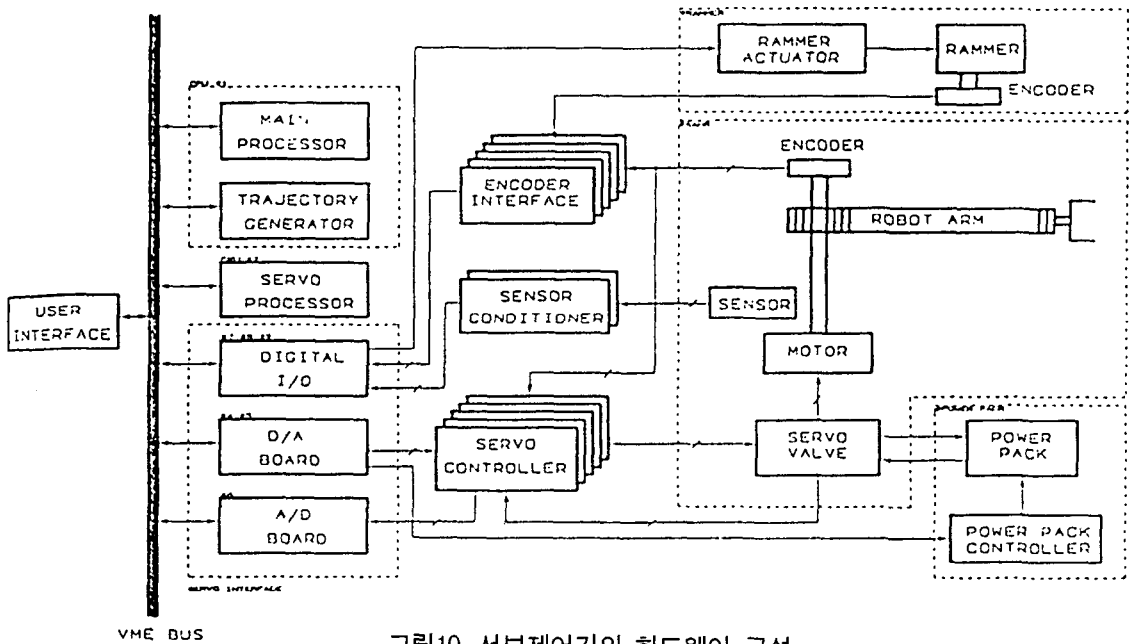


그림10. 서보제어기의 하드웨어 구성

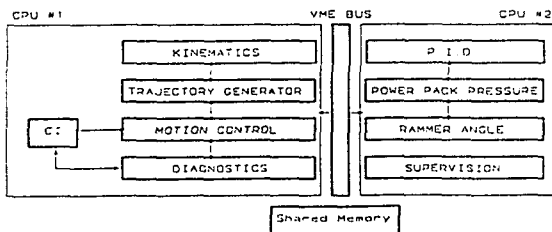


그림12. 제어기의 소프트웨어 구성

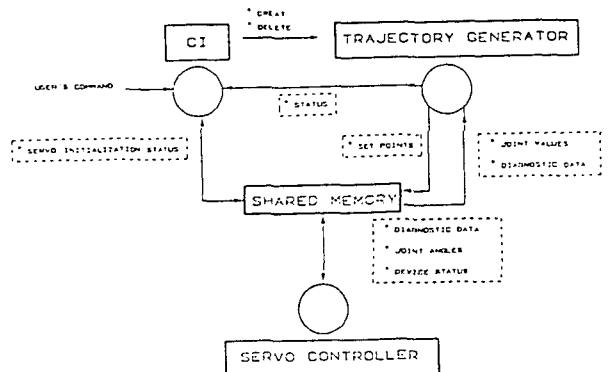


그림13. 궤적 생성기

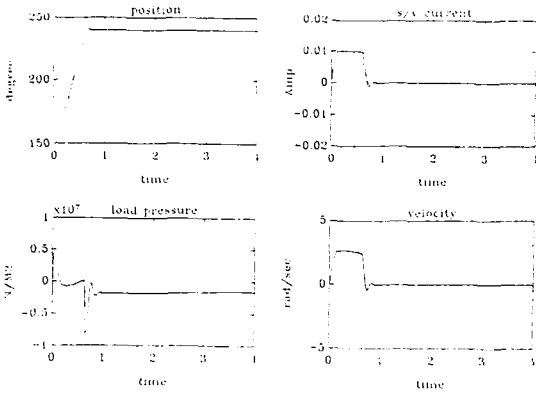


그림14. 2축 구동 시뮬레이션 응답
(150° → 240°, 부하)

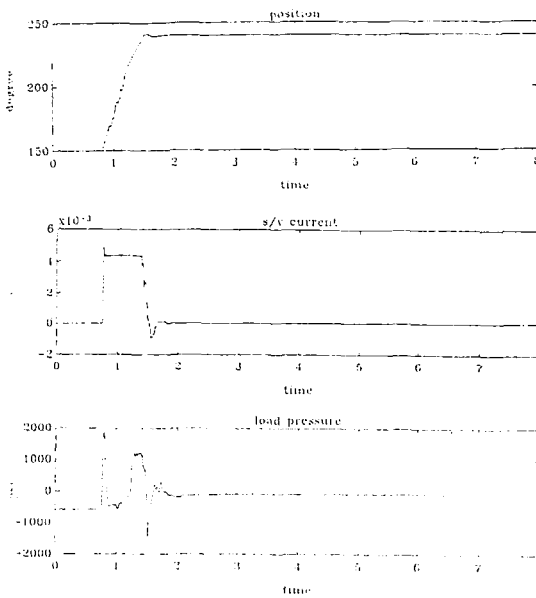


그림15. 2축 구동실험 응답
(150° → 240°, 부하)

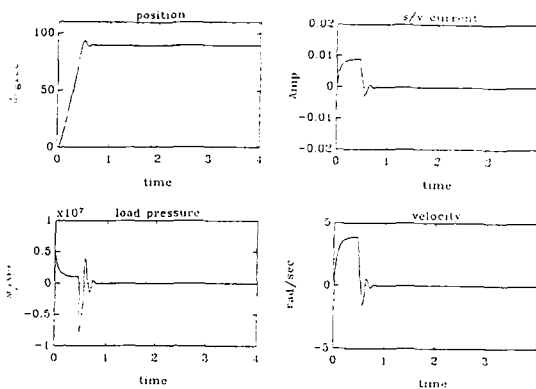


그림16. 4축 구동 시뮬레이션
(0° → 90°, 부하, $K_v = 2.5$)

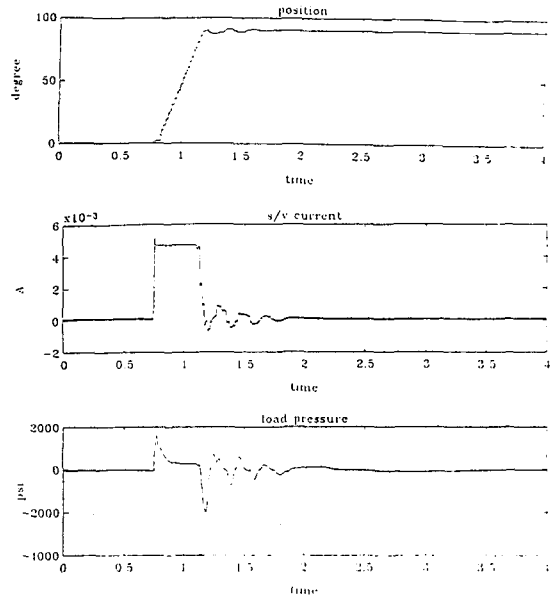


그림17. 4축 구동실험
(0° → 90°, 부하, $K_v = 2.5$)

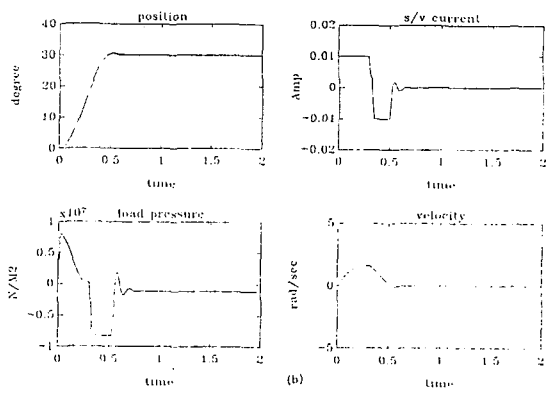
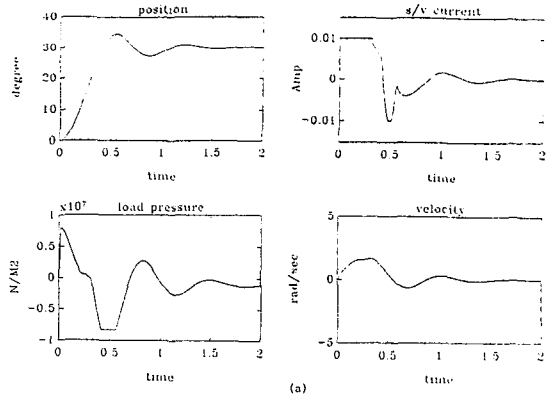


그림18. (a) 3축 PIDM 제어기 응답특성
(b) 3축 TDC 제어기 응답특성