

"로봇을 위한 DC Servo Motor 구동과 위치 제어에 관한 연구"

김 성준, 김 형래  
 건국대학교 공과대학 전자공학과

(A Study on the Control of DC Servo Motors  
 and the Position for Robot)

Seong Jun Kim, Hyung Lae Kim  
 Dept. of Electronic Engineering,  
 Kon Kuk University

ABSTRACT

Recently, the robot has been used in industries and laboratories for the automation and the coarse and hazardous environments.

In this paper, it was studied the robot using DC servo motors. In that maner, Gold Star educational robot "Top-1" which was driven by 6-step motors was rebuilt to the robot "Kon Kuk-I" using 6-servo motors. Because the characteristics of step motors were not fit well the differential change. For the precise robot control, it was designed the controller which was adopted the velocity mode control and the position mode control. It was studied also the supporting software for the robot motion.

As the results of this experiments, it was found that the robot "Kon Kuk-I" moved smoothly and accurately.

1. 서 론

최근 로봇의 이용분야가 산업계에 확대되고 고정밀도의 작업 수행이 요구됨에 따라 로봇팔의 제어에 대한 다각적인 연구가 활발히 진행되고 있다.

본 논문에서는 Step Motor로 구동되는 금성사의 Top-1로봇의 단점을 해결하기 위하여 DC Servo Motor 6대로 개조, 구동시키는 것을 목적으로 연구하였다.

본 논문에서 사용한 DC Servo Motor는 속도제어에 적합한 금일산업의 KG-D20 Motor와 일본 Sanyo제품의 DC tachometer를 축이음하여 사용하였으며 Servo Motor를 구동시키기 위한 Controller를 설계, 제작하였다. 설계된 Controller는 신속한 제어를 위하여 Analog방식을 채택하였고 로봇의관절에 대한 제어를 위하여 속도 및 위치제어를 시켜 정밀한 미소 동작에 대한 제어를 시도하였다.

2. 본 론

2-1. DC Servo Motor의 특성고찰

2-1.1 DC Servo Motor의 파라미터

본 논문에서 사용된 Motor의 각종 파라미터를 실험적으로 구하여 보자.

1) 회전자 관성: 진자의 비틀림 특성을 이용하여 기계적 성질이 진동주기의 제곱에 비례하는 것을 이용한 것이다. 회전자의 관성  $J_2$ 은

$$J_2 = J_1 (t_2 / t_1)^2 = 1.642 \times 10^{-6} \text{ Kg} \cdot \text{m}^2$$

2) 저항성분: 모터가 가열되지 않은 상태에서 ohm의 법칙을 이용한다. 저항성분  $R$ 은

$$R = U / I_a = 7.3 \Omega$$

3) Mechanical Time Constant: 모터에 전압을 인가함과 동시에 타코메터 출력을 A/D 변환기를 이용하여 컴퓨터로 측정할때 최종치의 63.2%되는 값의 시간으로서  $\tau_m$ 은 54msec가 된다.

4) Electrical Time Constant: 회전 속을 고정시키고 단자에 직렬로  $1\Omega$ 의 저항을 연결시킨후 모터에 전압을 가함과 동시에 저항에 걸리는 전압을 측정하여 최종값의 63.2%가 되는 시간이 electrical time constant로서  $\tau_e$ 는 1.4msec가 된다

5) 인덕턴스:  $\tau_e = L_a / R$ 의 관계식에서 인덕턴스  $L_a$ 는

$$L_a = 10.2 \text{ mH}$$

6) 댐핑성분: 댐핑성분은  $D = J_m / \tau_m$ 식으로 부터 얻는다.<sup>(2)</sup>

$$D = 3.04 \times 10^{-5} \text{ Kg} \cdot \text{m}^2 / \text{sec}$$

7) 타코메터의 전압상수: 타코메터의 속도와 이것의 출력 전압  $E_g$ 와의 관계식은  $E_g = K_e \cdot \omega$ 로 표시된다. 여기서  $K_e$ 는 타코메터의 전압상수이다. 모터에 가하는 전압  $U_1$ 과  $E_g$ 와의 평균기울기 ( $E_g / U_1$ ) = 0.002가 된다.

모터의 입력전압  $U_1$  과 회전자의 각속도  $W$ 의 비 ( $U_1 / W$ ) =  $0.023V / (rad \cdot s^{-1})$ 이 되므로 전압상수  $K_E$  는

$$\begin{aligned} K_E &= E_g / W \\ &= U_1 / W * E_g / U_1 \\ &= 1.886 * 10^{-3} V / (rad \cdot s^{-1}) \end{aligned}$$

### 2-1.2 DC Motor의 전달함수

모터의 특성은 저항성분  $R$ 과 직렬로 연결된 인덕턴스  $L_a$  그리고 내부적으로 발생하는 전압  $E_g$ 로써 나타낼수 있다. 이 관계식을 Laplace Transformation이 적용된 형태로 표시하면

$$\begin{aligned} U(S) &= (S L_a + R) \cdot I_a(S) + K_e \cdot W(S) \\ T_g(s) &= K_t \cdot I_a(S) \\ T_g(s) &= (J_m + J_L) \cdot S W(S) + D \cdot W(S) \end{aligned}$$

여기서  $U(S)$ 는 인가전압,  $K_e$ 는 모터의 전압상수,  $W(S)$ 는 회전속도,  $T_g(S)$ 는 토크,  $K_t$ 는 토크상수,  $J_m$ 은 회전자의 관성,  $J_L$ 은 부하의 관성,  $S$ 는 복소수변수,  $D$ 는 댐핑성분이다.

윗식으로부터 모터의 전달함수를 구하면

$$\begin{aligned} G_m(S) &= W(S) / U(S) \\ &= K_t / ((S L_a + R) \cdot (S J + D) + K_e K_t) \end{aligned}$$

지금 모터의 인덕턴스  $L_a$ 가 매우 작고 댐핑이 없다고 가정하면 모터의 전달함수는 다음과 같이 된다.<sup>(2)</sup>

$$\begin{aligned} G_m(S) &= 1 / (K_e (S \tau_m + 1) (S \tau_e + 1)) \end{aligned}$$

여기서  $\tau_m = R J / (K_e K_t)$ ,  $\tau_e = L_a / R$ 이다.

위에서 구한값들을 식(1)에 대입하면 모터의 전달함수는 다음과 같이 된다.

$$G_m(S) = 1 / (K_e (0.054S + 1) (0.001S + 1))$$

정상상태의 전달함수는 복소수변수  $S$ 를 0으로 놓음으로써 구할 수 있다. 따라서 정상상태의 전달함수  $G'_m(S)$ 는

$$G'_m(S) = 1 / K_e$$

가 된다.

다음은 로봇드관절의 영향을 고려한 DC Servo Motor의 전달함수를 생각해보자.

로봇의 관절이 모터와 기어로 연결된 상태에서 로봇드팔의 관성을  $J_L$ , 모터회전자의 관성을  $J_m$ 이라고 하면 그림 1과 같이 나타낼 수 있다.

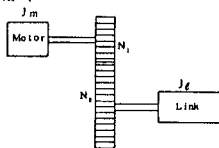


그림 4. 로봇드 관절이 모터와 기어로 연결된 상태

윗그림에서  $J_L$ 이  $J_m$ 에 미치는 영향을 고려한  $J_{ie}$ 는

$$\begin{aligned} J_{ie} &= J_m + (1/n) \cdot J_L \\ \text{단 기어비 } n &= N_2 / N_1 \text{이다.} \end{aligned}$$

따라서 모터와 관절이 기어로 연결된 상태의 mechanical time constant  $\tau'_m$ 가 주어지면

$$\begin{aligned} \tau'_m &= (R J_{ie}) / (K_e K_t) \\ &= R (J_m + (1/n) J_L) / (K_e K_t) \end{aligned} \quad (2)$$

표 1에 각 관절의 측정된 최대  $\tau'_m$ 과 기어비  $n$ 을 표시하였다.

표 1. 각 관절의 최대  $\tau'_m$ 와 기어비  $n$

관절	1	2	3	4	5	단위
$\tau'_m$	67.5	58.5	57.0	69.0	69.4	m sec
$n$	150	300	300	600	600	

표 1의 값을 식(2)에 대입하여 구한 최대  $J_e$ 와  $J_L$ 을 표 2에 나타내었다.

표 2. 각 관절에 대한 최대  $J_e$ 와  $J_L$

관절	1	2	3	4	5	단위
$J_{e \dots}$	2.052	1.778	1.733	2.100	2.109	$\times 10^{-4} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$
$J_L \dots$	9.225	12.24	8.190	165	168	$\times 10^{-2} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$

Kon Kuk-I 로봇드관절의 전달함수는 표 1을 이용하여 구하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} G_{m1}(S) &= 43.478 / ((0.068S + 1) (0.001S + 1)) \\ G_{m2}(S) &= 43.478 / ((0.059S + 1) (0.001S + 1)) \\ G_{m3}(S) &= 43.478 / ((0.057S + 1) (0.001S + 1)) \\ G_{m4}(S) &= G_{m5}(S) \\ &= 43.478 / ((0.069S + 1) (0.001S + 1)) \end{aligned}$$

### 2-2. DC Servo Motor Controller의 설계

#### 2-2.1 속도 재어기의 설계

모터회전자의 최대전류  $I_{pk}$ 는

$$\begin{aligned} I_{pk} &= V_{max} / R \\ &= 1.664A \end{aligned}$$

앞식에서  $T_g = T_a + T_f$ 가 되므로 전류에 대해 정리하면

$$\begin{aligned} I &= T_g / K_t = (T_a + T_f) / K_t \\ \text{단, } T_a &= \text{가속토크, } T_f = \text{댐핑손실이다.} \end{aligned}$$

만일  $T_f = 0$ 이면  $I_{pk} = T_{a \max} / K_t$  이고 이경우  $T_a$ 의 최대값  $T_{a \max} = J \cdot a_{\max}$ 가 된다. 여기서  $J$ 는  $J_m$ 과  $J_L$ 과의 합,  $a_{\max}$ 는 모터의 최대가속도이다.

$I_{pk}$ 와  $T_{a \max}$ 에 관한 식에서 최대가속도  $a_{\max}$ 는  $a_{\max} = (I_{pk} K_t) / J$ 가 되는데 전체관성  $J$ 는 실제관성  $J_e$ 로 볼 수 있으므로

$$a_{\max} = (1.644 * 9.651 * 10^{-3}) / J_e \quad (3)$$

표 2의  $J_{e \max}$ 값을 식(3)에 대입하면 모터의 최대허용가속도  $a'_{\max}$ 가 산출되며 이를 표 3에 나타내었다.

표 3. 각관절의 모터의 최대허용 가속도

관절의 순서	1	2	3	4	5	단위
$a'_{\max}$	7.732'	8.924	9.155	7.555	7.523	$\times 10^3 \text{ rad/sec}^2$

각 관절의 최대가속도는  $\alpha'_{max} \times (1/n_j)$  이 된다.

이러한 결과들은 Computer에 입력되어 Velocity Profile을 만들때 사용되며 설계된 속도제어기는 1)속도 비교회로(A), 2)PID제어회로(B), 3)선류제어회로(C), 4)절대치회로(D), 5)계이트펄스 발생회로(E,F), 6)방향선택회로(G), 7)Dual Converter회로(H), 8)여자기회로(I), 9)과전류감출회로(J), 10)과전류보조회로(K)로 구성되어있으며 이에대한 회로도는 부록에서 보여준다. 논문말미에 첨부된 부록에는 위치제어를 위한 위치비교회로(L)도 함께 보여준다.

### 2-2.2 위치제어의 설계

부록에서 스위치를 위치제어기로 전환하면 로봇드관절의 위치정보가 관절에 부착된 Potentiometer에 의해 위치비교회로에 재판된다. 그런데 그림 2에서 관찰하여보면 로봇드팔의 실제 위치와 Potentiometer에 의한 위치정보가 다른 것을 알 수 있다. 즉 로봇드팔이 1번위치에서 2번위치로 움직이는 경우 L2팔의 절대위치는 2번위치에서 측정하는 관절의 각  $\theta$ 는 변하지 않으나  $\alpha$  만큼의 각도로 움직인 결과로 Potentiometer에 출력된다.

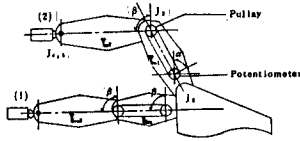


그림 2 로봇드팔과 Potentiometer와의 관계

이 오차는 L1팔이 움직이므로써 발생되며 보상하여야 한다.

### 2-3. 지원 Software의 개발

직각좌표계에서 End Effector의 위치 P가 주어지면 Inverse Kinematics로써 각 관절의 위치를 알 수 있다. 그림 3에 End Effector의 Velocity Profile 형태를 표시했다.

동속구간속도  $W_r$ 이 주어지면 이 구간을 움직이는 시간은

$$t_c = P / W_r$$

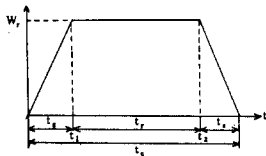


그림 3 Velocity Profile

각 관절의 위치할 곳을 알고있고 따라서 각 관절의 동속구간에서의 속도는

$$W_{rj} = \theta_{dj} / t_c$$

여기서 첨자 j는 각관절의 번호이다.

가속 및 감속을 최대로 할 경우 가속구간  $t_a$ 를 앞에서 구한 각 관절의 최대가속도를 기초로 하여 구할 수 있다.

어떠한 속도명령이 전압으로 속도제어기에 입력되면 이를 나타내는 블록선도는 그림 4와 같다.

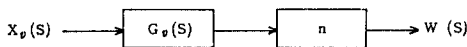


그림 4 속도명령이 인가되는 속도제어기의 블록선도

여기서  $Xv(S)$ 는 가하는 전압,  $Gv(S)$ 는 제어기

의 전달함수, n은 기어비이다.

따라서 속도에 대한 입력전압은 아래와 같다.

$$Xv(S) = W(S) / Gv(S) \cdot n \text{ ----- (4)}$$

또한 각 구간에서의 관절위치  $P_k$ 는

$$P_k = P * k / N \text{ ----- (5)}$$

여기서 N은 구간갯수

가 된다.

$P_k$ 에 대한 위치제어기의 입력전압은 그림 5에서

$$Xp(S) = \theta(S) / Gp(S) \text{ ----- (6)}$$

식(4), (5), (6)은 각 관절에 공통된 식이다.

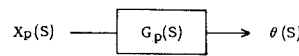


그림 5 위치명령이 인가되는 위치제어기의 블록선도

실제로 program에서는 End Effector의 위치와 동속구간의 속도를 입력으로 받고있다. 다음그림 6은 명령흐름도를 보였다.

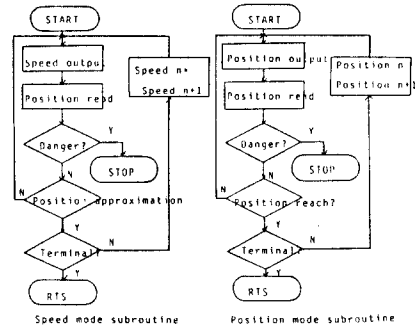


그림 6 속도제어 및 위치제어의 기계어 실행 프로그램

### 3. 실험 및 고찰

본 실험장치에 대한 물럭선도는 그림 7에서 보여준다.

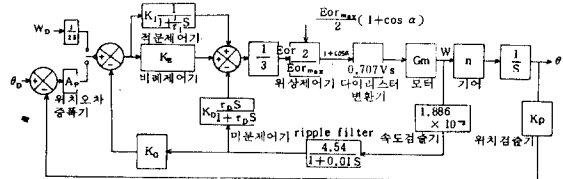


그림 7 속도 및 위치제어기의 물럭선도

DC Tachometer를 사용하므로써 모터의 속도정보와 회전방향을 동시에 얻을수 있었고 제어회로를 Analog회로로 구성하여 신속한 제어를 할 수 있었다.

그러나 Analog제어회로에서 OP Amp.의 offset 전압이 발생하였다. 이를 개선시키기 위하여 각 OP Amp.의 offset 전압을 조정하여 이 영향을 최소화 시켰다.

위상제어기의 위상기준신호를 삼각파에서 cosine함수로 바꾸어 저속에서 훨씬 안정된 속도응답을 얻을 수 있었다.

비교기에서 발생하는 점화펄스는 step pulse형태로 트

변스에 인가하는데 이때에 위상각이 0으로 접근할때에 포화현상이 발생하므로 이를 impulse 형태로 인가하여 해결하였다. 그림 8은 3관절에서의 속도응답을 보여준다.

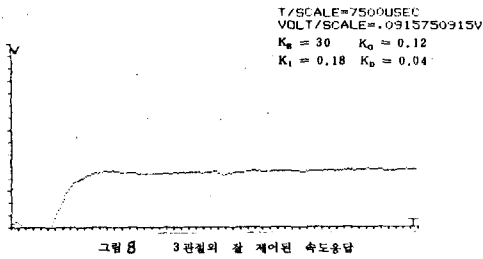


그림 8 3관절의 각 제어된 속도응답

#### 4. 결 론

본 논문에서는 미분변환에 대한 정확한 로봇제어를 위하여 Step Motor로 구성되어 있는 금상사의 고속용 로봇인 "Top-1"을 Servo Motor로 개조하였으며 로봇관절을 구동시켜주는 모터의 속도에 관한 정보를 Tacometer에서 얻고 위치관련 정보는 Potentiometer에서 얻어 이에 대한 Controller를 설계, 제작하여 실험하였고 강연제어방식을 택하였다. 뿐만아니라 속도로 제작한 Servo Motor의 각종 파라미터를 실험을 통하여 얻었다. 제작한 제어기는 속도 및 위치제어로 구성되어 일의 종류에 따라 software를 사용하여 선택적으로 제어모드를 바꾸어 효율적인 작업수행을 할 수 있도록 하여 속도모드 작업수행도중 발생하는 위치오차를 발견하여 즉시 위치수정을 가함으로써 보다 정확한 동작을 할 수 있도록 하였으며 다관절을 동시에 제어 할 수 있도록 연구하였다. 또한 Controller는

#### 부 록 : 속도 및 위치제어의 회로도

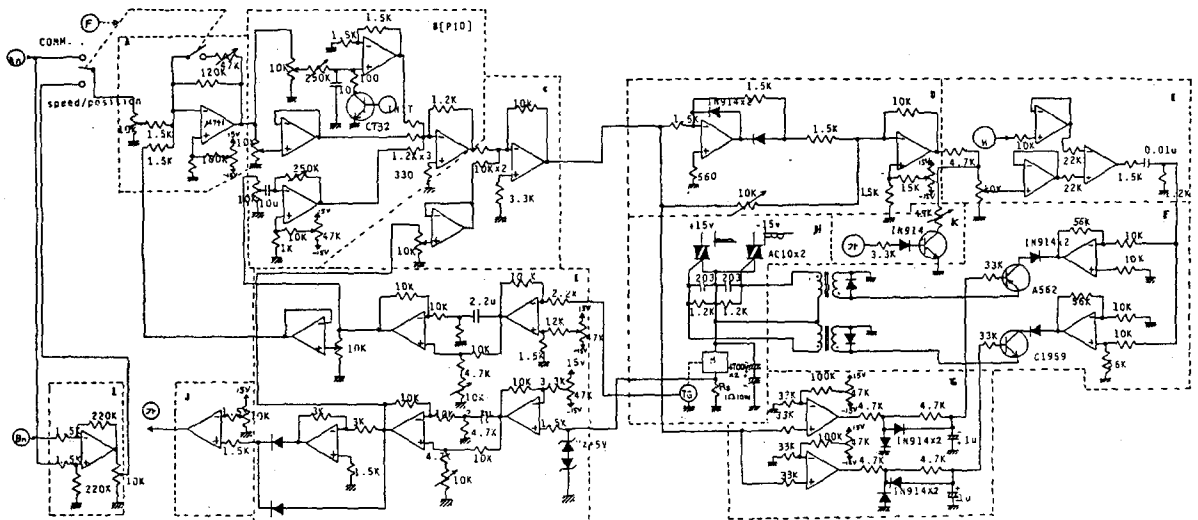


그림 속도 및 위치제어회로(A, L), PID제어회로(B), 전류 제어회로(C), 절대치 회로(D), 게이트펄스 발생회로(E, F), 방향신력회로(G), Dual Converter(H), 역파기(I), 과전류검출회로(J), 과전류 보호회로(K)

로봇제어컴퓨터와 분리하여 컴퓨터의 계산부담을 줄이고 로봇드라이버를 보다 효율적으로 하였다. 그리고 실제로 기대한 만큼 동작이 잘되었다.

앞으로 개조한 로봇 "Kon Kuk-I"을 이용하여 sensor를 이용한 오차수정 작업수행이 기대되고 이에대한 software의 개발이 요망된다.

#### 참 고 문 헌

1. J. E. Poulin. "Practical Considerations in DC Motor and Amplifier Selection." IEEE Trans. on Industry Applications, Vol. IA-20, No. 5, September/October 1984.
2. B. C. Kuo and J. Tai. "DC Motors and Control Systems." SRL Publishing Co., 1978.
3. C. S. George Lee. "Robot Arm Kinematics, Dynamics, and Control" Computer, December 1982, pp. 62-88.
4. R. P. Paul. "Kinematic Control Equation for Simple Manipulators." IEEE Trans. on Systems, Man and Cybernetics, Vol. SMC-11, No. 6, June 1981, pp. 449-455.
5. 이재삼, 김형래. "로봇 팔의 Kinematic Control.", 대한전자공학회, 합동학술포럼논문집, Vol. 8, No. 3, 1984년 10월, pp. 44-47.