

평행링크 메카니즘이 있는 관절형 로봇 회전축의 위치제어

여인택, 이연정  
한국기계연구소

Position Control of Robot's Rotational Axis  
having Parallel Link Mechanism

YEA IN-TEAK, LEE YUN-JUNG

KOREA INSTITUTE OF MACHINERY AND METALS

ABSTRACT

In the course of robot control system building, there are problems in the position control loop of 3rd axis of robot manipulator. the problems are summarized as two: one is uncontrollability of position and the other is oscillation. And these problems are analyzed through experiment, and it is known that the cause of problems is torsional vibration of 3rd axis. So that these two problems are solved by noise immunity enhancement and lowering of PI controller gain.

대한 Regulation 기능을 잃어버려 위치에 대한 명령이 zero 임에도 불구하고 계속 한방향으로 조금씩 움직이는 현상이다. 두번째는 첫번째 문제 해결 후에 나타난 현상으로 지령한 위치를 중심으로 계속 진동하는 현상이다. 이러한 현상을 없애기 위해 실험을 통해 원인을 파악 하는 데에 있어서, 다른 축의 위치제어계에서는 이런 현상이 일어나지 않았으므로 제3축의 기구적인 특성이 제어계에 영향을 줄 수 있다는 것을 염두에 두고, 이를 구체적으로 분석하기 위한 실험을 하였다. 실험을 통한 분석에 따라 대응책을 마련하여 제3축의 위치 발산 및 진동현상을 제거할 수 있었다.

1. 서론

본 연구에서 제어 대상으로 하는 ROBOT 는 6축 관절형으로 각축마다 독립적으로 위치제어를 실현하므로써 End Effector의 위치 및 자세를 제어하여 PTP 및 CP 운동을 수행하게 된다. 그러므로 각축마다 Motor 및 Motor Driver의 용량이 다른것을 제외하고는 6축 모두 위치제어계가 아래 그림[1]과 같이 구성되어 있다 [1].

2. 제3축 위치제어기의 특성파악 실험

제3축이 다른축과 다른점은 그림[2]에 나타난 바와 같이 구동Motor와 Load사이가 평행 Link로 연결되어 있고, 한방향으로 중력의 영향을 받기 쉽게 되어 있다.

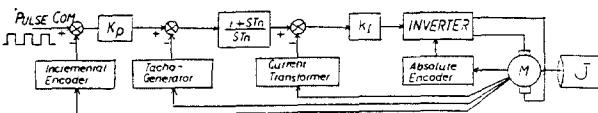


그림 1. 로봇 위치제어계 구성도

그런데 Motor와 load 간의 연결을 평행 Link Mechanism으로 한 제3축의 위치제어계가 제대로 동작하지 못하는 현상이 발견되었다. 제3축에서의 첫번째 문제는 위치제어계 내에 있는 위치제어기가 위치에

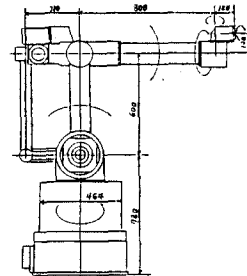


그림 2. Robot Configuration

그래서 여러실험을 쉽게 하기 위해 그림[3]과 같이 Motor를 Body에서 분리하여 Motor의 Rotor에서 본 Effective Inertia를 원형으로 만들어 붙이고 중력의

영향을 한방향으로 만 받게 Unbalanced Load(UL) 을 달아 아래의 4가지 실험을 통해 기구적인 특성이 전기적인 제어기에 미치는 영향을 알 수 있었다.

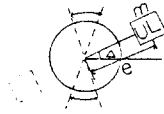


그림 3. Equivalent Unbalanced Load 실험

실험 1) 그림[1]에서  $K_p$ 로 표시된 제3축의 위치제어기에 문제가 있을 수 있으므로, 다른 축에 있던 위치제어기와 바꿔서 위치제어의 여부를 확인해 본 결과, 역시 위치 제어를 수행하지 못한다.

실험 2) 중력의 영향은 제3축을 중심으로 사람의 힘으로 움직여도 쉽게 감지할 수 있다. 특히 Robot Body에 Motor의 Rotor가 삽입되는 Coupling 부분을 힘으로, End Effector가 올라가는 방향으로 돌리면 곧 다시 2/3 정도 복귀한다.

실험 3) Microcomputer(INTEL MDS)의 Emulator로 동작시킬 때는 Main Controller의 CPU를 Halt 시키면 위치 발산은 하지않고 제자리에서 진동하는 현상만 나타난다.

실험 4) Unbalanced Load Test

a) 원형의 Load를 Rotor에 붙여서는 위치의 발산도 진동도 일어나지 않았다.

b) Unbalanced Load를 단 결과, 실선의 바깥부분에 위치해 있을 때는 위치진동을 계속하면서 발산하였고 실선부분에 있을 때는 발산과 진동을 멈추었다.

c) 실선으로 표시된 UL과 같은 UL을 점선과 같이 더 달았을 경우에는 위치제어기가 a)와 같았다.

### 3. 실험 결과에 대한 분석

4가지의 실험 결과 제3축은 다른축에 비해 기구적인 구성이 Torsional Vibration을 일으킬 가능성이 많다고 판단 되었다. 이에 따라 위치발산의 원인은 Torsional Vibration 에 위치제어계가 대응할때 power transistor가 급히 Switching 해야 하므로 여기에서 나온 Electromagnetic Field의 Noise가 제3축의 위치제어기에 영향을 주었기 때문으로 분석되었다. 다음에 위치 진동의 원인은 순수하게 Torsional Vibration 에 기인하였다. 이를 좀더 구체적으로

기구적인 Torsional Vibration을 포함한 위치제어계의 해석과 이 Torsional Vibration 이 전기적인 Noise를 발생시켜 위치제어기가 오동작 하도록 만드는 2가지면으로 보면 다음과 같다.

#### 3-1. 위치 제어계의 진동에 대한 분석

제3축에서 Torsional Vibration이 일어날 가능성이 오히려 Effective Inertia가 더큰 제2축보다 많은 이유는 제3축이 그림[2]에서 볼수 있는 바와 같이 평형 Link로 연결되어 있으므로 결과적으로 지렛대의 중심축에 Motor를 달고 Load를 이 중심축으로부터 310mm 떨어진 곳에 붙이는 꼴이 되어 Moment of Inertia가 평형 Link의 길이에 비례하는 만큼 더 커지게 되는 효과를 가져오기 때문으로 간주된다. 이를 좀 더 구체적으로 살펴보기 위하여 제3축의 기구적인 구조를 간단히 표시하면 그림[4]의 (a)와 같다 [2].



(a) 3rd axis drive power

(b) Two-body model

train

for Load-Motor System

그림.4 3rd axis mechanical structure

그림[4]에서

Motor Inertia  $J_m : 0.0177 \text{ Kgf Cm Sec}^2$

Load Inertia  $J_e : 215 \text{ Kgf Cm Sec}^2$

Reducer Inertia  $J_r : 0.0265 \text{ Kgf Cm Sec}^2$

감 속 비  $N : 100$

Rotational Stiffness  $K_t : 10 \times 577.1 \times 10^4 \text{ Kgf Cm/rad}$

이다. (감속기의 Stiffness 만을 고려)

이때 Motor를 Sanyo Brushless DC Servo Motor인 BL

827 065 MXT 로 선정하여 Motor의 변수가

권선 저항  $R : 3 \text{ V/A}$

Inductance  $L : 18 \text{ mH}$

Torque 상수  $K_t : 10.5 \text{ Kg Cm/A}$

Voltage 상수  $K_e : 110 \text{ V/K rpm}$  이다.

그림[4]의 (b)에서 Torsional Vibration을 고려하여 Motor를 포함한 Mechanical System을 Modelling 하면

$$(SL + R) \cdot I(S) + K_e \cdot S \cdot \Theta_m(S) = V(S) \text{ -----(1)}$$

$$Kt \cdot I(S) = S \cdot \{ (S J_m + D) \theta_m(S) + S J_l(S) \theta_l(S) \} \quad \text{---(2)}$$

$$S^2 J_l \theta_l(S) = K_l (\theta_m(S) - \theta_l(S)) + D_l S (\theta_m(S) - \theta_l(S)) \quad \text{---(3)}$$

$\theta_m - \theta_l$  : Torsional Angle

$I(S), V(S)$  : Armature Current and Voltage

$D_l, D$  : Damping Factor of Load and Motor

위의 (1) - (3) 식으로 부터 속도에 대한 전달함수인

$S \theta_m(S) / V(S)$  를  $G(S)$  라 하고 구하면,

$$G(S) = Kt (S^2 J_l + S D_l + K_l) / \Delta \quad \text{---(4)}$$

$$\text{where } \Delta = (S L + R) (S J_m + D) (S^2 J_l + S D_l + K_l) + (S L + R)$$

$$(S D_l + K_l) S J_l + K_t K_e (S^2 J_l + S D_l + K_l) \quad \text{---(5)}$$

이므로  $G(S)$ 의 Pole 을 근사적으로 구하면,

Low Frequency 에서  $S L + R = R, S D_l + K_l = K_l,$

$$S^2 J_l + S D_l + K_l = K_l$$

으로 놓고  $D$ 가 작으면 첫번째 Pole  $P_1$  은

$$P_1 = K_t K_e / R J \quad ; \quad J = J_m + J_r + J_l / N$$

$$= -53 \text{ rad/sec} \quad = 0.0657 \text{ KgCm/rad}$$

다음에  $|S| \gg J / J_m$  이므로  $|P_1| = K_e K_t / R J_m$  이라하면

$|S| \gg R D / R J_m$  이므로

$$= S (S L + R) (J_m R_l + J_l (S D_l + K_l)) \text{ 이 되어}$$

$P_2 = -R / L = -166$  이 되고, 나머지 Pole 은

$$S^2 J_m J_l + S J_m D_l + J_m K_l + S J_l D_l + J_l K_l = 0 \text{ 의 근이다.}$$

그러므로  $J_e = J_m + (J_l / N) + J_r$  로 놓고  $D_l$  을 무시하면,

$$P_{3,4} = \pm j K_l / J_e = \pm j (551.7 / 0.007) = \pm j 281$$

또한 (4) 식으로 부터 Zero는  $S D_l$  Term 을 무시하면,

$$J_l^{-1} = J_e^{-1} + J_r^{-1} \text{ 이므로 } J_l = 0.0118 \text{ 이고,}$$

$$Z_{1,2} = \pm j K_l / J_e = \pm j (551.7 / 0.0118) = \pm j 216$$

이상과 같이 제3축의 기구계에 Load와 Motor 사이의

Shaft Coupling에 Torsional Vibration 이 존재하게

될경우에 대해 속도 전달함수  $G(S)$  를 구했다[3].

이 속도 전달함수를 Pole 과 Zero로 나타내면,

$$K \cdot K_T (S + Z_1) (S + Z_2)$$

$$G(S) = \frac{K \cdot K_T (S + Z_1) (S + Z_2)}{(S + P_1) (S + P_2) (S + P_3) (S + P_4)} \quad \text{---(6)}$$

$K$  : System Gain

가 된다.

그런데 (6) 식으로 표현된 Motor 및 기구계의 속도

전달함수는  $K_T$

$$G_l(S) = \frac{K_T}{(S + P_1) (S + P_2)} \quad \text{---(7)}$$

$$(S + P_1) (S + P_2)$$

로 표현되는 것은 널리 알려진 사실로 이경우의 속도 전달함수 는 기구계를 포함한 계의 기계적 시정수 및 Motor의 전기적 시정수만으로 표현된다. 그러므로 기구계에 Torsional Torque 가 존재하게 되어 일어나는 Torsional Vibration을 고려하게 되어 각각 2개씩의 Pole과 Zero가 생기게 된다. 그래서 Motor & Mechanical System의 전달함수를  $G(S)$ 라 하고 PI 제어 방식을 사용하는 속도 제어기로 표현되는 Regulator로 위치제어계 내에 있는 속도 제어계를 그림[5]와 같이 나타낼 수 있다.

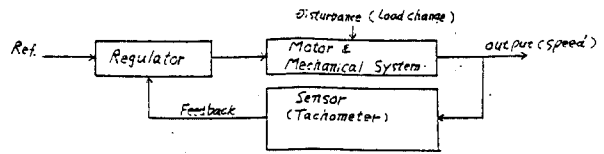


그림.5 Basic element of speed control system

위의 그림[5]에서 Regulator를  $AR \cdot (1 + ST_n) / ST_n$  으로 하고, Unity Feedback Gain을 생각하면 속도제어계의 Loop Gain ( $GH$ ) 는

$$GH = K \frac{AR KT (1 + ST_n) (S + Z_1) (S + Z_2)}{ST_n (S + P_1) (S + P_2) (S + P_3) (S + P_4)} \quad \text{--- (8)}$$

가 되므로 Torsional vibration 에 의해서 나타난 Term

$G_2(S)$  와 없을 때의 Term을 분리하고,  $G(S)$ 에 대한 Lograithm을 취하면,

$$GH = AR KT \frac{1 + ST_n}{ST_n} \frac{G_1(S) G_2(S)}{1 + ST_n} \quad \text{--- (9)}$$

$$20 \log GH = 20 [\log AR KT \frac{G_1(S) + \log G_2(S)}{ST_n}] \quad \text{--- (10)}$$

로 이의  $|GH|$ 에 대한 Bode선도는 그림[6]과 같다 [4].

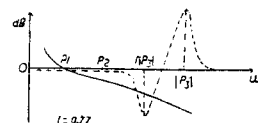


그림.6  $|GH|$ 에 대한 Bode Polt

그림.6의 (c)에서 볼수 있는 바와 같이  $w = 1/P_{31}$ 에서 Loop Gain 이 1 보다 커지므로 System이 불안정해져 결과적으로 위치가 진동하는 현상으로 나타나게 됨을 알 수 있다.

이상과 같은 Torsional Vibration은 계속해서 Shaft에 Torsional Torque가 걸리게 되면 일어나게 되는데 제3축에서는 실험 2)의 복귀 한다는 사실로 미루어 짐작할 수 있으며 실지로 전기적인 Regulator 를 부착하여 실제와 마찬가지로의 상황으로 생각할 수 있는 실험 4)의 경우 a)의 원형 Load 와 b)의 Unbalanced Load가 실선 부분에 있을 때는,  $TK = mge \cos\Delta$ 이므로, TK 가 작아 Torsion을 일으키지 않으므로 계가 안정되지만 실선 바깥 부분에 있을 때는 Torsion이 일어 나므로 그림[6]에서 볼 수 있는 바와 같이 불안정하게 된다.

### 3-2. 위치 제어계의-발산에 대한 분석

위치의 발산도 진동의 경우와 마찬가지로 제3축의 기구적인 특성에 기인한다고 밖에 생각할 수 없다. 왜냐하면 실험 4)에서 a)의 원형 Load를 달았을 경우는 진동 뿐만 아니라 발산도 언제나 멈추고 제 위치에 정지를 하였고, Unbalanced Load를 달았을 경우도 역시, UL 이 실선 부분에 있을 때에는, 정지하기 때문이다. 그러면 어떻게 전기적인 회로로 구성되어 있는 위치제어기의 오동작을 기구적인 특성과 연관지어 생각할 수 있을까 하는 의문이 제기된다.

그런데 다행히 실험 3)에서 알 수 있는 것이 있다. 즉, Main Controller 의 CPU (8086)을 Halt 시킨다는 것은 이 CPU 와 Power를 같이 쓰고 있는 위치제어기의 Ground 가 안정된다는 것을 의미하며, 이 때에 발산을 멈춘다는 것은 분명히 제3축의 위치제어기의 Ground 가 다른 축에 비해서 더 크게 Floating 된다는 것을 의미한다고 생각 할 수 있으며 이를 좀더 자세히 살펴보기 위해서는 본 연구에서 사용하고 있는 Brushless DC Servo Motor 및 Driver의 동작 원리 및 외형에 대해서 알아 볼 필요가 있다.

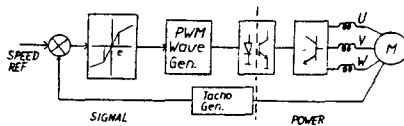


그림.7 속도 제어 LOOP

BL DC Servo Motor 는 동작원리가 Synchronous AC Motor 와 같기 때문에 속도 제어를 위해서는

강자성체인 Rotor 의 위치를 감지하여 그에 대응한 U,V,W 3상의 위상을 PWM 방식으로 만들어 Armature Coil 에 공급해 주어야 한다. 이 때 Driver 의 성능을 좋게 하기 위해서는 가능하면 PWM WAVE 를 만들 때 Carrier Frequency를 3KHz 로 하며, 그림[7]에 나타난 바와 같이 속도 오차가  $|e|$  이하일 때에는 상당히 큰 Gain 을 가지도록 한다. 그러므로 기구계에 Torsional Vibration을 일으키게 되면 이는 위치오차로 나타나고, Regulator 는 기계적 시정수에 해당하는 속도로 이를 보정하려고 한다. 이 때 이러한 움직임은 Motor 의 U,V,W 상의 권선에 전류를 흘리게 되며, 이 전류는 Motor 의 전기적 시정수( $\tau_e$ )에 상응하는 속도로 변화하게 되는데, 특히 회전 방향을 바꿀 때는 권선전류의 상 배치가 새로이 일어나므로 상당히 큰 전류의 변화가 일어난다. 이 큰 전류의 변화가 Power Tr. 에서 일어나면, Electric Field 가 발생을 한다. 이 때 이 전자파 Noise 는 Power Tr. 과 방열판 사이의 기생 Capacitance, 방열판과 Motor Driver 를 지지하는 몸체사이의 기생 Capacitance, 몸체와 Control Signal 처리부의 넓은 Ground 선 사이의 기생 Capacitance 의 순으로 전달된다. 그런데 Control Signal 처리부의 Ground 가 위치제어기의 Ground 와 연결되어 있으므로 제 3축의 위치제어기의 Ground 를 Floating 시키므로 제3축의 위치제어기가 제대로 동작하지 못하게 하는 역할을 하게 된다. 이를 좀 더 자세히 설명하기 위하여 본 연구에서 설계 제작한 위치제어기를 소개하면 그림 [8]과 같다. 여기서 각각의 기능은

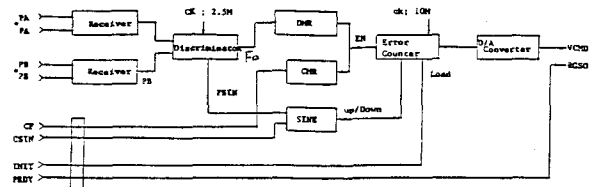


그림 8. 위치 제어기 Block Diagram

i) Receiver : Motor 의 Rotor 에 Flexible Coupling 에 의해 직결되어 있는 Incremental Encoder 로 부터 서로  $90^\circ$  위상차를 가진 PA 및 PB 신호를 받을 때 Electromagnetic-Coupling 에 의한 Common Mode Noise 를 제거하기 위한 자동회로를 가지고 있다.

ii) Discriminator : Command Pulse 와 PA 및 PB 신호로부터 만들어 내는 Feedback Pulse 를 시간적으로 각리시켜 Count 하기 위한 회로

iii) DMR,CMR : 최소제어 각도량을 조절하기 위해 Command Pulse 와 Feedback Pulse 에 각각  $X_n$  및  $X_m$  을 한다.

iv) Error Counter : 74191 4 개로 된 Asynchronous 16 bit Up/Down Counter 이다.

그런데 이들은 모두 Clock 이 10 MHz 로 매우 높기 때문에  $100 \div 2 = 50$  nSEC 안에 Timing 제어를 통해 회로가 동작되므로 20nSEC 이상의 Glitch 가 Ground Line 에 생기면 회로가 오동작을 일으키게 된다.

#### 4. 문제의 해결 방안

해결해야 하는 문제는 앞의 3절에서 분석한 바와 같이 위치제어기의 오동작으로 인한 위치발산과, Torsional Vibration 에 의한 위치진동으로 나눌 수 있지만 2가지 모두 직접적인 원인은 제3축의 기구적 인 특성에 있다. 고로 문제의 해결을 위해서는 우선 위치제어기의 오동작을 막아야 하는데 이를 위해서 위치제어기가 Noise 의 영향을 받지않도록 해야한다. 이를 위해 위치제어기의 Ground Line 을 강화하는 한편, 각 Block 의 동작에 Timing 의 여유를 늘려서 짧은 의사 Clock 에 동작을 하지 못하도록 동작 주파 수를 10M HZ에서 5M HZ로 낮춰 2배의 여유를 주어, 결과적으로 Ground Line 을 안정시키는 효과를 노려 위치의 발산현상을 막을 수 있었다.

다음에 위치진동현상을 막기위해 그림[6]에 나타난 Torsional Resonance Frequency 에서의 Peak 값을 1 이하로 해야 한다. 이 방법에는 System 전체의 Gain 을 낮추는 방법과 적절한 Cutoff Frequency 를 갖는 Sharp Low pass Filter 를 부가하는 방법이 있다. 본 연구에서는 System 전체 의 Gain 을 낮추기위해 그림[9] 와 같은 PI 제어기의 VR3 를 조절하였다.

실지로 원래  $\alpha$  가 3/5로 되어 있던 것을 5/6으로 조정하여 Gain 을 낮춰 위치진동 현상을 제거하였다. 이때  $\alpha$ 를 조정하므로써 PI 제어기의 P Gain 및 Reset Time( $T_{nd}$ )는 아래와 같이 표현된다. [5]

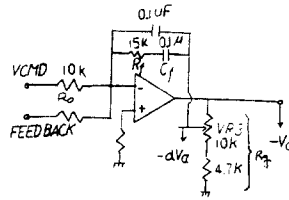


그림 9. 속도제어기로 사용한 PI 제어기

$$A\alpha = R_f/R_0 [1 + (\alpha - \alpha^2) R_g/R_f]$$

$$T_{nd} = R_f C_f [1 + (\alpha - \alpha^2) R_g/R_f]$$

#### 5. 결론

6축 관절형 Robot 의 위치제어기 구성에 있어 제 3축에 나타난 위치발산 및 진동현상을 제3축의 기구적 특성 및 Motor Driver 구조를 해석하여 Torsional Vibration과 전기적인 Noise 현상 때문이라는 것을 알았다. 그러므로 우선 위치제어기가 Noise 에 강하게 하기 위해 동작주파수를 낮춰 Noise 에 의한 짧은 의사 Clock 이 무시되도록 하여 위치제어기 오동작에 의한 위치발산을 제거하였다. 또 위치진동을 막기위해, 기구계의 특성을 포함한 위치제어계내의 전달함수를 구하여 Torsional Vibration 이 위치진동의 원인이라는 진단을 하여, 속도제어기의 PI Gain 및 Reset Time 을 조정하므로써, 위치진동현상을 제거할 수 있었다.

#### REFERENCES

1. 산업용 로봇 기술개발 (1), (11) 보고서, 1984. 5. 한국기계연구소 제어공학연구실
2. Francis S. Tse et al, Mechanical Vibrations: Theory and Application, Allyn and Bacon.
3. DC MOTORS SPEED CONTROLS SBRVO SYSTEMS, ELECTRO CRAFT CORP.
4. WOODWARD C. CARTER, "Mechanical Factors Affecting Electrical Drive Performance", IEEE Trans. VOL. IGA-5, NO.3 1969.
5. Friedrich Frohr, Introduction to Electronic Control Engineering, SIEMENS.