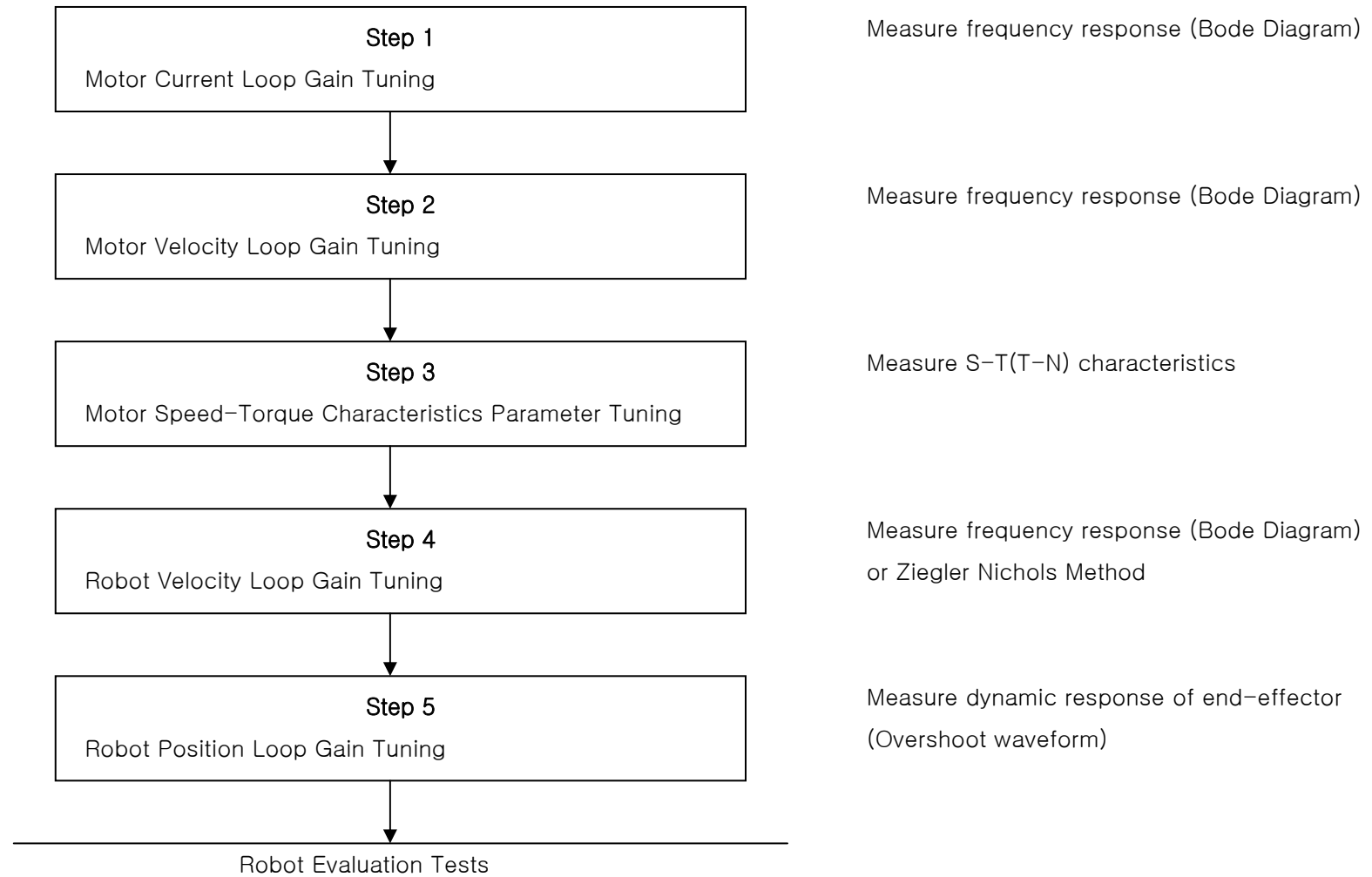


〈 신규 PPI 튜닝 방법 기술 〉

로보틱스연구실

본 튜닝방법은 서보 버전 SV5.21 이상부터 사용 가능합니다.
튜닝시 본 매뉴얼과 같이 제공된 엑셀파일을 참고하시기 바랍니다.

< Servo Gain Tuning Procedure >



Step 1~3

모터의 전류 Loop의 게인 조정

1~3까지의 스텝은 모터의 전류 Loop를 튜닝하는 과정이다.

이 과정은 이미 main 버전에 포함되어 자동으로 계산되도록 구성되어 있기 때문에 특별히 튜닝할 필요가 없다.

Step 4

속도루프의 조정

4. Velocity Loop Tuning (1)

KV 속도 이득

- 형식 : KV (16Q4)[Tbit/Eb]
- 설명 :
 - (1) 속도 루프의 비례이득이다. 속도 루프의 응답, 정상특성을 크게 지배한다. 마찰, 외란 등에 강하고 Robust한 서보계, 응답이 빠른 서보계를 구성하기 위해서는 이 이득을 높게 할 필요가 있다.
 - (2) 속도 루프를 아날로그로 구성한 일반 서보 앰프에서는, 속도 루프이득의 발진 한계는 상당히 높고, 로봇에 필요한 속도 이득을 얻는 것에 속도 루프의 안정성을 특별히 의식할 필요는 없다. 따라서 로봇의 성능을 떨어뜨리지 않기 위해서는 속도 루프의 KV를 크게 취하도록 할 필요가 있다.
 - (3) 속도 루프의 대역폭은 대략 $f = 80 \sim 150$ Hz 정도이다. 그러므로, KV를 높이면 암 선단의 움직임에 발진은 보이지 않으며, 소음이 나는 발진이 나타난다. 속도 루프가 발진하면 모터부로부터 “가~”, “고~” 와 같은 소음이 되어 들리게 된다.
- 파라미터 조정 :
 - (1) KV 조정은 위상지연 보상 파라미터 PLF와 함께 조정하면 좋다. 초기에는 PLF를 ‘0’으로 설정하고 KV는 가능한 한 크게 조정한다.
 - (2) KV 조정은 서보 아날라이저에 의해 속도 루프의 주파수응답을 계측하면서 행한다. (현재는 아날라이저를 이용하여 측정하지 않고 설계치 값 또는 소리를 듣고 수행한다. 소리를 가지고 게인을 설정하는 방법은 주파수응답 측정 또는 설계치가 없을 때 수행한다.)

4. Velocity Loop Tuning (1)

KV 속도 이득

(3) 주파수 응답특성 계측이 가능한 경우는 다음과 같이 설정한다.

A. PLF값을 '0'으로 설정하고 적당한 KV에서 주파수특성을 계측한다. 이 때 발진하고 있으면 발진이 작아질 때까지 KV를 낮춘 후에 계측한다.

B. 계측해서 얻어진 보드선도로부터 아래의 항목을 평가한다.

a. Open Loop 보드선도

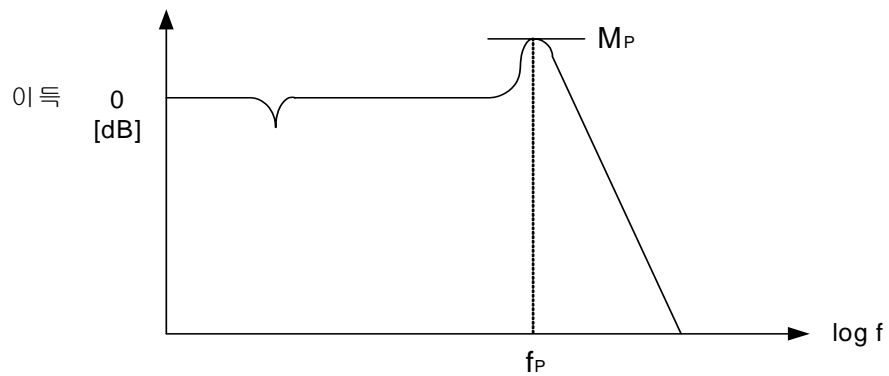


그림 1 속도루프 Open Loop 특성

- ✓ 공진 피크 : M_P ,
- ✓ 공진주파수 : f_p

4. Velocity Loop Tuning (1)

KV 속도 이득

b. Close Loop 보드선도

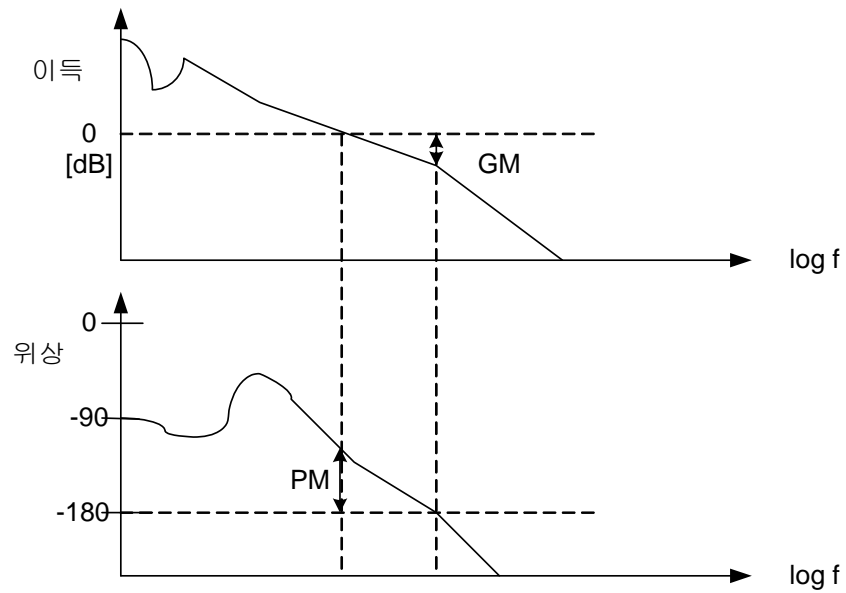


그림 2 속도루프 Close Loop 특성

- ✓ GM : 이득 여유, 위상이 180° 를 지나갈 때 0[dB]까지 어느 정도 여유가 있는가?
- ✓ PM : 위상 여유, 이득이 0[dB]을 지나갈 때 -180° 까지 어느 정도 여유가 있는가?

4. Velocity Loop Tuning (1)

KV 속도 이득

- c. 이와 같이 평가한 MP, 이득 여유, 위상 여유에 대해서 아래 표 1과 같이 되도록 KV를 조정한다.

| 항목 | 조정지표 |
|--------------------------------|-----------------------------|
| (a) Close Loop MP(Margin Peak) | 2 ~ 6 [dB], 6dB 이하 염수 |
| (b) Open Loop | |
| Gain Margin | -10 ~ -20 [dB], -20dB 이하 염수 |
| Phase Margin | 40 ~ 60 [deg] |

표 1 속도 루프의 조정 지표

(예) 예를 들면, 이득 여유가 β [dB]라고 하고, 이득 여유는 10[dB]이기를 바란다고 하자. 이때, 이득여유 10[dB]에 대해서 $\beta - 10$ [dB]만큼 여유가 있기 때문에 KV를 $10^{\frac{\beta-10}{20}}$ 배 하면 이득 여유 10[dB]가 되는 KV를 구할 수 있다.

- d. 'PLF = 0'에서의 최적 KV를 구했고, 이젠 PLF값과 함께 KV를 조정한다. 이들에 대해서는 PLF의 항에서 이야기한다. 같은 조정지표는 이 경우에도 표 1을 그대로 사용하면 좋다.

- (4) 서보 아날라이저가 설계치가 없는 경우, 주파수특성을 계측할 수 없지만, 이때는 KV를 조금씩 변화시키고 발진하기 시작하는 KV를 구한다. 발진한계의 KV를 도달하면 이것에 $10^{-\frac{1}{2}}$ 배 하면 이득 여유는 -10[dB]이라는 것이 된다. 왜냐 하면, 발진한계에서의 이득 여유는 0[dB]에 있기 때문이다.

- (5) 속도 루프의 안정한계는 계에 존재하는 탄성요소로부터 본 모터측 관성의 크기, 모터의 종류에 의해서 대부분 결정된다. 그러므로, 모터의 형식이 같고 감속기가 모터에 직결되었을 때는 속도 루프의 안정한계는 대부분 같고, KV 값도 대부분 같게 된다. 손목측에서 암 선단까지 고속전달하고 선단에서 감속하는 타입의 축은 탄성계로부터 본 모터측 관성은 고속전달 기계부(기어, 토크 튜브 등)을 포함하기 때문에 KV 값은 축에 따라서 달라지는 경우가 있다.

4. Velocity Loop Tuning (2)

PLF 속도 루프 위상지연 보상 파라미터(Phase Lag Filter)

- 형식 : PLF (16Q16) [1/Vt]

- 설명 :

(1) 속도 루프의 안정성을 확보하기 위해서 삽입한 직렬보상 파라미터입니다.

(2) 이 위상지연 보상의 전달함수는 연속계근사에서

$$G(s) = \frac{1 + T_i s}{1 + \alpha T_i s} \quad \text{단, } \alpha > 1 \quad \text{수식(1)}$$

으로 나타내어지고, 속도 루프의 전류지령 출력 앞 부분에 삽입되어 있다.

(3) 이 보상의 보드선도를 아래에 나타낸다.

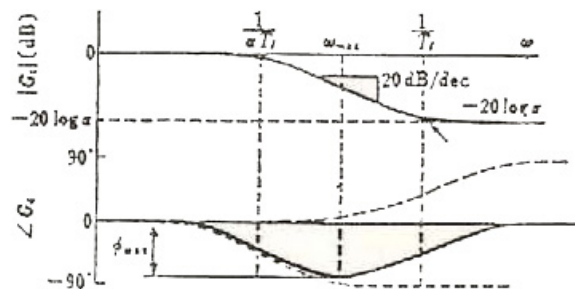


그림 3 위상지연 보상의 보드선도

(4) 이 위상지연 보상의 목적은 루프 이득 KP, KV의 향상에 있다. 이 보상에 의해서 루프 이득은 향상되지만 밴드폭은 좁아지게 되고, 과도응답은 뒤지게 된다. 그러나, 모터의 응답은 100 ~ 80 Hz로 변화해도 로봇의 선단 응답은 변화하지 않기 때문에 이들의 (-)요인은 무시할 수 있다. 이것은 루프 이득의 향상보다 정상특성의 개선효과를 목적으로 하는 것을 강조하고 있다.

4. Velocity Loop Tuning (2)

PLF 속도 루프 위상지연 보상 파라미터(Phase Lag Filter)

(5) 연속계 전달함수 수식(1)의 각 파라미터 α , T_i 를 서보 정수로 환산하는 식은 아래와 같이 구해진다.

$$PLF = \frac{\Delta T}{\alpha T_i} \quad [1/Vt] \quad \text{수식(2)}$$

$$iA = \frac{1}{\alpha} \quad \text{수식(3)}$$

단, $\Delta T = 500\mu\text{sec}$

이들 연산 결과를 정해진 Q 포맷으로 고친다.

(예) $T_i = 0.318 \text{ sec}$

$\alpha = 3$ 일때

$$PLF = \frac{500 \times 10^{-6}}{3 \times 0.318} = 5.24109 \times 10^{-4} [1/Vt]$$

$$16Q16\text{이름} \quad PLF = \text{Hex}(5.24109 \times 10^{-4} \times 2^{16}) = 22_H \quad \text{로}$$

$$iA = \frac{1}{3} = 0.333333$$

$$16Q16\text{이름으로} \quad iA = \text{Hex}(0.333333 \times 2^{16}) = 5555_H$$

● 파라미터 조정 :

(1) $PLF = 0$ 에서의 최적 KV를 구했다고 가정한다. KV를 올릴 수 있을 만큼 올린다고 하고, α 를 결정하면 KV는 α 배 만큼 올려진다.

(2) α 를 먼저 결정한다. $\alpha = 2 \sim 6$ 범위에서 선택한다. 경험적으로 $\alpha = 3$ 을 선택하는 것이 좋다. α 는 크게 하면 수렴하는 것이 지연되는 경향이 보여지기 때문에 (연산오차의 영향이라 생각됨) 아마도 큰 값을 취하지 않는 쪽이 좋다. 그래서 현재 제어기 내부적으로 $\alpha = 3$ 값을 사용하고 있기 때문에 따로 설정할 필요가 없다.

4. Velocity Loop Tuning (2)

PLF 속도 루프 위상지연 보상 파라미터(Phase Lag Filter)

- (3) T_i 를 결정한다. 위상여유 45° 를 지목하고 $PLF = 0$ 에서 최적인 KV 를 얻었을 때의 페루프 보드선도로부터 위상이 -135° 가 되는 주파수 f_p 를 읽어낸다. 이때,

$$T_i = \frac{10}{2\pi f_p} \quad \text{수식(4)}$$

가 속도루프의 조정상 최적인 T_i 가 된다.

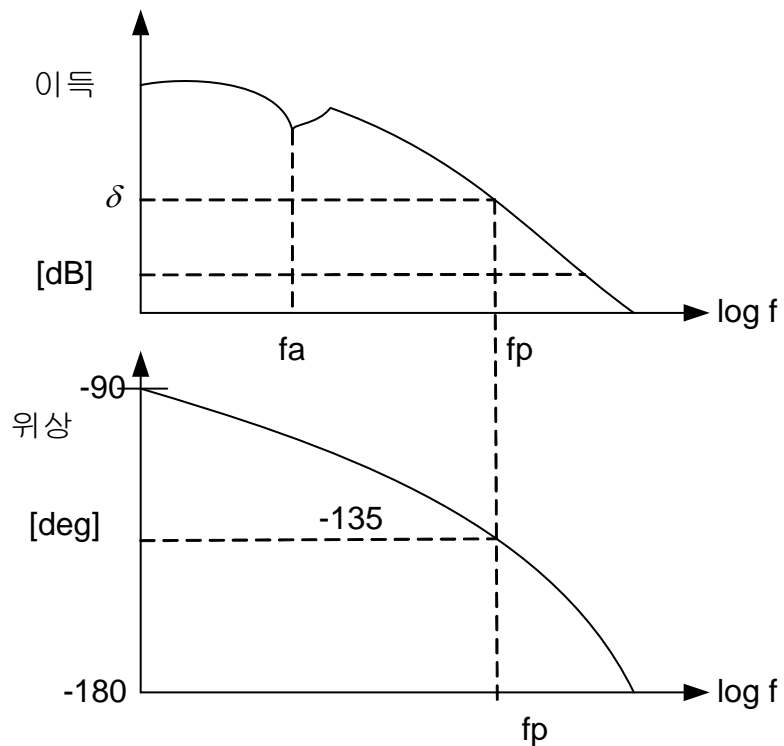


그림 4 속도 루프의 보드선도

4. Velocity Loop Tuning (2)

PLF 속도 루프 위상지연 보상 파라미터(Phase Lag Filter)

(4) (3)항의 보드선도로부터, f_p 의 이득을 읽어낸다. 이 때의 이득이 δ [dB]에 있다고 하면, 위상보상이 없는 경우($PLF = 0$) KV를 $\alpha \cdot 10^{\frac{\delta}{20}}$ 배 하면 위상보상이 적용됐을 때의 최적 이득을 구할 수 있다.

(5) (2) ~ (3)항에서 결정된 α , T_i 를 수식(2)~(3)에서 PLF, iA 를 계산하고, (4)에서 구한 KV를 적용하여 속도루프의 주파수 특성을 예측한다. 이렇게 예측한 값이 표 1의 조정지표를 만족한다면 이것도 좋지만 약간의 보정이 필요한 경우는 KV를 조정하여 지표에 맞도록 한다.

(6) 이상으로, 속도루프의 조정을 끝낸다. 여기서, 이 위상지연 보상은 암의 진동 억제에도 약간의 효과가 있는 것으로 판명되어 있다. 이상의 조정에서는 암의 진동억제에는 효과가 없지만 T_i 를

$$T_i = \frac{10}{2\pi f_a} \quad f_a : \text{보드선도상의 반공진주파수} \quad \text{수식(5)}$$

로 하고, α 는 (2)에서 결정된 대로 하고, 속도루프의 안정성은 확보한 채로 암의 진동도 약간 억제된다. 단, 이 효과의 확인은 (5)로부터 조정을 끝내고, 위치루프를 조정할 때 행하는 것을 추천한다.

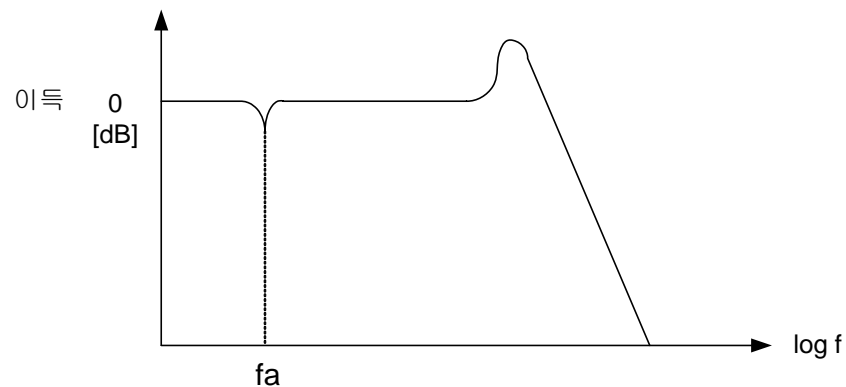


그림 5 속도루프의 페루프특성

4. Velocity Loop Tuning (3)

K_i 속도 루프 적분 이득

- 형식 : K_i (16Q12)[1/Vt]

- 설명 :

- (1) K_i 는 속도루프의 PI 제어기의 적분이득이다. 적분기 출력부에 제한 장치가 있어 적분치를 규제한다. iiLim(Integral Input Limite)은 적분 입력에 의한 적분기의 on/off 전환의 기준치이다. 이 적분기는 입력치가 iiLim보다 작으면 적분동작을 행하고, iiLim보다 크면 적분동작을 수행하지 않는 가변구조를 가지고 있다.

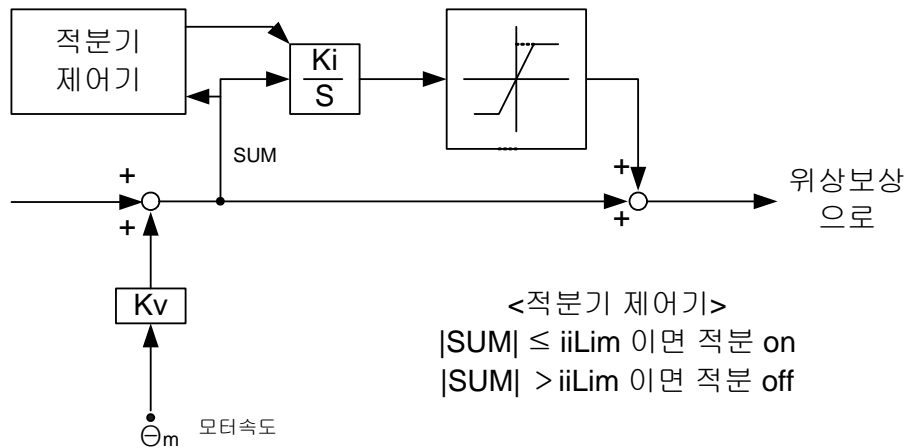


그림 6 속도루프의 PI제어기

- (2) 속도루프의 PI 제어기중 적분기의 목적은 정상오차의 개선에 있다. 이것에 의해 로봇 정지시의 위치결정 편차는 0 비트가 논리상 보장된다.
- (3) 일반적으로 적분동작을 표시하는 척도로서 적분 시정수를 사용한다. 이것을 T_i 라고 하면, 그 K_i 의 계산 공식은

$$K_i = \frac{\Delta T}{T_i} \quad [1/Vt] \quad \text{수식(6)}$$

단, $\Delta T = 500\mu\text{sec}$

4. Velocity Loop Tuning (3)

Ki 속도 루프 적분 이득

● 파라미터 조정 :

(1) 적분 이득은 크게 하면 위치편차가 0 비트로 수렴하는 속도는 빠르게 되는 반면, 암의 진동이 발생한다. 이것을 작게 하면 암의 진동은 억제할 수 있지만 위치편차가 0 비트로 수렴하는 것이 느려진다. Ki는 암의 진동이 없도록 만 크게 조정하는 것이 포인트이다.

(2) Ki를 결정하는 방법은 다음의 방법을 추천한다.

A. 우선 적분이득 $K_i = 0$ 일 때의 주파수특성 보드선도에 의해 반공진 주파수 f_a [Hz]를 읽어낸다.

B. 읽어낸 f_a 에 의해 최적 적분 시정수를 아래의 식을 이용하여 구한다.

$$T_i = c \cdot \frac{1}{f_a} \quad [\text{sec}] \quad \text{수식(7)}$$

여기서 $c = 0.5 \sim 0.83$, 추천 $c = 0.6$

- ✓ c 는 0.5 이하로 하면 암의 진동이 커지게 되므로 권장하지 않는다.
- ✓ c 는 크게 하면 암의 진동은 작아지게 되지만 모터축의 응답속도는 느려지게 된다. c 는 0.83이하를 권장한다.
- ✓ 모터의 응답, 선단파형 둘 다 가장 밸런스를 갖게 되는 것은 $c=0.6$ 일 때 이다. 이것은 시뮬레이션에서 확인할 수 있다.
- ✓ 현재까지는 $c=0.83$ 으로 조정했다. c 의 값은 선단파형을 잘 봐서 조정할 필요가 있다.

Step 5**위치루프의 조정**

속도루프의 조정이 대략적으로 끝나면 다음은 위치루프의 조정을 행한다. 위치루프의 조정은 단축을 50mm 각축 보간 동작시키고, 선단의 응답파형을 평가하는 것부터 행한다. 50mm피치는 적용상의 필연성이라고 말하는 것은 아니고 과도응답의 평가라는 관점부터 행하는 것.

조정하는 축의 순서는 관성모멘트가 큰 고유진동수가 낮은 것부터 행하는 것이 좋다. 그 이유는 궤적 정도를 얻기 위해서는 모든 축의 위치루프 응답속도를 가장 응답성능이 낮은 축부터 조정을 행하면 그 다음 축의 조정이 시행착오도 작도록 부드럽게

위치루프의 조정에 있어서, 조정을 행하는 서보 파라미터에 대해서 이하에 추천하는 조정 순서를 나타낸다.

| | | |
|------------|-------|-----------------------------------|
| 1-1 | KP | 위치이득 |
| 1-2 | KP1 | 위치이득 가변 파라미터(편차가 클 때 KP) |
| 1-3 | KP2 | 위치이득 가변 파라미터(편차가 작을 때 KP) |
| 2-1 | PF1B0 | 위치루프 Digital Filter PFLT1 파라미터 B0 |
| 2-2 | PF1A1 | 위치루프 Digital Filter PFLT1 파라미터 A1 |
| 2-3 | PF1B1 | 위치루프 Digital Filter PFLT1 파라미터 B1 |
| 2-4 | PF1A2 | 위치루프 Digital Filter PFLT1 파라미터 A2 |
| 2-5 | PF1B2 | 위치루프 Digital Filter PFLT1 파라미터 B2 |

5. Position Loop Tuning (1)

| | |
|----------|-------------|
| Kp | 속도 루프 적분 이득 |
| $Kp1$ | 속도 루프 적분 이득 |
| $Kp2$ | 속도 루프 적분 이득 |
| $PERREF$ | 속도 루프 적분 이득 |

● 형식 :

KP (16Q9) [Tb/Eb]

KP1 (16Q9) [Tb/Eb]

KP2 (16Q9) [Tb/Eb]

● 설명 :

(1) KP는 위치루프의 비례 이득이다. KP는 크게 하면 크게 한 만큼 응답이 빠른 서보계가 되지만 양의 진동이 커지게 된다.

(2) KP는 제어기 전체의 성능을 표현하는 곳에 자주 이용된다. 위치루프는 기본적으로 일차이연 성질을 갖고 있고, $1/KP$ 는 이 일차이연 특성의 시정수가 된다.

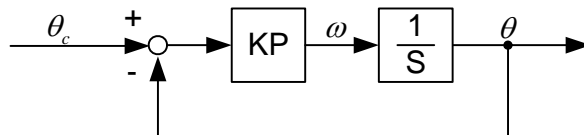


그림 7 이상적인 위치루프

$$G(s) = \frac{1}{1 + \frac{1}{Kp}s}$$

Kp : 위치이득 [s^{-1}]

θ_c : 위치지령 [rad]

θ : 위치 [rad]

ω : 속도 [rad/s]

(3) KP는 각종기계에 따라서 다르지만, 보통의 점진제어공작기계에서는 $40 \sim 50 s^{-1}$, 산업용 로봇에는 $10 \sim 20 s^{-1}$ 정도가 사용된다.

(4) 로봇과 같은 다축 동시제어 기계의 경우 궤적 정도를 얻기 위해서 모든 축의 응답을 같게 할 필요가 있다. 따라서 위치루프의 시정수를 모든 축에 같게 한다.

5. Position Loop Tuning (1)

| | |
|----------|-------------|
| K_p | 속도 루프 적분 이득 |
| K_{p1} | 속도 루프 적분 이득 |
| K_{p2} | 속도 루프 적분 이득 |
| $PERREF$ | 속도 루프 적분 이득 |

- (5) 위치이득 KP에 대해서 편차에 따라 KP를 변경할 수 있는 가변기구를 가지고 있다. 그림 8 가변 KP 구조처럼 편차가 큰 경우에는 작은 이득 K_{p1} 으로 동작하고 지령치가 정지한다. 편차가 작게 되면 KP가 K_{p2} 에 어울리게 크게 되어 간다. 이것에 의해 암의 진동을 크게 하지 않고 축 일치 시간의 단축을 그려 낼 수 있다. 이 효과의 개략적인 설명을 그림 9에 나타낸다.

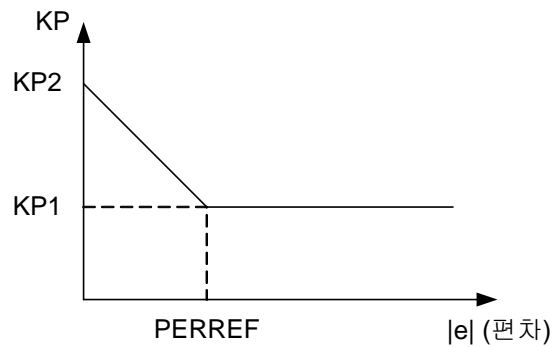


그림 8 가변 KP 구조

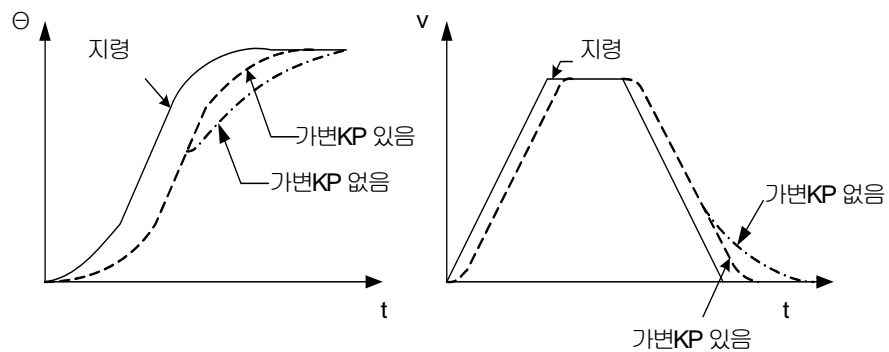


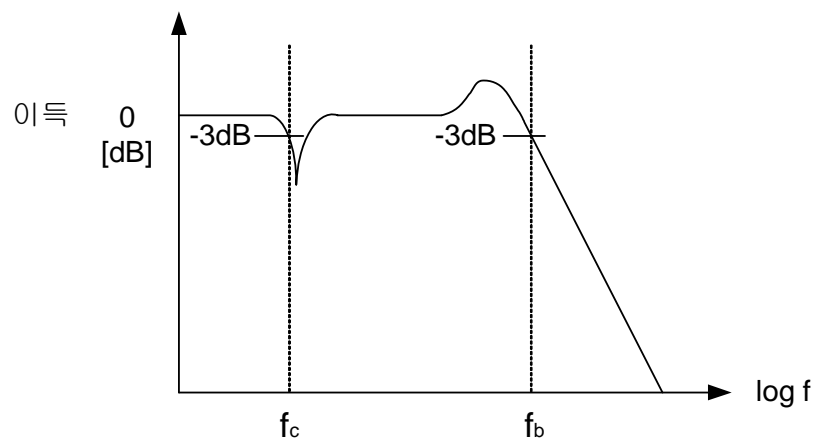
그림 9 가변 KP 구조의 효과

5. Position Loop Tuning (1)

| | |
|----------|-------------|
| K_p | 속도 루프 적분 이득 |
| K_{p1} | 속도 루프 적분 이득 |
| K_{p2} | 속도 루프 적분 이득 |
| $PERREF$ | 속도 루프 적분 이득 |

● 파라미터 조정 :

- (1) KP는 관성 모멘트가 가장 큰 고유진동수가 작은 것부터 조정해 간다.
- (2) KP의 개략치를 아는 것에는 속도루프의 보드선도를 보면 좋다. 속도루프의 페루프가 몇 Hz까지 0dB 을 유지하는 특성을 가지고 있는가를 본다. 보통 탄성계의 영향으로 반공진주파수에서 속도루프의 응답이 떨어지기 때문에 여기서 -3dB 되는 주파수 f_c 를 읽어낸다.(아래 그림 10)



f_c : 위치루프에서 유효한 속도루프의 응답

f_b : 속도루프 전체의 밴드 폭

그림 10 위치루프에 유효한 속도루프의 응답

f_c 를 읽으면, 다음 수식에 의해 KP를 결정한다.

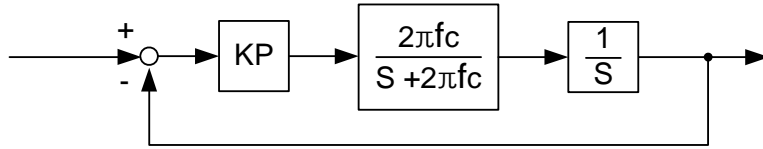
5. Position Loop Tuning (1)

| | |
|----------|-------------|
| Kp | 속도 루프 적분 이득 |
| $Kp1$ | 속도 루프 적분 이득 |
| $Kp2$ | 속도 루프 적분 이득 |
| $PERREF$ | 속도 루프 적분 이득 |

$$Kp = \frac{\pi f_c}{2\zeta^2} [s^{-1}] \quad \text{수식(8)}$$

$$\zeta = 0.707 \text{ 추천}$$

수식(8)은 아래와 같이 구해진다.



$$G(s) = \frac{2\pi f_c K_p}{s^2 + 2\pi f_c s + 2\pi f_c K_p}$$

$$\zeta\omega = \pi f_c \rightarrow \zeta^2\omega^2 = \pi^2 f_c^2 \quad (1)$$

$$\omega^2 = 2\pi f_c K_p \quad (2)$$

더욱이, 여기서 ζ 는 모터축 응답의 근사감쇠계수이다. 이 수치가 작게되면 모터축은 양버팀이 효과가 없게되고 계는 오버슈트한다.(암의 진동이 없는 것에 주의)

그러나 ζ 가 크게 되면 모터축이 교시점에 도달하는 속도가 떨어진다. 결과적으로 싸이클 타임이 떨어지게 된다. ζ 값은 $\zeta = 0.1 \sim 1.0$ 범위에서 임의로 응답을 봐가면서 결정하는 것이 좋을 것이다.

5. Position Loop Tuning (1)

| | |
|----------------------|-------------|
| <i>Kp</i> | 속도 루프 적분 이득 |
| <i>Kp1</i> | 속도 루프 적분 이득 |
| <i>Kp2</i> | 속도 루프 적분 이득 |
| <i>PERREF</i> | 속도 루프 적분 이득 |

(3) (2)에서 결정한 KP를 서보정수에 계산한다. 계산식은 아래 식을 이용한다.

$$K_{p_{new}} = K_p \cdot K_v \cdot \Delta T_p$$

K_p : 위치 이득, 일반표현 [s^{-1}]

K_v : 속도 이득 [Tb·t/Eb]

ΔT_p : 위치루프 Tick 계수 = 2×10^{-3} [s/t]

(4) 구해진 KP는 KP1에 넣는다. KP2는 정지점 근사 이득이기 때문에 KP1보다 약간 올린다. 실제값으로서

$$KP2 = 1.2 \times KP1$$

수식(9)

를 추천한다.

(5) PERREF는 장피치, 단피치 모두 이득변화의 관계가 복잡하지 않은 범위에서 목시적으로 조정한다. 이 값을 크게 하면, 싸이클 타임은 향상되지만 2단 모션이 된다.

(6) KP가 결정되면, 다음으로 Digital Filter PFLT1 조정으로 이동한다. 이 외의 위치루프 파라미터를 조정한 후, 원하는 응답을 얻도록 마지막으로 KP를 수정한다.

5. Position Loop Tuning (2)

| | |
|--------------|-----------------------------------|
| PF1B0 | 위치루프 Digital Filter PFLT1 파라미터 B0 |
| PF1A1 | 위치루프 Digital Filter PFLT1 파라미터 A1 |
| PF1B1 | 위치루프 Digital Filter PFLT1 파라미터 B1 |
| PF1A2 | 위치루프 Digital Filter PFLT1 파라미터 A2 |
| PF1B2 | 위치루프 Digital Filter PFLT1 파라미터 B2 |

● 형식 :

PF1B0 (16Q11)
 PF1A1 (16Q13)
 PF1B1 (16Q10)
 PF1A2 (16Q14)
 PF1B2 (16Q11)

● 설명 :

(1) 위치루프에 삽입된 Digital Fiter의 계수입니다. 이 필터는 종래 기계의 2차 위상 빠름보상(보통 노치 필터라 부름)를 소프트웨어로 실현한 것으로 이 전달함수는 아래의 식으로 표현된다.

< 연속계 >

$$G(s) = \frac{s^2 + 2\zeta_2\omega_2s + \omega_2^2}{s^2 + 2\zeta_1\omega_1s + \omega_1^2} \cdot \frac{\omega_1^2}{\omega_2^2} \quad \text{수식(10)}$$

< 디지털계 >

$$G(z) = \frac{B_0 + B_1z^{-1} + B_2z^{-2}}{1 - A_1z^{-1} - A_2z^{-2}} \quad \text{수식(11)}$$

5. Position Loop Tuning (2)

| | |
|--------------|-----------------------------------|
| PF1B0 | 위치루프 Digital Filter PFLT1 파라미터 B0 |
| PF1A1 | 위치루프 Digital Filter PFLT1 파라미터 A1 |
| PF1B1 | 위치루프 Digital Filter PFLT1 파라미터 B1 |
| PF1A2 | 위치루프 Digital Filter PFLT1 파라미터 A2 |
| PF1B2 | 위치루프 Digital Filter PFLT1 파라미터 B2 |

(2) 이 필터는 그림 11에 나타낸 것 같은 주파수특성을 갖는다.

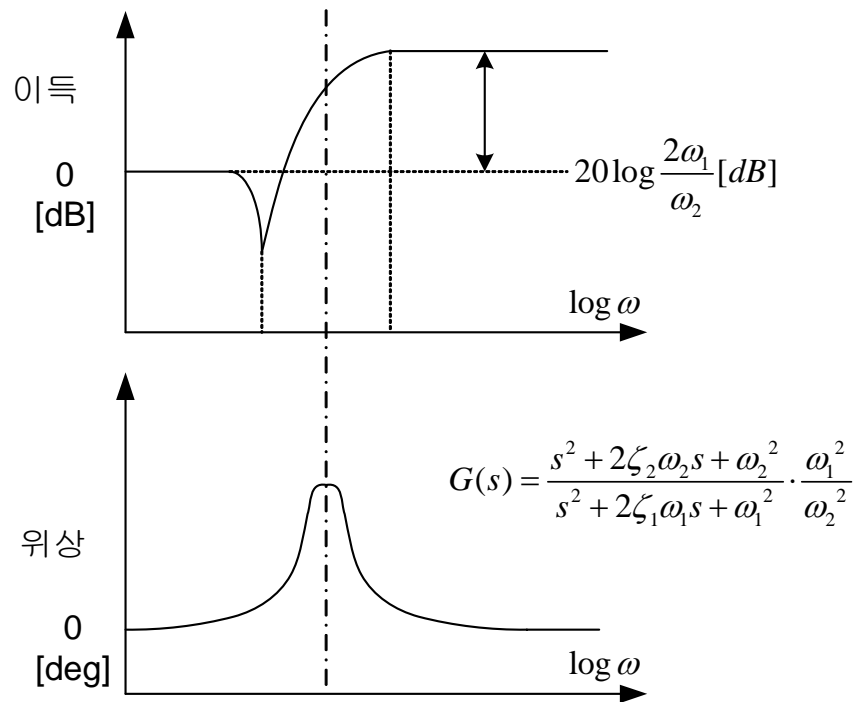


그림 11 2차 위상 빠름 보상의 보드선도(Notch Filter)

(3) 이 필터는 로봇 동작시에 발생하는 암의 진동억제가 목적이다. 위치편차 신호에 포함된다. 암 진동주파수 성분을 억제하고 위상을 앞서도록 함으로써 암의 진동을 억제한다.

5. Position Loop Tuning (2)

| | |
|--------------|-----------------------------------|
| PF1B0 | 위치루프 Digital Filter PFLT1 파라미터 B0 |
| PF1A1 | 위치루프 Digital Filter PFLT1 파라미터 A1 |
| PF1B1 | 위치루프 Digital Filter PFLT1 파라미터 B1 |
| PF1A2 | 위치루프 Digital Filter PFLT1 파라미터 A2 |
| PF1B2 | 위치루프 Digital Filter PFLT1 파라미터 B2 |

(4) 파라미터의 결정은 연속계 식(11)의 계수를 결정하고, 아래의 환산식을 행한다.

$$PF1A1 = -\frac{2(K_1^2 - 1)}{1 + 2\zeta_1 K_1 + K_1^2} \quad \text{수식(12)}$$

$$PF1A2 = -\frac{1 - 2\zeta_1 K_1 + K_1^2}{1 + 2\zeta_1 K_1 + K_1^2} \quad \text{수식(13)}$$

$$PF1B0 = \frac{K_1^2(1 + 2\zeta_2 K_2 + K_2^2)}{K_2^2(1 + 2\zeta_1 K_1 + K_1^2)} \quad \text{수식(14)}$$

$$PF1B1 = \frac{2K_1^2(K_2^2 - 1)}{K_2^2(1 + 2\zeta_1 K_1 + K_1^2)} \quad \text{수식(15)}$$

$$PF1B2 = \frac{K_1^2(1 - 2\zeta_2 K_2 + K_2^2)}{K_2^2(1 + 2\zeta_1 K_1 + K_1^2)} \quad \text{수식(16)}$$

$$K_1 = \tan \frac{\omega_1 T}{2} \quad \text{수식(17)}$$

$$K_2 = \tan \frac{\omega_2 T}{2} \quad \text{수식(18)}$$

$$T = 2.0 \times 10^{-3} [\text{sec}] \quad \text{수식(19)}$$

이들 연산 결과를 각 Q 포맷으로 환산해서 각 파라미터 Hex값을 얻는다.

5. Position Loop Tuning (2)

| | |
|--------------|-----------------------------------|
| PF1B0 | 위치루프 Digital Filter PFLT1 파라미터 B0 |
| PF1A1 | 위치루프 Digital Filter PFLT1 파라미터 A1 |
| PF1B1 | 위치루프 Digital Filter PFLT1 파라미터 B1 |
| PF1A2 | 위치루프 Digital Filter PFLT1 파라미터 A2 |
| PF1B2 | 위치루프 Digital Filter PFLT1 파라미터 B2 |

● 파라미터 조정 :

- (1) 양의 고유진동수를 ω_2 라 한다. 속도루프의 반공진주파수 $\omega_a = 2\pi f_a$ 를 ω_2 라고 하면 좋다.
- (2) ω_1 을 $\omega_1 = 3\omega_2$ 로 한다. $f_1 = \frac{\omega_1}{2\pi}$ 이 12Hz를 넘는 경우는 $f_1 = 12\text{Hz}$ 로 하고, $\omega_1 = 24\pi$ 로 한다.
- (3) $\zeta_1 = 0.6$ 고정하고, $\zeta_2 = 0.2$ 를 가정해서 결정한다.
- (4) 로봇 선단의 응답파형을 보면서 조정한다. 우선 (1) ~ (3)의 조건설정에서 ω_2 를 조금씩 움직여서 최적의 ω_2 를 얻는다.
- (5) ω_2 를 결정하고, 다음으로 최적의 ζ_2 를 결정한다. ζ_2 를 조금씩 변화시켜서 결정한다. ζ_2 의 최적값은 기계, 축에 의해서 달라지게 되지만, $\zeta_2 = 0.15 \sim 0.4$ 값으로 된다. 보통 특성이 거의 변하지 않을 때는 ζ_2 는 큰 값을 갖도록 한다.
- (6) 필터 파라미터를 결정하고, 원하는 응답에 되도록 PLF, KP의 수정 조정을 행한다.

추가사항 : ω_1 , ζ_1 , ω_2 , ζ_2 등의 전달함수 계수로부터 필터 파라미터 PF1B0,A1,B1,A2,B2를 계산하는 식(12)~(19)은 엑셀 sheet로 작성하고 있다. 이것을 사용하고자 할 때는 로보틱스연구실 엄일용 연구원에게 물어볼 것.

[주의]

이 파라미터의 변경은 서보 OFF하고 5개 동시에 행할 것. 그렇게 하지 않으면 로봇은 폭주한다.