

Final Project: Tracking Robot

Date: 2019.07.10.수

Name: 21600372 송윤경

21700599 이한나

1. Overall Block Diagram

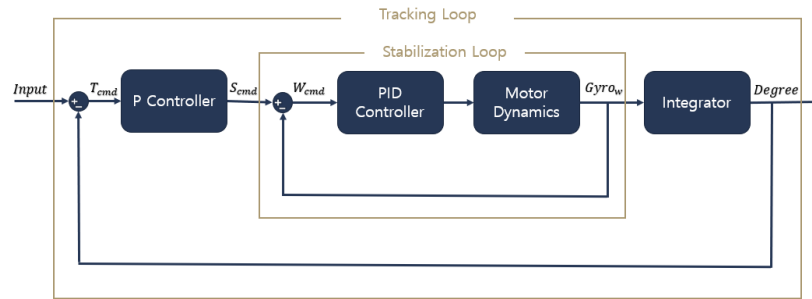
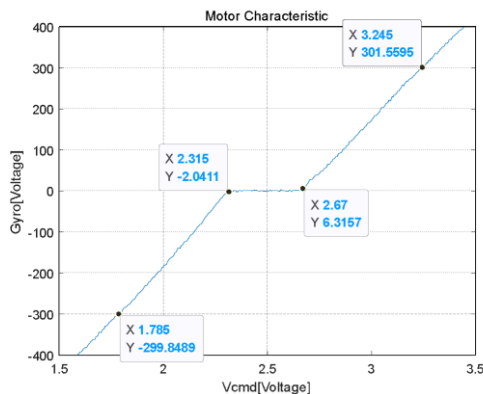


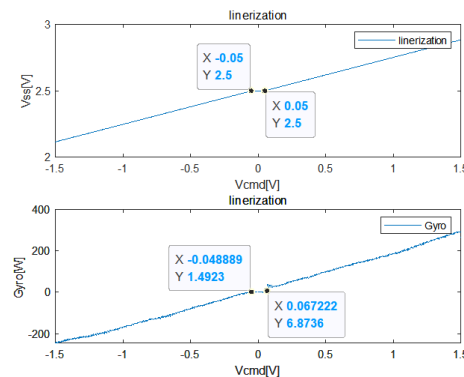
Figure 1.1. System Block Diagram

2. Motor Modeling

2.1. Motor Linearization



(a) 선형화 전 Data

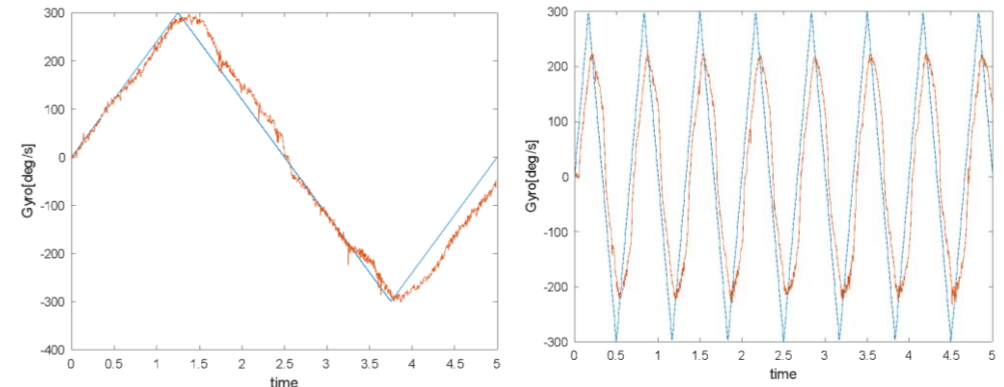


(b) 선형화 된 후 data값

Figure 2.1 Linearization for Modeling

Gyro scope에서 신뢰할 수 있는 각속도가 300[deg/s]이기 때문에 이 각속도를 출력하는 모터의 인가 전압을 saturation 전압으로 설정하였다. 모터를 모델링을 하기 위해서는 모터가 LTI 특성을 가져야 한다. 따라서 dead zone을 $\pm 0.05[V]$ 로 설정하고, 모터의 인가 전압을 0~5[V]로 설정하여 선형화 하였다.

(figure 2.1(b) 위) 앞서 언급한 선형화 예상 값.(figure 2.1(b) 위), 자이로 센서를 통해 선형화를 확인한 데이터 값(figure(b) 아래)을 비교해 보면 예상한 선형화가 되었음을 알 수 있다. 모터의 동적특성이 반영되었는지 확인하게 위해 삼각파로 선형화를 다시 한번 확인한다.



(a) 0.2[Hz]

(b) 2[Hz]

Figure 2.2 삼각파를 이용한 linearization Validity check

대체적으로 모터에 인가한 입력 주파수와 gyro scope에서 출력되는 전압이 선형적으로 비례함으로 선형화를 완료하였다. Figure 2.2(b)에서 입력(파란선)과 출력(빨간선)이 100[deg/s]차이나는 이유는 모터가 방향을 바꿀 때, 회전 관성, 기어의 backlash 문제로 입력 전압에 따라 모터가 바로 방향을 바꾸지 못하기 때문이다.

2.2 Motor Modeling

크기가 0.7이고 주파수가 0.1~2[Hz]인 정현파를 모터에 입력하여 자이로스코프를 통해 모터의 각속도를 측정한다. 이 데이터들을 이용하여 least square 방법으로 2차모터의 전달함수를 구한다.

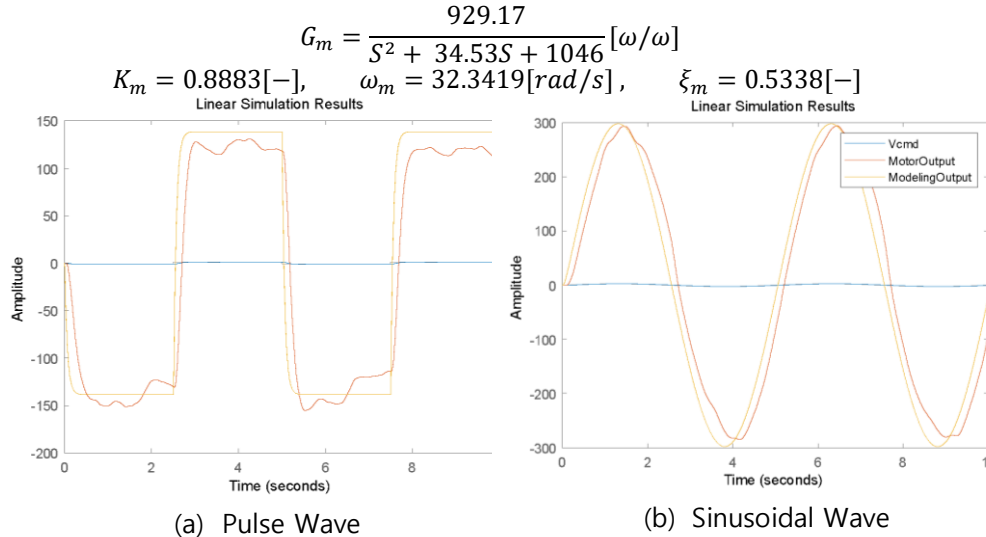


Figure 2.3 Motor Modeling validity Check

파란색 파형 입력 전압(figure 2.3 출력과 같은 주파수로 1.7~3.3[V]의 입력을 주었다), 노란색 파형은 MATLAB 시뮬레이션 출력, 주황색 파형은 실제 구동하여 출력한 값이다. Figure 2.3, 전반적으로 시뮬레이션과 실제 구동의 값이 거의 비슷하지만, (a) Pulse Wave를 보면 모델링 값과, 모터를 구동하여 출력한 데이터 값이 완벽하게 일치하지 않는다. Figure 2.2에서 선형화가 잘 되었음이 확인되었으므로 자이로 센서 자체의 오차라 판단된다. PID제어기에서 그 차이를 줄여줄 것으로 예측하여 위 결과를 바탕으로 Motor Modeling를 마쳤다.

3. Stabilization Loop

3.1. PID Controller Design

Pole-zero mapping 방법을 사용하여 controller를 설계하고자 한다. 주어진 시스템의 specification을 통해 제어하고자 하는 시스템의 사양을 확인한 후, pole과 zero의 위치를 그에 맞춰 변경하고자 하였다. 다음은 주어진 specification이다.

$$GM(\text{gain margine}) \geq 9[\text{dB}], \quad PM(\text{phase margin}) \geq 60[\text{deg}],$$

$$t_r^{90}(\text{rising time}) \geq 0.3[\text{sec}], \quad \%OS(\text{overshoot}) \leq 20[\%]$$

$$\frac{\omega_h}{\omega_b}(\text{disturbance rejection}) \leq 0.1 \text{ (when, } s = j\omega_{\max})$$

PID의 gain은 controller의 ω_c , ζ_c , R_c 에 의해 계산할 수 있다. 따라서 주어진 specification을 기준으로 각 parameter의 범위를 계산하여 확인한 후 parameter의 값을 결정하면, K_p, K_I, K_D (PID의 gain)가 결정된다. PID의 gain을 $\underline{\omega}_c = \frac{\omega_c}{\omega_m}$ 로 정리하여, PID의 gain이 양수가 되는 지점과 disturbance rejection의 범위를 확인하였다.

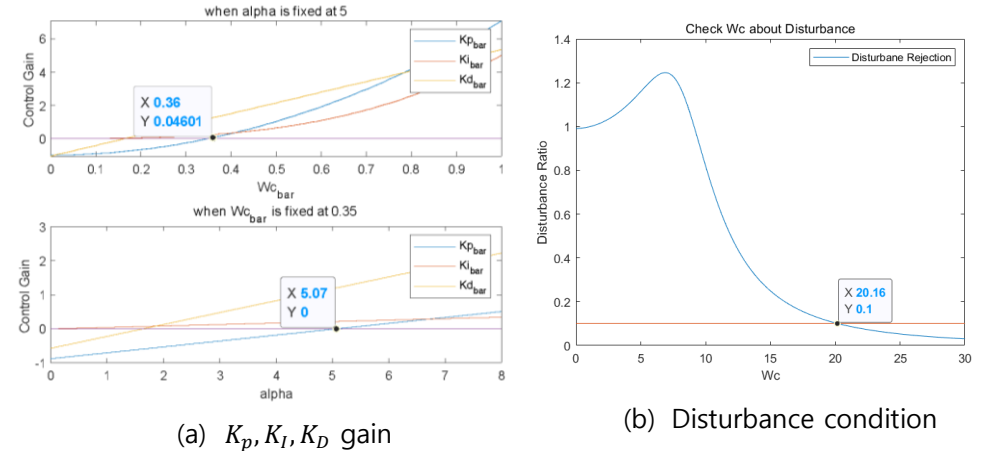


Figure 3.1. ω_c Range Check

$\%OS$ 에 의해 결정되는 ζ 의 범위: $\zeta < 0.4559$ rising time에 의해 결정되는 ω_c 의 범위: $\omega_c > 11.7662$

K_p, K_I, K_D 에 의해 결정되는 ω_c 의 범위: $\omega_c > 11.6431$

disturbance rejection에 의해 결정되는 ω_c 의 범위: $\omega_c > 20.16$

이때, ζ_c 의 값은 0.707로, α 의 값은 $\alpha \zeta_c \omega_c$ 로 고정시켜 ω_c 의 변화에 따라 PID의 gain을 결정 하였다. 또한, 시스템이 안정적이기 위해 ω_c 는 1보다 작아야 한다. 위의 조건들을 모두 만족시키는 ω_c 의 범위를 찾으면, $20.16 < \omega_c < 32.3419$ 이다. ω_c 가 커질수록 disturbance rejection에 유리하여 $\omega_c = 28.4664$ 로 설정하였다.

$$\begin{aligned} \omega_c &= 28.4664[\text{rad/s}], & \zeta_c &= 0.707[-], & R_c &= 142.3320 \ (\alpha = 5) \\ K_p &= 5.9122[-], & K_I &= 124.1292[-], & K_D &= 0.1593[-] \end{aligned}$$

따라서, PID controller의 전달함수(G_c)는 다음과 같이 계산된다.

$$G_c = \frac{0.1593 s^2 + 5.912 s + 124.1}{s} [\omega/\omega]$$

3.2. PID Controller Specification Check

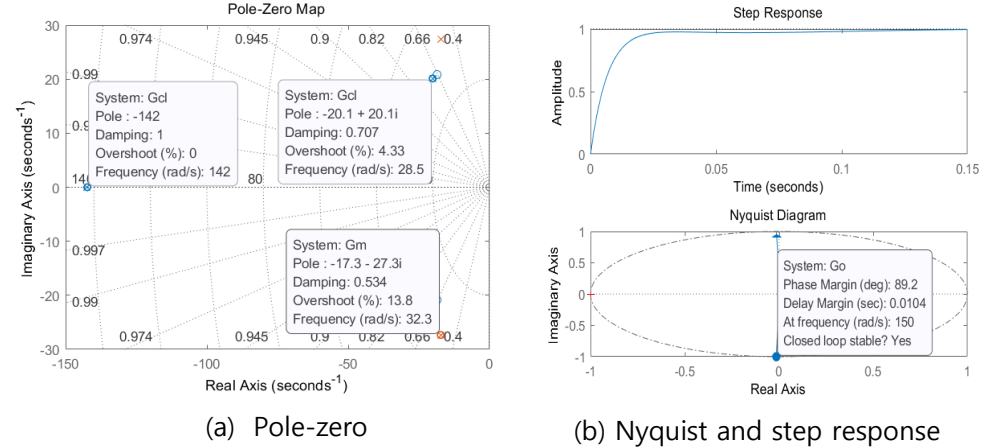


Figure 3.2. Stabilization Loop Spec

모터 pole 위치가 원래의 전달함수 $-17.3 \pm j37.3$ 에서 $-20.1 \pm j20.1$ 로 $-2.8 \pm j7.2$ 만큼 이동하였다. Pole의 위치가 y축으로부터 2.8 만큼 떨어져 모터의 동작이 안정되었고, damping도 7.2만큼 줄어 진동이 감쇄됨을 볼 수 있다. in dominant pole인 R_c 는 dominant pole보다 7.06배 먼 곳에 위치하고 있어 R_c 의 영향은 무시할 수 있다고 가정한다. 또한 Nyquist와 step response를 통해 주어진 specification을 만족하는 제어기를 설계하였는지 확인하였다.

$$\begin{aligned} GM(\text{gain margin}) &= \infty[\text{dB}], & PM(\text{phase margin}) &= 89.2[\text{deg}], \\ t_r^{90}(\text{rising time}) &= 0.0155[\text{sec}], & \%OS(\text{overshoot}) &= 0[\%] \end{aligned}$$

따라서, margin과 step response에서 보이는 specification은 만족하는 제어기를 설계하였고 Stabilization Loop의 전체 전달함수는 다음과 같다.

$$G_{scl} = \frac{148.1 s^2 + 5493 s + 115300}{s^3 + 182.6 s^2 + 6539 s + 115300} [\omega/\omega]$$

3.3. Stabilization Initial and Result performance

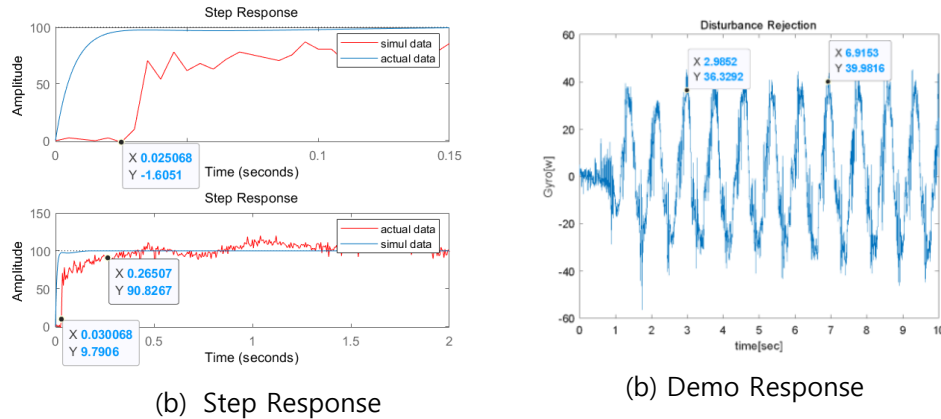


Figure 3.3. Stabilization Response

먼저, 모터의 actual performance를 통해 제어기의 specification을 검증하고자 하였다. Step response를 보면 실제 모터가 작동을 할 때 모터의 dead zone에 의해 입력에 바로 반응하지 못하고 0.025[sec]만큼 지연 되는 현상이 발생한다. 또한 대략적인 rising time을 보면 0.2350 [sec]로 아주 큰 오차를 가진다. 오차 자체는 크지만, 모터의 specification을 만족하고, 응답속도가 더 빠르므로 응답속도의 제어는 유효하다고 가정하고 진행하였다. 또한 step response에서 모터가 steady state 상태에서 약 10~20%의 error를 가지며 불안정하게 진행됨을 보인다. 모터의 진동과 같은 하드웨어적 요소에 의한 불안정으로 판단하였으나 떨림을 보완하지 못하였다.

또한 disturbance rejection에서는 크기가 300[deg/s]인 정현파 입력을 주었을 때 실제 바퀴의 작동과 자이로스코프의 출력을 비교하여 직접적인 disturbance에 대한 반응을 확인하였다. Disturbance rejection은 10%인 30[deg/s]까지 되어야 하는데 40[deg/s]까지 올라가며 specification을 만족하지 못하였다. 하드웨어의 한계를 고려하지 못한 채 과도한 제어를 설계하여 모터가 제어기의 조건을 따라가지 못해 발생한 오차인 것 같다.

4. Tracking Loop

4.1. Controller Design Method

Tracking을 설계하기 위해 DOA와 DIR값을 읽어와 2.Motor모델링과 같은 형태로 선형화를 한 후 제어기 설계를 진행하였다. 다음은 Tracking Loop에 주어진 specification이다.

$$GM(\text{gain margine}) \geq 6[\text{dB}], \quad PM(\text{phase margin}) \geq 45[\text{deg}], \\ t_r^{90}(\text{rising time}) \geq 0.3[\text{sec}], \quad \%OS(\text{overshoot}) \leq 5[\%]$$

Tracking system의 제어기를 설계할 때는 actuator가 빠르다고 가정하여의 P제어기만을 사용하여 제어한다. K_p 로 응답속도를 빠르게 하기위해 높여준다. 하지만, K_p 를 너무 높이면 시스템이 발산하며 떨기 때문에 적절한 값을 turning하며 찾은 결과 $K_p = 10$ 으로 설정하였다.

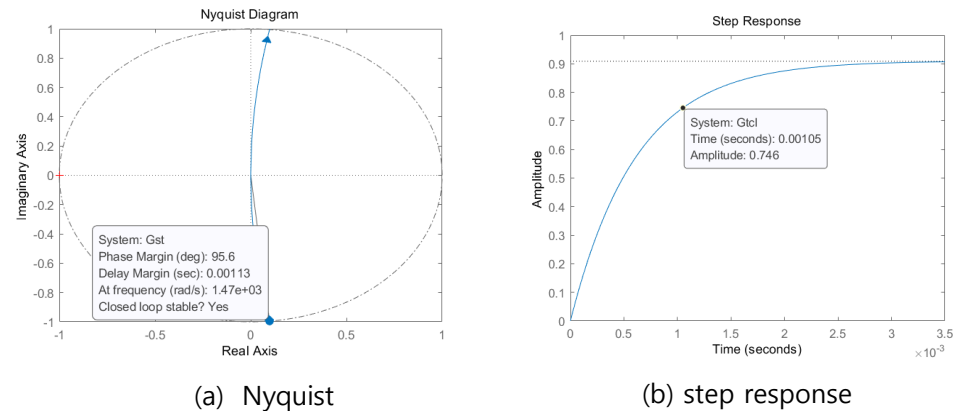


Figure 4.1. Tracking Loop Spec

Figure 4.1은 Tracking close loop의 전달 함수에 step response simulation결과이다. 이를 통해 시스템의 spec을 확인해보면, 아래와 같고 spec을 만족함을 보인다.

$$GM(\text{gain margine}) = \infty[\text{dB}], \quad PM(\text{phase margin}) = 95.6[\text{deg}], \\ t_r^{90}(\text{rising time}) = 0.0105[\text{sec}], \quad \%OS(\text{overshoot}) = 0[\%]$$

4.2. Initial and Result performance

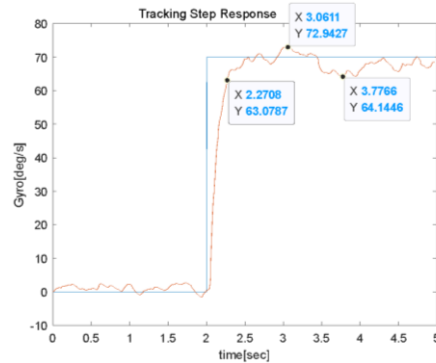


Figure 4.2. Tracking Step Response

이번 실험에서 준 step response는 코딩으로 7[deg]를 error를 입력하여 모터의 반응 속도를 본 것이다.(error가 7[deg]일 때, K_p 에 의하여 70[deg/s]로 모터가 회전한다.) 일정한 error값을 줄이기 위해 모터는 일정한 각속도로 tracking 함으로 위 방법을 사용해 Step Response를 데이터를 구하였다.

시뮬레이션과 결과 값이 완벽하게 일치하지 않는다. 실험 중 노이즈가 타고 들어가거나 모터에 step response 인한 갑작스런 모터의 움직임으로 관성이 발생하여 데이터 오차가 커질 수 있다. 노이즈를 제거하기 위해서 cut-off frequency가 6[Hz]인 LPF를 걸었다. 노이즈 부분을 제거하여 다음과 같은 규격을 도출하여 주어진 specification을 만족하였다.

$$rising\ time = 0.25[sec], \quad \%OS = 4.2[\%]$$

5. Analysis and Discussion

- 선형화 할 때 dead zone이 필요한이유

이번 실험에서는 연속적인 입력을 주어 데이터를 받고 그 데이터를 분석하여 system을 디자인한다. 완벽한 선형화를 위해서 dead zone을 없애면, 모터가 방향을 바꿀 시 모터의 회전 관성이나, backlash의 영향으로 정확한 데이터를 못 받기 때문에 일정한 dead zone을 주어 정확한 데이터를 얻도록 한다.

-bode plot

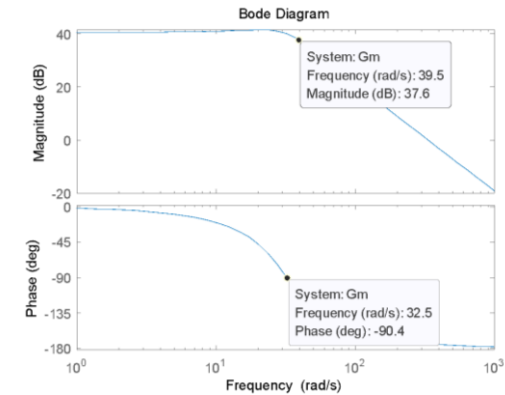


Figure 5.1 Motor Modeling Bode Plot

Figure 5.1를 보면 두 plot의 cut-off frequency가 다를 수 있다. 이 이유는 입출력 데이터의 문제가 있다. 이번 실험에서 모델링에 쓰인 데이터 입력이 모터인가 전압, 출력이 자이로스코프의 출력 각속도이다. 따라서 두 데이터의 입출력의 단위 차이가 있다. 또한 모델링하고 있는 모터를 보면 기어2개와 김발의 헤더가 모터 위에 있다. 즉 모터 자체를 모델링 하는 것이 아니기 때문에 bode plot에서 차이가 보인다.

-Additional zero

additional zero가 pole과 가까워 zero의 영향으로 damping이 생길 수 있어 pole과 멀어지도록 설계하는 것이 좋지만, 실제 PID tuning을 통해 확인해 본 결과 additional zero는 R_c 와 trade-off 관계이다. 따라서, 제어를 설계할 때 설계의 목적에 따라 우선적인 성능을 결정하여, 적절하게 값을 설정해주어야 한다.