2025.05.01. ~ 2025.06.20.

**Gimbal Project**

**22100252 Ryu Minseo**

**목차**

1. Control Object (기본 용어 설명)

2. Dead-Zone Checking

3. Linearization (p.3~12)

4. Motor Modeling

5. Potentio Modeling

6. 1st Controller (Designation)

7. 2nd Controller (Stabilization)

8. Appendix

**1. Control Objective**

**2. Dead Zone Checking**

데드존은 일정 구역에서 속도를 0으로 만들며 비선형적 요소를 추가한다.

예를 들면 designation controller 부분에서 20 에서는 를 만족하지만 40 에서는 만족하지 않을 수 있다.

또한 속도에 따라 감속하는 비중이 클 것이라고 예상된다.

낮은 속도에서는 데드존의 영향이 클 것이라고 예상된다.

반대로 높은 속도 일수록 데드존의 영향이 작을 수도 있을 것이라고 생각된다.

**- Vcmd 기준**  
- 0.1 [V] < Dead-Zone < 0.1 [V]

**- Vs 기준**

- 2.3191318661 [V] < Dead-Zone < 2.6901344124 [V]

**3. Linearization**

|  |
| --- |
|  |
| **Figure 1. DC Motor Block Diagram** |

**- 변환 (**)

는 의 범위를 가지며, 제어기에서 나오는 전압 신호를 의미한다.

는 의 범위를 가지며, 실제 모터를 들어가는 전압 범위를 가지는 신호를 의미한다.

|  |
| --- |
| 텍스트, 라인, 번호, 그래프이(가) 표시된 사진  AI 생성 콘텐츠는 정확하지 않을 수 있습니다. |
| **Figure 2.**   **to** |

이렇게 를 입력하고 모터에 의해서 출력되는 는 비선형 관계를 가진다.

|  |
| --- |
| **도표, 기술 도면, 평면도, 스케치이(가) 표시된 사진  AI 생성 콘텐츠는 정확하지 않을 수 있습니다.** |
| **Figure 2. Block Diagram** |

Linearization을 통해 입력 부터 출력 까지의 관계를 선형화 시켜 LTI 시스템으로 볼 수 있도록 한다.

이렇게 를 입력하여 Figure 2. 과정을 선형적인 관계를 가질 수 있는 를 출력한다.

**- 정도 (2025.05.01)**

|  |
| --- |
|  |
| **Figure 2. Datasheet** |

**위 datasheet을 통해 아래의 변환식을 산출할 수 있다. (**은 직접 측정해야 함**)**

**- 변환식**

**- 선형화 (2025.05.08)**

|  |
| --- |
|  |
| **Figure 4. Block Diagram** |

: 0.0 [V] ~ 5.0 [V]

: 0.0 [V] ~ 5.0 [V]

: [deg/s]

|  |
| --- |
|  |
| **Figure 5.** to |

입력 후 0.5~1.0 초 구간 평균으로 Plot

값은 가 0**을 입력할 때 구간에서 의 평균으로 계산한다.**

|  |
| --- |
|  |
| 1. to |
|  |
| 1. to |
| **Figure 6. Steady state I/O relationship** |

**1. Linear model 선정 (Vcmd to Wout)**

|  |
| --- |
|  |
| **Figure 8. Linearization** |

**Figure 6. (a)에서 확인할 수 있듯이 최대, 최저 출력을 1200으로 설정.   
(원래는 1450정도의 rad/sec 정도가 나았지만 범위를 줄여 설정)**

**ii) Mapping 선형 모델이 맞을 수 있도록 Vcmd to Vs**

**Figure 6. (a)의 output인 의 input인 와**

**Figure 8에서 output인 의 input인 를 맵핑**

|  |
| --- |
|  |
| **Figure 9. Steady state I/O relationship** |

**하지만 그대로 플랏을 하게 되면 Vcmd의 범위가 늘어나게 된다.**

**그렇기에 Vcmd의 범위가 - 2.5 [V] ~ 2.5 [V] 안에 들어오도록 데이터를 조절.**

**iii) 2차 curvefit**

|  |  |
| --- | --- |
|  |  |
| **(a) 양수 부분** | **(b) 음수 부분** |
| **Figure 10. 2차 근사** | |

|  |
| --- |
|  |
| **(a)** |
| **Figure 11. 2차 근사** |

**계수는 다음과 같다.**

**Y = p1 \* X.^2 + p2 \* X + p3**

**- 양수 부분**

**fcmd\_plus = p1\_plus \* Vcmd\_fcmd\_plus.^2 + p2\_plus \* Vcmd\_fcmd\_plus + p3\_plus**

**p1 = 0.047857294167694 ;**

**p2 = 0.481446065883277 ;**

**p3 = 2.641511232881421 ;**

**- 음수 부분**

**fcmd\_minus = m1 \* Vcmd\_fcmd\_minus.^2 + m2 \* Vcmd\_fcmd\_minus + m3**

**m1 = -0.050625373747380 ;**

**m2 = 0.471880847542348 ;**

**m3 = 2.366826204632063 ;**

**iii) Validation**

|  |
| --- |
|  |
| **Figure 12. result of Linearization** |

|  |
| --- |
|  |
| **Figure 13. result of f(cmd)** |

**4. Motor Modeling**

선형화를 통해 모터를 LTI 시스템으로 가정한 후, 모터의 전달함수를 구한다.

**1) 입력 신호** **의 크기 설정**

주파수가 모터의 natural frequency 일 때를 고려하며 크기를 결정해야 한다.

그때의 입출력 관계는 아래와 같이 정의된다.

|  |
| --- |
| **도표, 기술 도면, 평면도, 스케치이(가) 표시된 사진  AI 생성 콘텐츠는 정확하지 않을 수 있습니다.** |
| **Figure 14. I/O Relationship at** |

모터의 출력은 데드존에 포함되지 않는 마지노선 최소 전압의 5배 이상이 되어야 안전하다고 판단한다면 아래의 관계를 가진다.

는 Figure 3.(b)의 기울기가 되며, 는 로 가정한다.

(데드존 기준으로 )

입력 크기를 로 결정한다.

**2) 모터 전달함수의 차수 결정**

전달함수의 차수는 1차, 2차 둘 중에 하나이다. 다양한 주파수 신호를 입력하여 위상이 가 넘는다면 2차 아니면 1차로 판단한다.

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| 입력 주파수 [Hz] | 6.0 | 7.0 | 8.0 |
| Gain  [-] | 0.1638 | 0.1500 | 0.1369 |
| Phase Delay [] | -62.6593 | -68.60228 | -72.7855 |

입력 주파수를 높여도 가 넘지 않기 때문에 1차로 결정함.

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Table 2. Frequency Response | | | | | |
| 입력 주파수 [Hz] | 3.00 | 3.05 | 3.10 | 3.15 | 3.2/0 |
| Gain  [-] | 0.2231 | 0.2189 | 0.2185 | 0.2204 | 0.2194 |
| Phase Delay [] | -43.6407 | -44.4837 | -44.0470 | -45.3276 | -45.5653 |

또한 3.10 ~ 3.15 [Hz] 사이에 위상 변화가 45도인 대역폭이 있음을 확인하였다.

**3) Model Validation**

이를 바탕으로 10개의 주파수 범위 (0.10, 0.16, 0.22, 0.28, 0.34, 0.40, 0.46, 0.52, 0.58, 0.64 [Hz])에서 응답을 받아옴. 저주파 대역에 집중하여 모델링을 범위를 설정하였고, magnitude 보다 phase 모델링 정확도에 집중하여 모델링 결과를 산출함.

|  |  |
| --- | --- |
|  |  |
| (a) Magnitude | (b) Phase |
| **Figure 15. Bode Plot Validation** | |
|  | |

|  |
| --- |
|  |
| (a) Total Response |
|  |
| (b) Clockwise |
|  |
| (c) Counter Clockwise |
| **Figure 16. Step Response Validation** |

이 반응에서 나오는 주파수 성분을 FFT 분석을 해보았다.

|  |
| --- |
|  |
|  |
| **Figure 17. simulink of Gm (Step\_Response)** |

Fcn 블록에는 다음과 같은 코딩이 들어감. (이를 통해 데드존 설정)

**function y = fcn(u)**

**if u >= -0.1 && u <= 0.1**

**y = 0;**

**else**

**y = u;**

**end**

**end**

**5. 1st Controller (Designation)**

|  |
| --- |
|  |
| **Figure 17. Block Diagram (Designation Controller)** |

1. **Spec**

먼저 controller의 기본적인 틀은 Zero를 고려하지 않은 2차 표준 전달함수를 기준으로 설계가 진행된다.

Designation Contreller가 만족시켜야 할 기본 스펙은 다음과 같다.

이 조건들을표준 전달함수에서 와 의 범위를 정할 수 있으며 다음과 같다.

으로 가정한다.

정리하면 이상적인 2차 시스템에서는 다음과 같은 범위를 가진다.

**2) 제어기 선정 후 계수 생성**

제어기는 두가지 고려사항이 있다.

1. 극점 배치가 가능한가 ?

2. 설계 규격을 충족하는가 ?

1번의 관점에서 제어기를 선정해보려고 한다.

폐회로의 전달함수는 다음과 같다.

**여**기서 제어기의 구조에 따른 분모항()을 확인한다.

여기서의 모터의 전달함수는 다음과 같이 표현한다.

이를 고려하면 다음과 같다.

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| **Table 1. 제어기 선정** | | |
| 제어기 |  |  |
| P |  |  |
| PD |  |  |

보다 더 극점 배치를 자유롭게 할 수 있는 PD 제어기를 선정하였으며, 이 항들을 2차 표준 전달함수의 항들과 비교하여 와 를 구한다.

이를 flow chart로 표현하면 다음과 같다.

|  |
| --- |
| **도표, 기술 도면, 평면도, 라인이(가) 표시된 사진  AI 생성 콘텐츠는 정확하지 않을 수 있습니다.** |
| **Figure 0. Block Diagram (Designation PD Controller)** |

**이를 unit feedback system으로 만들기 위해** 와 를 과 로 변환하여 **Block Diagram의 형태를 바꾸어 준다.**

|  |
| --- |
|  |
| **Figure 0. Block Diagram (Designation PD Controller)** |

두 종류 계수는 다음과 같은 두 가지 관계를 활용하여 바꿔준다.

**1. 전개**

와 를 이용한 폐루프 전달함수는 아래와 같다.

와 를 이용한 폐루프 전달함수는 아래와 같다.

**이 두가지 식이 같다고 가정한다면 다음과 같은 관계를 가진다.   
(APPENDIX 참고)**

**2. 설계 조건과 관계를 이용한 유도.**

이렇게 최종적으로 같은 관계를 가진다.

|  |
| --- |
|  |
| **Figure 0. simulink of 1st Controller** |

**이렇게 나온 설계 요소와 계수의 값은 다음과 같다.**

**이렇게 해서 결정된 설계모델은 다음과 같다.**

|  |
| --- |
| **텍스트, 폰트, 화이트, 스크린샷이(가) 표시된 사진  AI 생성 콘텐츠는 정확하지 않을 수 있습니다.** |
| (a) Transfer Function |
|  |
| (b) Pole-zero map |
|  |
| (c) Bode Plot |
| Figure 0. Bodeplot |

|  |
| --- |
|  |
| 1. Bode Plot |
|  |
| (b) Nyquist Plot |
| **Figure 0. Margin** |

**Pole과 Zero는 다음과 같다.**

**대역폭은 다음과 같다. (1.5배가 이상적)**

**=**

**마진은 다음과 같다.**

**LPF 후**

**실험 결과는 다음과 같다.**

|  |
| --- |
|  |
| (a) Step Response |
| 텍스트, 스크린샷, 그래프, 라인이(가) 표시된 사진  AI 생성 콘텐츠는 정확하지 않을 수 있습니다. |
| (b) |
| **Figure 0. Result** |
|  |

**각 제어기만 고려했을 때 실험결과**

|  |
| --- |
| 텍스트, 그래프, 라인, 도표이(가) 표시된 사진  AI 생성 콘텐츠는 정확하지 않을 수 있습니다. |
| Figure 0. Only |

|  |
| --- |
| 텍스트, 스크린샷, 그래프, 폰트이(가) 표시된 사진  AI 생성 콘텐츠는 정확하지 않을 수 있습니다. |
| Figure 0. Only |

**LPF 적용 결과**

|  |
| --- |
|  |
| (a) Vg |
|  |
| (b) psig |
|  |
| (c) Vcmd |
| Figure 0. LPF |

**6. 2nd Controller (Stabilization)**

1. **spec**

이 또한 먼저controller는 2차 표준 전달함수를 기준으로 설계가 진행하였다.

Designation Contreller가 만족시켜야 할 기본 스펙은 다음과 같다.

이 조건들을표준 전달함수에서 와 의 범위를 정할 수 있으며 다음과 같다.

으로 가정한다.

이후 설정된 범위로 결정한 요소의 값들은 다음과 같다.

**2) 제어기 선정 후 계수 생성**

제어기는 두가지 고려사항이 있다.

1. 극점 배치가 가능한가 ?

2. 외란 상쇄 설계 규격 충족하는가 ?

두 관점에서 조금 더 생각해보려고 한다.

|  |
| --- |
|  |
| **Figure 0. Block Diagram (Stabilization Controller)** |

일 때, 외란()이 존재함에도 어떻게 를 유지할 수 있나?

먼저 Contorl Object는 다음과 같다.

1. Input Tracking ()

2. Disturbance rejection ()

이를 만족시키기 위해 사용되는 기본적인 용어들과 관계를 정의 내려보고자 한다.

이를 이 관계에 대입하면

이를 정리하면

이를 아래와 같이 정의한다.

Contorl Object에 의거하여 다음과 같은 목표를 가진다.

\*의 의미는 DC성분을 보겠다는 말이다. (Appendix 2번 참고)

또한 Disturbance rejection () 조건을 확인하기 위해 전달함수를 정의한다.

여기서는 다음과 같은 가정으로 구할 수 있다.

이를 정리하면 다음과 같은 식들을 유도할 수 있다.

이를 서로에 대입하면

이렇게 정리할 수 있으며 이를 통해 설계 조건을 만족 여부를 확인할 수 있다.

ㄴ

위에서 말한 두가지 기준으로 제어기 형태를 선정해보려 한다.

제어기 종류에 따른 형태는 다음과 같다.

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| Table 2. 제어기 종류 | | |
| 제어기 종류 |  |  |
| Ｐ |  |  |
| PD |  |  |
| PI |  |  |
| PID |  |  |

제어기의 종류에 따른 제어 루프 의 형태는 다음과 같다.

이는 아래와 같은 수식을 참고한다.

이를 정리하면 다음과 같다.

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| Table 3. 제어기 종류에 따른 폐루프 형태 | | |
| 제어기 종류 |  |  |
| Ｐ |  |  |
| PD |  |  |
| PI |  |  |
| PID |  |  |

이러한 형태를 따라 가지는 특성은 다음과 같다.

위에서 정의한 수식을 참고한다.

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
|  | | Table 4. 제어기 종류 | | |
| 제어기 종류 | Pole Placement 여부 | |  |  |
| Ｐ | O | |  |  |
| PD |  | |  |  |
| PI | O | |  |  |
| PID |  | |  |  |

Pole placement가 가능하면서 disturbance rejection이 가능한 제어기의 형태는 PI제어기로 선정하여 모델링을 진행한다.

**이렇게 해서 결정된 설계모델은 다음과 같다.**

**- Tracking**

|  |
| --- |
|  |
| (a) Transfer Function |
|  |
| (b) Pole-zero map |
|  |
| (c) Bode Plot |
| Figure 0. Bodeplot |

|  |
| --- |
|  |
| 1. Bode Plot |
|  |
| (b) Nyquist Plot |
| **Figure 0. Margin** |

**Pole과 Zero는 다음과 같다.**

**대역폭은 다음과 같다. (1.5배가 이상적)**

= 3.6319

**마진은 다음과 같다.**

**LPF 후**

**- Disturbance**

|  |
| --- |
|  |
| (a) Transfer Function |
|  |
| (b) Bode Plot |
| Figure 0. Bodeplot |

HPF 특성을 띈다.

**실험 결과는 다음과 같다.**

|  |
| --- |
|  |
| (a) |
|  |
| (b) |
|  |
| (d) *S* |
|  |
| (e) *S* |
| **Figure 0. Result** |

LPF 적용 후는 다음과 같다.

|  |
| --- |
|  |
| (a) |
|  |
| (b) |
|  |
| (d) *S* |
|  |
| (e) *S* |
| **Figure 0. Result** |

LPF 효과 보다는 linearization의 영향이 더 클 것이다.

- 안정성 테스트

시뮬레이션

|  |
| --- |
|  |
| Figure 0. Simulation |

Result

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| **Table** | | |
| at | **Theory** | **Simul** |
| Gain |  |  |

- 실제 테스트

|  |
| --- |
|  |
|  |
|  |
|  |
| **Figure 0. 유도과정** |

여기서 데이터 수정 실수

크기가 잘 못 들어갔다.

**7. Feedback**

**1. 설계 모델**

이론적을 기반으로 성능 구성. (설계와 수정 모두 이를 기반으로 이루어 짐)

설계 모델에서는2차 표준시스템으로 가정하여 설계한 이후, 추가적인 zero에 대한 고려를 한다.

설계 요건을 고려하여 Pole이 존재해야 할 수 있는 위치를 정한다.

**1.1 (Overshoot)**

|  |
| --- |
|  |
| Figure 0. Overshoot |

- 주요 수치

**1.2**  (**Rising Time) -**

|  |
| --- |
|  |
| Figure 0. Overshoot |

- 주요 수치

**1.3 Additional Zero**

|  |  |
| --- | --- |
|  |  |
| (a) designation | (b) stabilization |
| Figure 0. Additional Zero Effect | |

- 주요 수치

**1.4 Phase Margin**

|  |
| --- |
| 텍스트, 그래프, 라인, 도표이(가) 표시된 사진  AI 생성 콘텐츠는 정확하지 않을 수 있습니다. |
| Figure 0. Overshoot |

이런식으로 코드와 가능.

**2. 해석 모델**

시뮬레이션 툴을 이용하여 설계 모델을 기반으로 하여 최대한 실제와 비슷하게 구현.

이 결과를 바탕으로 설계 모델로 돌아가 다시 설계를 진행함.

|  |
| --- |
|  |
| Figure 0. Simulink of Designation |

|  |
| --- |
|  |
| Figure 0. Simulink of Stabilization |

여기서 잘못된 점은

1. Rate Translation 사용

2. LPF도 넣지 않음.

또한 실험에서 나온 Vcmd 값을 시뮬레이션 입력으로 넣어 출력 비교를 할 수 있다.

- 기어의 문제

중심 거리를 맞춰야 한다.

FFT활용

들어간 Vcmd에 비해 출력 증가 X. -> 기어 문제

출력 갑자기 올라감 -> 기어에 막혀있다가 풀림.

적분기에 오차 쌓임 문제로 이어짐.

|  |
| --- |
| 도표, 폰트, 텍스트, 화이트이(가) 표시된 사진  AI 생성 콘텐츠는 정확하지 않을 수 있습니다. |
| Figure 0. Simulink of Stabilization |

|  |
| --- |
| 도표, 폰트, 텍스트, 화이트이(가) 표시된 사진  AI 생성 콘텐츠는 정확하지 않을 수 있습니다. |
| Figure 0. Simulink of Stabilization |

**APPENDIX**

**1.**

|  |
| --- |
|  |
|  |
|  |
| **Figure 0. 유도과정** |

**2. FVT 정리**

|  |
| --- |
| 텍스트, 스크린샷, 소프트웨어, 컴퓨터 아이콘이(가) 표시된 사진  AI 생성 콘텐츠는 정확하지 않을 수 있습니다. |
| **Figure 0. 유도과정** |

**이거 때문에 Step Response에서는 S가 0일 때가 Gain임을 생각할 수 있다.**

**3. Zero 영향 정리**

|  |
| --- |
|  |
|  |
| **Figure 0. 유도과정** |

**4. LPF 구현 설명**

|  |
| --- |
| 텍스트, 그래프, 라인, 도표이(가) 표시된 사진  AI 생성 콘텐츠는 정확하지 않을 수 있습니다. |
| (a) |
| 텍스트, 그래프, 라인, 번호이(가) 표시된 사진  AI 생성 콘텐츠는 정확하지 않을 수 있습니다. |
| (b) |
| 텍스트, 그래프, 라인, 도표이(가) 표시된 사진  AI 생성 콘텐츠는 정확하지 않을 수 있습니다. |
| (d) *60 Hz* |
| **Figure 0. Result** |

**5. FFT 코드 정리**

**6. Nyquist**

**7. Bandwidth와 HPF**

|  |
| --- |
|  |
|  |
|  |
|  |
| **Figure 0. 유도과정** |

**8. 데이터 수정 코드**

**9. 전달함수에서 주파수 반응 뽑기 코드.**

**10. 대역폭과 자연 진동수**

**텍스트, 스크린샷, 폰트, 번호이(가) 표시된 사진

AI 생성 콘텐츠는 정확하지 않을 수 있습니다.**

**11. Zero effect 코드 정리.**