



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

공학석사 학위 논문

3축 매니퓰레이터의 반력 추정을 통한
센서리스 힘 제어에 관한 연구

A study on sensorless force control
through reaction force estimation of a
three-axis manipulator.

울산대학교 대학원
건설기계공학과
박 서 준

3축 매니플레이터의 반력 추정을 통한
센서리스 힘 제어에 관한 연구

지도교수 안경관

이 논문을 공학석사 학위 논문으로 제출함

2022년 2월

울산대학교 대학원
건설기계공학과
박서준

박서준의 공학석사 학위 논문을 인준함

심사위원 이 병 룡



심사위원 박 기 서



심사위원 안 경 관



울산대학교 대학원

2022년 02월

국문 요약

매니퓰레이터는 산업현장에서 근골격계질환 예방, 위험 지역 작업, 작업의 정밀성, 반복성 등 여러 이유로 인간을 도와 많은 작업에 사용되고 있으며 최근에는 작업환경 무인화에 대한 수요가 증가하면서 이에 관한 연구도 진행되고 있다.

매니퓰레이터는 작업의 목적과 환경에 따라 여러 가지 형태로 제작이 될 수 있고 센서가 부착될 수 있다. 공작물의 가공을 위해 일정한 힘을 가해줘야 하는 경우 목표치에 알맞은 힘을 공작물에 지속해서 가할 수 있도록 매니퓰레이터를 제어해야 하며 이는 공작물에 가해지는 힘을 잘 측정해야 제어성능이 보장된다는 것을 뜻한다. 작업부인 엔드-이펙터에 힘 센서를 장착하게 된다면 어태치먼트와의 호환성, 충격, 진동으로 인한 파손, 배선 문제 등이 생길 수 있고, 조인트마다 토크 센서를 장착하는 것은 가격에 있어 단점을 가진다.

따라서 본 논문에서는 조인트 변위 센서만을 이용해서 작업부에 가해지는 반력을 추정하기 위한 기법에 관해 연구하고 각 조인트에 필요한 토크를 계산하고 제어하기 위한 제어를 적절하게 선택해서 측정값 대비 추정 값을 이용한 제어의 성능을 비교하고 활용 가능성에 대해 검토해보고자 한다.

목차

1. 서론

- 1.1 연구 배경 및 선행 연구
- 1.2 본문의 구성

2. 시스템 모델링

- 2.1 매니플레이터 정기구학, 역기구학
 - 2.1.1 정기구학
 - 2.1.2 역기구학
- 2.2 경로설정
- 2.3 매니플레이터 모델링

3. 반력 추정기법

- 3.1 관측기 설계
- 3.2 관측기 게인 설정
- 3.3 추정값 보정/필터링

4. 매니플레이터 힘 제어기 설계

- 4.1 위치/힘 제어기
- 4.2 임피던스 제어 소개
- 4.3 임피던스 제어기 설계
- 4.4 안정도 분석
- 4.5 위치 제어기 설계

5. 결과 정리

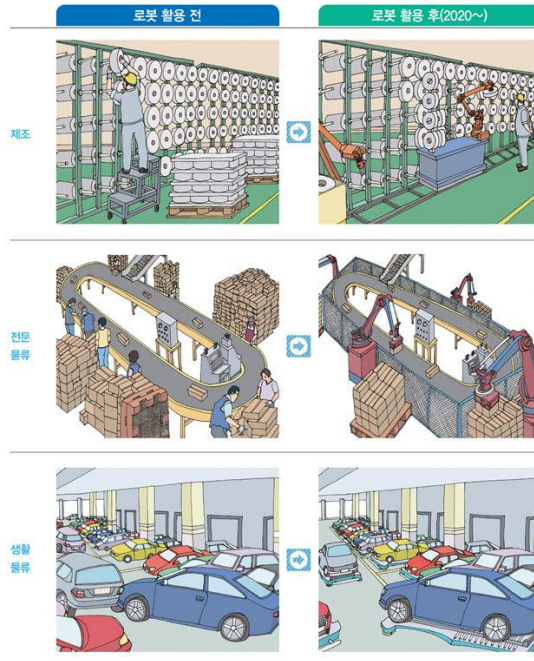
6. 참고자료

7. 영문요약

1.서론

1.1 연구 배경 및 선행 연구

매니플레이터는 인간처럼 관절, 즉 조인트가 존재하고 끝단을 통해 일정 작업이 가능한 장비를 뜻한다. 최근에 제조업, 물류업 등의 산업현장에서 많이 도입되고 있고, 인간을 도와 작업을 하면서 근로자의 근골격계질환 예방, 위험 지역에서의 산업재해 감소, 반복 작업의 효율성 및 정확성에서 큰 도움이 되고 있다.



많은 공정에서 인간 작업보다 매니플레이터가 작업 하는 것은 인간의 편의와 더불어 인간보다 지치지 않고 정확하게 일할 수 있기 때문이다. 이는 하드웨어 성능과 소프트웨어 성능 모두 필요하다. 작업 목표치를 달성할 수 있게 해주는 컨트롤러와 구동부 그리고 센서가 이에 해당한다. 인간의 경우 손으로 작업을 하고, 원하는 작업을 어깨, 팔꿈치, 손목의 운동으로 달성한다. 마찬가지로 매니플레이터가 끝단에서 원하는 작업을 하기 위해선 인간의 관절에 해당하는 조인트가 특정 각도, 토크를 가져야 한다. 인간은 관절의 각도와 부담되는 반력을 느낄 수 있지만 매니플레이터는 목적에 맞는 센서를 탑재해야 관절의 각도, 토크를 알 수 있다.



<로드셀, 토크 센서>

작업부인 엔드-이펙터에 힘 센서를 장착하게 된다면 어태치먼트와의 호환성, 충격, 진동으로 인한 파손, 배선 문제 등이 생길 수 있고, 조인트마다 토크 센서를 장착하는 것은 가격에 있어 단점을 가진다. 물론 고 정밀도가 요구되는 산업 또는 특수 목적의 로봇의 액추에이터는 가격에 비중을 두지 않고 고성능의 센서를 통한 제어성능을 보장하는 것이 좋다. 하지만 앞으로의 서비스 로봇의 상용화에 있어 높은 제어성능은 다소 우선순위가 떨어지고 센서의 선택으로 인한 가격의 상승은 넘어야 할 과제일 것이다.

매니플레이터 제어는 몇 가지가 선행되어야 한다. 작업 경로가 직교 공간(Cartesian Space) 혹은 조인트 공간(Joint Space)에서 정의가 되어야 한다. 이는 V.Kumar[1]가 기하학적 풀이법을 제안했고, Lucas와 Jonatas는[2] 기하학적 풀이법의 단점인 해의 다양성을 GA(Genetic Alorithm)와 ANN(Artificial Neural Network)을 이용했다.

또한, 매니플레이터 힘제어는 모션제어를 통해 힘 제어를 달성하는 Indirect Force Control 과 직접적인 힘 피드백을 통해 원하는 값으로 접촉력을 제어할 수 있는 Direct Force Control로 구분할 수 있다. Indirect Force Control에는 컴플라이언스 제어와 임피던스 제어 등이 속하고, Direct Force Control은 여러 제어법을 고려해 볼 수 있다. [6][7][8]

본 논문에서 사용하는 관측기를 통한 상태변수 추정에 관해서 많은 연구가 있었다. Jianyong Yao는 유압 로터리 액추에이터 시스템에서 각 변위를 센서를 이용해 유압 액추에이터의 압력과 모델링 되지 않은 외란을 확장 상태 관측기(Extended State Observer)를 통해 추정하는 연구를 통해 추정된 신호를 제어에 사용했다. [13]

또한, G. Sebastian가 앞서 말한 확장 상태 관측기를 이용해 엔드 이펙터의 접촉력을 추정했다. [4] 확장 상태 관측기를 통한 외력 추정은 특성상 계인 설정에 시스템 주파수를 고려하거나 안정도 분석에 있어 난이도가 있고 관측기 실제 측정 힘과 비교해보면 그 추정에 시간차가 생기는 결과가 있었다. 따라서 추정 값을 통한 제어를 한다면 다소 시간 지연이 생길 것으로 예상된다.

따라서 차수가 감소된 관측기를 통해 추정속도에 이점을 가지고 제어에 시간 지연이 적은 관측기를 사용해 제어성능을 보장하고자 한다.

1.2 본문의 구성

다음과 같은 내용으로 본 논문을 정리할 수 있다.

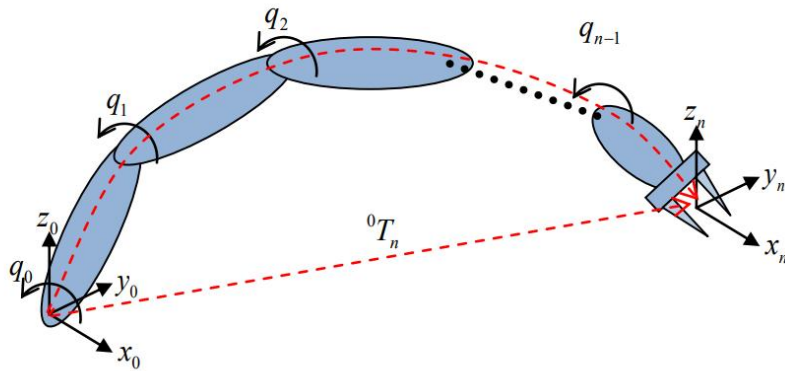
1. 매니플레이터의 작업 경로는 작업물의 직교(Cartesian) 좌표를 이용해 역기구학을 통해 구해 냈고, 기하학적 방법을 사용한다.
2. 매니플레이터 동역학은 라그랑지안 방법을 사용해서 구했고, 파라미터 불확실성이 존재할 수 있다.
3. 관측기를 사용해 상태변수를 추정하고, 반력 또한 추정한 상태변수와 관측기 계인과의 조합을 통해 추정하고 관측기가 수렴함을 증명한다.
4. 매니플레이터 동역학을 통해 임피던스 제어기와 임피던스 제어를 통해 도출 한 위치 지령 값을 제어할 위치 제어를 설계하고, 안정성을 검증한다.
5. 추정치를 고주파 필터링이 된 값과 필터링 되지 않은 값을 각각 제어기에 적용해 보고 응답을 비교해 성능 차이를 비교하고 개선 방안에 대해 검토한다.

2. 시스템 모델링

2.1 매니플레이터 정기구학, 역기구학

2.1.1 정기구학

정기구학(Forward Kinematics)은 각 관절의 각도를 통해 원점 기준 매니플레이터의 끝단의 직교좌표를 얻을 수 있는 변환 방식이다. Homogeneous Transform을 이용하여 정기구학의 해를 구하게 된다.



직교 좌표 공간상의 한 점의 위치 P 는 $P = [x, y, z, w]^T$ 로 나타낼 수 있고, w 는 크기 계수를 뜻한다. 엔드-이펙터의 위치를 P_e 라고 하고 원점을 P_o 라고 하면 P_e 와 P_o 사이에는 다음과 같은 관계가 있다.

$$P_e = T_0^n P_o \quad (1)$$

T_0^n 은 조인트 간의 변환 행렬을 뜻한다.

$$T_0^n = T_0^1 \times T_1^2 \times T_2^3 \times \dots \times T_{n-1}^n$$

변환 행렬 T 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$T = \begin{bmatrix} R & P \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad R = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix}, \quad P = \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \\ \Delta z \\ w \end{bmatrix} \quad R \text{은 } Z \text{축 회전 기준으로}$$

$$R = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & -\sin(\theta) & 0 \\ \sin(\theta) & \cos(\theta) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

본 논문의 매니플레이터는 Z축 회전 조인트 3개를 가진 평면 로봇이므로 엔드 이펙터의 좌표는 다음과 같다.

$$P_e = \begin{bmatrix} \cos(\theta_1) - \sin(\theta_1) & 0 & L_1 \cos(\theta_1) \\ \sin(\theta_1) & \cos(\theta_1) & L_1 \sin(\theta_1) \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \cos(\theta_2) - \sin(\theta_2) & 0 & L_2 \cos(\theta_2) \\ \sin(\theta_2) & \cos(\theta_2) & 0 & L_2 \sin(\theta_2) \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$\times \begin{bmatrix} \cos(\theta_3) - \sin(\theta_3) & 0 & L_3 \cos(\theta_3) \\ \sin(\theta_3) & \cos(\theta_3) & 0 & L_3 \sin(\theta_3) \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_1 c_1 + L_2 c_{12} + L_3 c_{123} \\ L_1 s_1 \end{bmatrix}$$

L_1, L_2, L_3 는 각각 링크의 길이를 의미한다.

2.1.2 역기구학

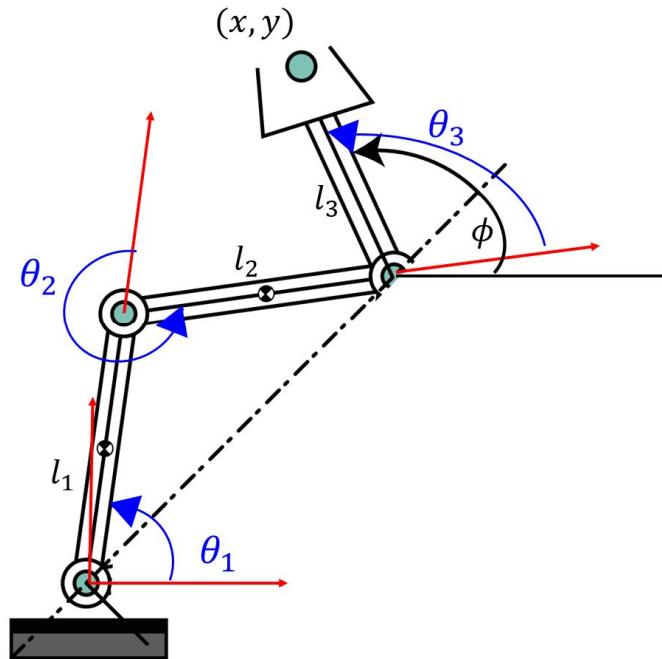
역기구학은 정기구학과 반대로 엔드 이펙터의 위치가 주어졌을 때 관절 각도를 구하는 방법이다. 본 논문에서는 기하학적인 방법을 사용했다. 하지만 기하학적인 방법은 엔드 이펙터의 위치에 대해 다수의 해가 나온다는 단점이 있다 따라서 관절을 각도를 제한하고 Matlab의 Robotics Tool box를 통해 역기구학을 이용한 엔드 이펙터 경로에 대해 검증하는 식으로 경로를 설정 했다.

위의 정기구학 절에서 엔드 이펙터의 직교 좌표를 관절 각도를 통해 나타냈다.

$$X_e = L_1 c_1 + L_2 c_{12} + L_3 c_{123} \quad (3)$$

$$Y_e = L_1 s_1 + L_2 s_{12} + L_3 s_{123}$$

$$\phi = \theta_1 + \theta_2 + \theta_3$$



<매니플레이터 간략도>

각 조인트 각도는 위의 그림과 같고 X', Y' 을 (3)에 대입하면 θ_3 를 제거할 수 있고, 우변이 아직은 알 수 없는 θ_1, θ_2 에 관한 식으로 남는다. ϕ 는 링크 3가 지면과 이루는 각으로 알고 있는 각이다. 남아 있는 좌변을 $X' = X_e - l_3 \cos \phi, Y' = Y_e - l_3 \sin \phi$ 로 치환하고 양변을 제곱한 후

두 식을 더하면 다음과 같은 식을 얻을 수 있다.

$$(-2L_1X')c_1 + (-2L_1Y')s_1 + (X'^2 + Y'^2 + L_1^2 - L_2^2) = 0 \quad (4)$$

이는 다음과 같은 형태의 식이다.

$$P\cos\alpha + Q\sin\alpha + R = 0 \quad (5)$$

γ 를 다음과 같이 정의한다.

$$\cos\gamma = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2}}, \quad \sin\gamma = \frac{Q}{\sqrt{P^2 + Q^2}}, \quad \gamma = \text{atan2}\left|\frac{Q}{\sqrt{P^2 + Q^2}}, \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2}}\right|$$

(5)를 다음과 같이 쓰면

$$\cos\gamma\cos\alpha + \sin\gamma\sin\alpha + \frac{R}{\sqrt{P^2 + Q^2}} = 0 \rightarrow \cos(\alpha - \gamma) = \frac{-R}{\sqrt{P^2 + Q^2}} \quad (6)$$

$$\alpha = \gamma + \sigma\cos^{-1}\left(\frac{-R}{\sqrt{P^2 + Q^2}}\right), \quad \sigma = \pm 1 \quad (7)$$

$$\theta_1 = \gamma + \sigma\cos^{-1}\left(\frac{-(X'^2 + Y'^2 + L_1^2 - L_2^2)}{2L_1\sqrt{X'^2 + Y'^2}}\right) \quad (8)$$

$$\gamma = \text{atan2}\left(\frac{-Y'}{\sqrt{X'^2 + Y'^2}}, \frac{-X'}{\sqrt{X'^2 + Y'^2}}\right) \quad (9)$$

$$c_{12} = \frac{X' - L_1c_1}{L_2} \quad (10)$$

$$s_{12} = \frac{Y' - L_1s_1}{L_2}$$

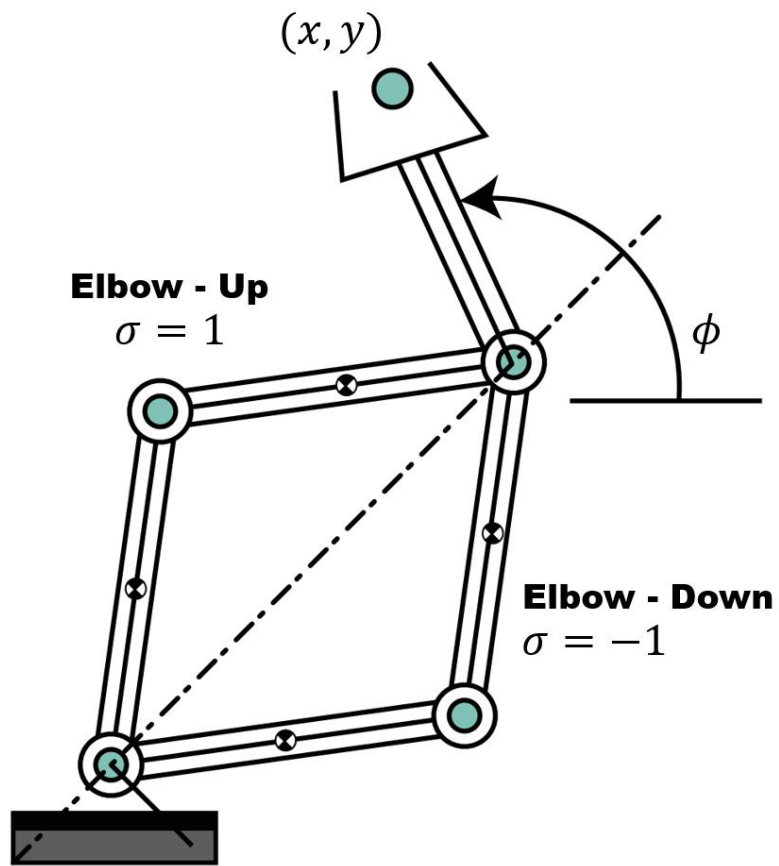
$$\theta_2 = \text{atan2}\left(\frac{Y' - L_1s_1}{L_2}, \frac{X' - L_1c_1}{L_2}\right) - \theta_1 \quad (11)$$

$$\theta_3 = \phi - (\theta_1 + \theta_2) \quad (12)$$

<매니플레이터 자세 결정 인자>

$\sigma = \pm 1$ 은 Elbow-up&down을 의미한다.

(시그마)에 양의 값을 주면 매니플레이터가 Elbow-up 상태로 목표 위치에 도달하려 할 것이고, 음의 값을 주면 down 형태로 목표에 도달하려 한다.



2.2 경로설정

<매니플레이터가 벽을 긁는 경로>

이번에 사용될 경로는 위 그림과 같이 매니플레이터가 수직 방향으로 일정한 힘을 유지하면서 아래 방향으로 긁으면서 내려오는 경로로 설정했다.

이 경우 수직력을 유지하는 것뿐만 아니라 마찰력이 발생하므로 제어에 있어서 큰 영향을 미치는 요소가 될 수 있다.

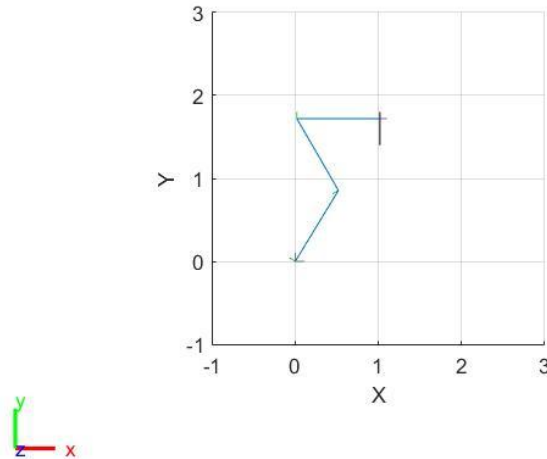
특정 위치에 도달하기 위해 3자유도가 존재하므로 거의 위치 대부분에 도달할 수 있다.

하지만 특이점과 다중 해를 피하기 위해서 조인트 각도를 제한하였으므로 도달 가능성에 대해 시뮬레이션을 통해 검증한 후 적용할 필요가 있다.

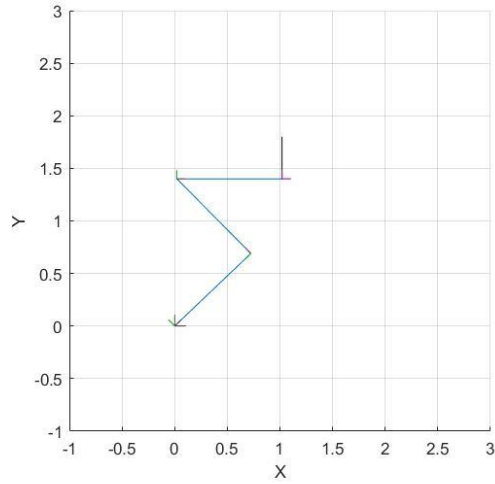
경로 검증은 Matlab의 Robotics Tool Box를 통해 검증했다.

매니플레이터 자세 중 ELBOW UP 자세를 통해 작업을 수행하게 되며, 환경의 위치 $X = 0.99\text{m}$ 에 대해 그 뒤의 위치에 도달하도록 초기 설정 값을 잡는다. Y 경로는 $1.8\text{m} \sim 1.2\text{m}$ 까지 긁어내는 경로를 가진다.

항목	초기 위치	경로
환경 위치	0.99m	X
X direction	0.95m	$0.95 \rightarrow x_{d_0}$
Y direction	1.8m	$1.8\text{m} \rightarrow 1.2\text{m}$

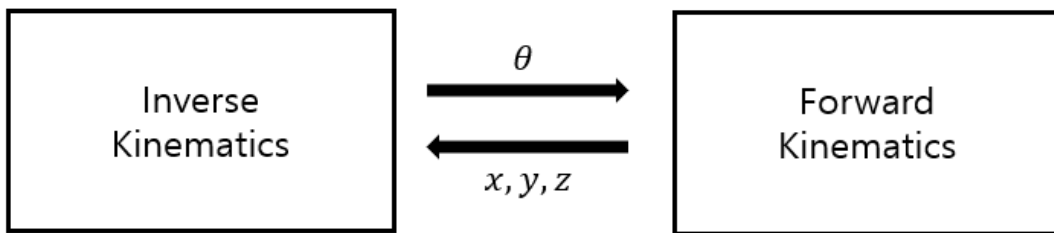


<초기 위치>



<나중 위치>

이와 같이 제한된 조인트 조건에서 벽을 끊으면서 내려오는 동작이 가능한지 시뮬레이션을 통해 검증했고 정해진 궤적을 필요에 따라 기구학을 이용해서 좌표계를 변환시켜 사용한다.



<좌표계 변환>

2.3 매니플레이터 모델링

매니플레이터의 동역학 방정식은 오일러-라그랑지안 방정식을 통해 도출한다. 라그랑지안 방정식은 운동에너지와 포텐셜 에너지의 차이를 나타낸다. 오일러-라그랑지안 방정식은 시스템의 일과 에너지에 근거해서 나타낸 방정식으로 라그랑지안 방정식 L로부터 구한다. 일반적인 식은 아래와 같은 미분 방정식의 형태로 표현된다.

$$\frac{d}{dt} \left[\frac{\partial L}{\partial \dot{\theta}_i} \right] - \frac{\partial L}{\partial \theta_i} = \tau_i \quad (13)$$

여기서 L : 라그랑지안 함수 = 운동에너지 K - 포텐셜 에너지 $P \rightarrow L = \sum_1^i (K_i - P_i)$,

$\theta_i, \dot{\theta}_i$ 은 각각 조인트의 각 변위와 각 속도, τ_i 는 i 번째 링크를 움직이기 위한 조인트 토크를 뜻한다. 오일러-라그랑지안 방정식을 풀어내면 다음과 같은 일반적인 동역학 식으로 정리할 수 있다.

$$M(\theta)\ddot{\theta} + C(\theta, \dot{\theta})\dot{\theta} + G(\theta) = \tau \quad (14)$$

M 은 관성 행렬 C 는 원심력과 코리올리스 힘 그리고 G 는 중력을 뜻한다. 오일러-라그랑지안 방정식으로 본 논문의 매니플레이터의 M, C, G 를 구하면 다음과 같다.

$$M_0 = \begin{bmatrix} m_1 l_1^2 + m_2 (L_1^2 + l_2^2) + m_3 (L_1^2 + L_2^2 + l_3^2), & \frac{1}{2} m_2 l_2^2 + \frac{1}{2} m_3 (L_2^2 + l_3^2), & \frac{1}{2} m_3 l_3^2 \\ \frac{1}{2} m_2 l_2^2 + \frac{1}{2} m_3 (L_2^2 + l_3^2), & m_2 l_2^2 + m_3 (L_2^2 + l_3^2), & \frac{1}{2} m_3 l_3^2 \\ \frac{1}{2} m_3 l_3^2, & \frac{1}{2} m_3 l_3^2, & m_3 l_3^2 \end{bmatrix} \quad (15)$$

$$\Delta M = \begin{bmatrix} m_2 L_1 l_2 c_2 + m_3 (L_1 L_2 c_2 + L_2 l_3 c_3 + L_1 l_3 c_{23}), & \frac{1}{2} m_2 L_1 l_2 c_2 + m_3 (\frac{1}{2} L_1 L_2 c_2 + L_2 l_3 c_3 + \frac{1}{2} L_1 l_3 c_{23}), & \frac{1}{2} m_3 (L_2 l_3 c_3 + L_1 l_3 c_{23}) \\ \frac{1}{2} m_2 L_1 l_2 c_2 + m_3 (\frac{1}{2} L_1 L_2 c_2 + L_2 l_3 c_3 + \frac{1}{2} L_1 l_3 c_{23}), & m_3 L_2 l_3 c_3, & \frac{1}{2} m_3 L_2 l_3 c_3 \\ \frac{1}{2} m_3 (L_2 l_3 c_3) & & \end{bmatrix}$$

(16)

$$M = M_0 + \Delta M$$

관성 모멘트 행렬은 시불변인 파트와 시변 파트가 동시에 존재 한다는 것을 알 수 있다.

관성 행렬을 보면 $M = M^T$ 로 대칭인 것을 알 수 있다.

$$C(\theta, \dot{\theta}) = \begin{bmatrix} -m_2 (L_1 l_1 \dot{\theta}_2 s_2) - \frac{1}{2} m_3 (2L_1 L_2 \dot{\theta}_2 s_2 + 2L_2 l_3 \dot{\theta}_3 s_3), & -\frac{1}{2} m_2 (L_1 l_2 \dot{\theta}_2 s_2) - \frac{1}{2} m_3 (L_1 L_2 \dot{\theta}_2 s_2 + 2L_2 l_3 \dot{\theta}_3 s_3 + 2L_1 l_3 \dot{\theta}_1 s_{23} + L_1 l_3 (\dot{\theta}_2 + 2\dot{\theta}_3) s_{23}), & -\frac{1}{2} m_3 (L_2 l_3 \dot{\theta}_3 s_3 + 3L_1 l_3 \dot{\theta}_3 s_{23}) \\ \frac{1}{2} m_2 L_1 l_2 \dot{\theta}_1 s_2 + \frac{1}{2} m_3 L_1 l_1 \dot{\theta}_1 s_2, & & \end{bmatrix}$$

(17)

$$G(\theta) = \begin{bmatrix} m_1 g l_1 c_1 + m_2 g (L_1 c_1 + l_2 c_{12}) + m_3 g (L_1 c_1 + L_2 c_{12} + l_3 c_{123}) \\ m_2 g l_2 c_{12} + m_3 g (L_2 c_{12} + l_3 c_{123}) \\ m_3 g l_3 c_{123} \end{bmatrix} \quad (18)$$

여기서 m_i 는 링크의 질량, $l_i = 0.5L_i$ 무게 중심까지의 길이 링크의 무게 중심이 중앙에 있다고 가정하고 계산했다.

파라미터	값	파라미터	값	파라미터	값
L_1	1m	θ_1	0~90 degree	m_1	3kg
L_2	1m	θ_2	-90~90 degree	m_2	3kg
L_3	1m	θ_3	-120~120 degree	m_3	3.5kg

<매니플레이터 파라미터>

3. 반력 추정기법

3.1 관측기 설계

위의 매니플레이터 동역학 식에서 외부 힘에 대한 항을 추가한다.

$$M(\theta)\ddot{\theta} + C(\theta, \dot{\theta})\dot{\theta} + G(\theta) = \tau - J^T(\theta)F \quad \text{where } F > 0 \quad (19)$$

F 는 환경과의 접촉 시 발생하는 반력이며 X 방향과 Y 방향의 힘으로 구성된다.

$$F = \begin{bmatrix} F_x \\ F_y \end{bmatrix} \quad (20)$$

J 는 자코비안으로 토크와 힘은 다음과 같은 관계를 가진다.

$$\tau = J^T(\theta)F \quad (21)$$

$$J = \begin{bmatrix} \frac{\partial X}{\partial \theta_1} & \frac{\partial X}{\partial \theta_2} & \frac{\partial X}{\partial \theta_3} \\ \frac{\partial Y}{\partial \theta_1} & \frac{\partial Y}{\partial \theta_2} & \frac{\partial Y}{\partial \theta_3} \\ \frac{\partial \theta_1}{\partial \theta_1} & \frac{\partial \theta_2}{\partial \theta_2} & \frac{\partial \theta_3}{\partial \theta_3} \end{bmatrix} \quad (22)$$

편의상 상태변수 $[x_1, x_2]^T = [\theta, \dot{\theta}]^T$ 으로 나타내면 식 (19)을 다음과 같이 적을 수 있다.

$$\dot{x}_1 = x_2 \quad (23)$$

$$\dot{x}_2 = M^{-1}(x_1)[-C(x_1, \dot{x}_1)\dot{x}_1 - G(x_1) + \tau - J^T(x_1)F] \quad (24)$$

위의 동역학식을 묘사해서 환경과 접촉력이 고려되지 않은 관측기를 설계한다. 조인트 각도만 측정할 수 있다 가정한다.

$$\dot{\hat{x}}_1 = \hat{x}_2 + K_1 \tilde{x}_1 \quad (25)$$

$$\dot{\hat{x}}_2 = M^{-1}(x_1)[-C(x_1, \hat{x}_1)\hat{x}_1 - G(x_1) + \tau + K_2 \tilde{x}_1] \quad (26)$$

$$\tilde{x}_1 = x_1 - \hat{x}_1 = \theta - \hat{x}_1 \quad (27)$$

K_1, K_2 는 양 한정 계인 행렬이고, (23),(24),(25),(26)을 이용해 추정 오차 방정식을 얻을 수 있다.

$$\dot{\tilde{x}}_1 = \tilde{x}_2 - K_1 \tilde{x}_1 \quad (28)$$

$$\dot{\tilde{x}}_2 = M^{-1}(x_1)[-C(x_1, \dot{x}_1)\dot{x}_1 + C(x_1, \hat{x}_1)\hat{x}_1 - J^T(x_1)F - K_2 \tilde{x}_1] \quad (29)$$

식을 미분하고 대입하는 식으로 차수를 낮추는 방법을 통해 다음과 같은 장점을 갖는다. 현재 확실하게 측정 가능한 위치 정보를 활용하기 위해 간단한 식 변환을 통해 위치만의 함수로 변형시킬 수 있다.

(28)과 (29)를 미분하고, (28)에 (29)를 대입하면 다음과 같은 결과를 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} \ddot{\tilde{x}}_1 &= \dot{\tilde{x}}_2 - K_1 \dot{\tilde{x}}_1 \\ &= M^{-1}(x_1)[-C(x_1, \dot{x}_1)\dot{x}_1 + C(x_1, \dot{\tilde{x}}_1)\dot{\tilde{x}}_1 - J^T(x_1)F - K_2 \tilde{x}_1] - K_1 \dot{\tilde{x}}_1 \end{aligned} \quad (30)$$

(30)을 다음과 같이 2차 미분방정식의 형태로 정리할 수 있다.

$$A_1 \ddot{\tilde{x}}_1 + A_2 \dot{\tilde{x}}_1 + A_3 \tilde{x}_1 = J^T(x_1)F \quad (31)$$

$$A_1 = M, \quad A_2 = +C(x_1, \dot{x}_1) - C(x_1, \dot{\tilde{x}}_1) + MK_1, \quad A_3 = K_2 \quad (32)$$

각 계수가 비선형성을 띠고 있지만, 모두 물리적으로 유계 되어있고, 수렴하는 값이므로 정상 상태에 언젠가 도달한다고 할 수 있다.

따라서 위의 방정식에서 오차가 정상상태에 도달한다면 (31)은 다음과 같이 반력을 추정할 수 있다.

$$\hat{F} = J^{T^{-1}} A_3 \tilde{x}_1 \quad (33)$$

3.2 관측기 게인 설정

위 절에서 알 수 있듯이 반력은 오차가 빠르게 수렴할수록 추정 값이 확실해진다.

이는 관측기 게인 K_1 과 K_2 를 튜닝해서 조절할 수 있다. 오차의 방정식을 라플라스 변환을 통해 전달함수로 표현하면 피드백된 페루프 함수의 방정식 형태를 띠므로 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\frac{E(S)}{F(S)} = \frac{1}{\Lambda_1 S^2 + \Lambda_2 S + \Lambda_3} = \frac{1}{MS^2 + (C(x_1, \dot{x}_1) - C(x_1, \hat{x}_1) + MK_1)S + K_2} \quad (34)$$

(34)을 다음과 같이 정리하고 관성 행렬 M 이 물리적으로 0이 아니고 유계라고 가정하면 다음과 같이 표현할 수 있다. M 은 행렬이지만 편의상 역행렬이 아닌 나눗셈으로 표현하였다.

$$\frac{E(S)}{F(S)} = \frac{1/M}{S^2 + \left(\frac{C(x_1, \dot{x}_1) - C(x_1, \hat{x}_1)}{M} + K_1\right)S + \frac{K_2}{M}} \quad (35)$$

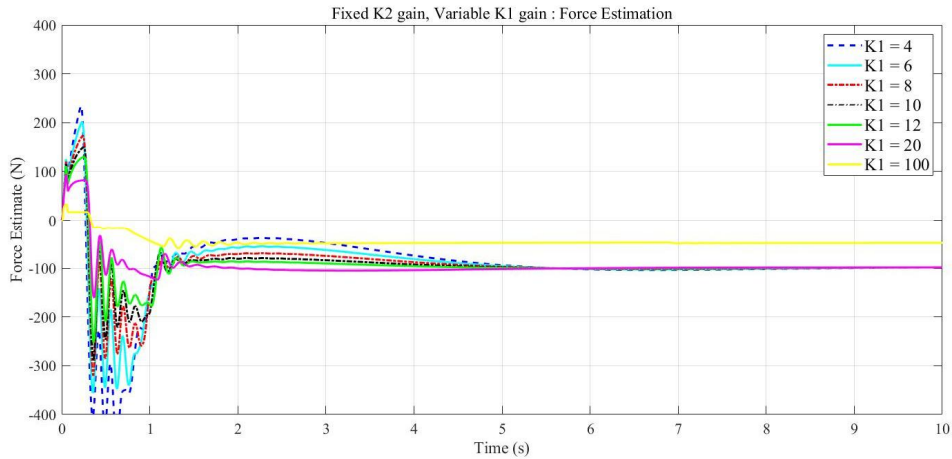
일반적인 2차 페루프 전달함수의 형태로 변형할 수 있다. M, C 행렬이 비선형성으로써 남아 있지만 관측기 게인 K_1 과 K_2 를 충분히 크게 선정한다면 비선형성의 영향은 매우 적어진다고 할 수 있다.

$$\frac{C(x_1, \dot{x}_1) - C(x_1, \hat{x}_1)}{M} \ll K_1 \quad (36)$$

일반적인 페루프 전달함수와 마찬가지로 K_1 이 비선형 행렬보다 충분히 크다면 오차 시스템의 감쇠력으로 작용해 추정 시 과도응답을 줄여줄 것이고, K_2 가 충분히 크다면 시스템의 응답성을 증가시키므로 빠르게 오차가 수렴하는 데 영향을 끼친다.

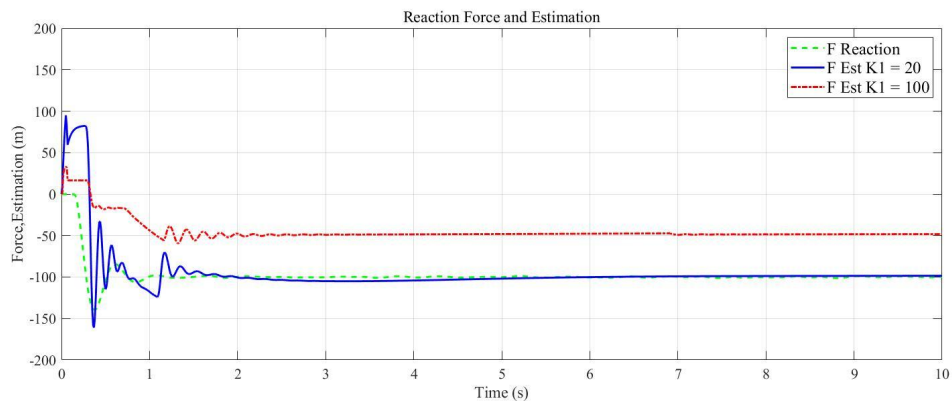
이는 다음과 같은 결과로 확인할 수 있다. 관측기 게인을 변화하면서 결과를 측정하면 K_2 는 추정 정확도 및 수렴 속도에 영향을 줬고, K_1 은 과도응답을 줄여주는 것을 확인할 수 있다.

아래의 그래프는 K_2 게인 값을 어떤 임의의 값으로 고정하고 K_1 게인을 몇 개의 값으로 변화시키며 힘을 추종한 결과이다.



<K1 게인 영향 분석을 위한 그래프>

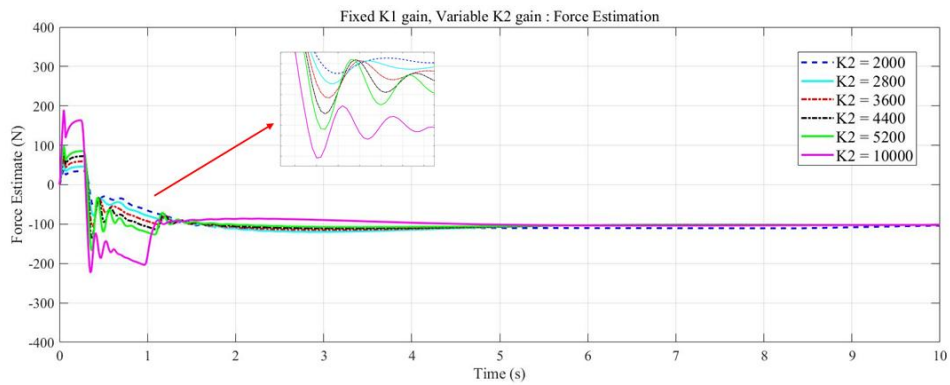
관측기 게인을 변화하면서 결과를 측정하면 K_1 은 과도응답을 줄여주는 것을 확인할 수 있다. 감쇠와 비슷한 역할을 하는 K_1 게인을 높게 설정하면 과도응답 및 오실레이션을 감소시키는 것은 추종에 좋은 영향을 주나 너무 높은 값은 실제 환경에서 작용하는 힘과 추정 값이 정상상태 오차가 생기게 하는 결과를 확인할 수 있었다.



<K1 게인 영향 분석을 위한 그래프 2>

추종 값이 반력 값에 도달하는 개인 중 결과 값이 가장 좋은 $K_1 = 20$ 과 과도하게 높게 설정해 정상상태 오차가 생긴 $K_1 = 100$ 과 접촉면에서의 반력을 비교했다.

추정 메커니즘 상 위치 추정 오차와 게인과의 곱을 통해서 반력을 추정해 내므로 초기 값 문제가 존재하고 정상상태에서 추정이 잘 이루어지는데 목표를 뒀고 수렴에 목표를 뒀기 때문에 수렴전의 거동은 잘 알지 못하고, 그동안의 오실레이션 문제가 있는 것을 확인할 수 있다.



그래프()와 반대로 K_1 계인을 고정하고 K_2 계인을 변화시키면서 얻은 결과다,

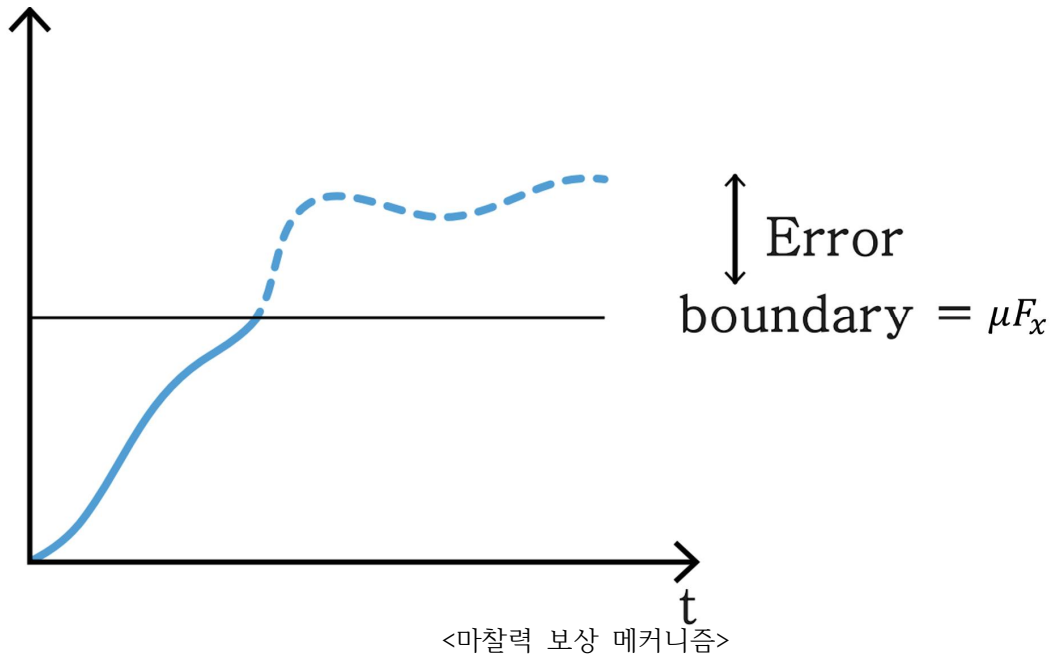
<K2 계인 영향 분석을 위한 그래프>

관측기 계인을 변화하면서 결과를 측정하면 K_2 는 추정 정확도 및 수렴 속도에 영향을 줬다, 하지만 계인 값을 높이면 정상상태 전까지 오실레이션의 크기가 커지기 때문에 과도하게 높게 설정하는 것은 오히려 추종 성능에 악영향을 끼치게 된다. 이는 추정 값 결과만을 판단하는 이번 절보다 실제 추정 값을 피드백 받아 제어하는 다음 절에서 더 크게 나타난다.

3.3 추정 값 보정, 필터링

선정한 궤도의 특성상 환경과 수직 방향의 작용력과 수평 방향의 마찰력 두 가지의 힘이 결합되어 추정이 된다. 이는 과하게 추정됐다고 판단된 마찰력에 대해서 별도의 보정을 해주지 않으면 다소 추정 능력에 악영향을 끼치게 된다. 따라서 사전의 물리적인 지식을 통해 선정한 유계값 이상의 오차를 보정해 주는 과정을 거쳐 추정 정확도를 높여준다.

오차는 다음과 같은 메커니즘으로 보정된다.



$$Error = F_y - Sat(F_y) \quad (37)$$

마찰은 작업 속도가 느리고, 미끄럼이 없다고 가정했을 때 수직 하중과 마찰계수의 곱인 정적 마찰로만 정의했다.

$f = \mu F_x$ 로 가정하고 포화함수 값을 다음과 같이 정해놓고 실시한다.

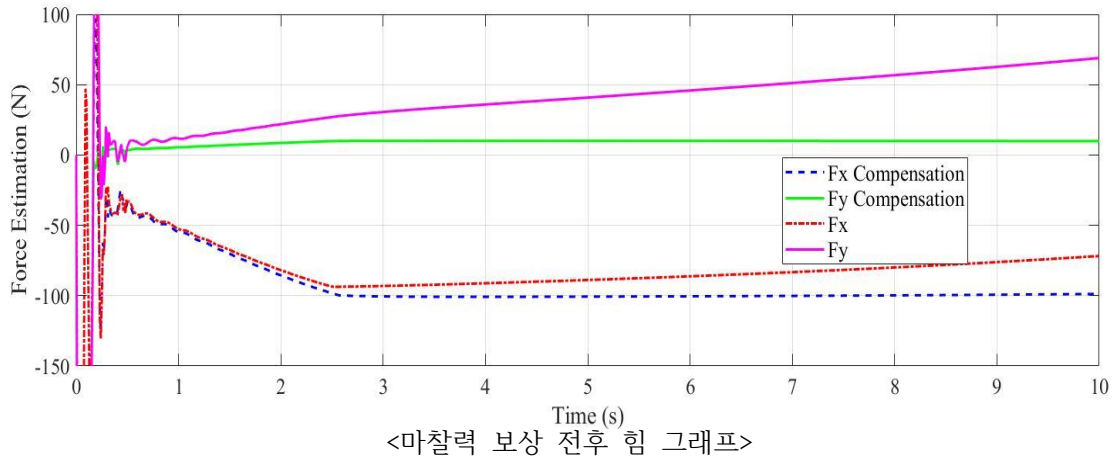
$$Sat(F_y) = \begin{cases} \mu F_x & \text{if } |F_y| > f_{\max} \\ 0 & \text{if } |F_y| < f_{\max} \end{cases} \quad (38)$$

일반적으로 마찰력이 작용면에 가해지는 하중에 비례해서 정해진다는 것을 이용해 접촉 표면에 따라 일반적으로 정해진 마찰계수를 곱해서 벽을 긁도록 정해진 경로에서 유계값 이상의 오 추정된 값을 수직력에 보정 해줘서 정확도를 높일 수 있다.

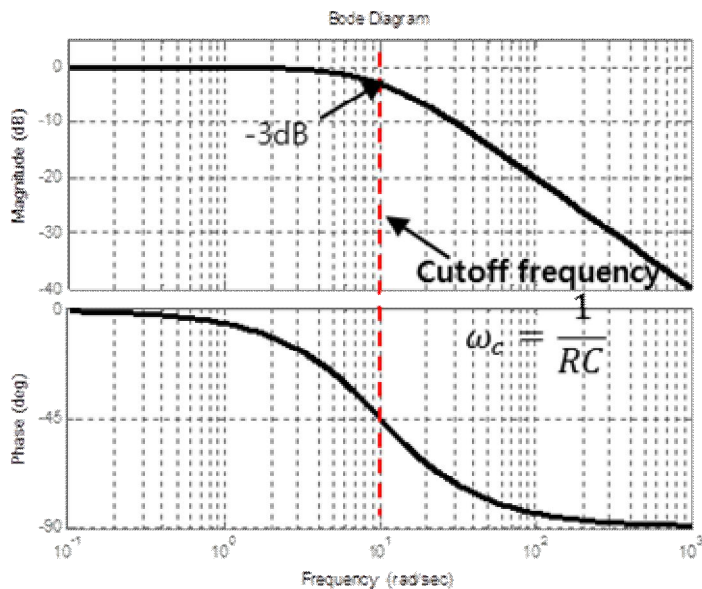
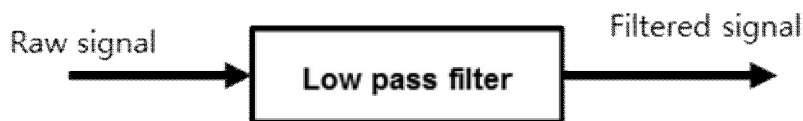
다음과 같이 간단한 식으로 수직력과 마찰력을 보정해 준다.

$$\hat{F}(t+t_s) = \hat{F}(t) - \begin{bmatrix} k_x \\ k_y \end{bmatrix} Error(t) \quad (39)$$

보정 전과 후를 비교하면 추정된 수직 방향의 작용력이 실제 측정되는 작용력과의 오차가 작아진 결과를 확인할 수 있다.



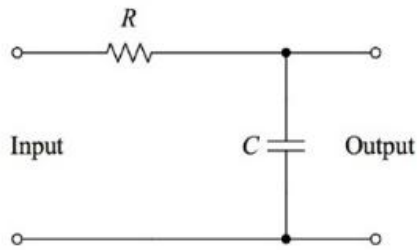
Low Pass Filter



$$H(s) = \frac{V_o(s)}{V_i(s)} = \frac{1/\tau}{s + 1/\tau} = \frac{1/RC}{s + 1/RC} = \frac{\omega_c}{s + \omega_c} \quad (40)$$

여기서 ω_c 는 cut-off 주파수로써 초과 된 주파수를 가진 신호는 통과하지 못한다.

이식은 1차 LPF 회로에서 도출된 것이다.



<LPF RC 회로>

키르히호프 전압 법칙에 따라

$$Ri(t) + v_o(t) = v_i(t) \quad (41)$$

$$RC \frac{dv_o(t)}{dt} + v_o(t) = v_i(t)$$

라플라스 변환을 통해 주파수 영역으로 변환하면 다음과 같고, 이를 이용해 전달함수를 구하면 다음과 같다.

$$(RCs + 1)V_o(S) = V_i(S) \quad (42)$$

$$H(s) = \frac{V_o(S)}{V_i(S)} = \frac{1}{RCs + 1} = \frac{1/RC}{s + 1/RC} = \frac{\tau}{s + \tau} = \frac{\omega_c}{s + \omega_c} \quad (43)$$

4. 매니플레이터 힘 제어기 설계

4.1 위치/힘 제어

힘 제어를 이해하기 위해 산업용 로봇의 기본적인 제어 방식을 상기시켜보면, 산업용 로봇은 기본적으로 위치를 제어한다. 그런데, 위치가 아닌 힘(force)이 제어 대상이 될 경우, 힘 제어(force control)라 한다.

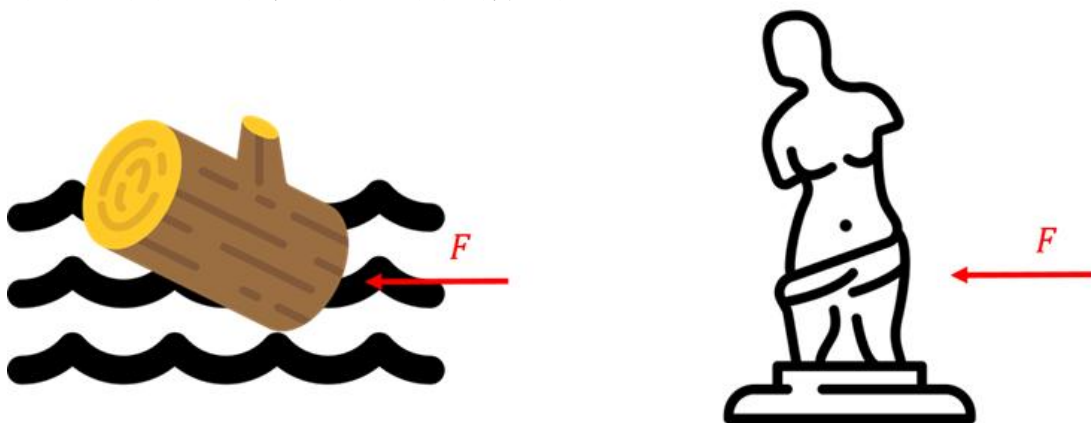
하지만, 힘제어는 독립적인 것이 아닌 위치 제어 문제를 동반하게 된다. 이는 접촉력이 위치에 민감하게 반응하기 때문이다. 목표 힘이 달성되기 위해 위치는 강성에 따라 달라질 수 있기 때문이다. 이러한 성질로 인해 힘 제어는 순응 모드(compliance mode)라고도 부른다.

힘 제어의 순응 특성은 외부의 힘을 받아들여야 하는 경우에 유용하다. 일반적으로 위치 제어 독립적으로 사용할 경우 환경에 의해 외력이 가해지더라도 장애물 넘어 목표 위치에 도달하기 위해 외부 힘을 역지로 견디려 할 것이다. 위치 제어는 말 그대로 정해진 위치를 반복해서 움직이는 방법으로, 접촉력이 얼마가 되었는지에 대해서는 전혀 관심이 없다. 이로 인해 기구가 손상되거나 위치 편차 등의 에러가 발생할 수 있다. 힘 제어 모드를 사용할 경우, 외력에 순응하여 로봇이 움직일 것이기 때문에 기구 손상이나 위치 에러 등과 같은 문제를 피할 수 있을 것이다.

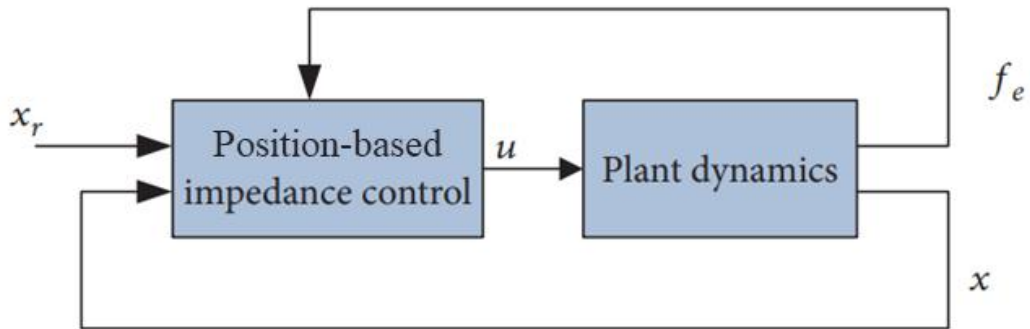
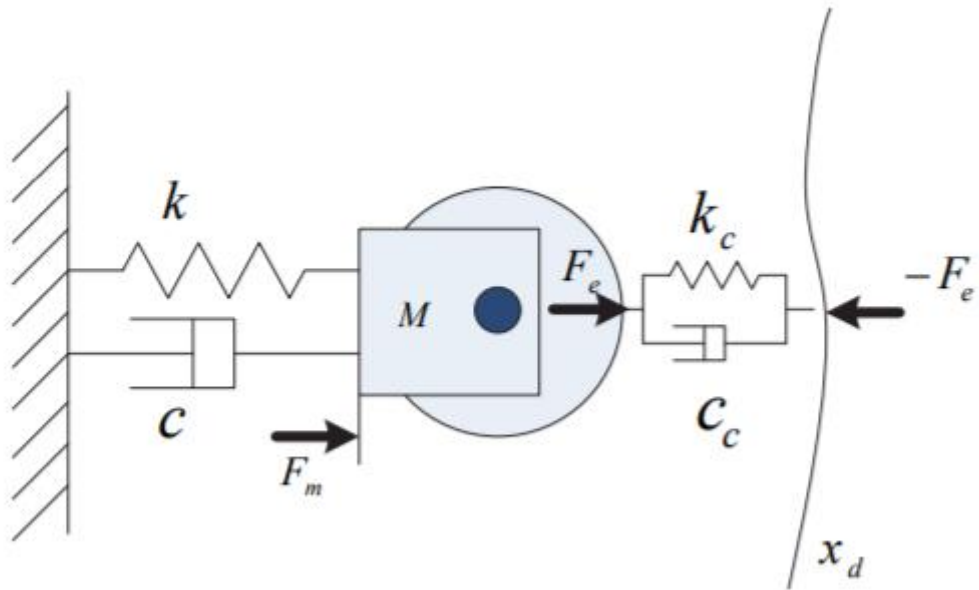
4.2 임피던스 제어 소개

임피던스 제어란 힘과 위치에 대한 동적 제어와 관련이 있다.

임피던스 제어는 위치 기반의 힘제어 방법으로서 매니플레이터와 환경 사이의 접촉력을 제한하는데 효과적이다. 작업 중 힘뿐만 아니라 위치에 대한 정확도가 요구되는 경우에 위치 기반의 힘제어 기법은 더욱 효과적일 것이다. 임피던스 제어는 매니플레이터와 환경의 상호작용을 제어하기 위해 가상의 질량, 감쇠기, 스프링 시스템을 구축해 환경에 대한 반응성을 조절한다. 기계적인 임피던스는 모션 인풋에 대한 힘의 아웃풋인데 이는 전류 인풋에 대한 전압 아웃풋의 비를 가지는 전기적 임피던스에서 비롯됐다.



<외부 힘에 대한 플랜트의 모션 반응 예시>



<위치 기반 임피던스 제어기>

하지만 일반적인 임피던스 제어는 환경, 외부입력에 대응하는 컴플라이언스에 효과적이거나 힘 추종 능력은 보장되지 않으며, 환경의 강성과 이에 따른 기준 위치를 정하지 못하면 원하는 힘 추종 성능을 달성하기가 어렵다.

4.3 임피던스 제어기 설계

위치와 접촉력 2가지의 제어를 달성해야 하므로 기존의 임피던스 컨트롤러에서 개량된 제어기를 사용할 필요가 있다.

제어기 설계 서술과정의 편의를 위해 기호를 먼저 설명하면 다음과 같다.

M, C, K	접촉부의 가상의 질량, 감쇠기, 강성
k_o, k_e	초기 강성, 환경의 강성
x_{d_0}, x_d	초기 기준 위치 궤적, 기준 위치 궤적
x_c	순응 위치 궤적
x_{dc}	$x_d - x_c$
x_e	환경의 위치
x	실제 엔드-이펙터 위치
δx	순응 위치 궤적과 실제 엔드 이펙터 위치간의 에러
F_e, F, F_{ref}	외부 힘, 측정된 접촉력과 기준 힘
k_p, k_d, k_i	비례, 미분, 적분 게인
E_f	$F_{ref} - F$

전통적인 임피던스 제어 방법은 적절한 임피던스 파라미터를 선택하여 위치와 힘 사이의 관계를 조절한다. 로봇 시스템의 임피던스 관계는 다음을 만족시킨다.

$$M(\ddot{x}_d - \ddot{x}) + C(\dot{x}_d - \dot{x}) + K(x_d - x) = F_e \quad (44)$$

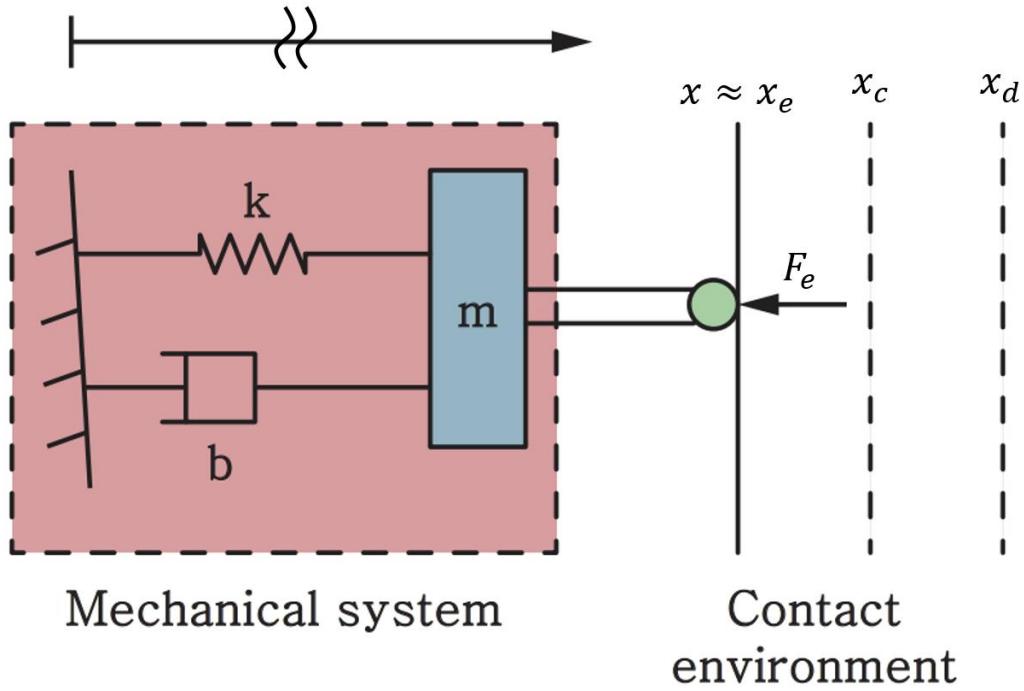
M, C, K 는 각각 임피던스 제어를 위한 접촉부 가상의 질량, 감쇠기, 강성을 의미한다.

여기서 x_d 는 위치 제어를 위한 엔드 이펙터의 기준 위치 궤적, 환경 위치 및 강성, 감쇠비, 임피던스 파라미터 및 원하는 접촉력으로부터 결정된다.

일반적으로 접촉력은 환경 강성 및 감쇠에 의해 결정된다. 따라서 다음과 같이 환경 모델을 근사하기 위해 표현식이 사용된다.

$$F_e = K_e(x - x_e) + C_e(\dot{x} - \dot{x}_e), \dot{x}_e = 0 \quad (45)$$

힘을 직접 제어하면 쉽고 정확하게 제어할 수 있지만, 임피던스 힘제어는 힘을 간접적으로 제어한다. 또한, 힘을 제어하기 위해서는 경로 x_d 를 정확하게 설정해야 한다. 주어진 경로 x_d 는 원하는 힘 F_{ref} , 대상의 강성도 K_e , 대상의 위치 x_e , 그리고 임피던스 강성 K 등의 값들을 정확하게 알아야만 미리 계산할 수 있다. 이러한 문제점들을 해결하는 임피던스 방식이 필요하다.



<매니퓰레이터와 환경 접촉 모델>

이번 연구의 목적은 3가지로 정리할 수 있다.

1. 힘 추정을 통해 센싱 값이 아닌 추정 값으로 제어
2. 환경 파라미터에 대해 적은 정보에도 원하는 수준의 제어 달성
3. 추정 값 응답 분석

목표 힘 달성을 위해 식에 목표 힘에 대한 정보를 추가하고 식을 다음과 같이 변경한다.

$$M(\ddot{x}_d - \ddot{x}_c) + C(\dot{x}_d - \dot{x}_c) + K(x_d - x_c) = F_{ref} - F_e \quad (46)$$

측정된 힘을 피드백 받아 목표 힘 달성을 위한 어드미턴스 필터로서 작용한다.

즉, 센싱 된 힘을 이용해 어드미턴스 필터를 통해 보정 위치 궤적으로 변경한 후 위치 제어에 사용한다.

원하는 기준 궤적이 일정한 값을 유지하는 경우(상수), 1차 및 2차 미분 값은 0과 같다.

$$M(-\ddot{x}_c) + C(-\dot{x}_c) + K(x_d - x_c) = F_{ref} - F \quad (47)$$

환경의 변형을 나타내는 간단한 스프링 모델을 사용하여 (환경의 강성이 변형과 비례한다고 가정할 때) 상호 작용력은 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$F = k_e(x - x_e), \quad x = \frac{F_e}{k_e} + x_e \quad (48)$$

위 식에 힘 오차를 대입하면

$$x = \frac{F_{ref} - E_f}{k_e} + x_e \quad (49)$$

x 는 환경에 의해 생성되는 반력에 대해 강성과 비례해 평형점이 되는 매니플레이터의 엔드이펙터 위치다.

$$x_c = \frac{F_{ref} - E_f}{k_e} + x_e + e_p \quad (50)$$

환경과의 접촉에서 실제 위치는 제한되므로 위치에 대한 오차가 생기게 된다. 따라서 순응 위치 궤적은 실제 위치 궤적에서 다소 위치에 대한 오차가 더해진 값으로 설명할 수 있다.

(50)를 (47)에 대입하면(피드백) 힘/위치 오차 방정식을 얻는다.

$$M\ddot{E}_f + C\dot{E}_f + (K + k_e)E_f = k_e K x_e + M\ddot{F}_{ref} + C\dot{F}_{ref} + KF_{ref} + k_e (M\ddot{E}_p + C\dot{E}_p + K(E_p - x_d)) \quad (51)$$

목표 힘이 상수고 정상상태에 도달하면 정상상태 힘 오차는 다음과 같다.

$$E_f = \frac{Kk_e}{K + k_e} \left[\frac{F_{ref}}{k_e} + x_e + e_p - x_d \right] \quad (x_d = x_e + F_{ref}/k_e) \quad (52)$$

$$E_f = \frac{Kk_e}{K + k_e} e_p$$

위치 오류는 정상상태 힘 오류에 중요한 역할을 한다.

또한, 불확실한 환경 강성으로 위치 기반 임피던스 제어에서 작용력 수렴을 보장할 수 없다

따라서 강성은 고정 값을 사용하지 않고 목표 힘과 접촉력과의 에러를 피드백 받아 값이 정해지는 적응형 강성을 사용한다. 일정 기준 궤적을 사용하지 않고 수정 기준 궤적을 사용한다. x_{dc} 는 기준 궤적을 수정하는 데 사용된다.

$$\begin{cases} K(t) = \left(k_p E_f + k_d \dot{E}_f + k_i \int_0^t E_f d\tau \right) x_{dc}^{-1} + k_o \\ x_d = x_d^o - \gamma x_{dc} \end{cases} \quad (53)$$

보는 바와 같이 힘 추종을 효과적으로 하기 위해 힘 추종 에러를 이용한 PID 형태의 강성이 된다, (53)을 (47)의 강성에 적용하면 다음과 같은 식이 된다.

$$M\ddot{x}_{dc} + C\dot{x}_{dc} + k_o x_{dc} = F_{ref} - \left(k_p E_f + k_d \dot{E}_f + k_i \int_0^t E_f d\tau \right) \quad (54)$$

$x_{dc} = x_d - x_c = x_d^o - x_c - \gamma x_{dc}$ 이고 초기 기준 위치는 상수이므로 1차 미분과 2차 미분 값은 다음과 같다. γ 는 0과 1 사이의 값으로 정해진다.

$$\dot{x}_{dc} = \frac{-\dot{x}_c}{1 + \gamma}, \quad \ddot{x}_{dc} = \frac{-\ddot{x}_c}{1 + \gamma} \quad (55)$$

(53)과 (55)를 (47)에 대입하면

$$M\left(\frac{-\ddot{x}_c}{1+\gamma}\right) + C\left(\frac{-\dot{x}_c}{1+\gamma}\right) + k_o\left(\frac{x_d^o - x_c}{1+\gamma}\right) = F_{ref} - \left(k_p E_f + k_d \dot{E}_f + k_i \int_0^t E_f d\tau\right)$$

$$M\ddot{x}_c + C\dot{x}_c + k_o(x_c - x_d^0) + (1+\gamma)F_{ref} = (1+\gamma)\left[(1+k_p)E_f + k_d\dot{E}_f + k_i\int_0^t E_f d\tau\right]$$

(56)

여기서 E_f 는 $E_f = F_{ref} - F_{real}$ 이 일반적이지만 이번 연구에서는 추정 값을 제어에 피드백해 사용하기 때문에 $E_f = F_{ref} - \hat{F}$ 으로 정의한다.

4.4 안정도 분석

위의 절에서 기준 위치 궤적에 대한 수정을 위한 파라미터 x_c 를 구하는 로직을 소개했다.

접촉부에서 순응 위치 궤적은 아래와 같이 시스템에 작용하게 된다.

$$x_c = \frac{F_{ref} - E_f}{k_e} + x_e + e_p, \quad x_e + e_p = \bar{x}_e \quad (57)$$

$$M \left(\frac{-\ddot{E}_f}{k_e} + \ddot{x}_e \right) + C \left(\frac{-\dot{E}_f}{k_e} + \dot{x}_e \right) + k_o \left(\frac{F_{ref} - E_f}{k_e} + x_e - x_d^0 \right) + (1+\gamma)F_{ref} = (1+\gamma) \left[(1+k_p)E_f + k_d\dot{E}_f + k_i \int_0^t E_f d\tau \right] \quad (58)$$

위 식을 라플라스 변환 후 힘 오차에 대해 정리하면

$$E_f(s) = \frac{sk_e(Ms^2 + Cs + k_o)\bar{X}_e(s) + k_o(F_{ref}(s) - k_e X_d^o(s))}{Ms^3 + (1 + (1+\gamma)k_e k_d)s^2 + k_o(1+\gamma)k_e(1+k_p)s + (1+\gamma)k_e k_i} \quad (59)$$

위 식의 수렴 여부를 알아보기 위해 Routh- Hurwitz 판별법을 이용해서 특성 방정식인 분모에 대해 판단한다.

분모를 간단한 3차 다항식의 형태로 변형한다.

$$p = M(= a_3)s^3 + a_2s^2 + a_1s + a_0 \quad (60)$$

Routh - Hurwitz 방법에 따르면 다음과 같은 구조로 나타낸다.

s^3	M	a_1
s^2	a_2	a_0
s	b_{n-1}	0
1	c_{n-1}	0

<Routh-Hurwitz 안정도 판별법 표>

$$where \ b_{n-1} = \frac{a_{n-1}a_{n-2} - a_n a_{n-3}}{a_{n-1}} = \frac{a_2 a_1 - a_3 a_0}{a_2} \quad (61)$$

$$c_{n-1} = \frac{a_{n-1}b_{n-3} - a_{n-3}b_{n-1}}{b_{n-1}} = \frac{0 - a_0 b_2}{b_2} \quad (62)$$

M은 질량으로 양수만을 갖는다. 따라서 시스템이 원하는 값에 수렴하기 위해선 음영된 Routh 항이 부호 변화가 있어서는 안 되므로 모든 항이 양수여야 한다. $a_2 > 0, b_2 > 0, c_2 > 0$

$$b_2 = \frac{a_2 a_1 - a_3 a_o}{a_2} > 0 \rightarrow \frac{(1 + (1 + \gamma)k_e k_d) k_o (1 + \gamma)k_e (1 + k_p) - M(1 + \gamma)k_e k_i}{(1 + (1 + \gamma)k_e k_d)} > 0$$

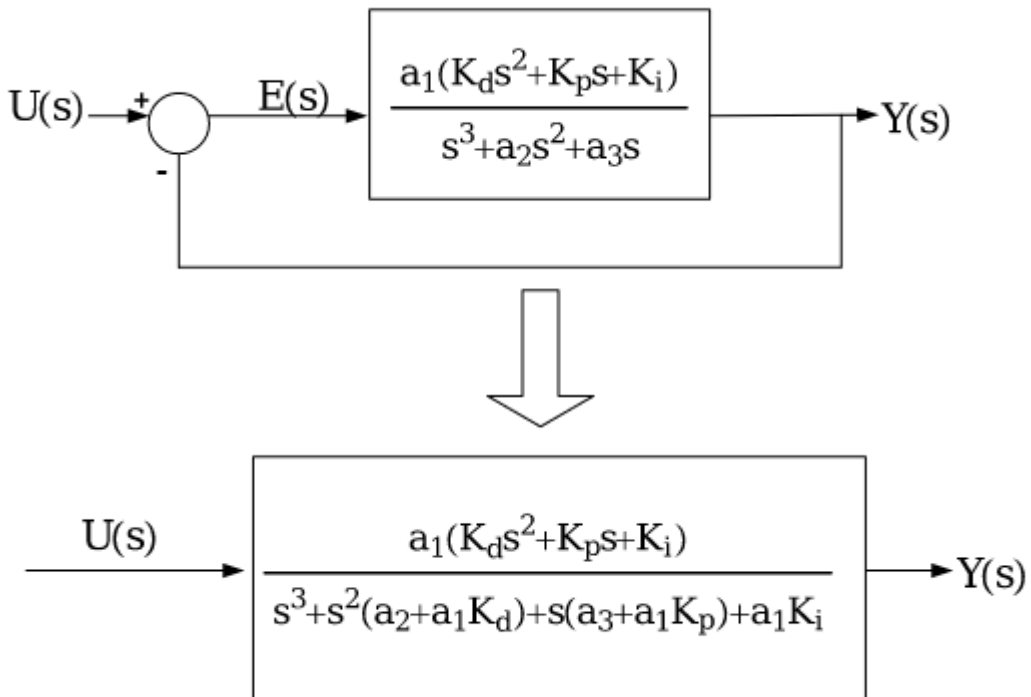
(63)

$$\frac{(1 + (1 + \gamma)k_e k_d) k_o (1 + k_p) - M k_i}{(1 / (1 + \gamma)k_e + k_d)} > 0 \quad (64)$$

$c_2 > 0 \rightarrow -a_0 > 0 \rightarrow -M(1 + \gamma)k_e k_i > 0$ 을 만족해야 한다는 뜻으로 k_i 계인을 음의 값을 줘야 시스템이 원하는 값에 수렴할 수 있을 것이다.

$$E_f(s) = \frac{sk_e (Ms^2 + Cs + k_o) \overline{X}_e(s) + k_o (F_{ref}(s) - k_e X_d^o(s))}{Ms^3 + (1 + (1 + \gamma)k_e k_d)s^2 + k_o (1 + \gamma)k_e (1 + k_p)s + (1 + \gamma)k_e k_i}$$

(65)



<일반적인 PID 제어기 페루프 함수의 형태>

특성 방정식의 형태가 같은 형식을 띠고 있으므로 기본적인 계인의 역할은 PID 제어와 크게 다르지 않음을 알 수 있다.

4.5 위치 제어기 설계

위 절에서 목표 힘을 달성하기 위한 기준 궤적을 구하기 위한 임피던스 제어를 실시했고, 힘의 피드백 값에 맞는 기준 궤적이 실시간으로 계산이 된다.

이젠 이 기준 궤적을 충족시킬 수 있도록 각 조인트에 알맞은 토크를 발생시켜줄 위치 제어기 별도의 루프로 존재해야 한다.

다이아그램 그림 첨부

동역학 모델 기반 보상에 따르면, 조인트 토크는 다음과 같이 정해진다.

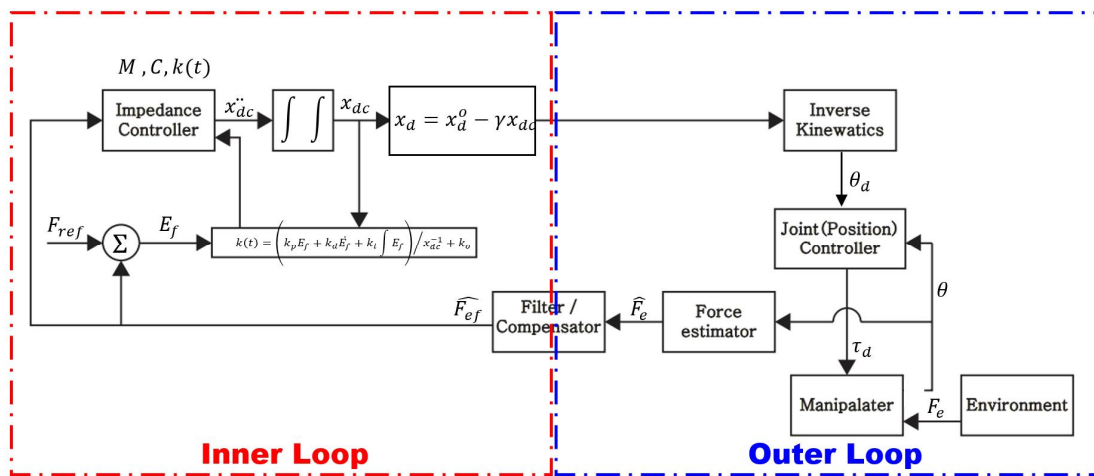
$$\tau = M(q)\ddot{q} + C(q,\dot{q})\dot{q} + G(q)$$

$$\rightarrow \begin{bmatrix} \tau_1 \\ \tau_2 \\ \tau_3 \end{bmatrix} = M(q) \begin{bmatrix} \ddot{q}_1 \\ \ddot{q}_2 \\ \ddot{q}_3 \end{bmatrix} + C(q,\dot{q}) \begin{bmatrix} \dot{q}_1 \\ \dot{q}_2 \\ \dot{q}_3 \end{bmatrix} + G(q) \quad (66)$$

$$M(q) = 3 \times 3, C(q,\dot{q}) = 3 \times 3$$

이것은 외부 신호량이 0이라고 가정한다. 즉 이는 환경과의 접촉을 염두해 놓지 않고 제어기를 설계한다. 위치 제어기를 단독으로 쓸 경우 환경과 접촉 시 기준 궤적을 달성하기 위해 매 니플레이터가 낼 수 있는 최대의 힘을 환경에 가할 것이고 파손될 수 있다.

하지만 위치 제어를 위한 피드백 루프와 피드백되는 (여기서는 추정되는) 힘에 따라서 수정된 기준 궤적을 생성하는 임피던스 제어 루프 두 가지가 존재하므로 위치 제어기는 외부 힘을 신경 쓰지 않고 설계할 수 있다.



<임피던스 제어기와 위치 제어기 제어 루프>

적절한 토크 입력을 만들어줄 제어 입력 α 를 새롭게 정의하고 위 식에 대입해 입력 토크를 계산하는 과정을 가진다.

$$\ddot{q} = \alpha \quad (67)$$

$$\tau_d = M(q)\alpha + C(q, \dot{q})\dot{q} + G(q) \quad (68)$$

α 값은 조인트 변수 측면에서 기술된 가속도를 의미한다.

(68)식은 (67)에 대해 완전한 보상이 가능하다고 가정하고 구해졌다. 이는 시스템 식별 등을 통해 얻을 수 있는 정확한 동적 모델의 가용성에 달렸다.

하지만 실제로는 보상이 불완전한 경우, 파라미터 불일치, 외란 항 등에 의해 그렇지 않은 경우가 많다.

$$\ddot{q} = \alpha - \delta \quad (69)$$

실제로, 외란 δ 는 모델링 되지 않은 동역학 때문인데, 이 경우 마찰 토크 같은 것을 정확히 보상하기 어렵기 때문에 불완전한 보상으로 이어진다. 이는 관측기 같은 추가적인 알고리즘을 통해 보상을 해주지 않으면 다소 제어성능에 있어 악영향으로 다가오지만, 대부분의 경우 이를 감안 하더라도 납득할만한 제어 성능이 보장된다.

목표는 원하는 엔드 이펙터 위치 궤적의 추적을 보장하는 위치 제어를 설계하는 것이므로 엔드 이펙터 위치와 조인트 각도간의 관계를 고려할 필요가 있다.

엔드이펙터의 속도 v_e 는 다음과 같은 관계를 가진다.

$$v_e = J(q)\dot{q} \quad (70)$$

(70)을 미분하면

$$\dot{v}_e = J(q)\ddot{q} + \dot{J}(q, \dot{q})\dot{q} \quad (71)$$

이 식은 조인트 가속도와 엔드 이펙터 선형 및 각도 가속 사이의 관계를 제시한다.

새로운 제어 입력 α 를 대입함으로써 α 에 대한 식으로 정리할 수 있다.

$$\alpha = J^{-1}(q)[\dot{a} - \dot{J}(q, \dot{q})\dot{q}] \quad \text{where } \dot{v}_e = a \quad (72)$$

$$a = [a_p] : (3 \times 1) \text{vector}$$

$$\ddot{p}_e = a$$

기준 위치, 속도, 가속도 궤적은 $p_d(t), \dot{p}_d(t), \ddot{p}_d(t)$ 으로 나타낸다.

기준 궤적과 엔드 이펙터 사이의 위치 오차는 $\Delta p_{de} = p_d - p_e$

엔드이펙터의 선형 가속도에 대한 식은 다음과 같이 적을 수 있을 것이다.

$$a_p = \ddot{p}_d + K_{Dp}\dot{p}_{de} + K_{Pp}p_{de} \quad (73)$$

여기서 K_{Dp}, K_{Pp} 는 적절한 피드백 게인 행렬이고 대각 행렬이다.

이는 오차 Δp_{de} 에 대한 일반적인 2차 선형 제차 미분방정식에서 유도한 것으로

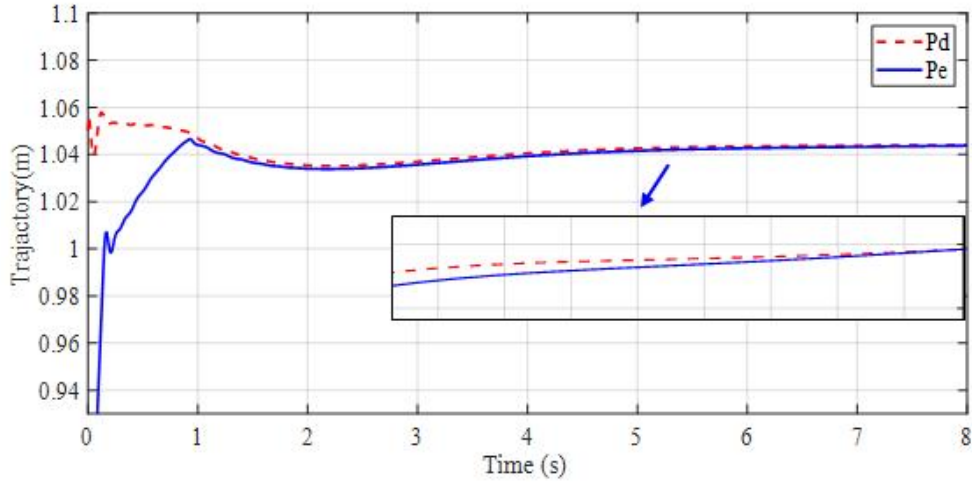
$\Delta \ddot{p}_{de} + K_{Dp} \Delta \dot{p}_{de} + K_{Pp} \Delta p_{de} = 0$ 에서 피드백 게인을 튜닝 하는 것은 얼마나 빨리 오차를 0으로 수렴시키거나 과도응답을 제한하는 등의 역할을 하게 된다. 이는 일반적인 PD 제어와 같은 메커니즘을 가지기 때문에 K_{Dp} , K_{Pp} 는 양의 값을 선택하기만 한다면 0으로 수렴은 하므로 안정성, 수렴성은 보장된다.

$$\alpha = J^{-1}(q)[\ddot{p}_d + K_{Dp}\dot{p}_{de} + K_{Pp}p_{de} - \dot{J}(q,\dot{q})\dot{q}] \quad (74)$$

(74)를 (68)에 대입하면 원하는 위치를 위한 토크 입력을 구할 수 있다.

5. 결과 정리

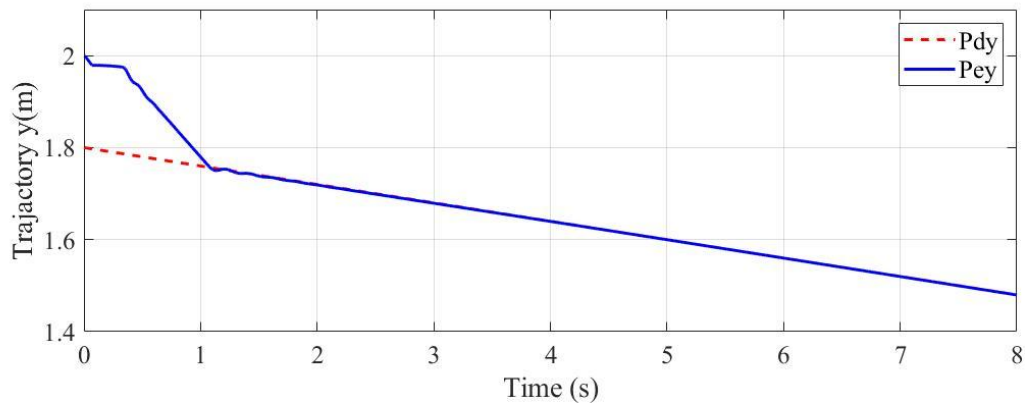
위치 비교



<X 방향의 위치 지령과 엔드 이펙터 위치>

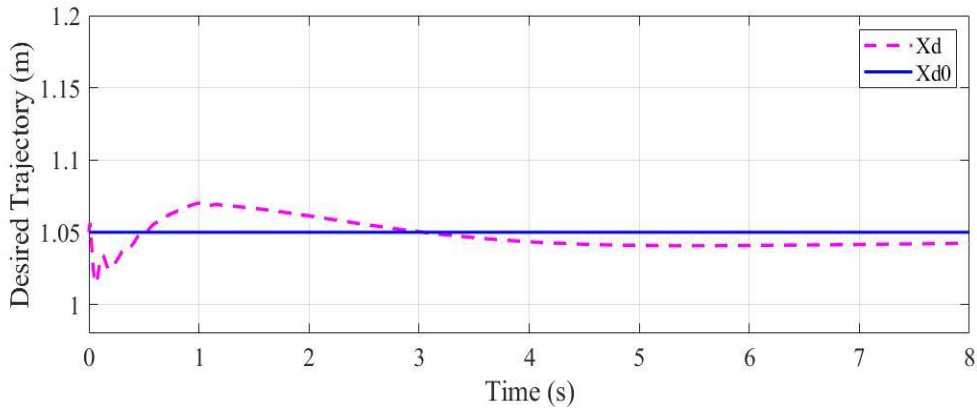
수정된 위치 지령과 엔드 이펙터의 X방향 위치를 나타낸다. 기준 궤적과 차이가 난다. 초기에는 힘 추정 과정에서 정상상태에 도달하지 못한 상태로 오실레이션이 생긴다. 따라서 위치를 통해 간접적으로 힘을 제어하는 임피던스 제어의 특성상 힘의 추정 값이 초기에 정확도가 떨어진다면 위치에도 오차가 크게 날 수 있다.

또한, 기준 궤적과 엔드 이펙터 위치간의 일정량의 차이가 생기는 것은 힘이 작용하는 환경은 변화가 크지 않고, 위치가 제한되기 때문에 기준 궤적이 환경 위치보다 뒤에 있을 수 있기 때문이다.



<Y 방향 위치 지령과 엔드 이펙터 위치>

y 방향의 위치 지령과 엔드 이펙터의 위치를 나타낸다. 굵어내는 작업 궤적으로 X 방향의 경우와 달리 환경에 의해 제약 될 것이 없으므로 기준 궤적과 실제 궤적의 차이가 크게 나지 않는다. 초기 위치와 기준 궤적의 초기 값이 다르므로 초기 오차가 존재하고 빠르게 수렴하는 모습을 볼 수 있다.



<초기 위치 지령과 수정 위치 지령>

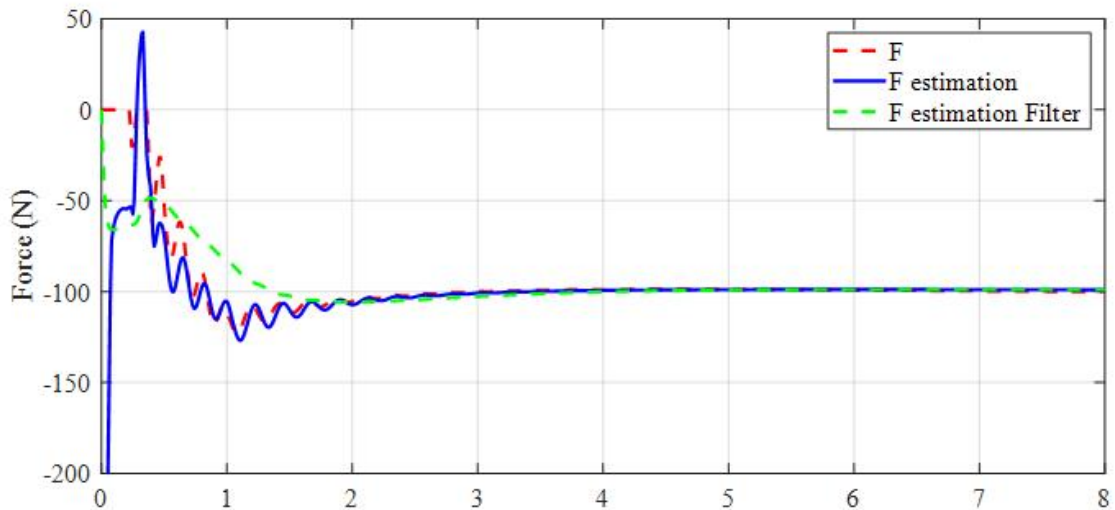
초기 위치 지령 X_{d0} 와 X_d 의 그래프를 나타낸다. 초기 위치 지령 1.05m 설정 값에 대해 수정된 기준 궤적을 나타낸다. 환경에 대한 정보, 대체적으로 환경의 강성을 잘 모른다면 고정 기준 궤적을 사용한다면 원하는 힘을 얻기 힘들고 많은 수정을 통해 기준 궤적을 수정해야 할 것이다. 하지만 목표 힘과 추정 힘의 오차를 통해 접촉부의 목표 강성과 기준 궤적이 적응하게 된다.

힘 측정, 추정 비교

결과는 두 가지 Case로 측정 했다. 마찰에 대한 보상은 두 Case 모두 적용 됨.

Case1 : 필터를 통하지 않은 추정 값을 피드백 해 제어에 이용한 경우

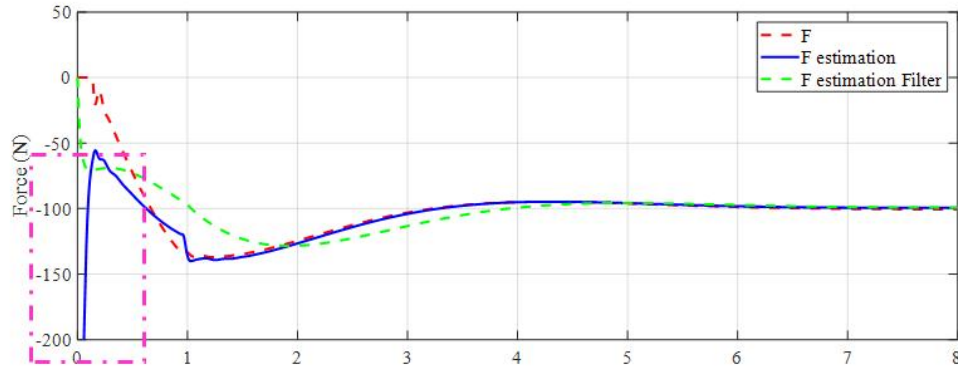
Case2 : 필터를 통해 고주파 성분이 제거 된 추정 값을 피드백 해 제어에 이용한 경우



<X 방향의 힘 그래프. Case 1>

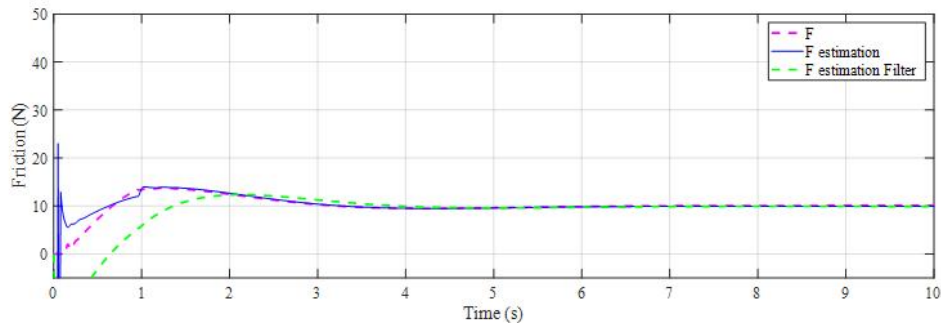
환경에서 작용하는 힘, 추정 값 (필터링 되지 않은 값), 추정 값 (필터링 된 값)을 비교한 그래프다. 필터링 되지 않은 추정 값을 피드백 해 제어에 사용 했을 경우 추정 값이 실제 값을 빠르게 추정하는 결과를 볼 수 있지만, 추정 오차를 줄이는 과정 동안 오실레이션이 생기는 값

이 힘 제어의 지령 값으로 주어지기 때문에 정상상태 부근으로 수렴하기까지 오실레이션이 존재하게 된다. 빠른 추정이 가능하지만, 제어 성능과 별개로 신뢰성 있는 힘 지령이 입력되지 않은 문제가 생긴다.

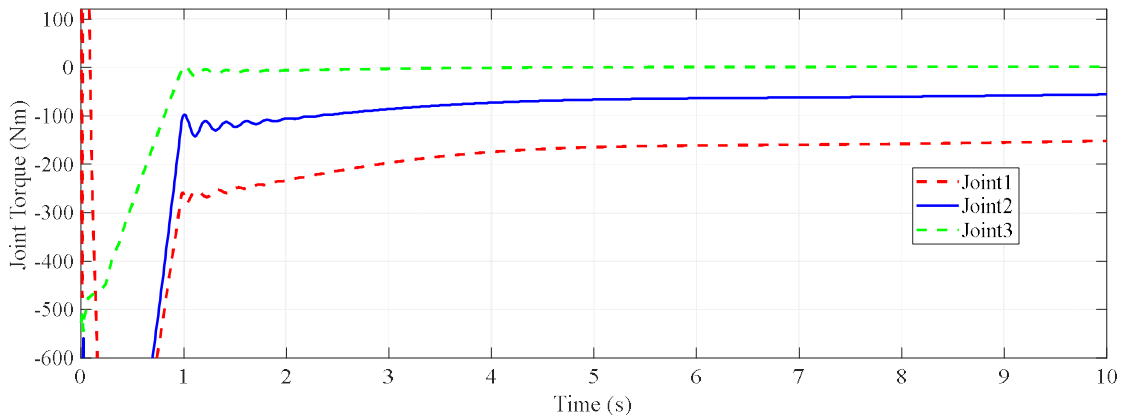


<X 방향의 힘 그래프. Case 2>

환경에서 작용하는 힘, 추정 값 (필터링 되지 않은 값), 추정 값 (필터링 된 값)을 비교한 그래프다. 필터링 된 추정 값을 피드백 해 제어에 사용 했을 경우 추정 단계에서 생기는 오실레이션을 강제로 제거해 완만한 힘 지령이 제어기에 입력되므로 액추에이터의 과도 응답이 생기지 않지만 로우 패스 필터를 사용함으로써 고주파 성분이 제한됨으로 신호 왜곡이 생기게 된다. 추정 값이 필터에 입력된 후 제어기에 지령 값으로 들어가는 과정에서 군 지연(Group Delay)가 생기게 돼 지령 값에 시간 지연이 생기므로 제어 지령치 자체가 제어 성능과 별개로 느려진다.



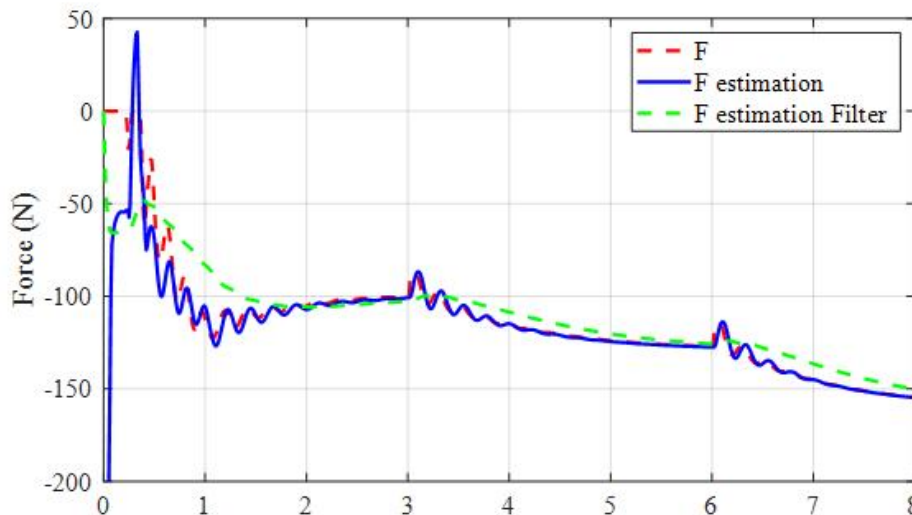
<Case 2의 Y 방향의 힘(마찰력)>



<각 조인트의 토크 입력>

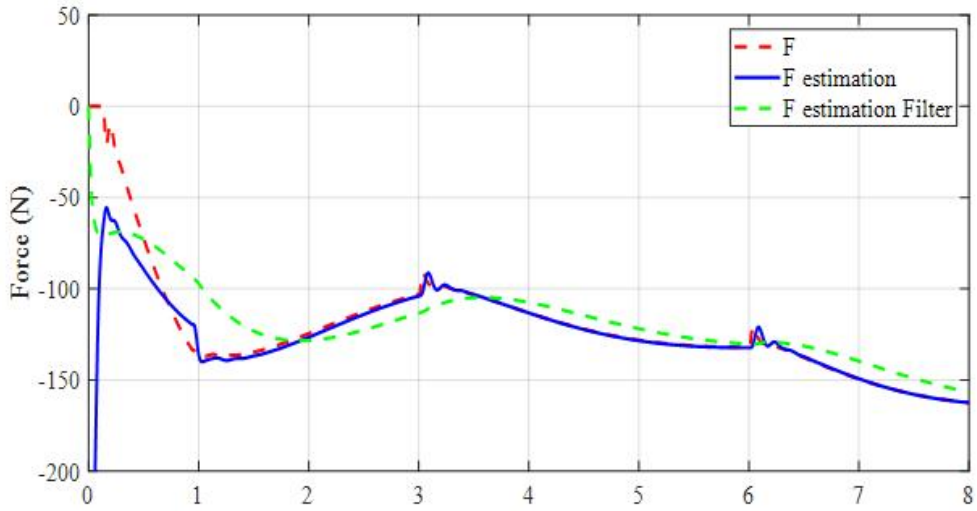
임피던스 제어를 통해 계산된 기준 궤적 x_d 를 Computed Torque Control을 통해 기준 궤적에 도달하기 위한 토크를 계산해 낸다. 고정형 기준 궤적을 사용한다면 그 궤적에 도달하기 위해 매니퓰레이터의 액추에이터가 낼 수 있는 최대의 힘을 계속 내게 되는데, 환경이 변형된다. 가정한다면 기준 궤적이 환경의 변형값 이상의 위치에 존재한다면 엔드 이펙터가 파괴되거나 최대 구동력에 도달할 때 까지 증가 할 것이다. 수정 기준 궤적을 사용한다면, 기준 궤적이 원하는 힘에 평형이 되는 위치까지 수렴하기 때문에 원하는 힘에 도달하면 그에 해당하는 조인트 토크 값으로 수렴하게 된다.

시간 내에 2번의 힘 지령 값을 변경하면서 결과를 측정 했다.
3초, 6초에 각각 30N씩 지령 값에 Step 입력을 더했다.



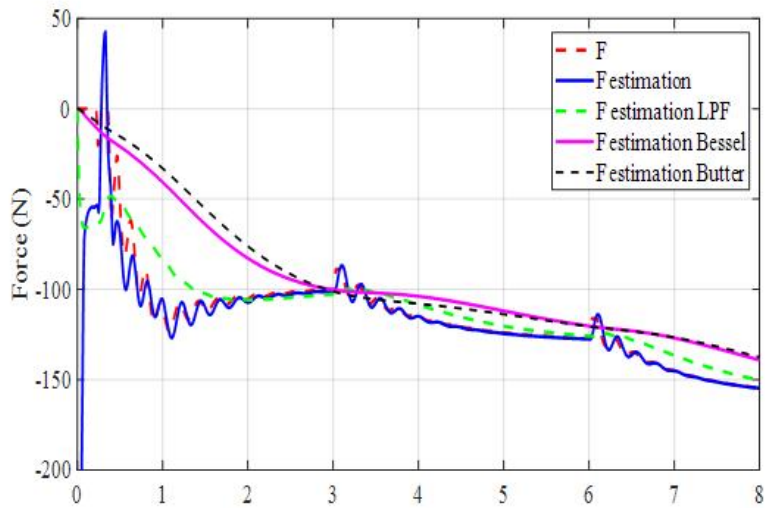
<Case 1의 X방향 힘>

마찬가지로 빠른 추정 값 도출을 볼 수 있지만, 지령치가 바뀔 때 마다 오실레이션이 존재하는 것을 확인할 수 있다. 초기 값 정보가 없는 0초 보다는 오실레이션이 덜하지만 순간적인 지령 값의 변경은 오실레이션을 유발한다.



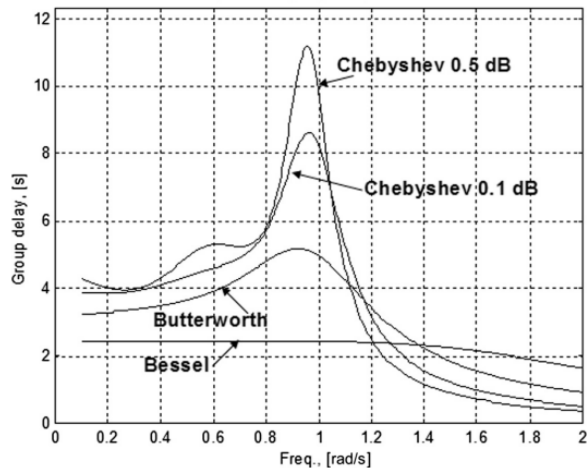
<Case 2의 X방향 힘>

마찬가지로 Case 1 대비 완만한 동작 특성을 확인할 수 있다. 빠른 추정 값 도출을 포기한 만큼 과도 응답이 없지만, 응답이 느리고 지령치가 바뀔 때 마다 오실레이션이 적지만 응답이 느리다.



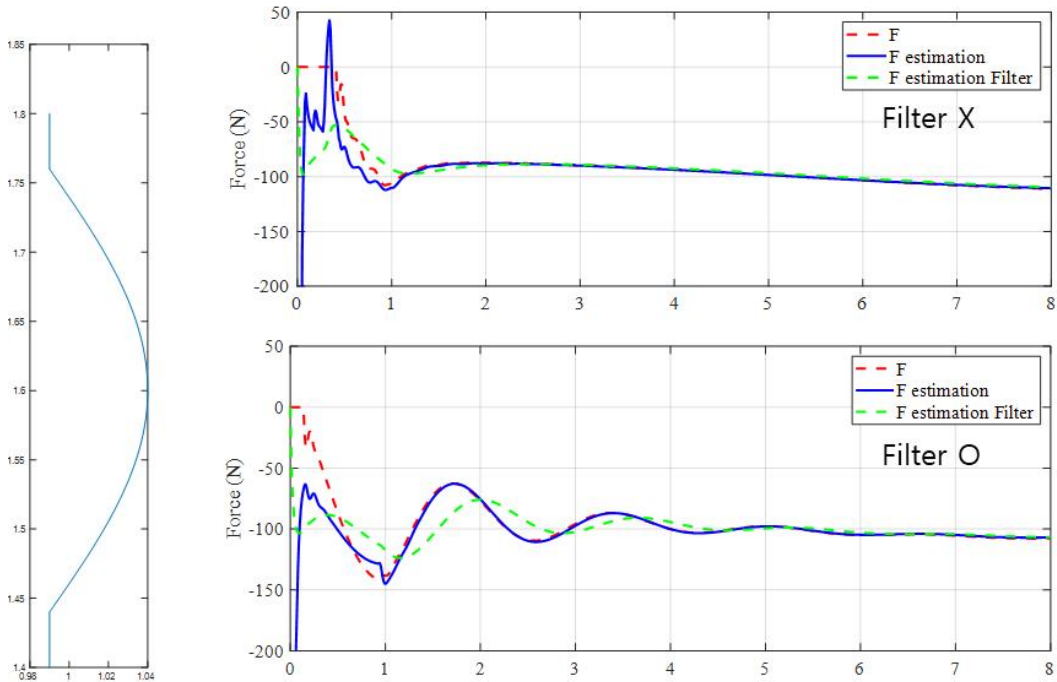
<아날로그 필터링 결과>

다른 아날로그 필터링을 통해 군지연이 적고 필터링 성능이 좋은 결과를 얻기 위해 여러 필터를 적용했을 때 크게 효과적인 결과를 얻지 못했다.



<각 필터별 군 지연(Group Delay)을 나타낸 그래프>

X축은 컷오프 주파수를 나타내고 Y축은 주파수별 군 지연 시간이다.



<곡면 형상에 대한 힘 추정, 제어 결과>

곡면 형상 측, 환경 위치가 지속적으로 바뀌는 Case에 대해서 제어 및 추정 성능이 정적인 환경 대비 5~10N, 힘 지령치와는 10% 정도의 오차를 유발 했다. Case 1인 필터링 안한 경우는 힘 오차와 초기 오실레이션이 존재해도 지령 치 까지 수렴 속도가 빠르지만 Case 2 필터링 한 경우는 환경의 지속적인 변화가 있고, 임피던스 추정 가중치를 증가시키면서도 불구하고 시간 지연이라는 단점이 크게 작용했다.

위의 결과들을 통해 다음과 같은 결론을 내릴 수 있다.

1. 확장 상태 관측기에 비해 구조가 간단하고 계산량이 있어서 강점을 보이고 계인 설정이 직관적인 추정기를 설계했고 추정 성능이 타당하게 도출 됐다.
2. 추정 값을 피드백 해 제어에 사용할 경우 제어, 추정 성능은 서로 상보적인 관계임을 확인 했다.
3. 고주파 필터링을 하지 않으면 액추에이터에 오실레이션이 있는 지령치가 입력되므로 필터링을 통해 이를 억제함이 필요함.
4. 고주파 제한을 위해 아날로그 필터링을 사용했을 때 군지연이 생기므로 제어 응답이 느려지게 된다. 따라서 빠른 추정을 통한 빠른 제어 응답과 완만한 추정을 통한 과도 응답이 없는 제어 응답은 Trade off 관계임을 알 수 있다.
5. 아날로그 필터링으로는 군 지연을 최소화 시키는데 한계가 존재하므로 다른 분류의 필터를 적용한다면 성능에 큰 향상에 있을 것으로 예상.

6. 참고자료

- [1] Hayder F. N. Al-Shuka, Steffen Leonhardt, Wen-Hong Zhu, Rui Song, Chao Ding, Yibin Li, "Active Impedance Control of Bioinspired Motion Robotic Manipulators: An Overview", Applied Bionics and Biomechanics, vol. 2018, Article ID 8203054, 19 pages, 2018. <https://doi.org/10.1155/2018/8203054>
- [2] V.Kumar "Robot Geometry and Kinematics" Chap. "Kinematics of a planar 3R manipulator"
- [3] Botoni de Souza, Lucas & Favotto Dalmedico, Jonatas & Kondo, Henrique & Mendonça, Márcio & Montezuma, Marcio & Poczeta, Katarzyna. (2018). Inverse Kinematics and Trajectory Planning Analysis of a Robotic Manipulator. International Journal of Advanced Engineering Research and Science. 5. 207-214. 10.22161/ijaers.5.4.30.
- [4] G. Zhang, S. Ma and Y. Li, "Contact Force Estimation and Regulation of a Position-controlled Floating Base System without Joint Torque Information," 2020 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), 2020, pp. 3967-3974, doi: 10.1109/IROS45743.2020.9340785.
- [5] Z. Cong, A. Honglei, C. Wu, L. Lang, Q. Wei and M. Hongxu, "Contact Force Estimation Method of Legged-Robot and Its Application in Impedance Control," in IEEE Access, vol. 8, pp. 161175-161187, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.3021080.
- [6] Guanhua Hu1, Qingjiu Huang and Takuya Hanafusa, "Hybrid Position/Force Control with Virtual Impedance Model of Robot Manipulators", Journal of Physics: Conference Series, Volume 1601, 5. Mechanical Systems and Machine Learning
- [7] Simeon P. Patarinski, Roumen G. Botev, "Robot force control: A review", Mechatronics, Volume 3, Issue 4, 1993, Pages 377-398
- [8]H. Seraji and R. Colbaugh, "Force tracking in impedance control," [1993] Proceedings IEEE International Conference on Robotics and Automation, 1993, pp. 499-506 vol.2, doi: 10.1109/ROBOT.1993.291908.
- [9] 정슬, & 이지홍 (1997). 로봇의 비선형 임피던스 힘제어에 대한 연구. 제어로봇시스템학회 1997년도 한국자동제어학술회의논문집: 17-18 Oct. 1997 1997 Oct. 01 , 1997년, pp.560 - 563

- [10] 정슬 “로봇 공학”, 교문사(청문각), 2019.12 ISBN : 9788936318864
- [11] G. Sebastian, Z. Li, V. Crocher, D. Kremers, Y. Tan and D. Oetomo, "Interaction Force Estimation Using Extended State Observers: An Application to Impedance-Based Assistive and Rehabilitation Robotics," in IEEE Robotics and Automation Letters, vol. 4, no. 2, pp. 1156-1161, April 2019, doi: 10.1109/LRA.2019.2894908.
- [12] Tie Zhang, Xiaohong Liang, "Disturbance Observer-Based Robot End Constant Contact Force-Tracking Control", Complexity, vol. 2019, Article ID 5802453, 20 pages, 2019. <https://doi.org/10.1155/2019/5802453>
- [13] J. Yao, Z. Jiao and D. Ma, "Extended-State-Observer-Based Output Feedback Nonlinear Robust Control of Hydraulic Systems With Backstepping," in IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 61, no. 11, pp. 6285-6293, Nov. 2014, doi: 10.1109/TIE.2014.2304912.

7. 영문 요약

Manipulators are used in many works in industrial sites to help humans for various reasons such as musculo-skeletal disease prevention, work in dangerous area, precision, and repeatability, and recently, research is underway as demand for unmanned working environment increases.

The manipulator can be manufactured in various forms depending on the purpose and environment of the work, and sensors can be attached. If a constant force must be applied to the workpiece to process the work, the manipulator must be controlled so that the force appropriate to the target can be continuously applied, which means that the control performance is guaranteed only when the force applied to the workpiece is well measured. If a force sensor is mounted on the end-effector, which is a working unit, compatibility with the attachment, impact, damage due to vibration, wiring problems, etc., and mounting a torque sensor at each joint has disadvantages in price.

Therefore, this paper studies techniques for estimating the reaction force applied to the work unit using only joint displacement sensors and properly selects a controller to calculate and control the torque required for each joint to compare the performance of control using estimated values and examine its availability.