



안전성 확보를 위한 Gimbal Tray Serving Robot 설계

- I. 서론**
- II. Adams 기구동역학 모델링**
- III. 시뮬레이션**
- IV. 결론**

서론

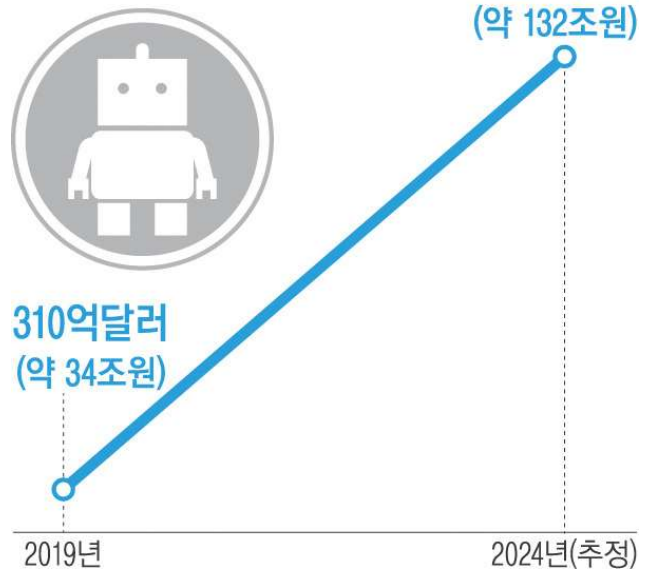


- 서빙로봇이란?
- 개선 필요성
- 아이디어 (Gimbal)
- 설계목표

서론 서빙로봇이란?

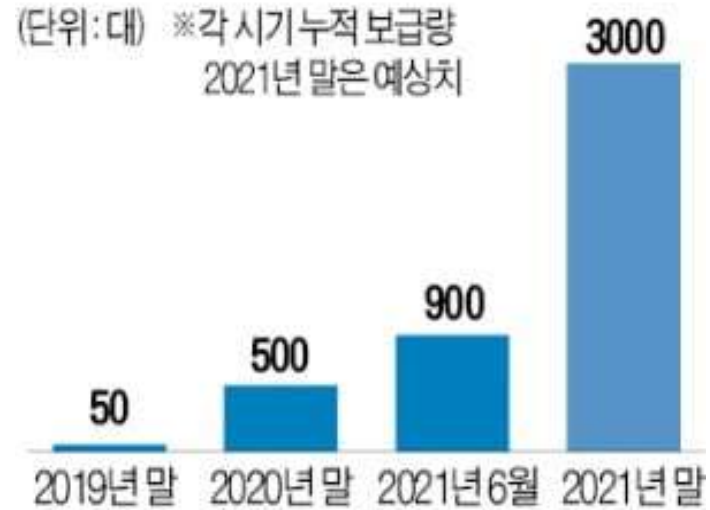
글로벌 '서비스 로봇' 시장 규모

자료: 스트래티지 애널리틱스



식당서빙로봇보급량

(단위:대) ※각 시기누적보급량
2021년 말은 예상치



자료: 브이디컴퍼니, 우아한형제들, KT 취합

서론 서빙로봇이란?



자율주행 서빙로봇

식당 내 장애물이나 사람이 있으면
센서를 통해 멈춘 후 우회

주기적으로 순회하여 단순 반복 되는
힘든 일을 자영업자 대신 수행

흥미로운 마케팅 아이템

서론 서빙로봇이란?



코로나19, 인건비 상승에 이종고

자영업 돌파구로 떠오른 '서빙로봇'

AI 기술을 활용한 자율주행 서빙로봇 '푸두봇(PuduBot)'의 가장 큰 장점은 **코로나19에 대응한 비대면 서비스 강화와 인건비 절감, 운영효율화** 등 세 마리의 토끼를 한 번에 잡는 효과를 얻는 것이다. 다양한 환경에서도 여러 테이블로 정확한 운반이 가능한 푸두봇은 인건비를 절감하고, 운영 효율을 높이면서 서비스 수준 향상도 도모한다. 속초에서 물회전문점을 운영하는 A 점주는 "지방이다 보니 가장 바쁜 성수기 때 알바 구하기가 하늘의 별따기나 다름없었다. 손님 줄은 끊이지 않는데 응대할 수 있는 홀 직원은 한계가 있고.... 큰맘 먹고 푸두봇을 11대 들였고, 여력이 없어서 2개 층만 운영하던 홀을 3층 전체로 운영할 수 있게 됐다. 그리고 하루 매출 1억원의 기록을 세웠다"고 전했다. 시흥에서 숯불갈비집을 운영하는 B 점

서론 개선 필요성



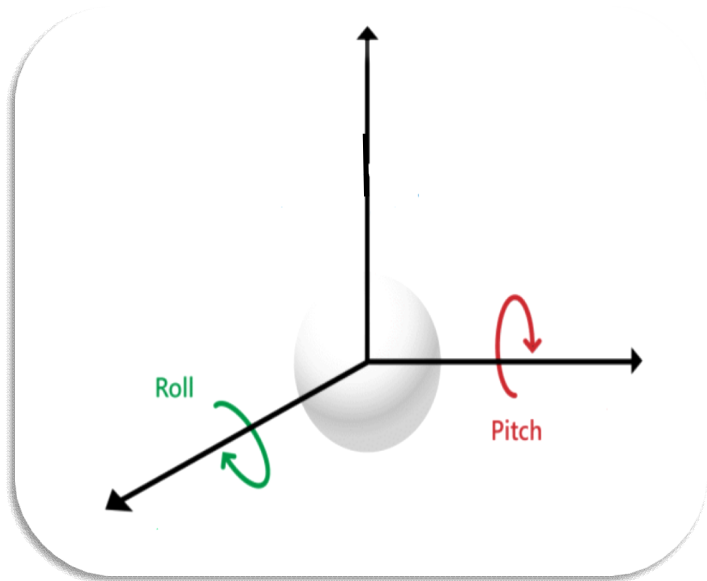
기존모델 단점

- ✓ Tray 위 물체가 외부 환경변화 또는 외란에 의한 차체 수평변화 대하여 매우 취약
 - 뛰는 아이와 충돌 등
- ✓ 환경적인 요소로 인해 공급하지 못하는 경우발생
 - 경사도가 많은 장소 등
- ✓ 다소 난해한 자율주행 로봇관련 사고
 - 2차 사고방지를 위해 보다 안전한 모델필요

서론 아이디어

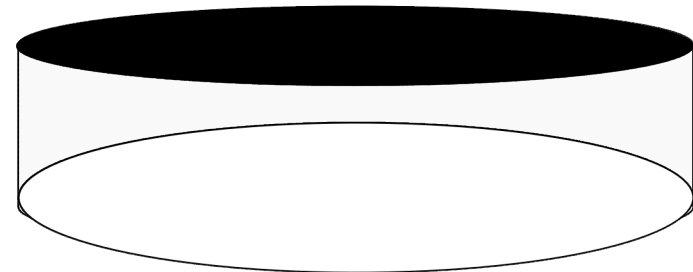
짐벌 Gimbal

외부의 움직임에 대해 반대 방향으로 같은 힘을
가함으로써 움직임을 0 으로 만드는 원리
: 수평유지장치

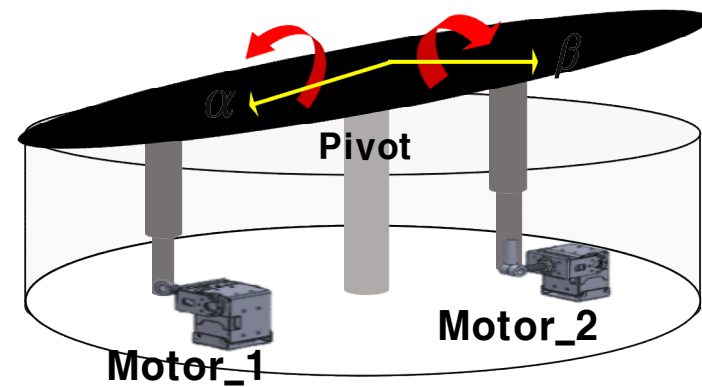
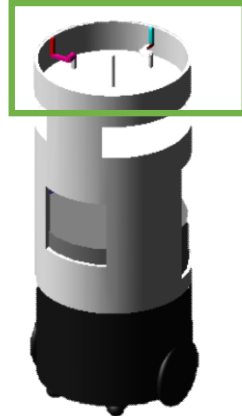


서론 아이디어

기존모델
Fixed Tray



개선모델
Gimbal Tray



서론 설계목표

- ✓ 서빙로봇 Tray Gimbal기능 추가
- ✓ 외란으로 인한 Tray 수평변화 제어
- ✓ Tray위 물체 수평변화율 감소
- ✓ 안전한 운반 & 환경변화 극복

Adams 기구동역학 모델링

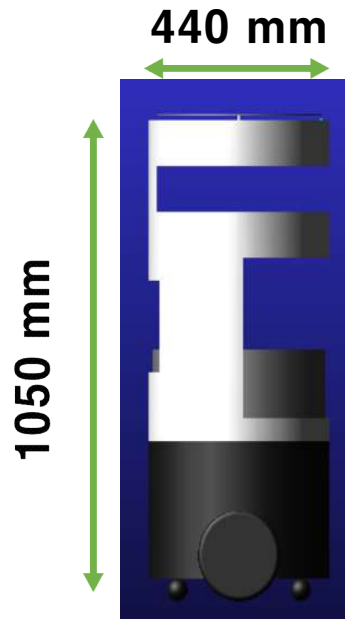


- **Serving Robot**
- **Joint**
- **Force**
- **해석과정**
- **Motor**

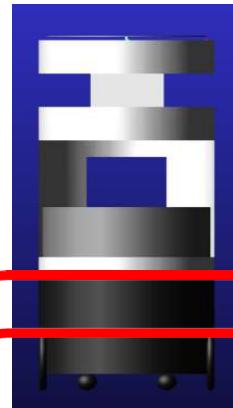
Adams 기구동역학 모델링 Serving Robot

서빙로봇 대표4사
Comparison 규격

SIZE: 440x440x1050
Weight: 35KG



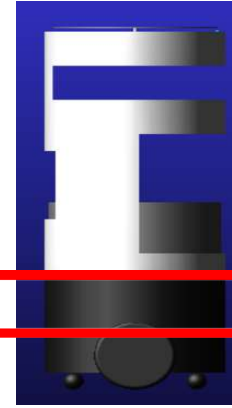
Front



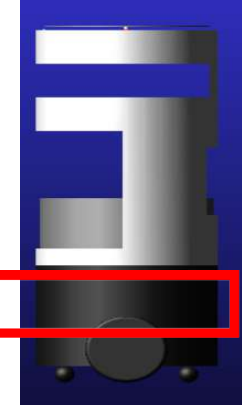
Back



Right



Left



움직이기 위한 모터 | 여러 센서 등 실제 서빙 로봇의 무게중심이 하단부에 비중이 큰것을 고려하여 35kg중 30kg가 차지하도록 무게를 설정하였다.

Bottom part	Tray	Wheel & body	Total
30kg	0.5kg	4.5kg	35kg

Adams 기구동역학 모델링 Serving Robot

<Wheels>

Material: rubber

구동바퀴x2 보조바퀴x4

- 원하는 좌표에서 yaw회전 용이

System	Static friction μ_s	Kinetic friction μ_k
Rubber on dry concrete	1.0	0.7
Rubber on wet concrete	0.7	0.5
Wood on wood	0.5	0.3
Waxed wood on wet snow	0.14	0.1
Metal on wood	0.5	0.3
Steel on steel (dry)	0.6	0.3
Steel on steel (oiled)	0.05	0.03
Teflon on steel	0.04	0.04
Bone lubricated by synovial fluid	0.016	0.015
Shoes on wood	0.9	0.7
Shoes on ice	0.1	0.05
Ice on ice	0.1	0.03
Steel on ice	0.4	0.02

Modify Contact

Contact Name

Robot_GND_Fric

Contact Type

Solid to Solid

I Solid(s)

Main_Wheel1,Main_Wheel

J Solid(s)

Ground

Force Display

Red

Normal Force

Impact

Stiffness

1.0E+08

Force Exponent

2.2

Damping

1.0E+04

Penetration Depth

1.0E-04

Augmented Lagrangian

Friction Force

Coulomb

Coulomb Friction

On

Static Coefficient

1.0

Dynamic Coefficient

0.7

Stiction Transition Vel.

0.1

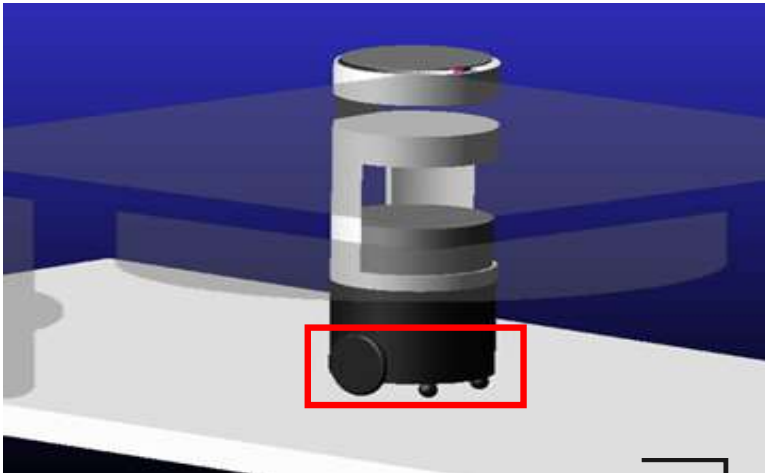
Friction Transition Vel.

1.0

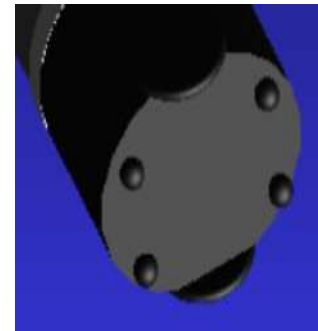
OK

Apply

Close

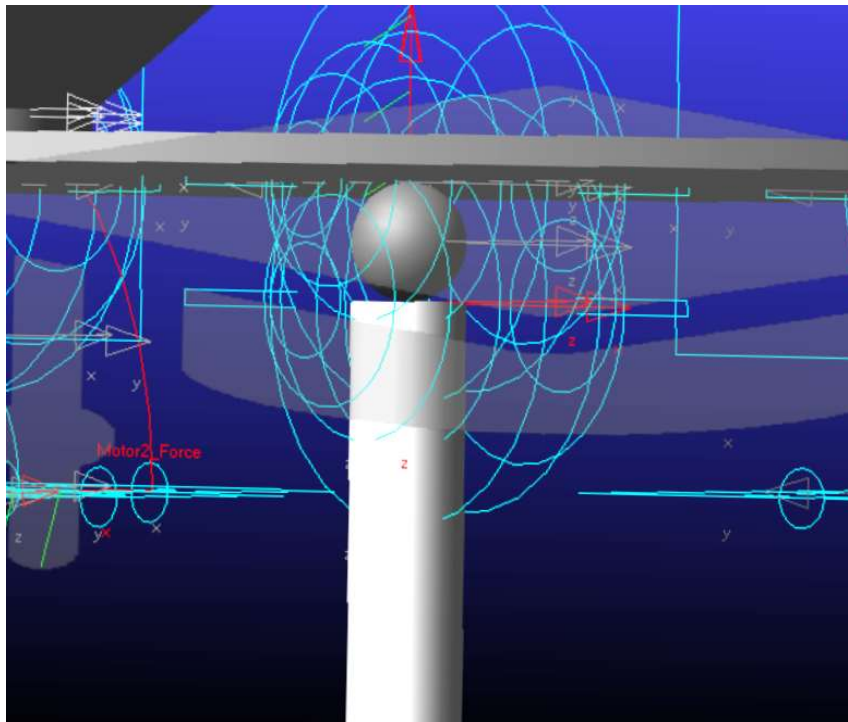
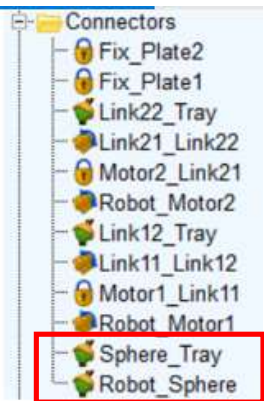


*바닥 - 바퀴 Friction 적용



식당에서 흔히 사용하는 바닥소재
concrete-polishing 으로 고려

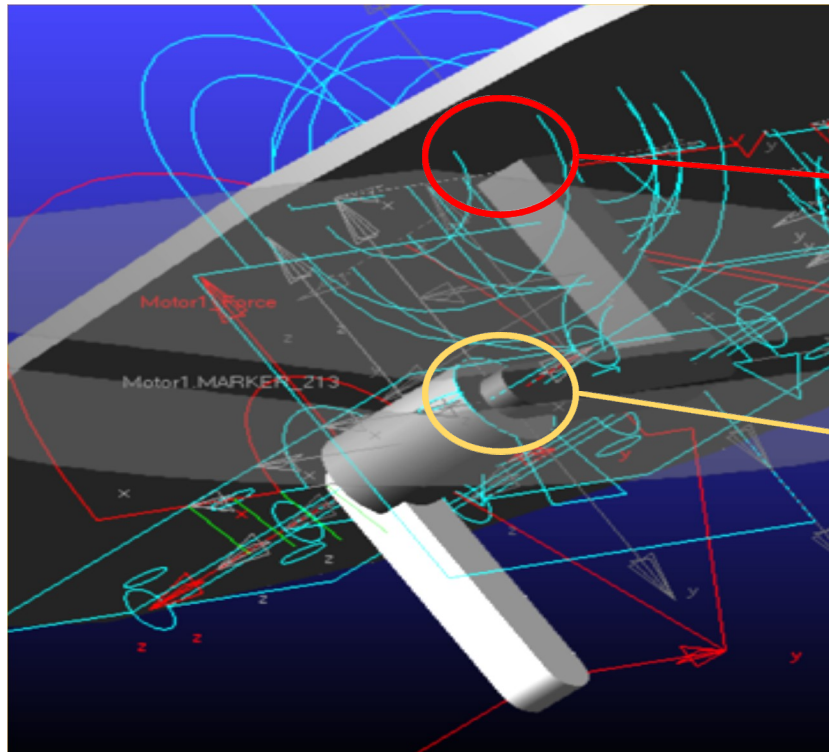
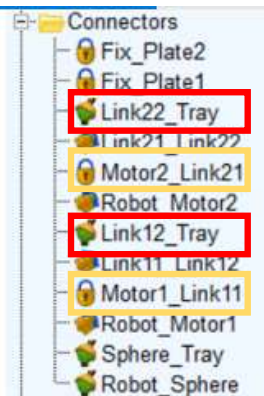
Adams 기구동역학 모델링 Joint



Spherical joint
: 자유로운 움직임 가능

* 상[Tray – Pivot] | 하[Pivot – Robot]

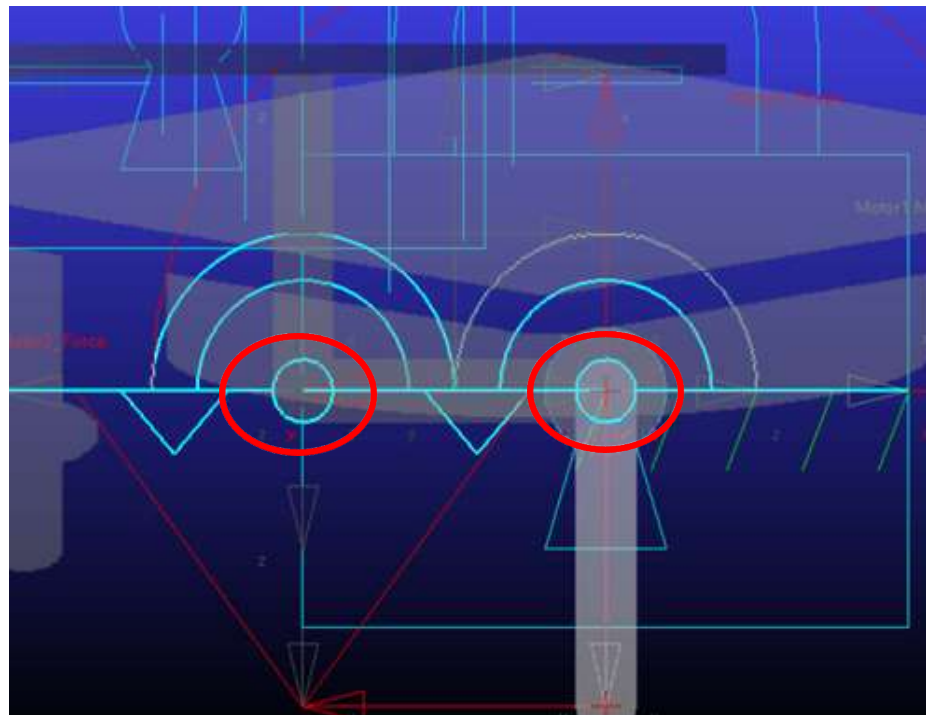
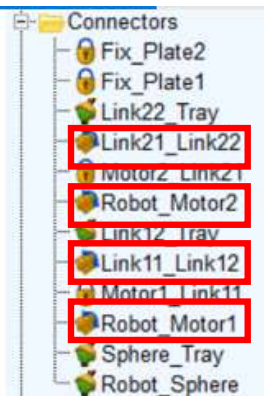
Adams 기구동역학 모델링 Joint



* [Link2 - Tray]
Spherical joint
: 자유로운 움직임 가능

* [Motor - Link1]
Fixed joint
: 모터 회전방향과 동일하게 움직이게함

Adams 기구동역학 모델링 Joint



Revolute joint
: 고정된 상태로 회전 가능

* 좌 [Link1 - Link2] | 우 [Robot - Motor]

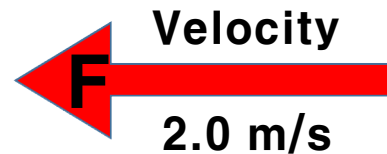
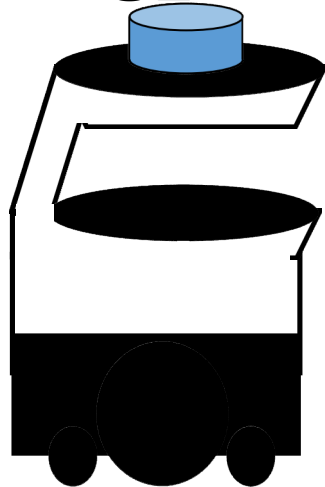
Adams 기구동역학 모델링 Force

기존 탑재기능

:서빙로봇은 경로에 물체(어린이)가 있으므로
장애물로 인식하여 초기속도 **0m/s[정지]** 가정

Situation

:식당(실내)에서 멈춰있는 서빙로봇이 2m/s로
뛰어다니는 21kg의 아이와 부딪혀 800mm높이
에서 0.1s동안 $F=525[N]$ 만큼의 힘을 받았다.



Force(F) 계산식

$$m_1 v_{10} + m_2 v_{20} = m_1 v_{1f} + m_2 v_{2f}$$

$$\frac{1}{2} m_1 v_{10}^2 + \frac{1}{2} m_2 v_{20}^2 = \frac{1}{2} m_1 v_{1f}^2 + \frac{1}{2} m_2 v_{2f}^2$$

$$\rightarrow F \Delta t = \frac{2m_1 m_2}{m_1 + m_2} v_{10}$$

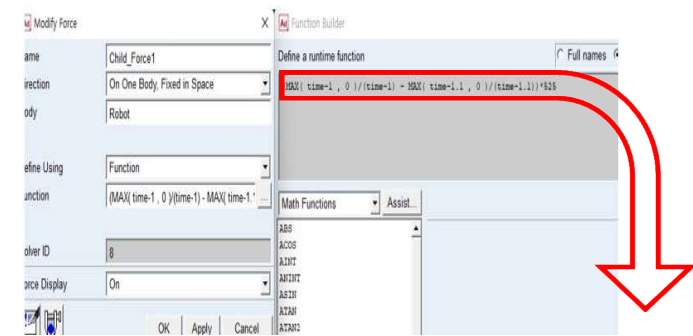
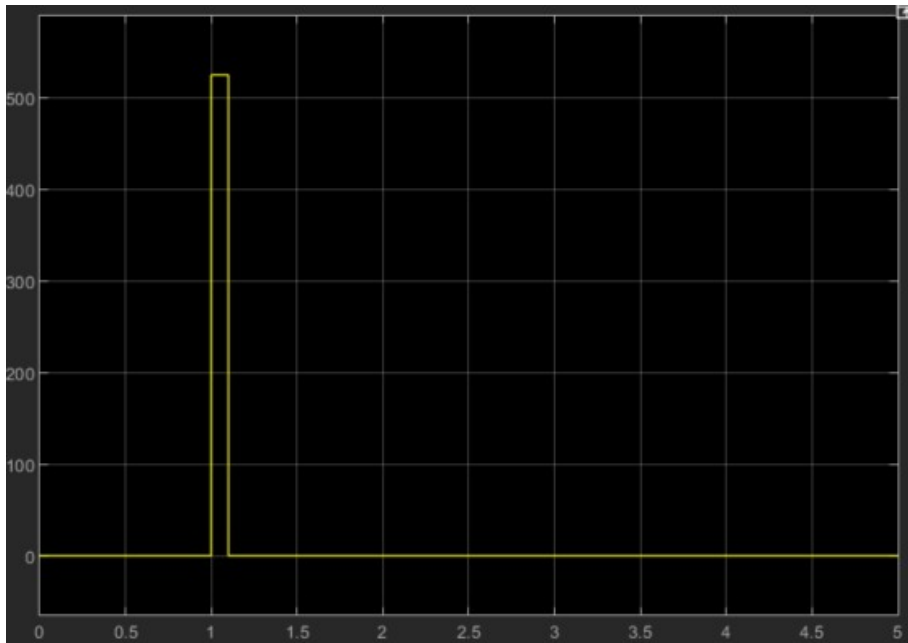
* m_1 : 아이몸무게
게

* m_2 : 서빙로봇 무
게

Force	$F = 525[N]$
Weight	21kg
Velocity	2.0m/s
High	800mm

Adams 기구동역학 모델링 Force

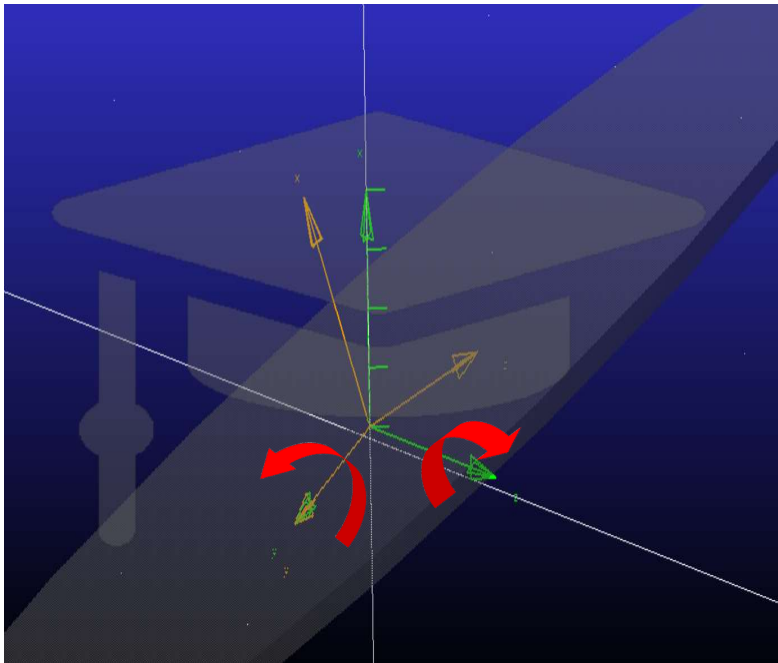
Force function



$$\left(\frac{\text{Max}(time-1, 0)}{time-1} - \frac{\text{MAX}(time-1.1, 0)}{time-1.1} \right) * 525$$

시뮬레이션 시작 후 1s ~ 1.1s 시점에 525[N]을 가한다.
[800mm (from the bottom)]

Adams 기구동역학 모델링 해석과정



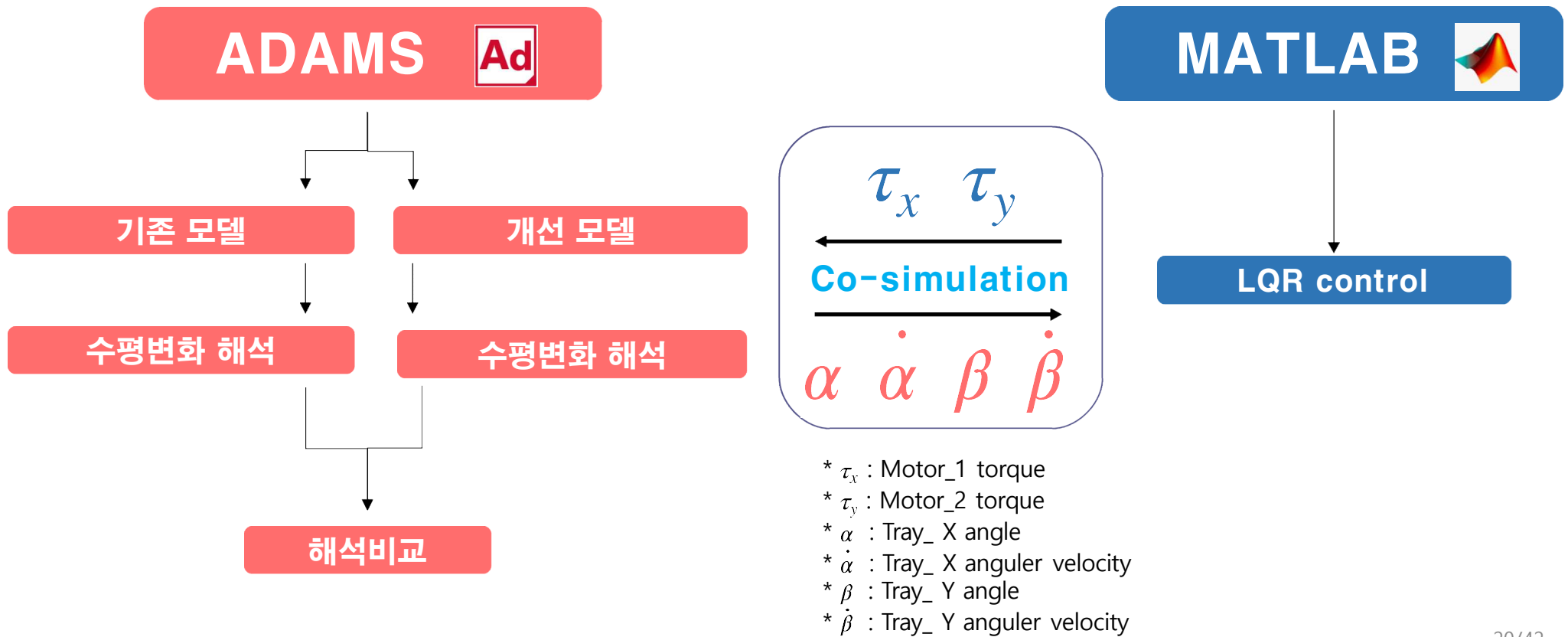
GROUND의 ang_ref (고정)와 Tray.cm (변화)의 각도차이를 비교

- AY : Y축 기준 회전각도 (α) - WY : Y축 기준 회전각속도 ($\dot{\alpha}$)
- AZ : Z축 기준 회전각도 (β) - WZ : Z축 기준 회전각속도 ($\dot{\beta}$)

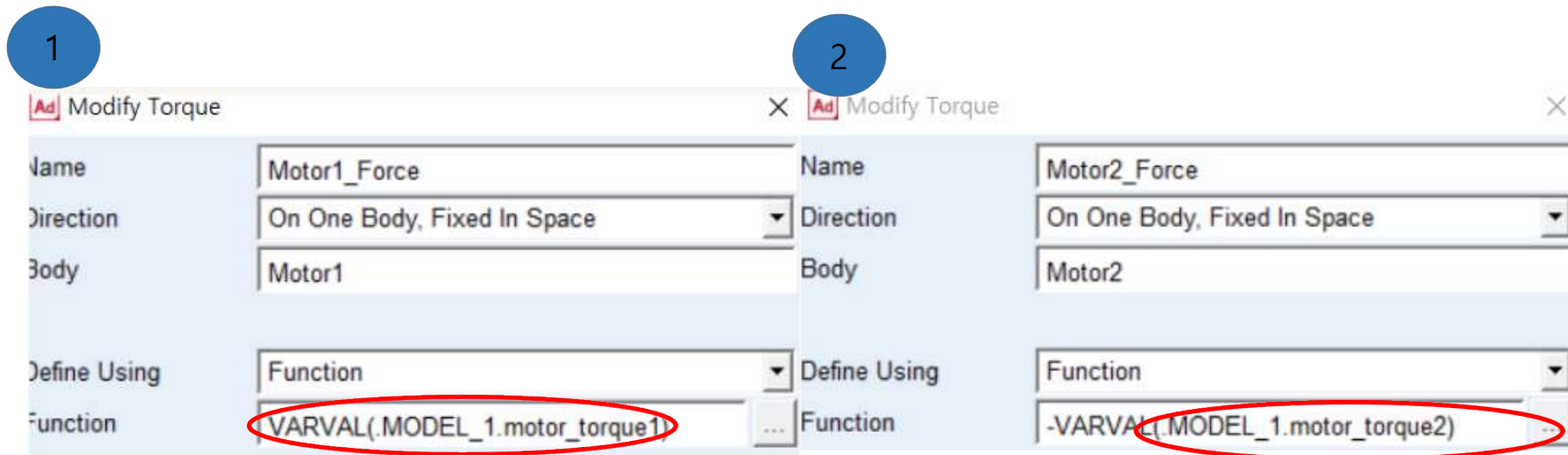
측정한 값을 활용해 LQR(상태궤환) 제어를 수행하여 모터에 토크 인가

—→ Tray.cm
—→ Ang_ref

Adams 기구동역학 모델링 해석과정



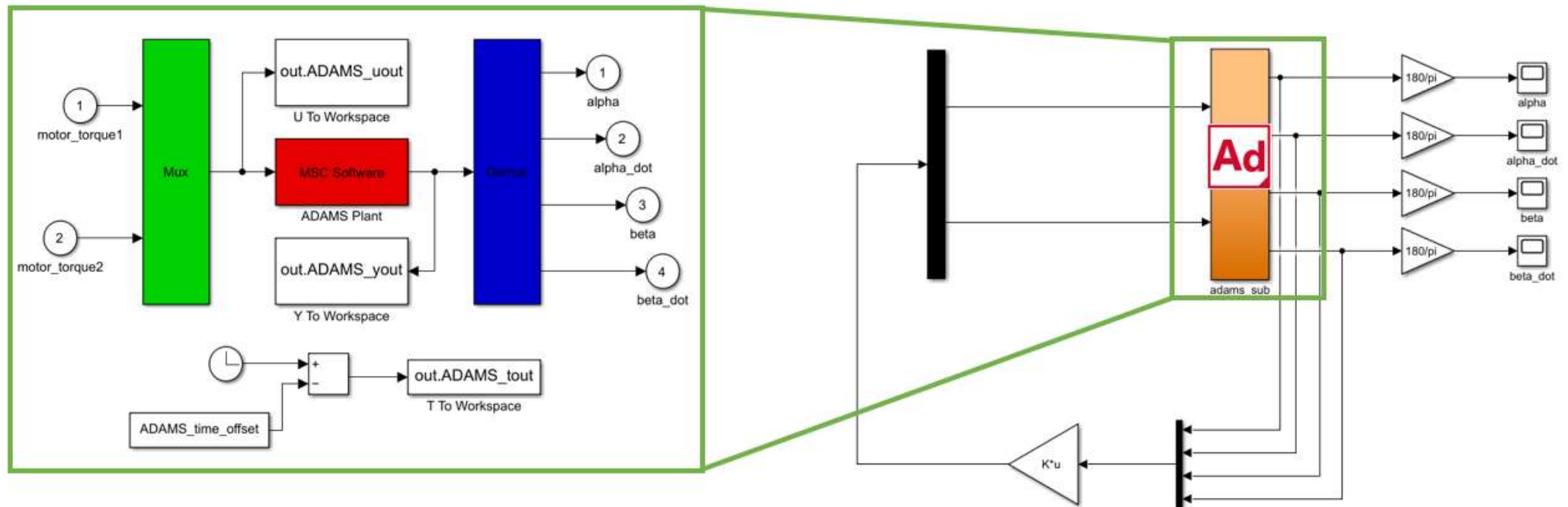
Adams 기구동역학 모델링 Motor



VARVAL : Torque입력 함수 사용
- Matlab (Co-sim) 적용

Adams 기구동역학 모델링 Motor

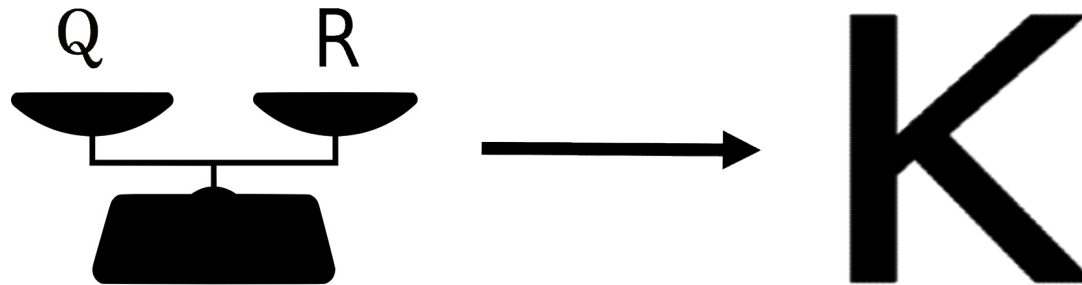
LQR control



* Adams ↔ Matlab : Co-sim을 이용한 Simulink block

Adams 기구동역학 모델링 Motor

LQR control



* Q : 성능(시간)

* R : 에너지(소모비용)

기준치	시간	소모값
$Q > R$	↓	↑
$Q < R$	↑	↓

Adams 기구동역학 모델링 Motor

LQR Process

- ✓ Q 와 단위행렬 R(가중치) 으로 피드백 이득(K) 설정
- ✓ Q와 R를 조정하여 제어에 적당한 K를 찾기 위한 지속적인 시뮬레이션 진행
- ✓ 최종 K값 도출
- ✓ 최종 K값을 적용시켜 개선모델 시뮬레이션

```
Ip= 0.005; %kg/m^2 판의 관성모멘트
```

```
Tf = 5; % 총 시뮬레이션 시간
```

```
Q=diag([100 1 100 1])*100;
```

```
R=eye(2)*0.01;
```

```
A=[0 1 0 0;0 0 0 0;0 0 0 1;0 0 0 0];
```

```
B=[0 0;1/Ip 0;0 0;0 1/Ip];
```

```
K=lqr(A,B,Q,R,0);
```

```
K =  
  
1.0e+03 *  
  
1.0000    0.1000   -0.0000   -0.0000  
0.0000    0.0000    1.0000    0.1000
```

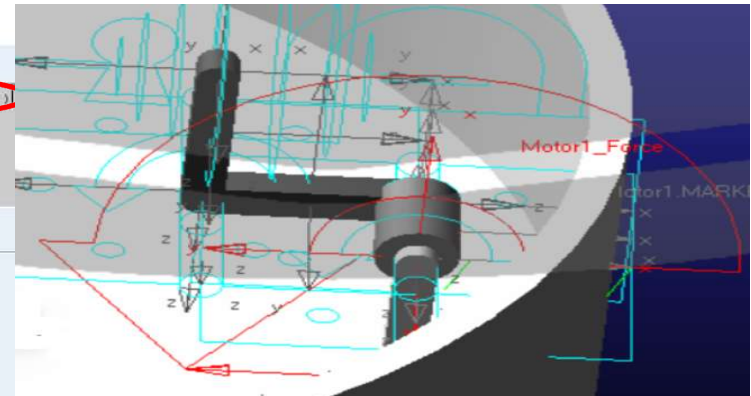
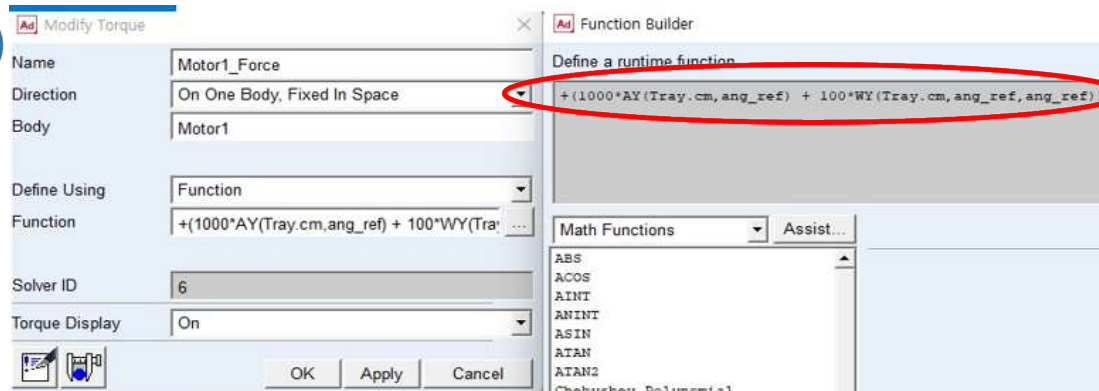


Process를 통해 도출한	K
Angle(각도)	1000
Angular velocity(각속도)	100

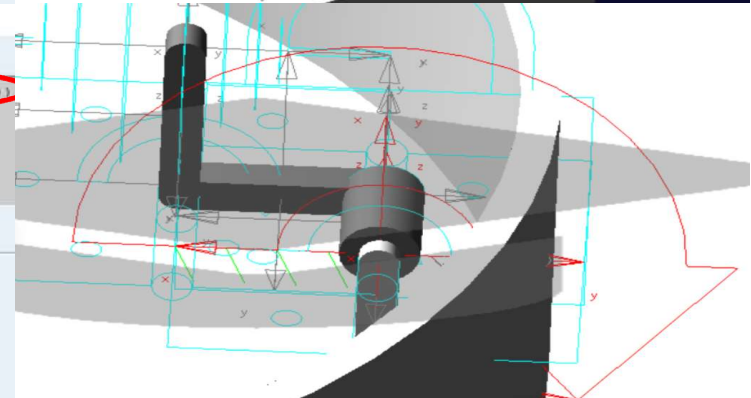
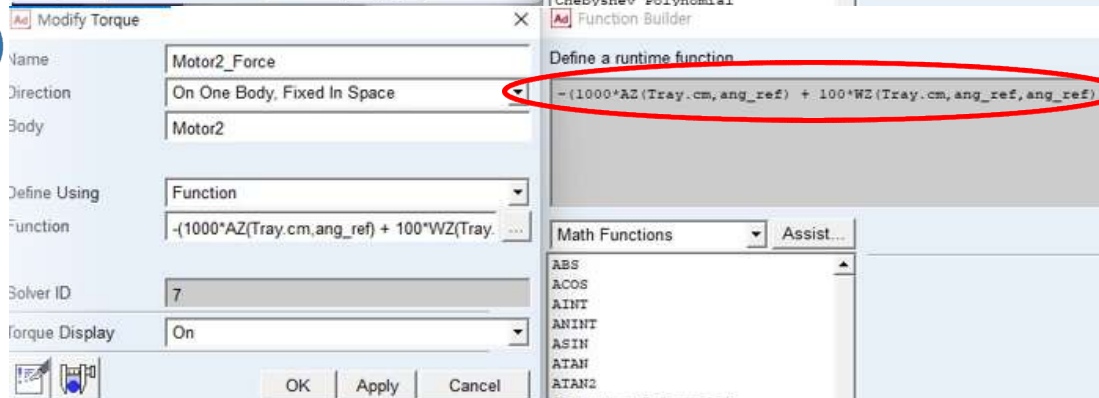
Adams 기구동역학 모델링 Motor

Motor_1 Motor_2의 Torque구현

1



2



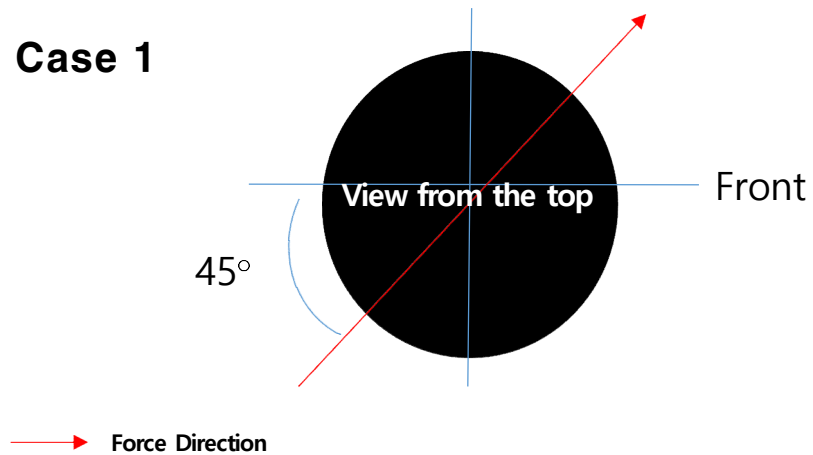
시뮬레이션



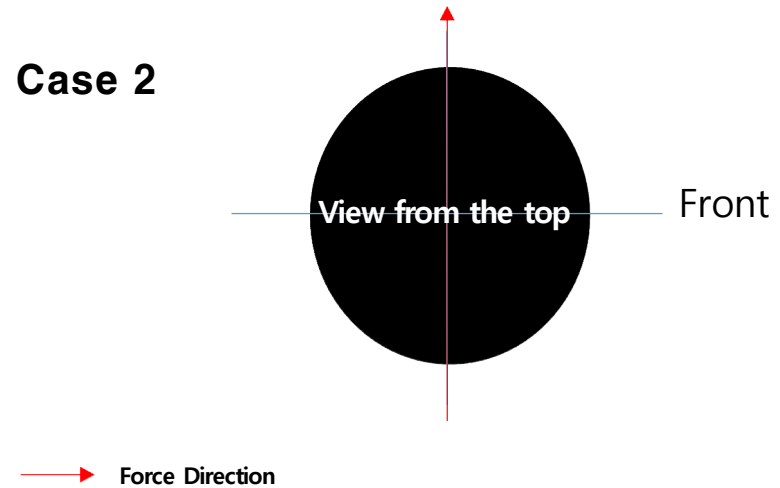
- Case
- 기존모델(Fixed Tray)
- 수평변화 해석
- 개선모델(Gimbal Tray)
- 수평변화 해석

시뮬레이션 Case

Case 1



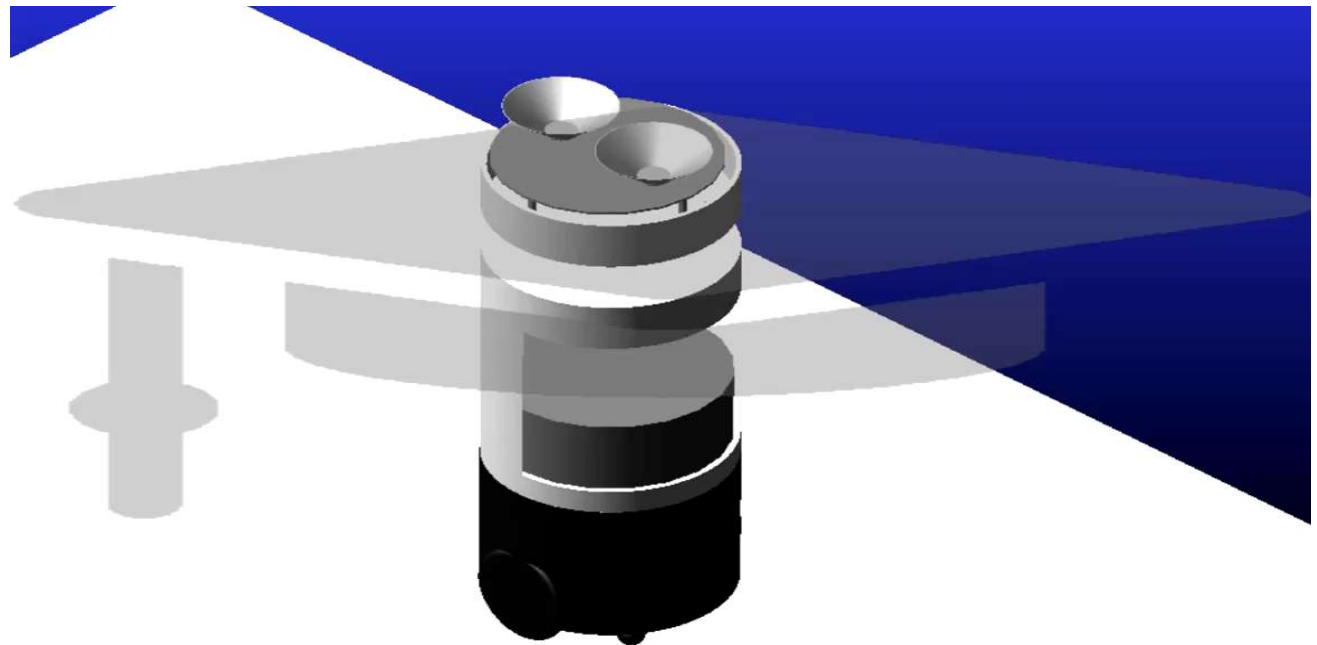
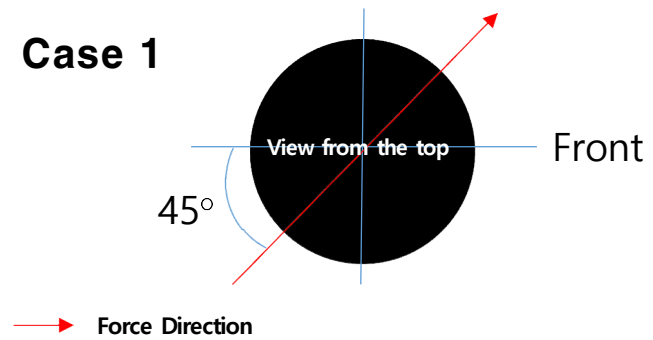
Case 2



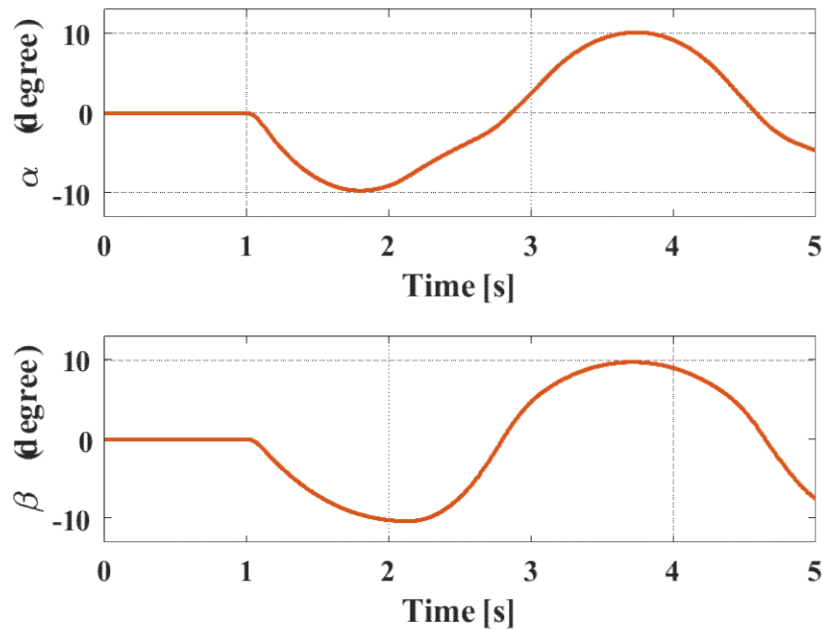
시뮬레이션 기존모델 (Fixed Tray)

Simulation

Case 1



시뮬레이션 수평변화 해석



Fixed Tray : Case 1

α

10.25°

The biggest angle error after the force.

* 소수점 셋째 자리에서 반올림

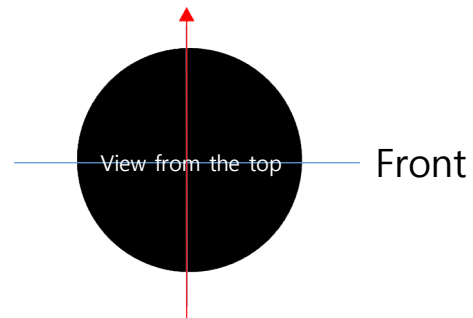
β

10.17°

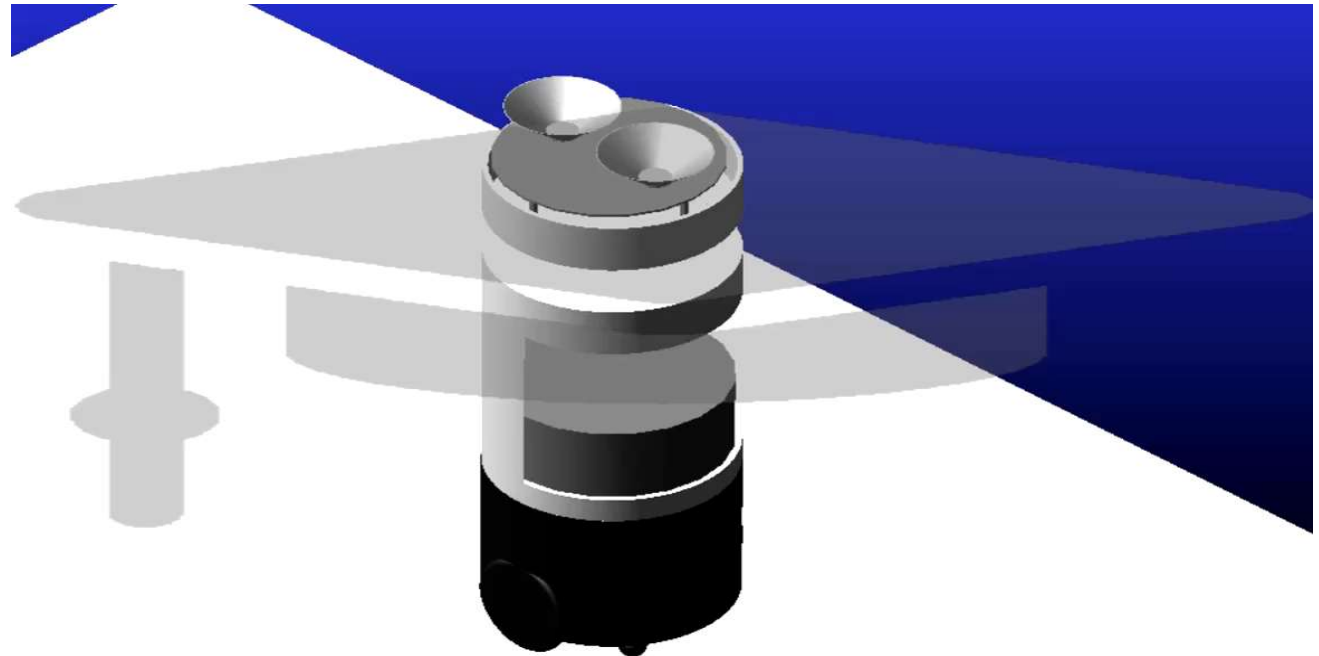
시뮬레이션 기존모델 (Fixed Tray)

Simulation

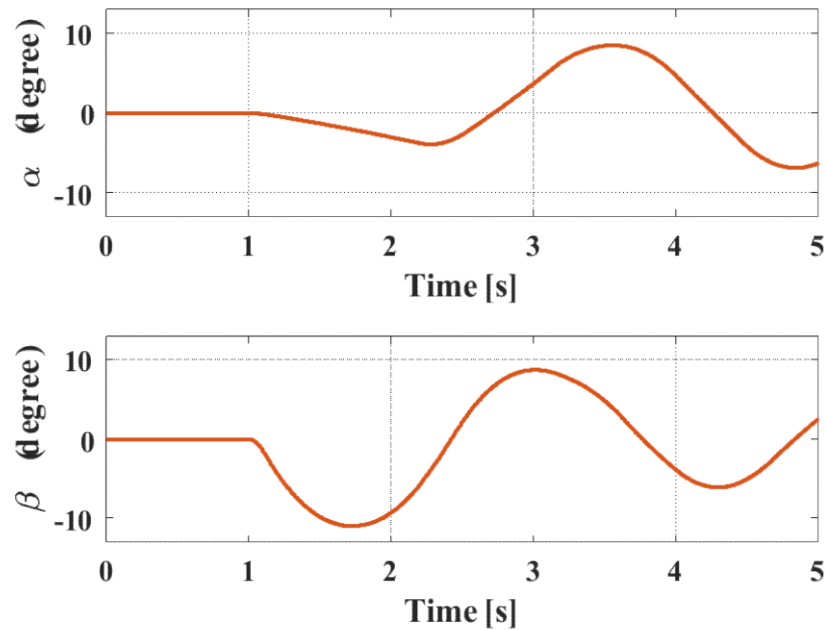
Case 2



→ Force Direction



시뮬레이션 수평변화 해석



Fixed Tray : Case 2

α

8.41°

The biggest angle error after the force.

* 소수점 셋째 자리에서 반올림

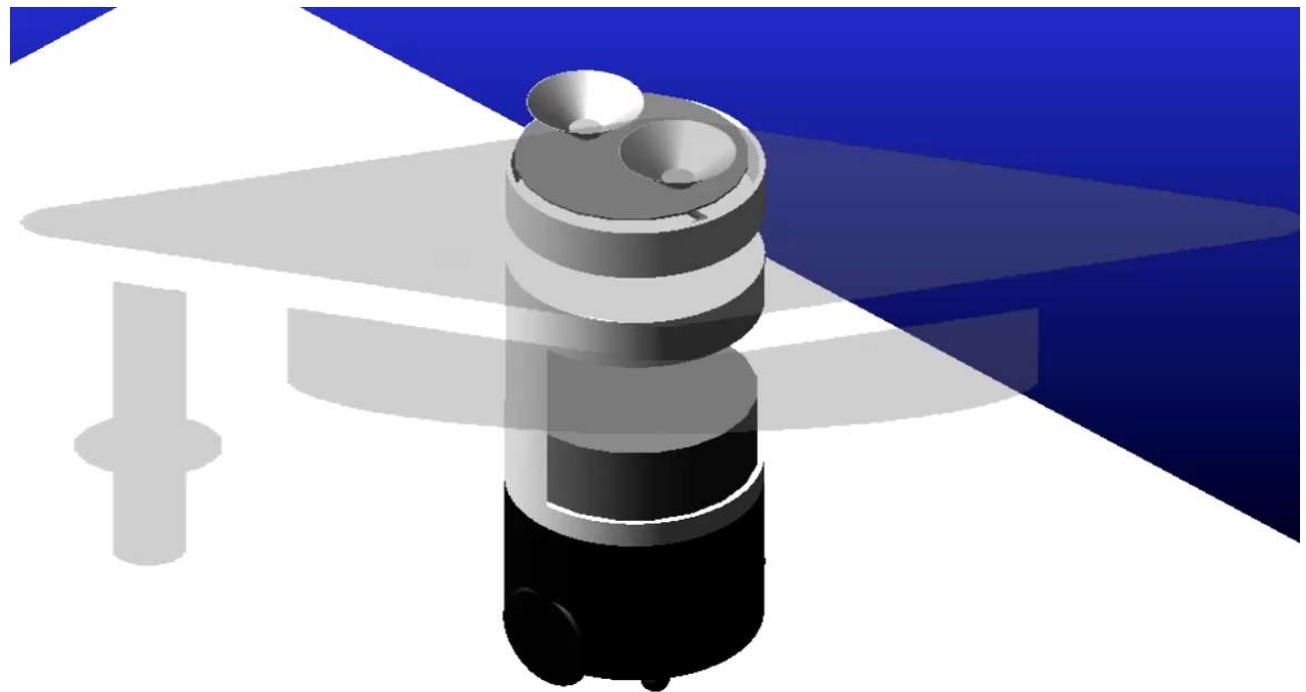
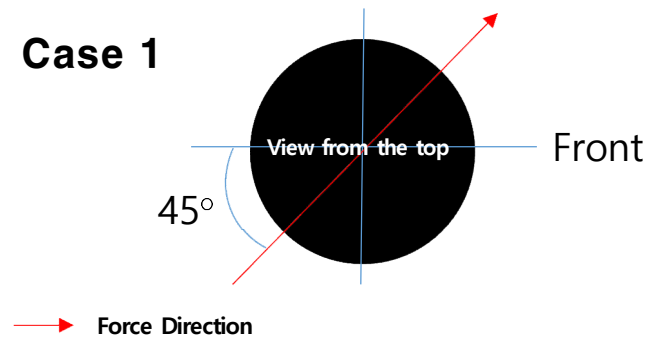
β

10.85°

시뮬레이션 개선모델 (Gimbal Tray)

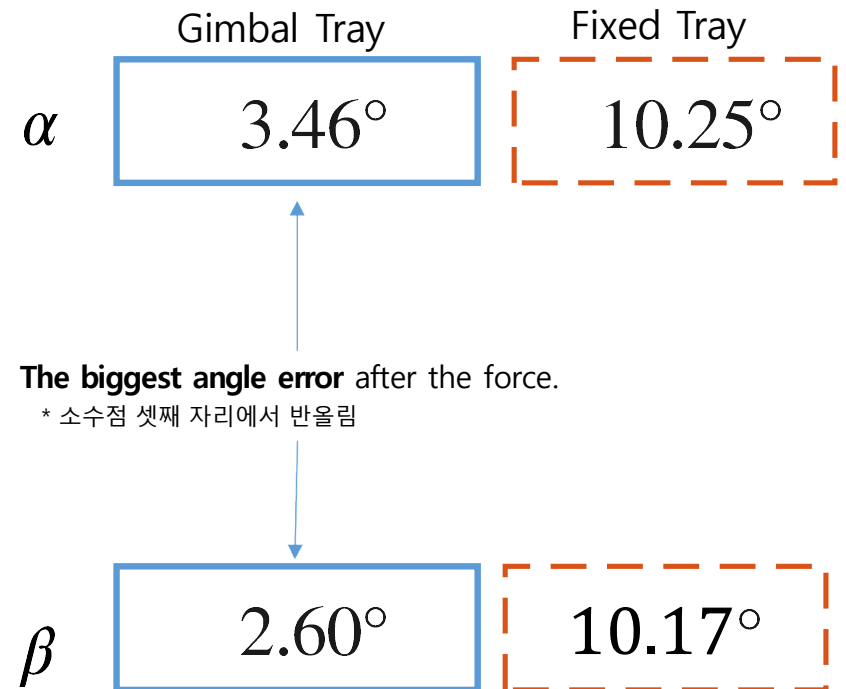
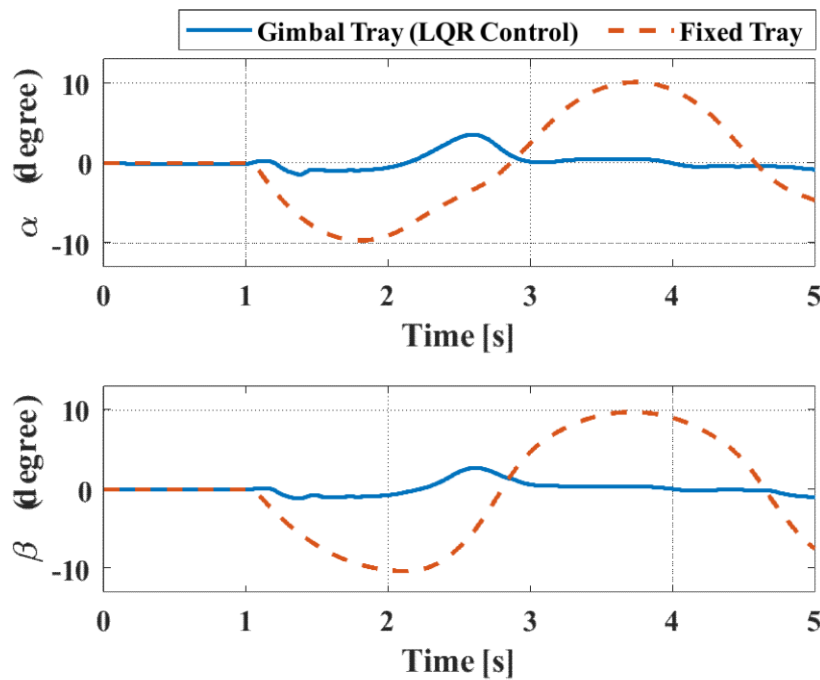
Simulation

Case 1



시뮬레이션 수평변화율 해석

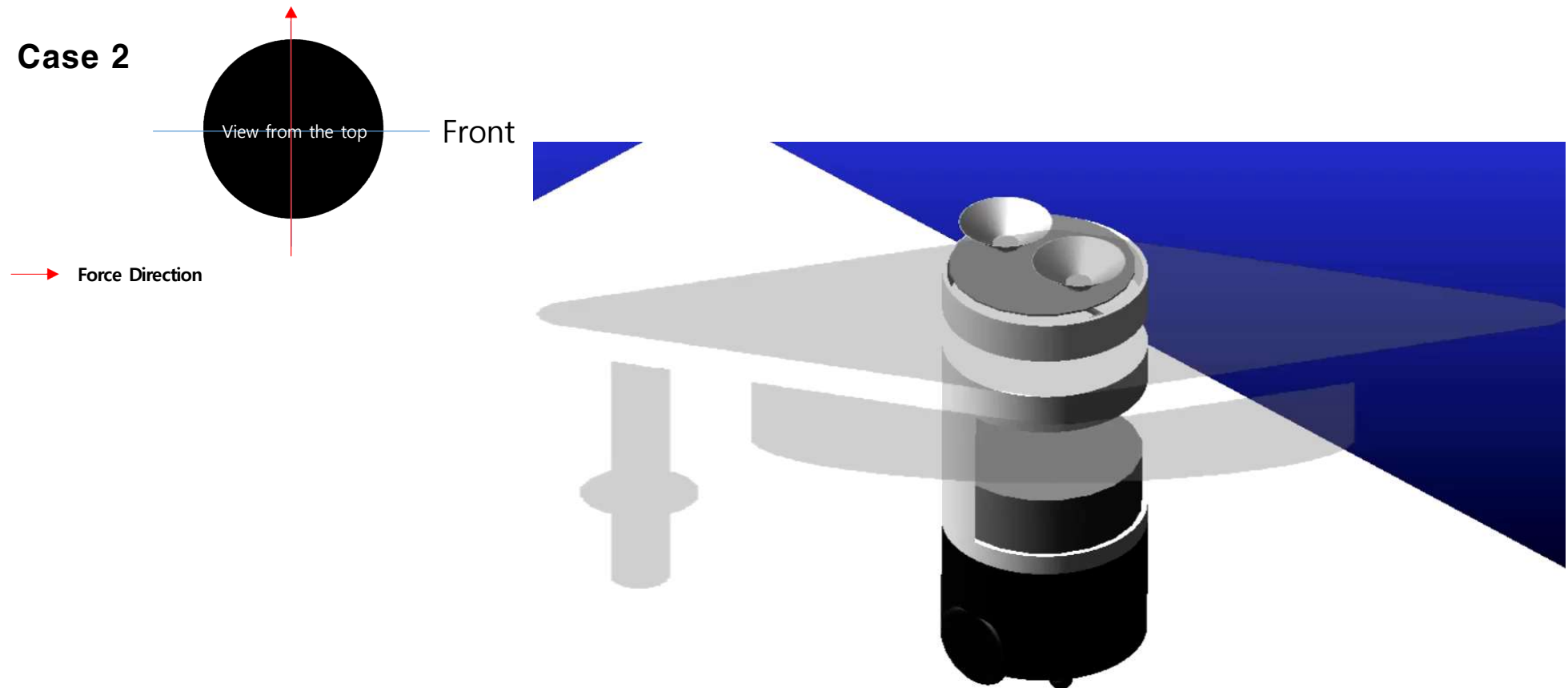
Case 1



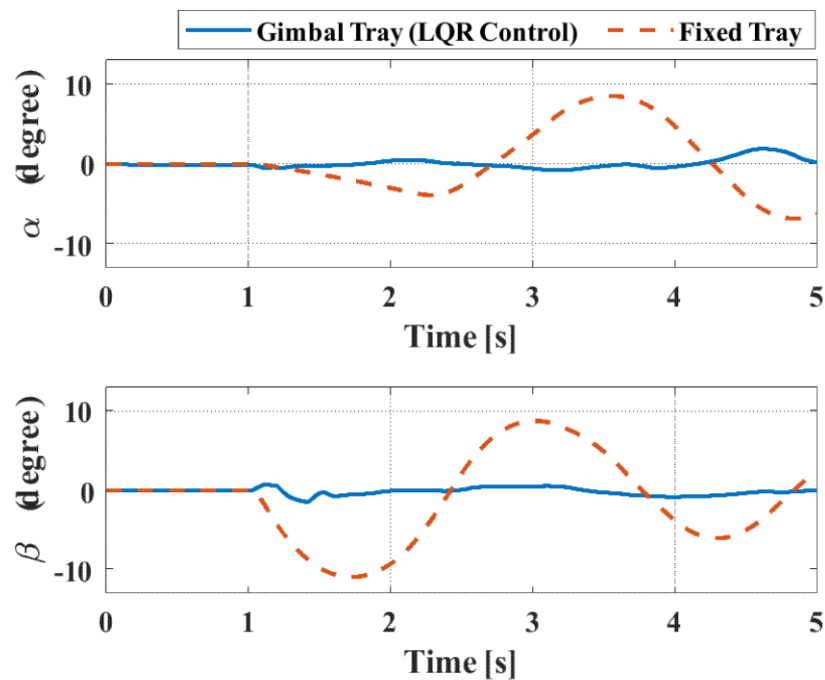
시뮬레이션 개선모델 (Gimbal Tray)

Simulation

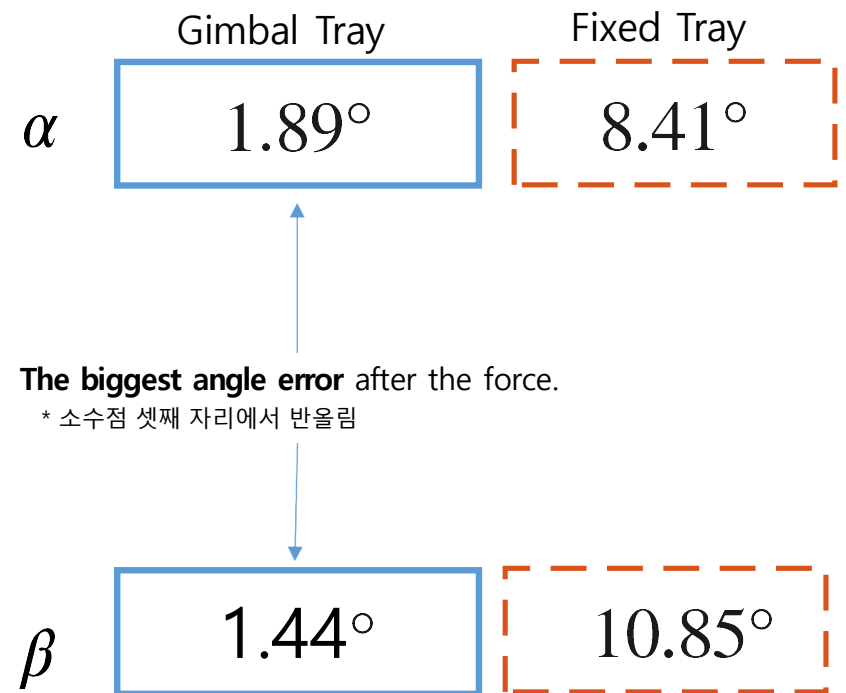
Case 2



시뮬레이션 수평변화 해석



Case 2



결론



- 해석비교
- 연구요약

결론 해석비교

기존모델(Fixed Tray)

	Case 1	Case 2
α Angle error	10.25°	8.41°
β Angle error	10.17°	10.85°



개선모델(Gimbal Tray)

	Case 1	Case 2
α Angle error	3.46°	1.89°
β Angle error	2.60°	1.44°

α : 71.89% β : 80.58%
Angle error 개선

결론 연구요약

- ✓ Adams modeling
- ✓ Adams & Matlab co-simulation
- ✓ Tray 개선 : LQR control 적용
- ✓ 기존모델 | 개선모델 수평변화 해석
- ✓ Tray위 물체의 변화를 최소화하여 2차 사고를 방지하여 보다 안전한 서빙로봇으로 운반 가능