



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 학위논문

외란 관측기를 이용한 휴머노이드 무
계 중심 유연 동작 제어

Center of Mass Compliance Control of
Humanoid using Disturbance Observer

2023년 2월

서울대학교 대학원

지능정보융합학과

박 경 재

외란 관측기를 이용한 휴머노이드 무계 중심 유연 동작 제어

Center of Mass Compliance Control of
Humanoid using Disturbance Observer

지도 교수 박 재 흥

이 논문을 공학석사 학위논문으로 제출함
2023년 1월

서울대학교 대학원
지능정보융합학과
박 경 재

박경재의 공학석사 학위논문을 인준함
2023년 1월

위 원 장 _____ 곽 노 준 (인)

부위원장 _____ 박 재 흥 (인)

위 원 _____ 전 동 석 (인)

초 록

로봇의 작업 환경이 인간의 일상과 점점 가까워짐에 따라, 인간의 안전을 보장할 수 있는 유연 동작 제어 방식들이 연구되어 왔다. 특히, 휴머노이드 로봇에 있어서는, 인간의 안전을 보장하기 위해 유연 동작을 생성함에 더해, 유연 동작 과정에서 로봇 또한 안정적으로 균형을 유지할 수 있어야 한다. 추가로, 휴머노이드 로봇이 수행 중인 작업 혹은 환경에 적합할 수 있도록 독립적으로 유연 동작을 생성하고, 직관적으로 이를 제한할 수 있어야 한다. 본 논문에서는, 협동 작업을 위한 휴머노이드 로봇의 무게 중심 유연 동작 제어 알고리즘을 제안한다. 제안하는 알고리즘은 상태 관측기와 외란 양성 피드백에 기반한다. 휴머노이드 로봇의 무게 중심 제어 성능 모델에 기반하여 상태 관측기를 설계하였고, 이를 통해 무게 중심에 발생한 외란을 관측한다. 관측된 외란은 참조 무게 중심 경로에 양성 피드백되어 휴머노이드 로봇의 유연 동작을 생성한다. 이를 통해 무게 중심 좌표계에서 축 별로 독립적인 유연성을 구현하고, 구현된 유연성을 통해 외란에 대응하여 로봇이 균형을 유지할 수 있다. 제안하는 알고리즘의 성능을 휴머노이드 로봇 DYROS-JET를 활용한 동역학 시뮬레이션과 실제 로봇 실험을 통해 검증하였다.

주요어 : 휴머노이드 로봇, 외란 관측기, 유연 동작 제어
학 번 : 2021-27111

목 차

제 1 장 서론	1
제 1 절 연구 배경 및 동기	1
제 2 절 관련 연구	1
제 3 절 연구의 내용	2
제 4 절 논문의 구성	3
제 2 장 CoM 유연 동작 제어기	4
제 1 절 CoM 제어 성능 모델	4
제 2 절 제어 프레임워크의 흐름도 소개	5
제 3 절 제어 프레임워크의 수학적 모델링	6
제 3 장 동역학 시뮬레이션	9
제 1 절 로봇 및 시뮬레이션 환경 설명	9
제 2 절 CoM 위치 측정	11
제 3 절 유연성 독립 제어 시뮬레이션	12
제 4 절 충돌 외란 시 안정 균형 제어 시뮬레이션	14
제 4 장 실험	19
제 1 절 로봇 DYROS-JET 설명	19
제 2 절 충돌 외란 시 안정 균형 제어 실험	22
제 3 절 위치 추종 막힘 외란 실험	28
제 5 장 결론	33
참고문헌	35
Abstract	39

표 목차

[표 1] Control poles and observer poles.....	8
[표 2] Feedback Control gain and Observer gain	8
[표 3] Specification of DYRPS-JET	10
[표 4] Independent compliance simulation data	12
[표 5] Stable balance under impact disturbance simulation data	16
[표 6] Dynamixel PRO(H54-200-S500-R)의 Datasheet.....	16
[표 7] Stable balance under impact disturbance experiment data	24
[표 8] Position track blocking disturbance experiment data...	29

그림 목차

[그림 1] CoM control performance model.....	5
[그림 2] Block diagram of proposed compliance controller using state Observer	6
[그림 3] Humanoid Robot DYROS-JET	10
[그림 4] Computation of CoM position in global coordinate.....	11
[그림 5] Schematic figure of independent compliance simulation result.....	13
[그림 6] Independent compliance simulation result - Ratio of z-axis displacement to y-axis displacement.....	13
[그림 7] Stable balance under impact disturbance simulation snapshot	15
[그림 8] Stable balance under impact disturbance simulation graph	17-18
[그림 9] (a) DYROS-JET, (b) Joint configuration of DYROS-JET20	
[그림 10] Dynamixel PRO(H54-200-S500-R)의 설계도.....	21
[그림 11] Dynamixel PRO(H54-200-S500-R)의 성능 그래프 ..	21
[그림 12] Setup for stable balance under impact disturbance experiment	23
[그림 13] Stable balance under impact disturbance experiment graph	24-25
[그림 14] Stable balance under impact disturbance experiment snapshot	26
[그림 15] Setup for position track blocking disturbance experiment	28

[그림 16] Position track blocking disturbance experiment graph30-31

[그림 17] Position track blocking disturbance experiment snapshot
..... 32

제 1 장 서 론

제 1 절 연구 배경 및 동기

로봇은 실제 환경에서 인간을 대신하거나, 인간과 함께 작업을 수행하려는 목표 아래 지난 수십년간 활발히 연구 및 개발되어 왔다. 산업 현장에서 먼저 사용된 로봇은, 인간을 대신하여 Pick & Place와 같이 단순하지만, 높은 정확도의 위치 제어가 요구되는 작업을 수행했다. 이를 위해, [1,2]와 같은 방법들이 연구 및 개발되었다.

로봇이 발전함에 따라, 로봇은 산업 현장에서 벗어나 인간과 함께 협동 작업을 수행하게 되었다. 협동 작업에서는, 정확한 위치 제어보다는 함께 작업하는 인간의 안전이 우선시되는 제어가 요구되었다. 이에 따라 [3,4]와 같은 유연 동작 제어 방법들이 연구 및 개발되었다.

휴머노이드 로봇은 인간과 닮은 형상으로 인해, 다양한 상황에서 인간을 대신하거나, 인간과 함께 작업을 수행할 수 있을 것으로 기대되어 왔다 [5,6,7]. 2015년에 개최된 DARPA Robotics Challenge (DRC) [8,9,10]는 재난상황에서 휴머노이드 로봇이 위험하고 복잡한 작업을 수행할 수 있다는 가능성을 보여주었다. 2020년에 개최된 Avatar Xprize Contest Semifinal [11]은 휴머노이드 로봇이 재난상황 뿐만 아니라, 일상 생활에서 인간과 상호작용하며 협동 작업을 수행할 수 있다는 것을 보여주었다. 휴머노이드 로봇의 작업 환경이 점차 인간의 생활에 가까워짐에 따라, 작업 수행 중인 휴머노이드 로봇에 적용될 유연 동작 제어 방법이 필요하게 되었다.

제 2 절 관련 연구

휴머노이드 로봇에 적용된 대표적인 유연 동작 제어 방법으로는 임피던스 제어가 있다 [12,13,14]. 임피던스 제어는 유연 동작하고자 하는 말단 장치 혹은 관절에 Force/Torque 센서 혹은 Joint Torque 센서를 부착하여 가해지는 외력을 측정한다. 그 다음, 가상의 mass-spring-damper 시스템을 모델링하고, 측정된 힘으로부터 변위를

생성하여 유연 동작을 생성한다. 이 연구들에서는, 센서를 통해 힘을 유연 동작으로 쉽게 변환하여 제어하며 로봇에 가해지는 충격을 완화시킬 수 있었지만, 센서가 측정할 수 있는 방향의 외력에 대해서만 대응할 수 있었다. 또한, 센서의 bandwidth와 같은 성능에 의해 제어기의 성능들이 민감하게 결정되었다. 이러한 F/T 센서에 의존적인 성능의 한계를 극복하기 위해, Kim 등은 내재센서(엔코더)를 이용한 외란 관측기 기반의 유연 동작 제어 방법을 제안하였다 [15]. 이 논문에서는, 엔코더로부터 외란을 추정하고, 추정된 외란을 DC계인에 비례하여 모터 위치 입력에 더하여 외란 방향으로 로봇을 유연하게 동작하도록 하였다. 어플리케이션으로써, 휴머노이드 로봇의 보행에서 스윙 발과 지면의 충돌 시 충격 완화를 위해 사용되었다. 하지만, 관절 공간에서의 유연 동작은 이로 인해 발생하는 작업 공간에서의 움직임 예측하기 어려웠다. 또한, 작업 공간에서 동작의 유연성을 각각 독립적으로 제어해야 할 때 (예. 무게 중심(Center of Mass, CoM) z축 위치 유지, y축 유연 제어) 이를 구현하기 어려웠다.

제 3 절 연구의 내용

본 논문에서는, 제자리에서 작업 수행 중인 휴머노이드 로봇을 위한 유연 동작 제어 방법이 제안된다. 작업 수행 중인 휴머노이드 로봇을 위한 유연 동작 제어 방법은, 기존 유연 동작 제어 방법들의 목적인 인간의 안전을 보장하는 것에 더해, 유연 동작 과정에서 로봇이 안정적으로 대응하게 해야 한다. 또한, 특정 작업, 상황에 적합하도록 Position, Orientation의 유연성을 각각 독립적으로 제어 및 직관적으로 제한할 수 있어야 한다.

본 논문에서 제안되는 유연 동작 제어 방법은, 기존 관절 공간에서 구현되었던 외란 관측기 기반의 유연 동작 제어 방법을, 작업 공간에 적용함으로써 휴머노이드 로봇의 CoM의 위치를 방향 (x,y,z) 에 따라 독립적으로 유연 동작하게 한다. 높이가 일정한 로봇 CoM의 수평 방향 움직임을 spring-damper 근사화 모델 [16]을 통해 모델링하고, 이 모델에 기반한 외란 관측기를 이용하여 로봇에 가해지는 외란을 추정한다. 이후, 추정된 외란을 DC 계인에 비례하여 참조 CoM 명령에 더하여, 외란 방향의 유연한 CoM 동작을 구현하였다.

본 논문에서 제안되는 휴머노이드 CoM 유연 동작 제어 프레임워크를 통해 위치 제어 기반 휴머노이드 로봇의 CoM은 1) F/T 센서를 사용하지 않고, 2) 방향에 따라 독립적으로 유연 동작을 생성하며, 3) 유연 동작 과정에서 외란에 안정적으로 대응할 수 있다.

제 4 절 논문의 구성

본 논문은 총 4절로 구성되어 있다. 먼저, 2절에서는 기반이 되는 배경지식과 제안하는 알고리즘이 소개되며, 3절에서는 제안하는 알고리즘을 동역학 시뮬레이션을 통해 검증한다. 제안하는 알고리즘이 실제 로봇에서도 외란에 대응할 수 있음을 4절에서 확인하고, 마지막 5절에서 결론이 논의된다.

제 2 장 CoM 유연 동작 제어기

2 장에서는, 본 논문에서 제안되는 직관적이고, 방향 별로 독립적인 유연 동작 제어를 위한 휴머노이드 CoM 유연 동작 제어기가 소개된다. 선행 연구에서 제안된 관절 공간 유연 동작 제어 [15]는, 관절 공간 유연 동작으로 인해 발생하는 작업 공간에서의 동작을 예측하기 어려웠고, 이로 인해 원하지 않는 작업 공간에서의 동작이 발생할 수 있었다. 또한, 휴머노이드 로봇의 안정성에 직결될 수 있는 특정 방향의 동작들 (예: CoM z축 위치 유지)의 유연성을 독립적으로 제어하기 어려웠다. 따라서, 본 논문에서는 선행 연구에서 제안된 관절 공간 유연 동작 제어와 CoM 제어 성능 모델을 이용해, CoM의 동작을 방향 별로 독립적인 유연성을 갖도록 제어하는, CoM 유연 동작 제어기가 제안된다.

1절에서는 제안되는 제어기의 기반이 되는 CoM 제어 성능 모델이 소개된다. 다음으로, 2절에서는 제안되는 CoM 유연 동작 제어기의 프레임워크의 흐름도가 소개된다. 마지막으로, 3절에서는 CoM 유연 동작 제어의 수학적 모델링과 제어기의 세부 구성들이 설명된다.

제 1 절 CoM 제어 성능 모델

Kim 등은 실제 휴머노이드와 이상적인 모델 사이의 모델링 오차를 완화하기 위해, 로봇의 CoM 움직임을 spring-damper가 있는 선형 역진자 모델로 묘사하는 CoM 제어 성능 모델 [16]을 제안하였다 ([그림 1] 참조). 여기서, c_x^{des} 는 CoM의 목표 경로이며, c_x 는 실제 CoM 위치를 나타낸다. 하위 레벨 제어기에 의한 CoM 추종 제어 성능이 [그림 1]과 같은 스프링, 댐퍼로 구성된 2차 동역학 모델로 근사되었다. 모델에서 c_x 와 c_x^{des} 사이의 관계식은 (1)과 같이 표현된다.

$$\ddot{c}_x = k_{p,x}(c_x^{des} - c_x) - k_{v,x}\dot{c}_x \quad (1)$$

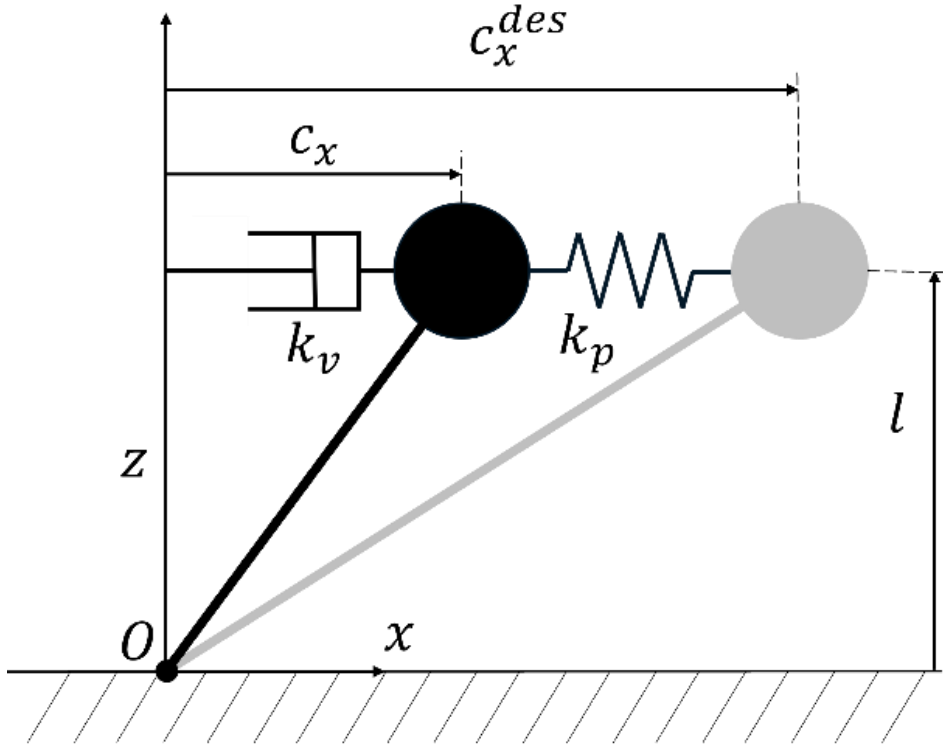


그림 1: CoM control performance model

이 때, $k_{p,x}$ 와 $k_{v,x}$ 는 스프링과 댐핑 계수이다. $k_{p,x}$ 와 $k_{v,x}$ 는 목표 CoM 경로 c_x^{des} 와 하위 레벨 제어기에 의한 실제 CoM 위치 c_x 을 매트랩의 시스템 식별 도구 (Matlab System Identification Toolbox)를 사용하여 얻을 수 있다. 본 논문에서는 이 과정을 y 축에서 진행하여, cubic trajectory로 주어진 c_y^{des} 와 c_y 에 시스템 식별 도구를 사용하여 $k_{p,y} = 225.5, k_{v,y} = 6.2$ 가 계산되었다.

제 2 절 제어 프레임워크의 흐름도 소개

본 논문에서 제안되는 CoM 유연 동작 제어기의 전체 프레임워크의 흐름도를 [그림 2]에 나타냈다. c_x^{ref} 는 참조 CoM 경로, c_x^{des} 는 목표 CoM 경로, y_{com} 은 제어기의 출력으로 CoM 위치 ($=c_x$), d 는 외란을 의미한다. c_x, \dot{c}_x 은 실제 CoM 위치와 속도, \hat{d} 을 포함한 상태 벡터 $\hat{\mathbf{x}} =$

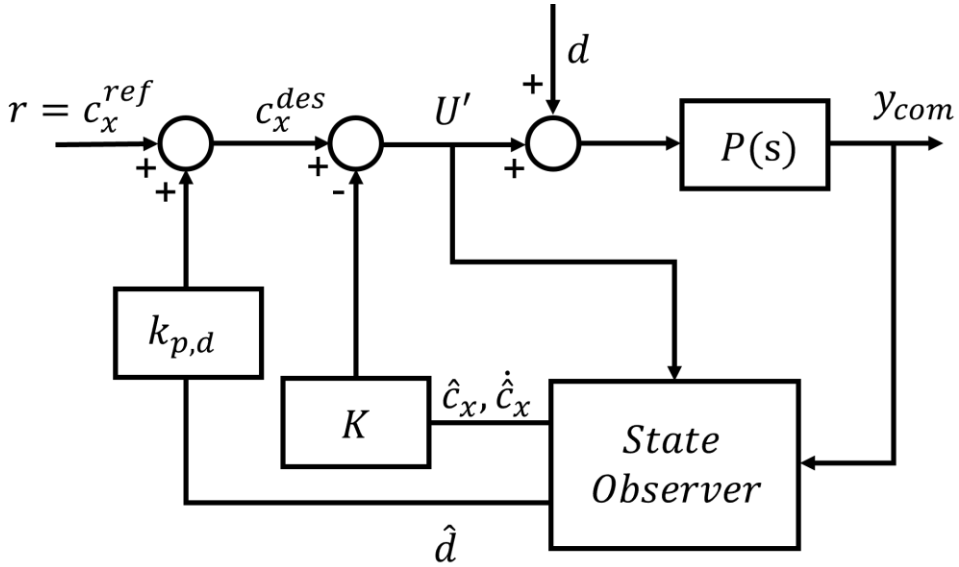


그림 2: Block diagram of proposed compliance controller using state Observer

$[\hat{c}_x \ \dot{\hat{c}}_x \ d]^T$ 을 추정한다. 추정된 상태 벡터 $\hat{c}_x, \dot{\hat{c}}_x$ 을 통해 Observed State Feedback Control이 구성되고, 추정된 외란 \hat{d} 은 선행 연구의 관절 공간 유연 동작 제어 [15]에서의 양성 피드백 개념을 이용하여, k_{dist} 에 비례하여 참조 CoM 경로 (c_x^{ref})에 더해져 목표 CoM 경로 (c_x^{des})을 생성한다. 여기서, c_x^{des} 로 인해 외란 방향으로 CoM이 유연하게 동작된다.

제 3 절 제어 프레임워크의 수학적 모델링

[그림 2]에서 소개된 CoM 유연 동작 제어기는, 다음의 (5)~(11)과 같은 상태 공간 방정식으로 유도된다. 여기서 상태 공간 방정식은 x 축에 대해서 서술되었다. 먼저, (1)의 제어 성능 모델을 사용해 (2)의 상태 방정식과 (3)의 출력 방정식이 구성되었다.

$$\begin{aligned}
\begin{bmatrix} \dot{c}_x \\ \ddot{c}_x \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} \dot{c}_x \\ k_{p,x}(c_x^{des} - c_x) - k_{v,x}\dot{c}_x \end{bmatrix} \\
&= \begin{bmatrix} \dot{c}_x \\ -k_{p,x}c_x - k_{v,x}\dot{c}_x + k_{p,x}c_x^{des} \end{bmatrix} \\
&= \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -k_{p,x} & -k_{v,x} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} c_x \\ \dot{c}_x \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ k_{p,x} \end{bmatrix} c_x^{des} \tag{2}
\end{aligned}$$

$$y_{com} = [1 \quad 0] \begin{bmatrix} c_x \\ \dot{c}_x \end{bmatrix} \tag{3}$$

$$\dot{d} = 0 \tag{4}$$

(2)와 (3), 그리고 (4)의 외란 모델을 사용해 외란을 포함한 상태 벡터(\mathbf{x})로 구성된 (5)의 상태 방정식, (6)의 출력 방정식을 구성하였다.

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{B}u' \tag{5}$$

$$y = \mathbf{C}\mathbf{x} \tag{6}$$

$$\mathbf{x} = [c_x \quad \dot{c}_x \quad d]^T,$$

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ -k_p & -k_v & k_p \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \mathbf{B} = \begin{bmatrix} 0 \\ k_p \\ 0 \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{C} = [1 \quad 0 \quad 0] \tag{7}$$

(5), (6)에 기반하여 아래 (8)의 상태 관측기가 구성되었다.

$$\hat{\mathbf{x}} = \mathbf{A}\hat{\mathbf{x}} + \mathbf{B}u' + \mathbf{L}(y_{com} - \hat{y}) \tag{8}$$

표 1: Control poles and observer poles

Control poles	Observer poles
$-10 \pm 2i$	$-30 \pm 2i, -20$

표 2: Feedback Control gain and Observer gain

K	L
-0.574, 0.061	10.1302, 7.0109, 9.5910

$$u' = -\mathbf{K}\hat{\mathbf{x}} + c_x^{des} \quad (9)$$

$$c_x^{des} = r + k_{dist}\hat{d} \quad (10)$$

$$r = c_x^{ref} \quad (11)$$

식 (7)의 행렬 \mathbf{A}, \mathbf{C} 로부터 가관측성 행렬의 랭크가 3임을 확인할 수 있다. 이로 인해 상태 벡터 (\mathbf{x})를 구성하는 CoM 위치, 속도(c_x, \dot{c}_x) 그리고 외란 (d)을 관측할 수 있다. 이를 위한 식 (8)의 상태 관측기를 구성하기 위해 [표 1]의 Observer poles이 설정되었다. 식 (7)의 행렬 \mathbf{A}, \mathbf{B} 로부터 계산된 가제어성 행렬의 랭크가 2이기 때문에, 상태 벡터 (\mathbf{x})에서 외란 (d)은 제어할 수 없다. 이에 따라 Observed State Feedback Control에는 관측된 CoM 위치, 속도($\hat{c}_x, \dot{\hat{c}}_x$)만 사용되었다. Control poles은 [표 1]과 같이 설정되었다.

목표 CoM 경로(c_x^{des})는 추정된 외란 \hat{d} 을 $k_{p,d}$ 에 비례하게 참조 CoM 경로 (c_x^{ref})에 더하여 생성된다. 생성된 목표 CoM 경로 (c_x^{des})로 인해 외란 방향으로 CoM이 유연하게 동작된다.

제안되는 제어 프레임워크는, 1절의 CoM 제어 성능 모델에 기반한다. 이 CoM 제어 성능 모델은, CoM의 높이를 지면으로부터 일정하다고 가정하고, CoM의 동작을 축 별로 고려하였다. 제어 프레임워크는 이에 기반하여, CoM의 동작을 작업 공간으로 설정하고, 방향 별 \hat{d} 을 추정한 다음, 이에 따른 제어 입력을 생성한다. 이를 통해 선행 연구의 관절 공간

유연 동작 제어와 달리, CoM 동작의 유연성을 방향에 따라 독립적으로 제어할 수 있다.

제 3 장 동역학 시뮬레이션

본 절에서는 제안되는 CoM 유연 동작 제어를 검증하기 위해 수행된 동역학 시뮬레이션 결과가 소개된다. 먼저 1절에서는 시뮬레이션에 사용된 휴머노이드 로봇 DYROS-JET와 동역학 시뮬레이션 환경이 설명된다. 2절과 3절에서는 2가지 유형의 외란을 가정하고, 이에 따른 선행 연구의 관절 공간 유연 동작 제어와 본 논문에서 제안하는 CoM 유연 동작 제어의 시뮬레이션 결과가 비교 및 분석된다. 2절에서는 제자리에서 업무 수행 중인 로봇을 가정하여 두 발이 모두 지면에 닿아 있는 상태의 로봇에 y 축과 z 축이 혼합된 형태의 외란 (유형 1)이 가해지는 시뮬레이션이 수행되었다. 3절에서는 제자리에 있는 로봇에 특정 위치까지 이동하는 물체가 로봇의 pelvis에 충돌하는 시뮬레이션이 수행되었다. 시뮬레이션에서는 제안되는 CoM 유연 동작 제어는 y 축 방향으로만 구현되어 이에 따른 유연 동작을 확인할 수 있었다.

제 1 절 로봇 및 시뮬레이션 환경 설명

본 연구에서 제안되는 CoM 유연 동작 제어를 검증하기 위해 휴머노이드 로봇 DYROS-JET ([그림 3] 참조)와 ROBOTI LLC에서 개발된 동역학 시뮬레이터 MuJoCo가 사용되었다. 로봇의 전체 높이는 1.63m, 골반까지의 높이는 0.72m이고, 무게는 48kg이다. 로봇은 총 33자유도로 하체는 한쪽 다리에 6자유도씩 총 12자유도로 구성되어 있다. 양 발목에는 지면 반발력을 측정하기 위해 6축 F/T 센서가 부착되어 있으며, 몸통의 관성 정보를 수집하기 위해 골반에 IMU 센서가 부착되어 있다. 자세한 로봇의 사양은 [표 2]와 같이 제시된다.

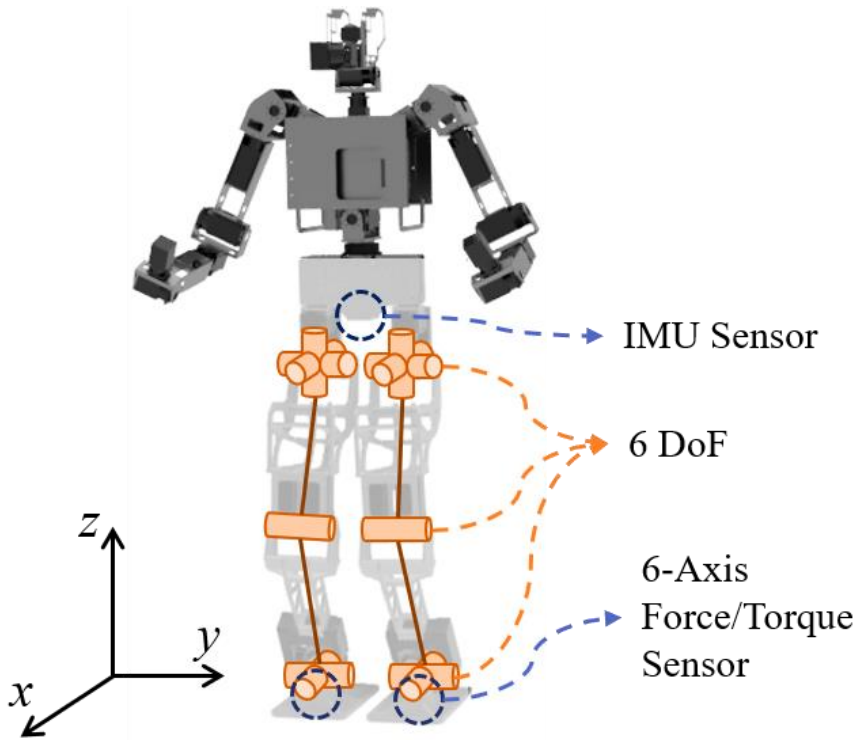


그림 3: Humanoid Robot DYROS-JET

표 3: Specification of DYROS-JET

Degree of Freedom	Upper Body	20
	Lower Body	12 (6 for each leg)
Height	Overall	1.63 m
	Pelvis	0.72 m
Weight	48 kg	
Sensors	Pelvis	IMU Sensor (3DM-GX4-25™)
	Ankle	Two 6-axis force/torque Sensor (ATI mini85)

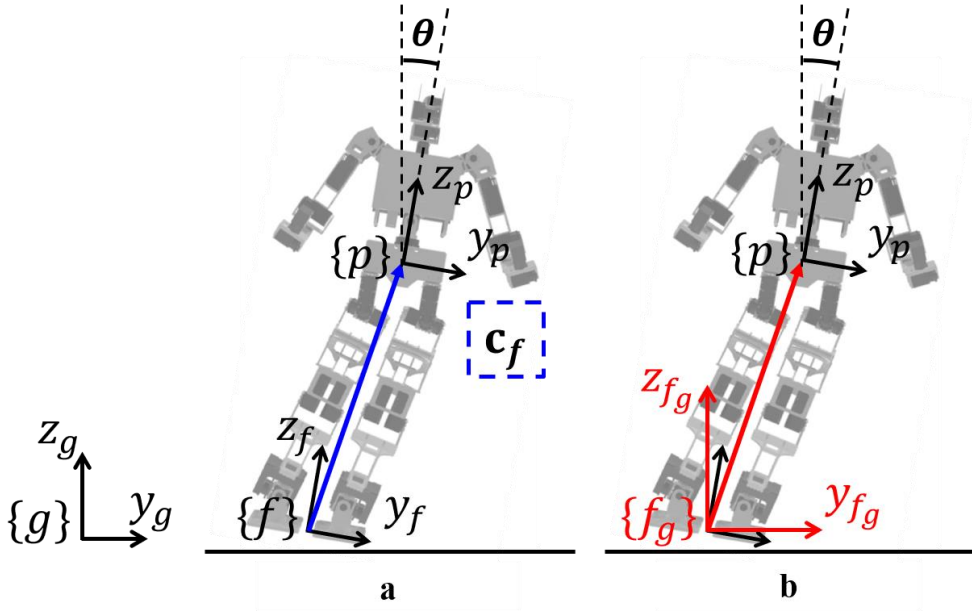


그림 4: Computation of CoM position in global coordinate

제 2 절 CoM 위치 측정

본 논문에서 CoM 위치를 측정한 방식이 [그림 4]에 제시되었다. 먼저, [그림 4]의 a와 같이 관절 엔코더 값을 기반으로 두 지지 발 중앙에 위치한 좌표계($\{f\}$) 기준 CoM 위치인 \mathbf{c}_f 가 계산된다. 그 다음 골반($\{p\}$)에 위치한 IMU 센서로부터 회전 변환 행렬 ${}^g\mathbf{R}$ 이 계산되고, 관절 엔코더 값으로 지지 발 중앙 좌표계($\{f\}$)와 골반($\{p\}$)사이의 회전 변환 행렬 ${}^p_f\mathbf{R}$ 이 계산된다. 이를 통해 지지 발의 기울기가 반영된 글로벌 좌표계 ($\{f_g\}$) 기준 CoM 위치 \mathbf{c} 가 계산된다 (식 (12)).

$$\mathbf{c} = {}^g\mathbf{R} \cdot {}^p_f\mathbf{R} \cdot \mathbf{c}_f \quad (12)$$

제 3 절 유연성 독립 제어 시뮬레이션

유연성 독립 제어 시뮬레이션에서는 [그림 5]의 첫 번째 그림과 같이 두 발이 지면에 닿아 있는 휴머노이드의 pelvis에 y축과 z축 방향이 혼합된 형태의 외란 (외란 유형 1)이 2초 동안 가해진다. 시뮬레이션을 통해 본 논문에서 제안되는 CoM 유연 동작 제어가 CoM 동작의 유연성을 방향 별로 독립적으로 제어할 수 있음을 확인하고자 했다. 시뮬레이션에서 가해진 외란은 $F_y = 100N, F_z = 200N$ 으로 설정되었다. 제어 방식 별로 외란 유형 1에 의해 발생한 y축 변위에 대한 z축 변위의 비율을 [그림 6]에 나타냈다. 선행 연구에서 제안된 관절 공간 유연 동작 제어에서는, 2초 동안 발생한 y축 변위의 평균 18.49% 정도의 z축 변위가 발생했다. 반면, 본 논문에서 제안되는 CoM 유연 동작 제어에서는 발생한 y축 변위의 평균 6.35% 정도의 z축 변위가 발생했다 ([표 4]). 각 제어 방법이 외란에 대응한 결과를 단순화하여 [그림 5]의 a, b에 나타냈다. 본 논문에서 제안되는 CoM 유연 동작 제어는, 선행 연구의 관절 공간 유연 동작 제어와 달리, CoM의 특정 방향 동작만을 유연 대응하게 할 수 있었고, 시뮬레이션을 통해 이로 인해 발생하는 결과를 확인하였다. 관절 공간 유연 동작 제어에서는 관절 별 유연 동작으로 인해 발생하는 작업 공간 (CoM)에서의 동작을 예측하기 어려웠던 반면, CoM 유연 동작 제어에서는 y축으로는 유연하게 동작하면서 z축으로는 일정하게 유지하여 CoM 동작의 유연성을 방향 별로 직관적이고, 독립적으로 제어할 수 있음을 확인하였다.

표 4: Independent compliance simulation data

	관절 공간 유연 동작 제어	CoM 유연 동작 제어
Y축 변위 대비 Z축 변위	Mean 18.49%	Mean 6.35%

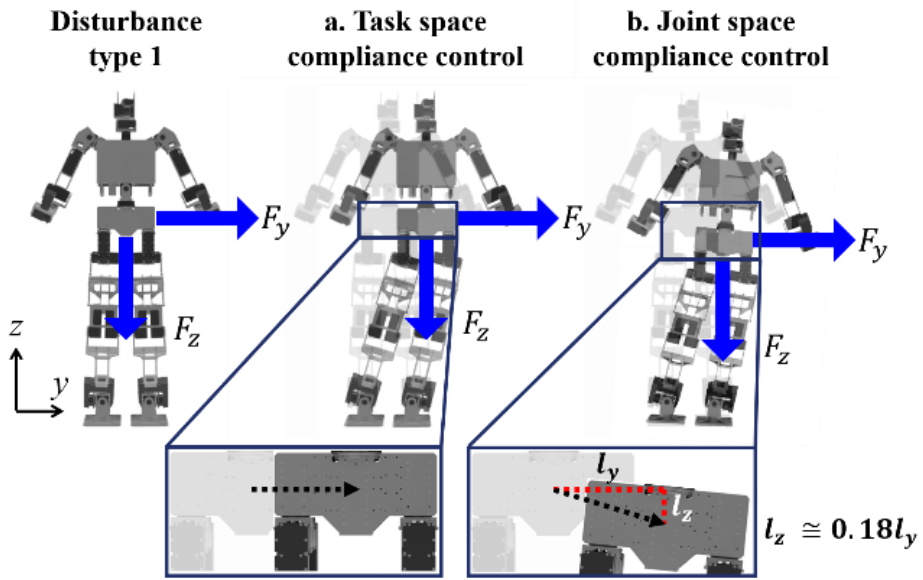


그림 5: Schematic figure of independent compliance simulation result

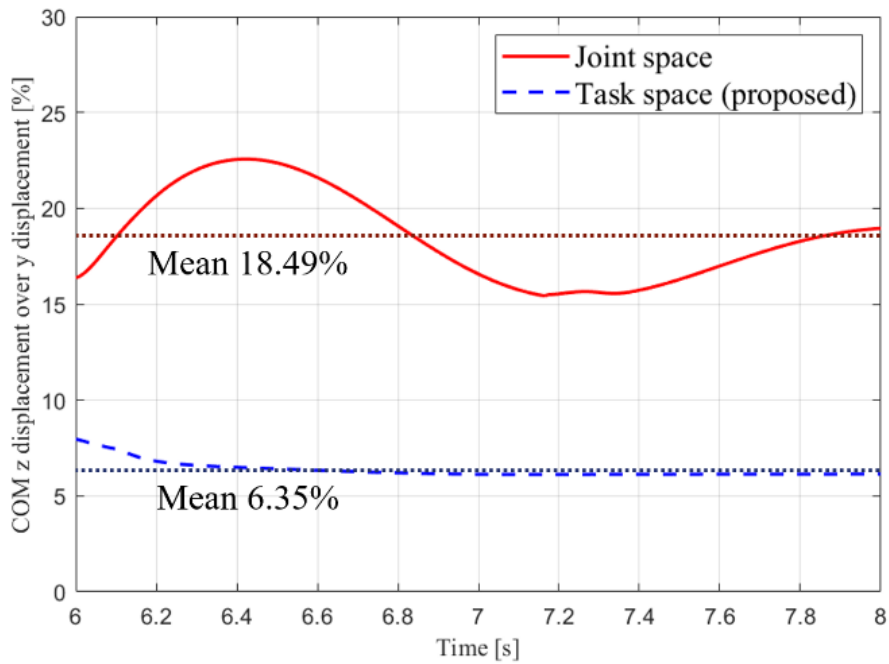


그림 6: Independent compliance simulation result – Ratio of z-axis displacement to y-axis displacement

제 4 절 충돌 외란 시 안정 균형 제어 시뮬레이션

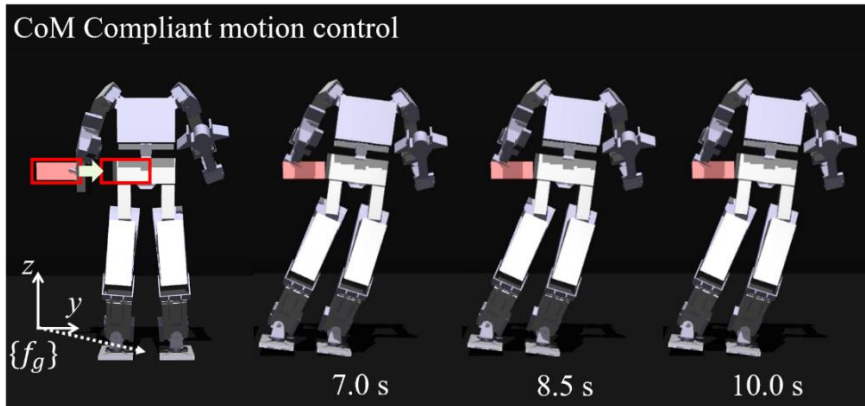
외란 발생 시 안정 균형 제어 시뮬레이션에서는 [그림 7](a)의 첫 번째 그림과 같이 사람 혹은 다른 위치 제어 로봇과의 상호작용에 의해 발생될 수 있는 형태로, 로봇의 pelvis가 차지하고 있는 공간 내 특정 위치까지 이동하는 물체가 로봇에 충돌하는 외란 (외란 유형 2)이 가해진다. 로봇의 골반은 y축을 따라 이동하는 물체와 6초에 충돌하여 0.2m를 이동하게 된다. 시뮬레이션을 통해 제안되는 CoM 유연 동작 제어가 외란 대응 시 안정적인 균형 제어에 기여하는 것을 확인하고자 했다.

외란 유형 2가 가해졌을 때, 목표 CoM 경로 (c_x^{des})는 (10)와 같이, \hat{d} 을 $k_{d,p}$ 에 비례하게 참조 CoM 경로 (c_x^{ref})에 더하여 생성된다. 참조 CoM 경로는 제자리에서 CoM의 움직임 없이 업무 수행하는 상황을 가정하여 글로벌 좌표계 기준 0m로 일정한 값을 가진다. 생성된 목표 CoM 경로를 통해 CoM이 외란에 유연하게 대응하게 된다. 글로벌 좌표계 기준 실제 CoM y 위치를 나타낸 [그림 8](b)와 왼발 좌표계 기준 실제 CoM y 위치를 나타낸 [그림 8](a)를 통해 이를 확인할 수 있다.

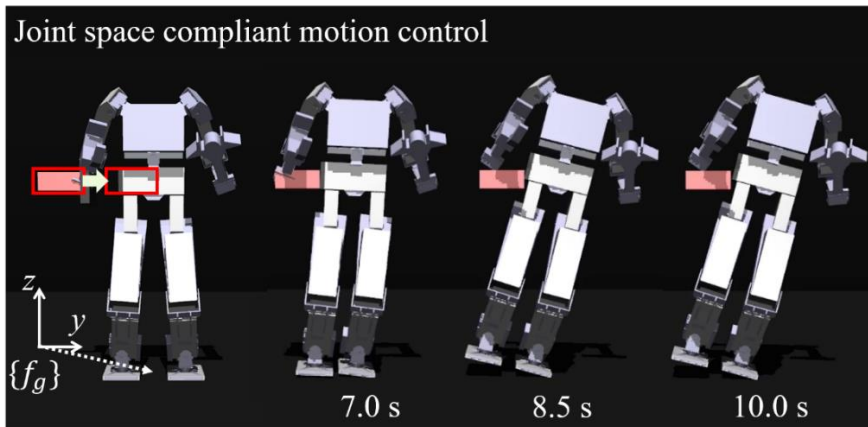
본 논문에서 제안되는 CoM 유연 동작 제어가 적용된 경우에는 CoM이 12.15cm의 유연 동작을 생성하였고 ([그림 8](a) 적색 실선), 생성된 유연 동작으로 인해 로봇이 안정적으로 균형을 유지한 것을 확인할 수 있었다 ([그림 7](a) 참조). 이는 글로벌 좌표계 기준 CoM 위치가 0.2m ([그림 8](b) 적색 실선), pelvis의 roll 축 기울기가 3.5도 ([그림 8](c) 적색 실선)의 일정한 값에 수렴한 것에서도 확인할 수 있다.

선행 연구에서 제안된 관절 공간 유연 동작 제어가 적용된 경우에는 CoM이 2.69cm의 유연 동작을 생성하였으나 ([그림 8](a) 녹색 점선), 물체가 정지한 이후에도 외란을 버티지 못하고 로봇이 균형을 잃었다 ([그림 7](b) 참조). 글로벌 좌표계 기준 CoM 위치 ([그림 8](b) 녹색 점선), pelvis의 roll 축 기울기 ([그림 8](c) 녹색 점선)에서도 이를 확인할 수 있었다.

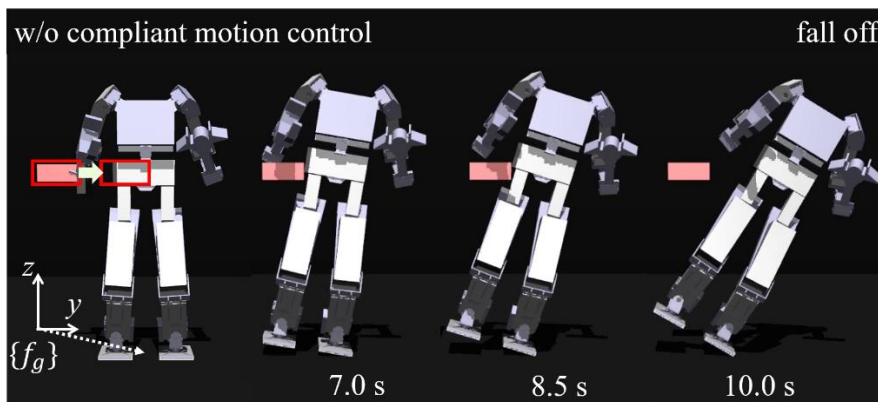
유연 동작 제어가 적용되지 않은 경우에는 CoM이 외란에 의해 유연하게 동작하지 않았으며 ([그림 8](a) 청색 점선), 물체가 정지한 이후에도 관절 공간 유연 동작 제어가 적용된 경우보다 빠른 시점에 외란을 버티지 못하고 로봇이 균형을 잃었다 ([그림 7](c) 참조). 글로벌



(a) Simulation snapshot - CoM compliant motion control



(b) Simulation snapshot - Joint space compliant motion control



(c) Simulation snapshot - w/o compliant motion control

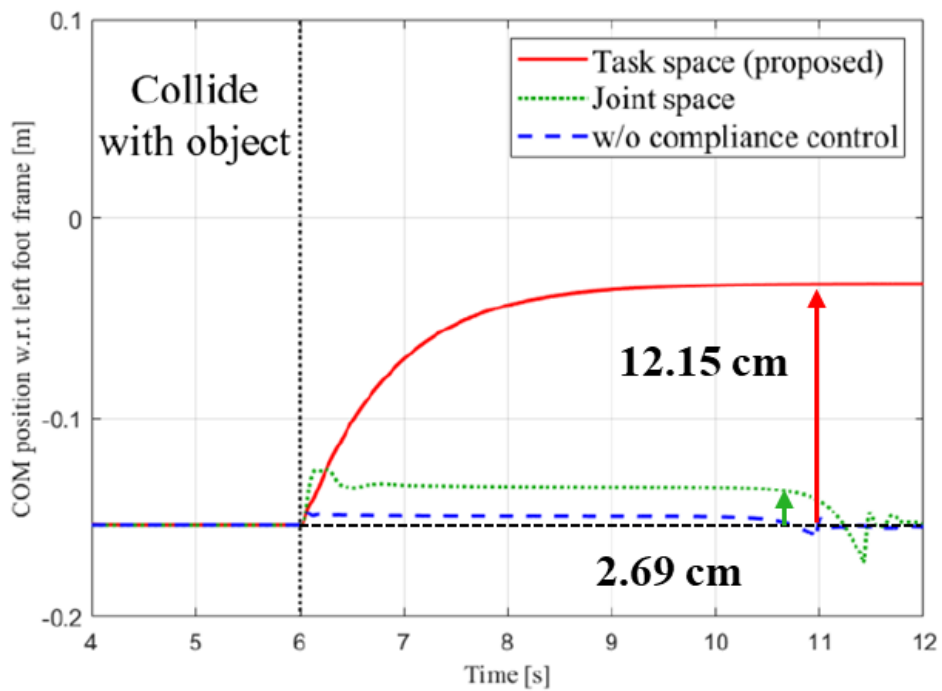
그림 7: Stable balance under impact disturbance simulation snapshot

좌표계 기준 CoM ([그림 8] (b) 청색 점선), Pelvis의 roll 축 기울기에서 역시 이를 확인할 수 있었다 ([그림 8] (c) 청색 점선).

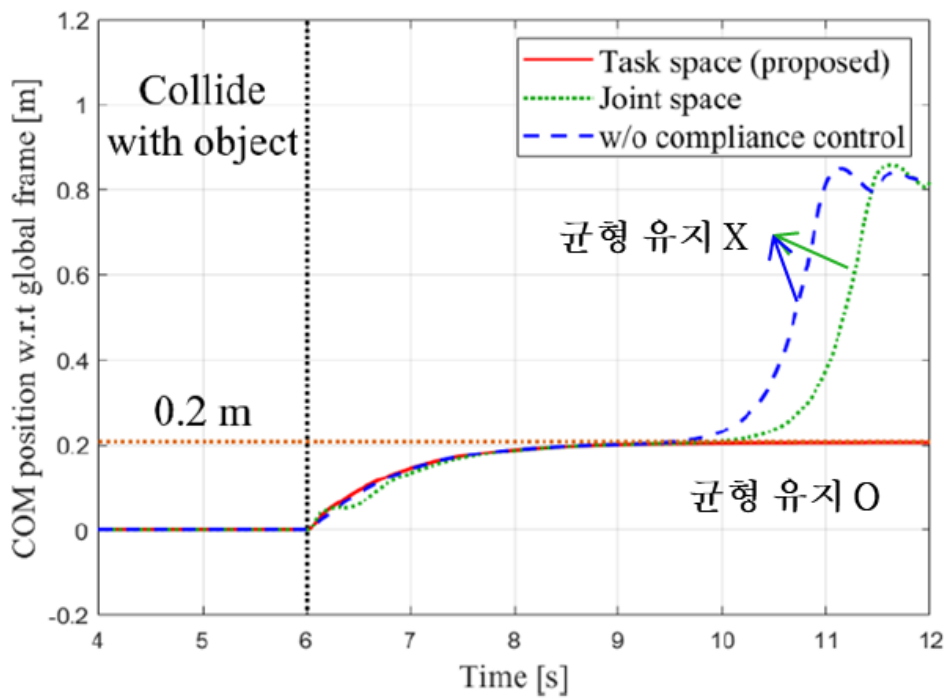
외란 발생 시 안정 균형 제어 시뮬레이션의 결과를 [표 5]에 정리하여 나타냈다. 시뮬레이션 결과, 본 논문에서 제안되는 CoM 유연 동작 제어가 외란에 가장 유연하게 대응하였고, 그 과정에서 균형을 유지하였다. CoM 유연 동작 제어에서는 다른 경우와 달리 pelvis orientation이 유지되면서 유연 동작이 생성되어 지면과 지지발의 접촉이 안정적으로 유지될 수 있었고 이로 인해 안정적인 balancing이 가능했다. 반면, 관절 공간 유연 동작 제어에서는 관절 별 유연 동작이 pelvis orientation 제어에 영향을 미쳤다. 따라서, Pelvis의 기울기로 인해 지면과 지지발의 접촉이 불안정해졌고 이로 인해 균형을 잃었다.

표 5: Stable balance under impact disturbance simulation data

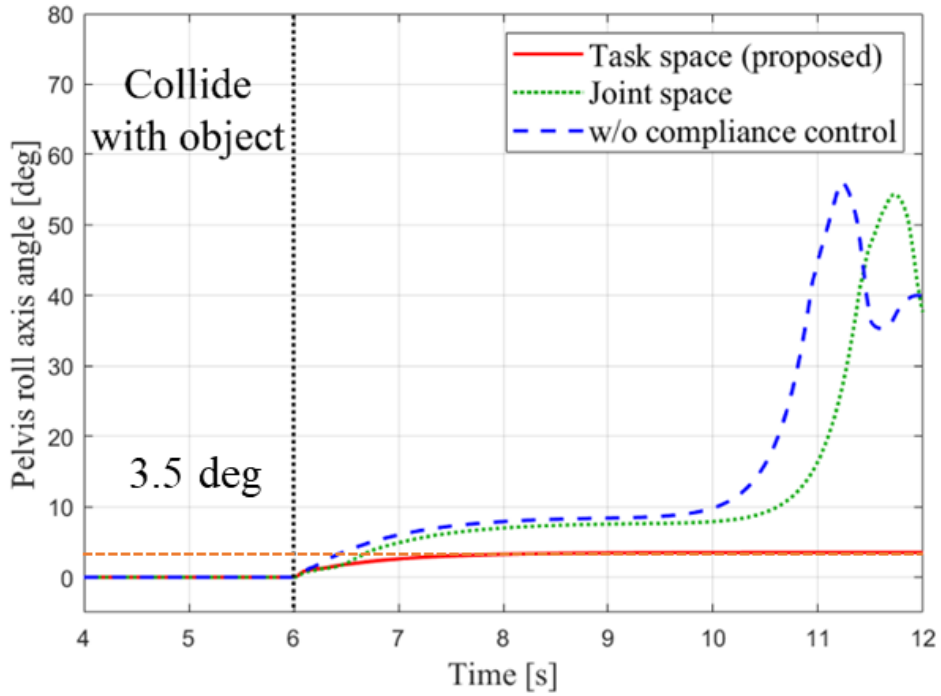
	생성된 CoM 변위	Orientation
CoM 유연 동작 제어	12.15 cm	3.5 deg
관절 공간 유연 동작 제어	2.69 cm	수렴 X
유연 동작 제어 미적용	0.64 cm	수렴 X



(a) CoM y position w.r.t left foot frame



(b) CoM y position w.r.t global frame



(c) Pelvis roll-axis angle w.r.t global frame in compliance control under disturbance type 2

그림 8: Stable balance under impact disturbance simulation graph

제 4 장 실 험

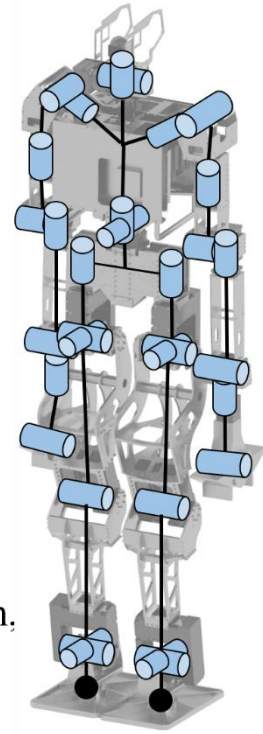
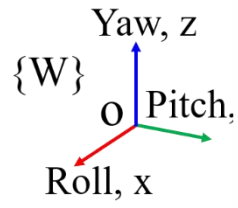
본 논문에서 제안되는 CoM 유연 동작 제어기를 검증하기 위해 실제 로봇 실험의 결과가 소개된다. 먼저 1절에서는 실험에 사용된 휴머노이드 로봇 DYROS-JET가 설명된다. 2절과 3절에서는, 작업 수행 중인 휴머노이드 로봇에 발생할 수 있는 두 가지 유형의 외란을 설정하고, CoM 유연 동작 제어, 관절 공간 유연 동작 제어, 유연 동작 제어가 적용되지 않은 경우 로봇이 외란에 대응한 결과를 비교 및 분석된다. 2절에서는, 위치를 유지하고 있는 로봇에 이동하는 물체가 부딪혀 발생하는 외란 실험이 수행되었다. 3절에서는, 주어진 위치 경로를 추종하는 로봇을 물체가 막아서 발생하는 외란 실험이 수행되었다.

제 1 절 로봇 DYROS-JET 설명

본 논문에서 제안되는 CoM 유연 동작 제어기를 검증하기 위해 휴머노이드 로봇 DYROS-JET ([그림 9](a))가 사용되었다. 로봇의 사양은 표 2에 소개된 시뮬레이션에서의 모델과 같다. 각 관절에는 상업용 액추에이터 모델인 Dynamixel Pro (*H54-200-S500-R*, *ROBOTIS Co., Ltd*)가 사용되었다. 액추에이터 도면, 토크 곡선, data sheet은 각각 [그림 10], [그림 11], [표 3]와 같다. 액추에이터는 RS-485 통신선을 이용해 제어기와 통신하며, 제어 주기는 200Hz이다[17]. 본 논문에서 진행된 실험에서는, 외란에 의해 발생하는 충격력을 측정하기 위해 로봇의 Pelvis에 F/T 센서를 추가로 부착하였다.



(a)



(b)

그림 9: (a) DYROS-JET, (b) Joint configuration of DYROS-JET

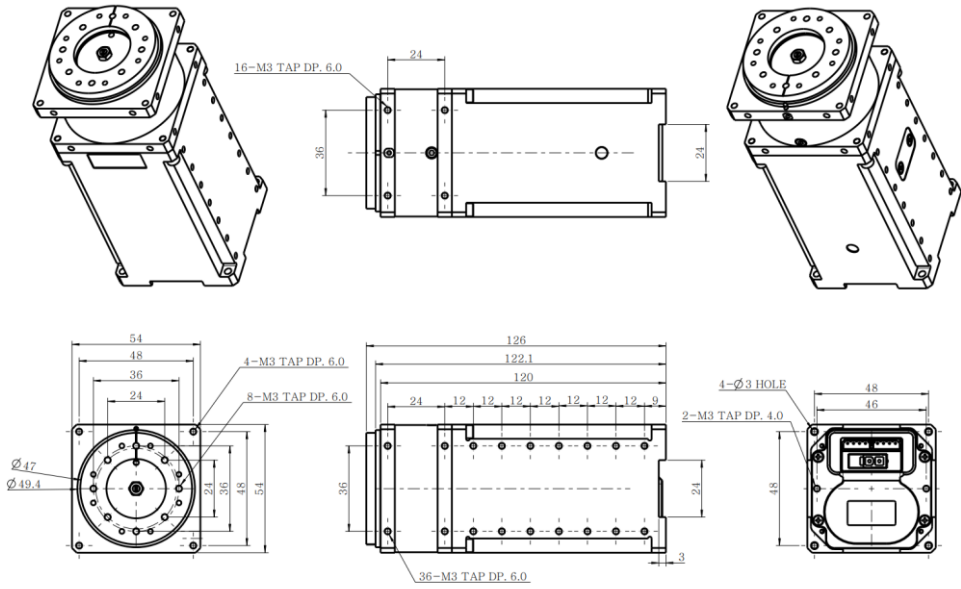


그림 10: Dynamixel PRO(H54-200-S500-R)의 설계도 [17]

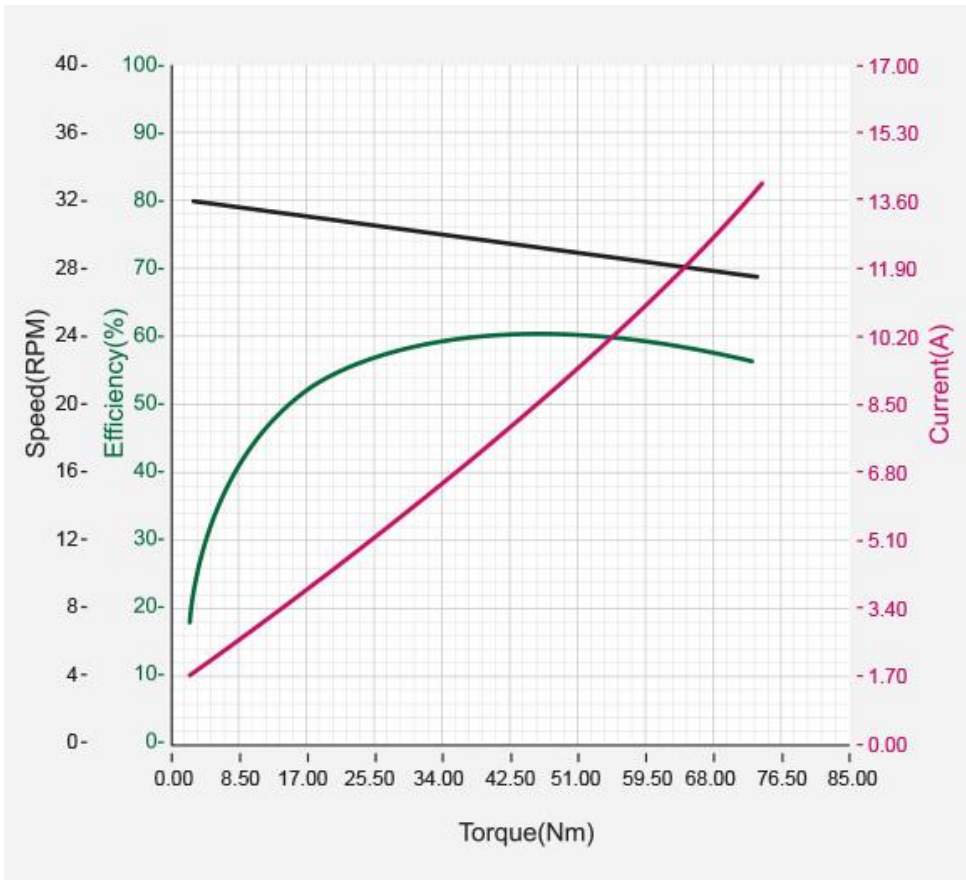


그림 11: Dynamixel PRO(H54-200-S500-R)의 성능 그래프 [18]

표 6: Dynamixel PRO(H54-200-S500-R)의 Datasheet[18]

		Unit	Value
Dimension		mm	54 x 54 x 126
Weight		kg	0.855
Nominal Voltage		V	24
No Load Speed		RPM	33.1
No Load Current		A	1.65
Continuous Operation	Speed	RPM	29.0
	Torque	Nm	44.7
	Current	A	9.3
Resolution		steps/turn	501, 923
Gear Ratio		-	501.9:1
Backlash		arcmin	3.5
Network Interface		-	RS-485
Operating Temperature		℃	5~55

제 2 절 충돌 외란 시 안정 균형 제어 실험

본 절에서는 로봇이 작업 중에 외부 요인의 충돌에 의해 발생할 수 있는 외란을 가정하였다. 외부 물체는 로봇의 pelvis가 차지하고 있는 공간 내 특정 위치까지 y축을 따라 이동하며, 충돌로 인해 로봇은 발목이 회전하기 직전까지 외란을 받는다. 실험에서, 유연 동작 제어가 외란에 대응시 안정적인 균형 유지에 기여하는 것을 확인하고자 했다. 로봇의 Pelvis에 부착된 F/T 센서를 통해 실험 과정에서 로봇과 물체 간의 접촉력을 측정하였다 ([그림 12]).

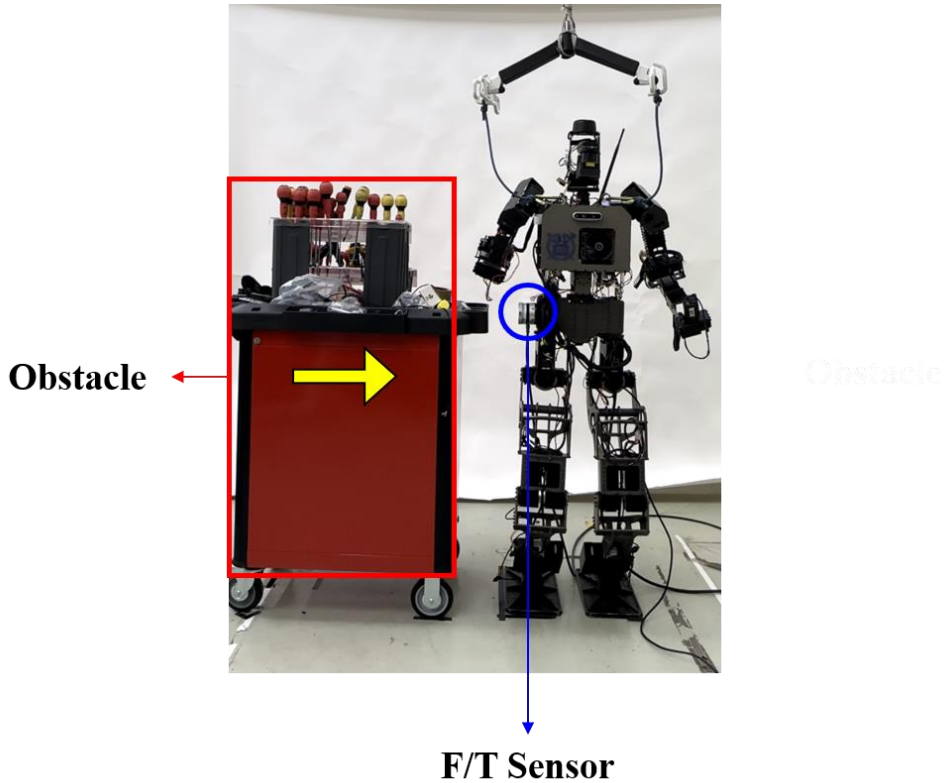


그림 12: Setup for stable balance under impact disturbance experiment

물체의 충돌에 대해 CoM 유연 동작 제어, 관절 공간 유연 동작 제어, 유연 동작 제어가 적용되지 않은 경우가 대응한 실험의 스냅샷을 각각 [그림 14] (a), (b), (c)에 나타냈다.

외란 실험에 의해 발생한 원발 좌표계 기준 CoM 위치를 [그림 13] (a)에 나타냈다. 이때, 참조 CoM 경로(흑색 점선)는 제자리에서 작업 수행하는 상황을 가정하여 원발 좌표계 기준 -0.126m 로 일정한 값을 가진다.

CoM 유연 동작 제어가 적용된 경우에는 CoM이 4.64cm 의 유연 동작을 생성하여 원발 좌표계 기준 -0.079m 까지 이동하였고 ([그림 13] (a) 적색 점선), 관절 공간 유연 동작 제어가 적용된 경우에는 그보다 작은 3.62cm 의 유연 동작을 생성하여 원발 좌표계 기준 -0.089m 까지 이동한 것을 확인할 수 있다 ([그림 13] (a) 녹색 점선). 유연 동작 제어가 적용되지 않은 경우에는 CoM이 0.44cm 로 거의 유연 동작을 생성하지 않았다 ([그림 13] (a) 청색 점선).

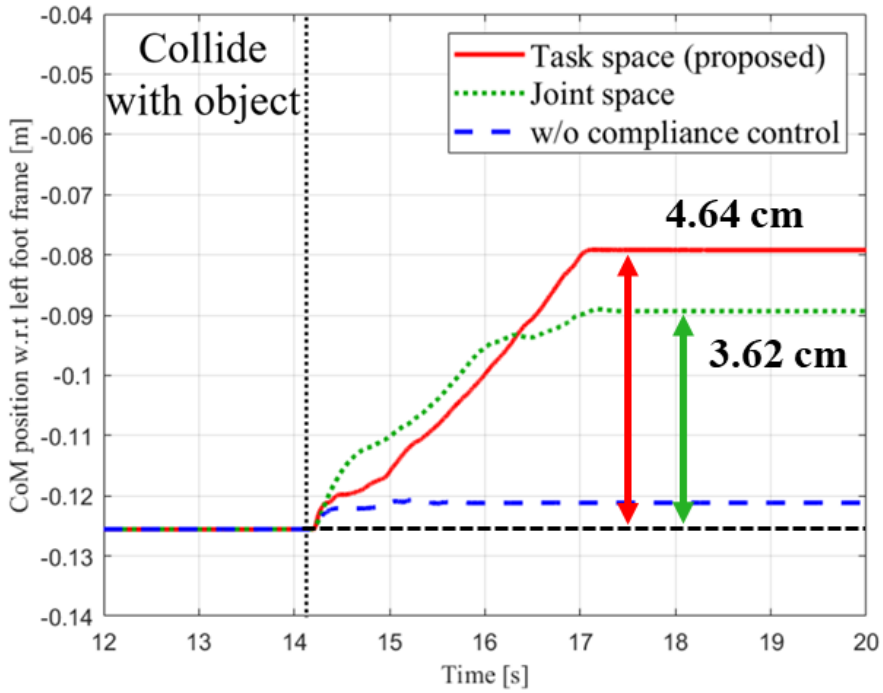
[그림 13] (b)에는 외란 실험에서의 Pelvis roll 축 기울기를 나타냈다. CoM 유연 동작 제어가 적용된 경우에는 1.1 도를 유지하였는데, 이는 관절 공간 유연 동작 제어가 적용된 경우의 3.0 도, 유연 동작 제어가 적용되지 않은 경우의 3.1 도에 비해 작은 것을 확인할 수 있었다.

로봇의 Pelvis 에 위치한 F/T 센서를 통해 실험 과정에서 측정된 접촉력을 [그림 13] (c)에 나타냈다. 유연 동작 제어가 적용되지 않은 경우에는 실험 과정에서 측정된 접촉력이 최대 72N 에 도달한 이후, 60N 으로 수렴하였다 ([그림 13] (c) 청색 점선). 관절 공간 유연 동작 제어가 적용된 경우, 접촉력이 최대 55N 에 도달한 후, 47N 으로 수렴하였다 ([그림 13] (c) 녹색 점선). CoM 유연 동작 제어가 적용된 경우에는, 접촉력이 최대 44N 에 도달한 후, 33N 으로 수렴하였다 ([그림 13] (c) 적색 실선).

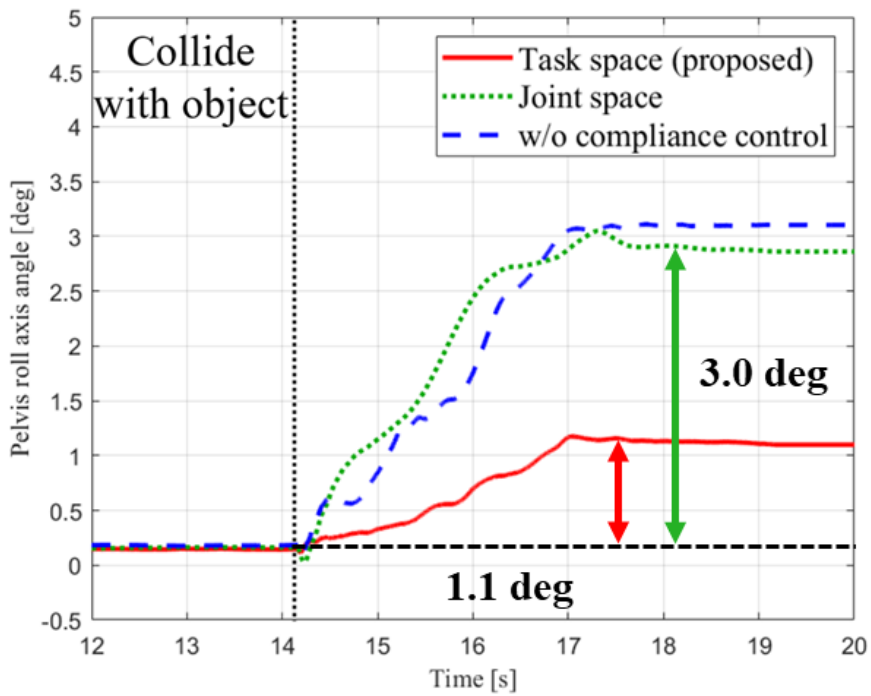
충돌 외란 시 안정 균형 제어 실험 결과를 [표 7]에 정리하여 나타냈다. 실험 결과, 본 논문에서 제안되는 CoM 유연 동작 제어가 외란에 대응하여 Orientation 과 독립적으로 유연 동작을 생성한 것을 확인할 수 있었다. 물체와의 접촉력이 다른 경우에 비해 작게 나온 것을 통해 로봇에 가해지는 충격 역시 가장 많이 완화시킨 것을 확인할 수 있었다.

표 7: Stable balance under impact disturbance experiment data

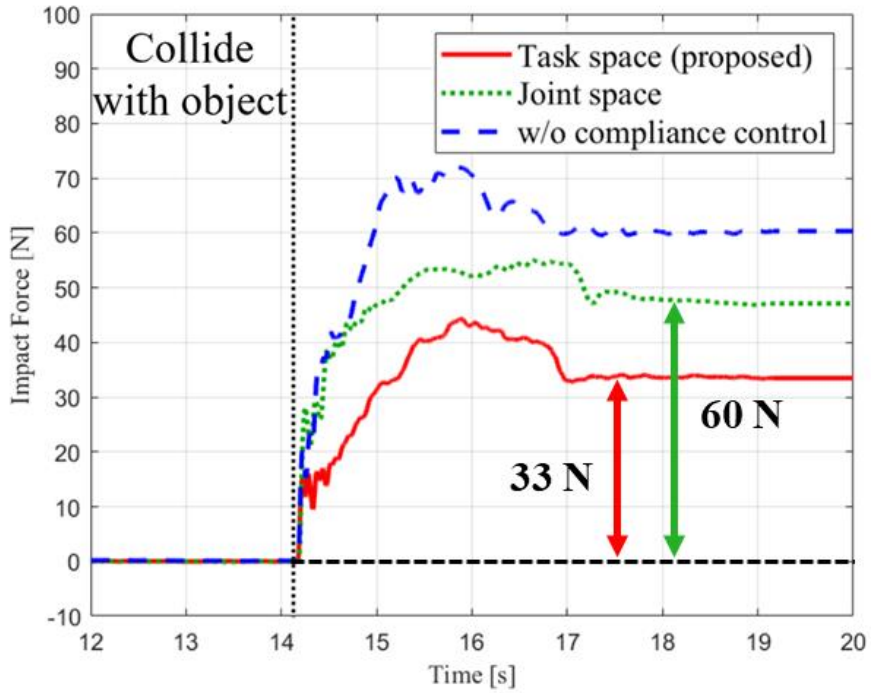
	생성된 CoM 변위	Orientation	최대 접촉력	정적 평형 시 접촉력
CoM 유연 동작 제어	4.64 cm	1.1 deg	44 N	33 N
관절 공간 유연 동작 제어	3.62 cm	3.0 deg	54 N	47 N
유연 동작 제어 미적용	0.44 cm	3.1 deg	72 N	60 N



(a) CoM y position w.r.t left foot frame



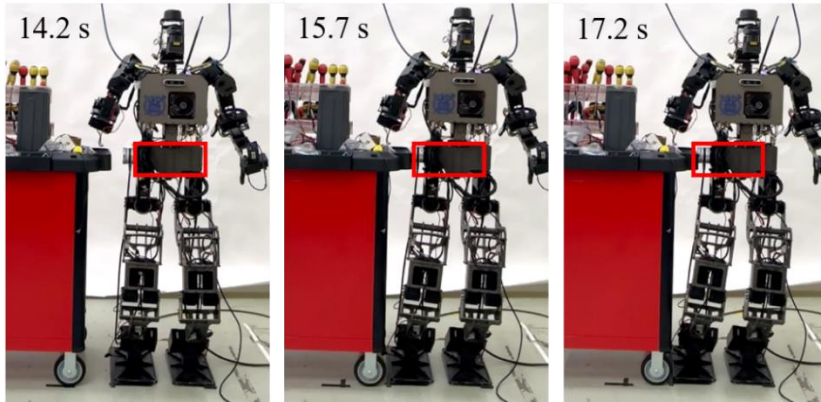
(b) Pelvis roll-axis angle w.r.t global frame in compliance control



(c) Measured Contact Force

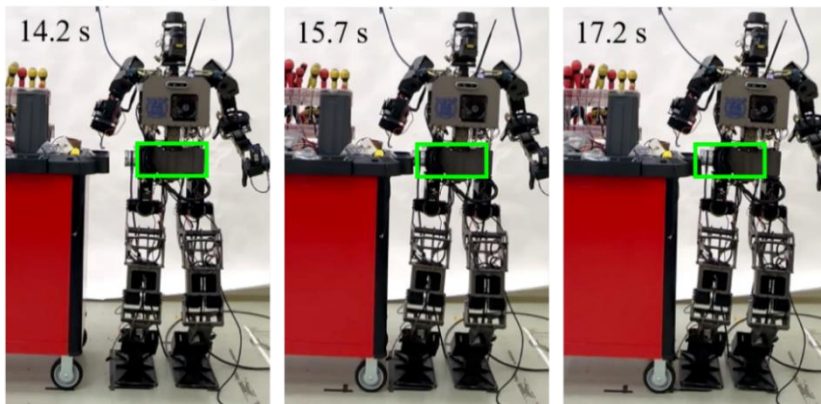
그림 13: Stable balance under impact disturbance experiment graph

CoM Compliant motion control



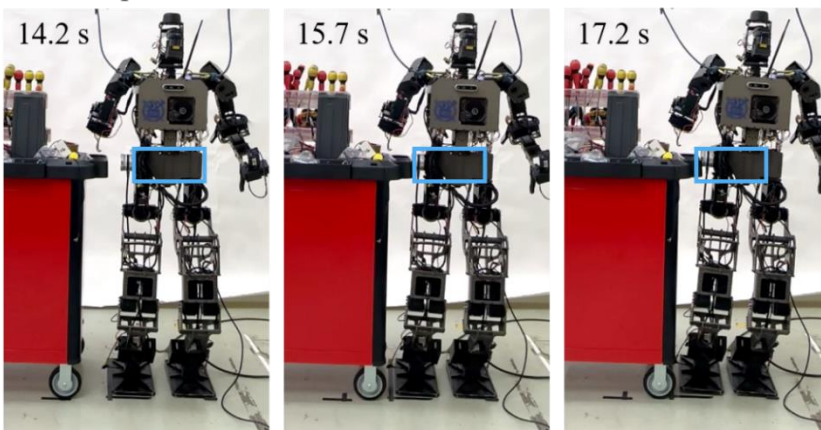
(a) Experiment snapshot - CoM compliant motion control

Joint space compliant motion control



(b) Experiment snapshot - Joint space compliant motion control

w/o compliant motion control



(c) Experiment snapshot - w/o compliant motion control

그림 14: Stable balance under impact disturbance experiment snapshot

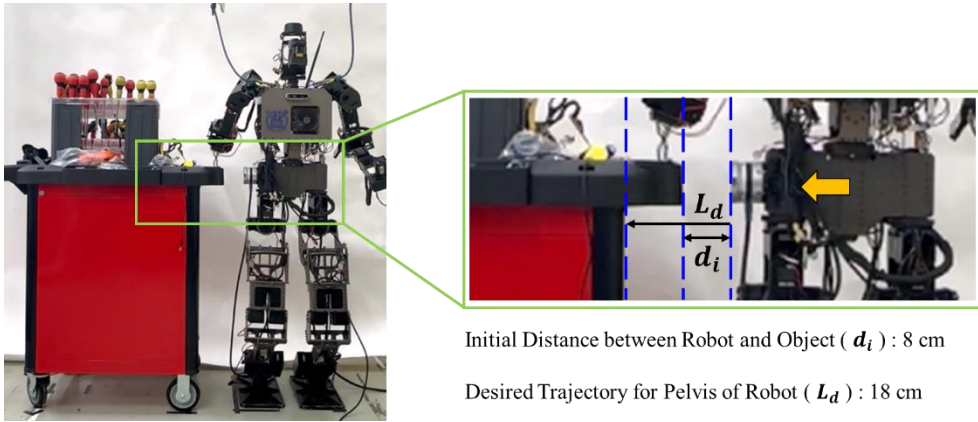


그림 15: Setup for position track blocking disturbance experiment

제 3 절 위치 추종 막힘 외란 실험

본 절에서는 작업 중인 로봇의 위치 추종이 막히는 상황을 가정하였다. 로봇의 pelvis는 y축 방향을 따라 2초 동안 18cm를 이동하는 위치 경로를 추종하지만, pelvis에서 9cm 거리에 위치한 물체에 의해 위치 추종이 막힌다. 실험을 통해 유연 동작 제어가 위치 추종 중인 로봇을 안정적으로 멈출 수 있는지를 확인하고자 했다. 로봇의 pelvis에 부착된 F/T 센서를 통해 실험과정에서 로봇과 물체 간의 접촉력을 측정하였다 ([그림 15] 참조).

[그림 16] (a)에는 외란 실험에서 측정된 왼발 좌표계 기준 CoM 위치를 나타냈다. CoM의 초기 위치는 왼발 좌표계 기준 -0.126m 이다. CoM 유연 동작 제어가 적용된 경우에는 -0.126m 의 초기 위치에서 이동하는 CoM이 물체에 의해 발생한 외란에 순응하여 -0.041m 에 멈추어 9.25cm의 유연 동작을 생성하였고 ([그림 16] (a) 적색 실선), 관절 공간 유연 동작 제어가 적용된 경우에는 CoM이 외란에 순응하여 -0.029m 에 멈추어 8.08cm의 유연 동작을 생성하였다 ([그림 16] (a) 녹색 점선). 유연 동작 제어가 적용되지 않은 경우에는 CoM이 외란에 순응하지 못하였고, 목표 경로를 추종하다 균형을 잃어 로봇의 작동을 멈추었다 ([그림 16] (a) 청색 점선).

Pelvis roll 축 기울기의 경우, CoM 유연 동작 제어는 충돌 이후에도 1.52도로 기존 orientation을 유지한 반면 ([그림 16] (b)

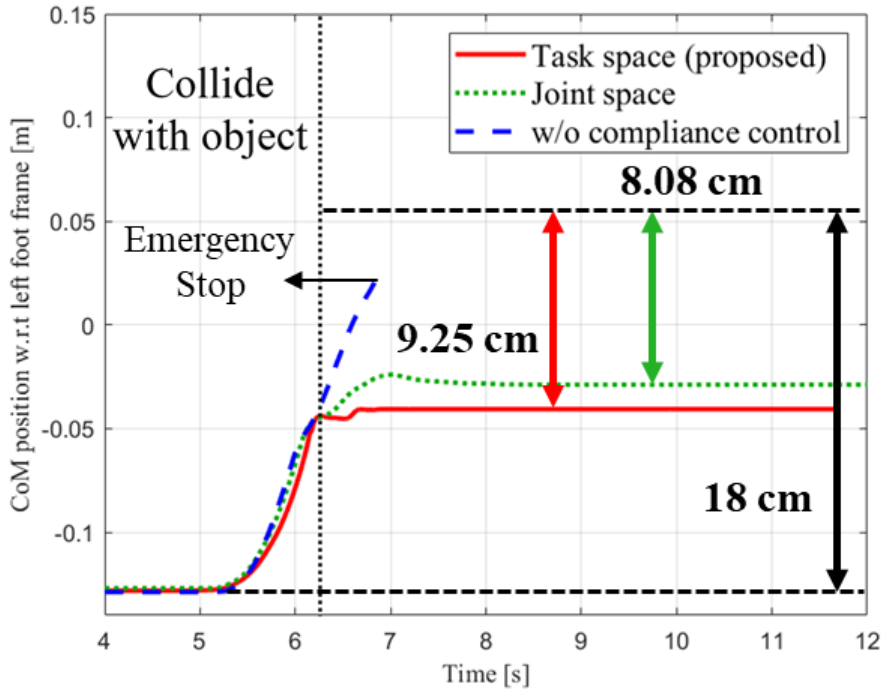
적색 실선), 관절 공간 유연 동작 제어가 적용된 경우에는 5.46도, 유연 동작 제어가 적용되지 않은 경우에는 균형을 잃기 직전 7.3도로 기존 orientation을 유지하지 못한 것을 확인할 수 있다 ([그림 16] (b) 녹색 점선, 청색 점선).

로봇의 Pelvis에 부착된 F/T 센서를 통해 측정된 실험에서의 접촉력을 [그림 16] (c)에 나타냈다. CoM이 외란에 순응한 CoM 유연 동작 제어와 관절 공간 유연 동작 제어의 경우 최대 접촉력은 각각 119.66 N, 121.95 N([그림 16] (c) 적색 실선, 녹색 점선), 외란에 순응하지 않은 유연 동작 제어가 적용되지 않은 경우 최대 접촉력 139.65 N보다 작은 접촉력이 측정된 것을 확인할 수 있다 ([그림 16] (c) 청색 점선). 정적 평형 시 접촉력의 경우 CoM 유연 동작 제어와 관절 공간 유연 동작 제어가 각각 111.11 N, 119.69 N이 측정되었다.

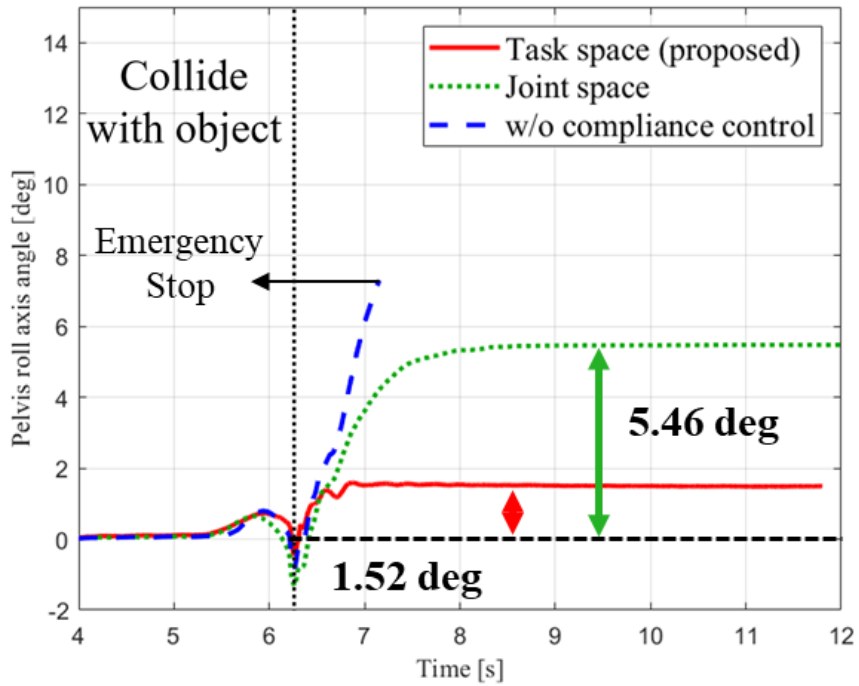
위치 추종 막힘 외란 실험 결과를 [표 8]에 정리하여 나타내었다. 실험 결과, 본 논문에서 제안되는 CoM 유연 동작 제어가 외란에 대응하여 Orientation과 독립적으로 유연 동작을 생성한 것을 확인할 수 있었다. 물체와의 접촉력이 다른 경우에 비해 작게 나와 로봇에 가해지는 충격 역시 가장 많이 완화시킨 것을 확인하였다. 각각의 제어 방식이 외란에 대응한 실험의 스냅샷을 [그림 17] (a), (b), (c)에 나타냈다.

표 8: Position track blocking disturbance experiment data

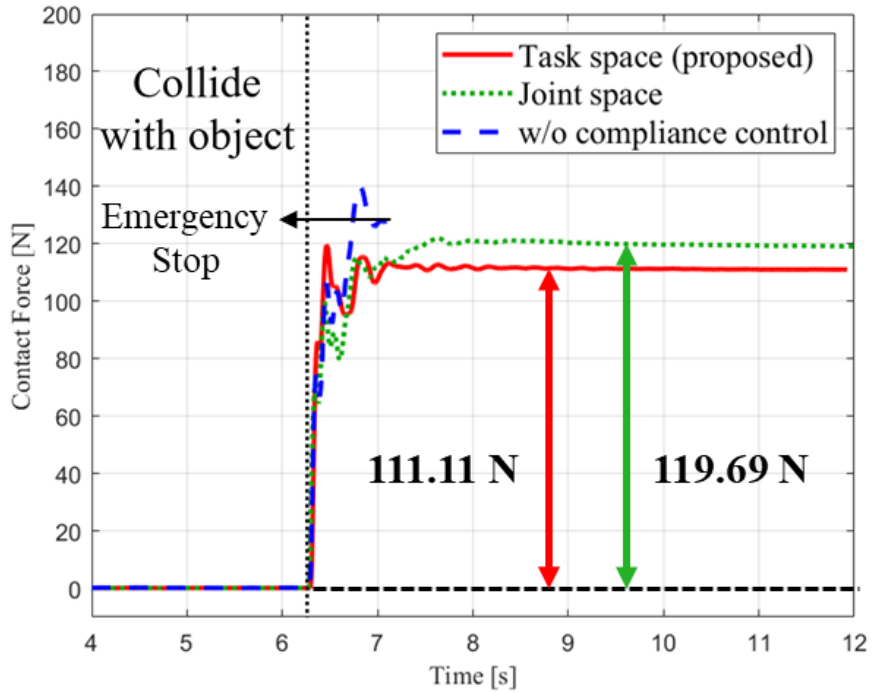
	생성된 CoM 변위	Orientation	최대 접촉력	정적 평형 시 접촉력
CoM 유연 동작 제어	9.25 cm	1.52 deg	119.66 N	111.11 N
관절 공간 유연 동작 제어	8.08 cm	5.46 deg	121.95 N	119.69 N
유연 동작 제어 미적용	-	7.30 deg	139.65 N	-



(a) CoM y position w.r.t left foot frame

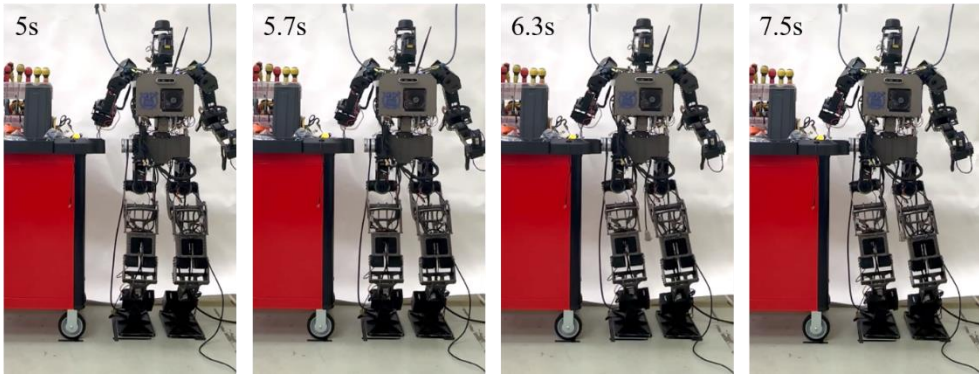


(b) Pelvis roll-axis angle w.r.t global frame in compliance control

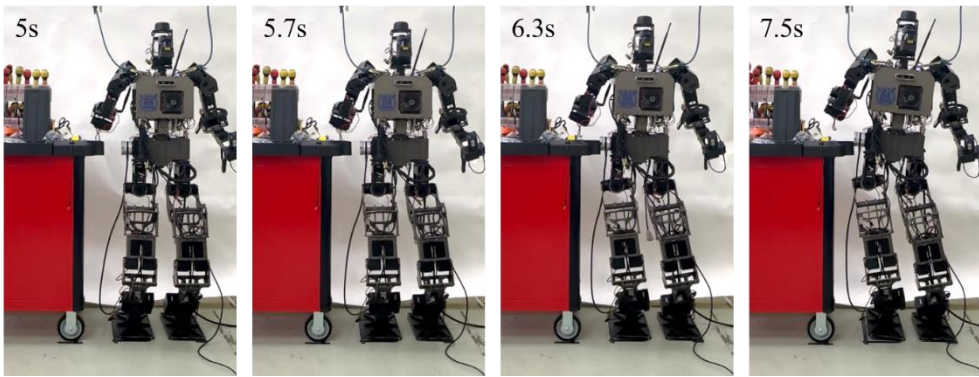


(c) Measured Contact Force

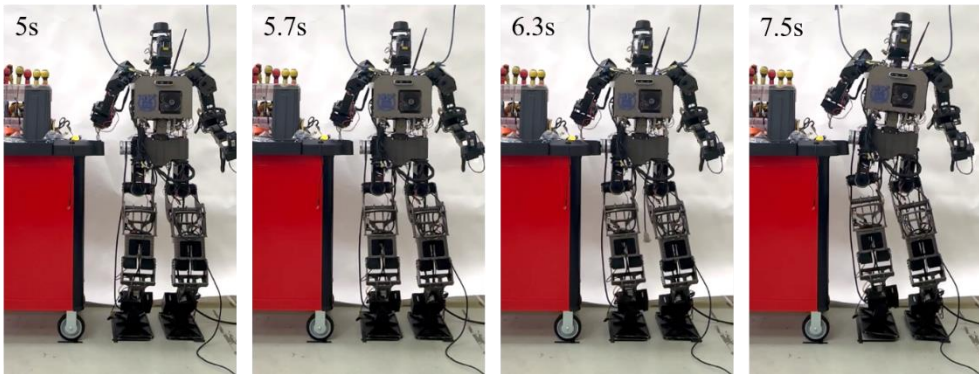
그림 16: Position track blocking disturbance experiment graph



(a) Experiment snapshot - CoM compliant motion control



(b) Experiment snapshot - Joint space compliant motion control



(c) Experiment snapshot - w/o compliant motion control

그림 17: Position track blocking disturbance experiment snapshot

결 론

본 논문에서는 CoM 동작의 유연성을 방향 별로 독립적으로 제어할 수 있는 휴머노이드 CoM 유연 동작 제어 프레임워크를 제안한다. 선행 연구인 관절 공간에서의 유연 제어 방법은, 각 관절에서 외란에 대해 외란 방향으로 유연한 동작을 생성하여 로봇에 가해지는 충격을 완화하였다. 하지만 관절의 회전 방향으로의 유연한 움직임은 작업 공간에서의 움직임을 예측하기 어려웠고, 특정 동작 방향의 유연 동작을 독립적으로 생성하기에는 어려움이 있었다. 이 문제를 해결하기 위해, COM 제어 성능 모델 기반의 상태 관측기를 도입하였으며, 방향 별로 관측된 외란을 COM의 움직임에 더하여 COM의 유연 동작을 방향 별로 독립적으로 제어할 수 있었다. 제안된 알고리즘을 통해 CoM 동작들의 유연성을 독립적으로 제어할 수 있는 안정 균형 제어가 구현되었다.

제안된 알고리즘의 성능은 두 가지 방법의 비교 시뮬레이션과 두 가지 방법의 비교 휴머노이드 로봇 실험을 통해 검증되었다. 시뮬레이션과 실험에서 외란이 로봇에 가해졌을 때, 본 논문에서 제안되는 CoM 유연 동작 제어를 통해 휴머노이드 로봇이 orientation을 유지하면서 독립적인 CoM 유연 동작을 생성한 것을 확인할 수 있었다. 외란에 대응하는 과정에서 orientation의 유지는, 두 발의 지면과의 안정적인 접촉 유지에 기여하였고, 이로 인해 로봇이 외란에 더 안정적으로 대응할 수 있었다. 외란 충돌 과정에서 측정된 충격력을 통해, CoM 유연 동작 제어가 충격력을 가장 많이 완화시킨 것도 확인할 수 있었다.

본 논문에서 제안하는 알고리즘은, 선행 연구의 관절 공간 유연 동작 제어를 CoM 제어 성능 모델을 통해 작업 공간 상의 CoM 움직임에 적용하였다. 이로 인해 CoM의 방향 별 독립적인 유연성을 구현할 수 있었지만, 개선할 점을 찾을 수 있다. 먼저, CoM 제어 성능 모델의 경우, 중력 등의 이유로 인해 spring, damper의 계수가 자세에 따라 달라질 수 있다. 자세에 따른 모델링 차이를, 학습 등의 방식을 통해 보완하여 정확한 상태와 외란을 추정할 수 있을 것으로 보인다. 또한, 본 논문에서는 업무 수행 중인 상황을 가정한 양 발 지지 상태에만 적용하여 알고리즘의 효용성에 대한 제한이 있었다. 이에 따라, 추후 연구를 통해, 알고리즘을 확장하여 CoM이 아닌 여러 작업에 적용하여 전신을 이용해 외란에 유연하게 대응하거나, 휴머노이드

로봇의 다양한 상황 (예: 이족 보행)에서의 외란에 대응할 수 있는 유연 제어를 제시하고자 한다.

참고 문헌

- [1] Y. X. Su, B. Y. Duan, C. H. Zheng, Y. F. Zhang, G. D. Chen and J. W. Mi, "Disturbance-rejection high-precision motion control of a Stewart platform," *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, pp. 364-374, 2004.
- [2] Y. X. Su, C. H. Zheng and B. Y. Duan, "Automatic disturbances rejection controller for precise motion control of permanent-magnet synchronous motors," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, pp. 814-823, 2005.
- [3] R. Schiavi, A. Bicchi and F. Flacco, "Integration of active and passive compliance control for safe human-robot coexistence," *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 259-264, 2009.
- [4] M. Jin, S. H. Kang and P. H. Chang, "Robust Compliant Motion Control of Robot with Nonlinear Friction Using Time-Delay Estimation," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, pp. 258-269, 2008.
- [5] K. Kaneko, K. Harada, F. Kanehiro, G. Miyamori and K. Akachi, "Humanoid robot HRP-3," *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp.2471-2478, 2008.
- [6] I. Park, J. Kim, J. Lee and J. Oh, "Mechanical design of humanoid robot platform KHR-3 (KAIST Humanoid Robot 3: HUBO)," *5th IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots*, pp. 321-326, 2005.

- [7] S. Lohmeier, T. Buschmann and H. Ulbrich, "Humanoid robot LOLA," *2009 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 775–780, 2009.
- [8] E. Krotkov, D. Hackett, L. Jackel, M. Perschbacher, J. Pippine, J. Strauss, G. Pratt and C. Orlowski, "The DARPA Robotics Challenge finals: Results and perspectives," *Journal of Field Robotics*, vol. 34, no. 2, pp. 229–240, 2017.
- [9] M. Johnson, B. Shrewsbury, S. Bertrand, T. Wu, D. Duran, M. Floyd, P. Abeles, D. Stephen, N. Mertins, A. Lesman, J. Carff, W. Rifenburg, P. Kaveti, W. Straatman, J. Smith, M. Griffioen, B. Layton, T. de Boer, T. Koolen, P. Neuhaus and J. Pratt, "Team IHMC's Lessons Learned from the DARPA Robotics Challenge Trials", *Journal of Field Robotics*, vol. 32, no. 2. pp. 192–208, 2015.
- [10] M. DeDonato, F. Polido, K. Knoedler, B.P.W. Babu, N. Banerjee, C.P. Bove, X. Cui, R. Du, P. Franklin, J.P. Graff, P. He, A. Jaeger, L. Li, D. Berenson, M.A. Gennert, S. Feng, C. Liu, X. Xinjilefu, J. Kim, C.G. Atkeson, X. Long, and T. Padir, "Team WPI-CMU: Achieving Reliable Humanoid Behavior in the DARPA Robotics Challenge", *Journal of Field Robotics*, vol. 34, no. 2. pp. 381–399, 2017.
- [11] Avatar Xprize Contest, [Online], <http://www.xprize.org/prizes/-avatar>, Accessed: March 07, 2022

- [12] S. Jung, T. C. Hsia and R. G. Bonitz, "Force tracking impedance control of robot manipulators under unknown environment," *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, vol. 12, no. 3, pp. 474–483, May, 2004.
- [13] J. Park, "Impedance control for biped robot locomotion," *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, vol. 17, no. 6, pp. 870–882, Dec, 2001.
- [14] V. Duchaine and C. M. Gosselin, "General Model of Human–Robot Cooperation Using a Novel Velocity Based Variable Impedance Control," *Second Joint EuroHaptics Conference and Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems (WHC'07)*, pp. 446–451, 2007.
- [15] M. Kim, J. H. Kim, S. Kim, J. Sim and J. Park, "Disturbance Observer Based Linear Feedback Controller for Compliant Motion of Humanoid Robot," *2018 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, pp. 403–410, 2018.
- [16] M. Kim, D. Lim and J. Park, "Online Walking Pattern Generation for Humanoid Robot with Compliant Motion Control," *2019 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, pp. 1417–1422, 2019.
- [17] <http://support.robotis.com/>
- [18] S. Kim, M. Kim, J. Lee, S. Hwang, J. Chae, B. Park, H. Cho, J. Sim, J. Jung, H. Lee, et al., "Approach of team snu to the darpa

robotics challenge finals,” in *Humanoid Robots (Humanoids), 2015 IEEE-RAS 15th International Conference on. IEEE*, 2015, pp. 777–784.

Abstract

Center of Mass Compliance Control of Humanoid using Disturbance Observer

Gyeong Jae Park

Department of Intelligence and Information

The Graduate School of Convergence Science and Technology

Seoul National University

As the task environment of robots became closer to human, compliant motion control methods that can ensure human safety have been studied. In particular, for the humanoid robot, compliant motion control must also be able to stably maintain the balance. In addition, compliant motion control should be able to independently create and intuitively limit the compliance so that compliant motion control can be suitable for the task of humanoid. In this paper, a center of mass (CoM) compliance control algorithm of humanoid robots for collaborative works is proposed. The proposed algorithm is based on the state observer and positive feedback of observed disturbance. With the state observer based on humanoid CoM control performance model, disturbance in each direction can be observed. The positive feedback of disturbances to the reference CoM trajectory enables compliant motion. The main contributions of this algorithm are achieving compliance independently in each axis and maintaining balance against external force. Through dynamic simulations and real

robot experiments of Humanoid robot DYROS–JET, the performance of the proposed method was demonstrated.

Keywords : Humanoid robot, Disturbance observer, Compliant motion control

Student Number : 2021–27111