

외란 관측기를 이용한 휴머노이드 무게 중심 유연 동작 제어

Center of Mass Compliance Control of Humanoid Using Disturbance Observer

박경재¹·김명주¹·박재흥[†]

Gyeongjae Park¹, Myeong-Ju Kim¹, Jaeheung Park[†]

Abstract: To operate in real environment, humanoid robots should be able to react to unknown disturbances. To deal with disturbances, various robust control algorithms have been developed for decades. But for collaborative works such as teleoperation system, a compliance control can be the better solution for disturbance reactions. In this paper, a center of mass (CoM) compliance control algorithm for humanoid robots is proposed. The proposed algorithm is based on the state observer and positive feedback of 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, the performance of the proposed method was demonstrated. Under two types of disturbance conditions, humanoid robot DYROS-JET reacted with compliant motion via the proposed algorithm.

Keywords: Humanoid Robot, Disturbance Observer, Compliance Control

1. 서론

휴머노이드 로봇은 실제 환경에서 인간을 대신하여 특정 작업들을 수행하려는 목표 아래 지난 20년간 활발히 연구 및 개발되어왔다^[1-3]. 특히, 2015년에 개최된 DARPA Robotics Challenge (DRC)^[4]는 재난상황에서 휴머노이드 로봇이 위험하고 복잡한 작업을 수행할 수 있다는 가능성을 보여주었다^[5,6]. 또한, 2020년에 개최된 Avatar Xprize Contest Semifinal^[7]은 휴머노이드 로봇이 재난상황 뿐만 아니라, 일상 생활에서도 활용될 수 있다는 것을 보여주었다^[8]. 하지만, 휴머노이드 로봇이 실제 환경(예: 재난 현장, 생활 서비스)에서 사용되기 위해서는 외부 요인들로부터 발생하는 교란에 대응하는 능력

이 필수적이다. 이러한 중요성에 따라, 휴머노이드 로봇이 외부 교란에 대응하기 위한 많은 연구들이 소개되었다.

Kaneko 등은 휴머노이드 로봇에 가해지는 외력을 추정하고 이에 대응하기 위해, 센서 기반의 외력 관측 방법을 제안하였다^[9]. 이 논문에서는, Inertial Measurement Unit (IMU)센서와 Force/Torque (F/T)센서를 이용하여 몸통의 가속도와 지면 반발력의 변화를 측정하고, 휴머노이드 로봇을 질점으로 가정한 단순 동역학 모델을 통해 외력을 추정하였다. Kim 등은 경사로 인해 로봇에 발생하는 외란에 대응하는 방법을 제안하였다^[10]. 휴머노이드 로봇 다리에 부착된 IMU센서를 이용하여 지면의 기울기를 추정하고, 기울기로 인해 발생하는 외란을 추정하였다. 이후, 로봇 다리를 Inverted Pendulum Model (IPM)로 모델링하고, 외란을 소거하는 Zero Moment Point (ZMP) 제어 입력을 IPM의 Center of Mass (CoM) 움직임에 통해 발현하여, 지면 기울기 외란에 대응하였다. Griffin 등은 CoM 선운동량의 변화량을 통해 외란에 대응하고자 했다. 이들은 F/T 센서를 이용해 외력으로 인해 발생한 CoM 선운동량의 변화량에서의 외란을 추정하고, 기존에 제시되었던 PI 제어 기반의 Divergent Component of Motion (DCM) 추종 제어에 외란 소거

Received : Mar. 10. 2022; Revised : Apr. 7. 2022; Accepted : Apr. 8. 2022

※ This work was supported by the National Research Foundation of Korea (NRF) grant funded by the Korea government (MSIT) (No. 2021R1A2C3005914)

1. Student, Graduate School of Convergence Science and Technology, Seoul National University, Seoul, Korea (rudwo1301, myeong-ju@snu.ac.kr)

† Professor, Corresponding author: Graduate School of Convergence Science and Technology, ASRI, RICS, Seoul National University, Seoul, Korea and also Advanced Institutes of Convergence Technology, Suwon 443-270, Korea (park73@snu.ac.kr)

항을 추가하여 DCM 제어 성능을 개선하고자 했다. 추가로, 개선된 DCM 제어기를 이용해 외란의 크기에 따른 균형 제어와 스텝핑 제어를 구현하였다^[11]. 위에서 제시된 연구들은 로봇에 가해지는 외란을 추정하고, 이를 소거하는 강인 제어 방법들을 적용하였다. 이러한 강인 제어 방식은, 로봇이 외란에 저항하도록 하여 외란이 있는 상황에서도 로봇이 특정 업무를 수행할 수 있도록 하였다. 하지만, 이러한 연구들은 로봇이 외란을 버틸 수 있도록 하여, 로봇과 로봇 그리고 사람과 로봇이 부딪히며 협동하는 상황에서는 오히려 상호작용에 악영향을 줄 수 있다. 따라서, 협동 업무를 수행하는 상황에서 발생하는 외란에 대해서는 강인 제어 방식보다 외란에 유연하게 대응하는 제어 방식이 적합할 수 있다.

외란에 대응하는 대표적인 유연 제어 방법으로써 임피던스 제어가 연구되었다^[12-14]. 임피던스 제어는 로봇을 가상의 mass-spring-damper 시스템으로 모델링하고 측정된 힘으로부터 변위를 생성하여, 외력에 대해 로봇이 유연하게 동작하도록 한다. 이러한 결과로 로봇에 가해지는 충격이 완화되어, 로봇이 안정화된다. 하지만 이 연구들에서는 F/T 센서를 이용하여 외력이 측정되기 때문에, 센서의 위치에 따라 특정 위치에 가해지는 외력에만 대응할 수 있었다. 또한, F/T 센서의 bandwidth에 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 DC 계인에 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. CoM z축 위치 유지, y축 유연 제어), 이를 구현하기 어려웠다.

본 논문에서는, 외란에 대응하기 위하여 휴머노이드 로봇의 CoM의 위치를 방향(x, y, z)에 따라 독립적으로 유연하게 동작하는 CoM 유연 동작 제어 프레임워크가 제안된다. 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. 기존의 관절 공간에서 적용되었던 외란 관측기 기반 유연 동작 제어 프레임워크를, 작업 공간 상의 CoM 움직임에 구현하여 직관적이고, 방향 별 독립적인 유연 동작을 생성하였다.

본 논문에서 제안되는 제어 프레임워크는 다음과 같은 특

징을 갖는다. 1) F/T센서를 사용하지 않고 2) 방향에 따라 독립적으로 유연 동작을 생성하며 외란에 대응할 수 있도록 하였다.

본 논문은 총 4절로 구성되어 있다. 먼저, 2절에서는 기반이 되는 배경지식과 제안하는 알고리즘이 소개되며, 3절에서는 제안하는 알고리즘을 동역학 시뮬레이션을 통해 검증한다. 마지막으로 4절에서는 결론이 논의된다.

2. CoM 유연 동작 제어기

2절에서는, 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.

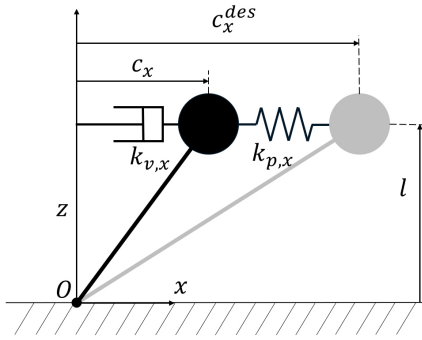
2.1절에서는 제안되는 제어기의 기반이 되는 CoM 제어 성능 모델이 소개된다. 다음으로, 2.2절에서는 제안되는 CoM 유연 동작 제어기의 프레임워크의 흐름도가 소개된다. 마지막으로, 2.3절에서는 CoM 유연 동작 제어의 수학적 모델링과 제어기의 세부 구성들이 설명된다.

2.1 CoM 제어 성능 모델

Kim 등은 실제 휴머노이드와 이상적인 모델 사이의 모델링 오차를 완화하기 위해, 로봇의 CoM 움직임을 spring-damper가 있는 선형 역 진자 모델로 묘사하는 CoM 제어 성능 모델^[16]을 제안하였다([Fig. 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 [Fig. 1]과 같은 스프링, 댐퍼로 구성된 2차 동역학 모델로 근사되었다. 모델에서 c_x 와 c_x^{des} 사이의 관계식은 식 (1)과 같이 표현된다.

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

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 를 매트랩의 시스템 식별 도구(Matlab System Identification

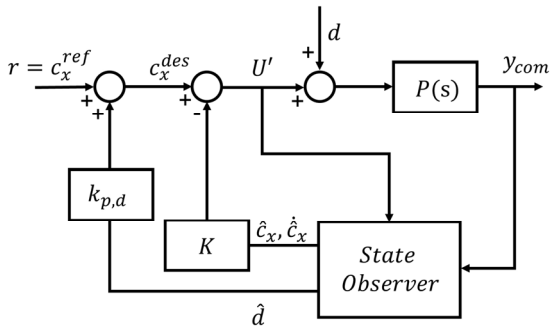


[Fig. 1] CoM control performance model

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.

2.2 제어 프레임워크의 흐름도 소개

본 논문에서 제안되는 CoM 유연 동작 제어기의 전체 프레임워크의 흐름도를 [Fig. 2]에 나타냈다. c_x^{ref} 는 참조CoM 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} 은 외란 관측기를 통해 추정된 외란 그리고 $k_{p,d}$ 는 비례 게인이다. 2.1절의 모델링에 기반하여 구성된 외란 관측기(State Observer)는 제어 입력 (U')과 제어기의 출력 y_{com} 을 이용하여 \hat{d} 을 포함한 상태 벡터 $\hat{\mathbf{x}} = [\hat{c}_x \ \hat{\dot{c}}_x \ \hat{d}]^T$ 을 추정한다. 추정된 상태 벡터 $\hat{c}_x, \hat{\dot{c}}_x$ 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, $k_{p,d}$ 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.



[Fig. 2] Block diagram of proposed compliance controller using state Observer

2.3 제어 프레임워크의 수학적 모델링

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

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

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

$$\dot{d} = 0 \quad (4)$$

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

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{B}u' \quad (5)$$

$$y = \mathbf{C}\mathbf{x} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \mathbf{x} &= [c_x \ \dot{c}_x \ d]^T, \\ \mathbf{A} &= \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ -k_p & -k_v & k_p \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \mathbf{B} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}, \\ \mathbf{C} &= [1 \ 0 \ 0] \end{aligned} \quad (7)$$

식 (5), (6)에 기반하여 아래 식 (8)의 상태 관측기가 구성되었다.

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

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

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

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

[Table 1] Control poles and observer poles

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

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 [Table 1]의 Observer poles 이 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 [Table 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, 2.1절의 CoM 제어 성능 모델에 기반한다. 이 CoM 제어 성능 모델은, CoM의 높이를 지면으로부터 일정하다고 가정하고, CoM의 동작을 축별고려하였다. 제어 프레임워크는 이에 기반하여, CoM의 동작을 작업 공간으로 설정하고, 방향별 \hat{d} 을 추정한다. 이에 따른 제어 입력을 생성한다. 이를 통해선행 연구의 관절 공간 유연 동작 제어와 달리, CoM 동작의 유연성을 방향에 따라 독립적으로 제어할 수 있다.

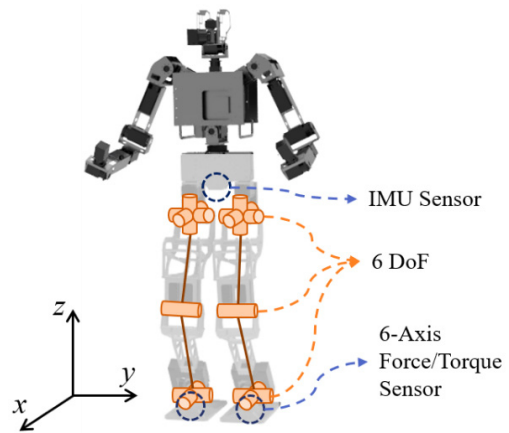
3. 동역학 시뮬레이션

본 절에서는 제안되는 CoM 유연 동작 제어를 검증하기 위해 수행된 동역학 시뮬레이션 결과가 소개된다. 먼저 3.1절에서는 시뮬레이션에 사용된 휴머노이드 로봇 DYROS-JET와 동역학 시뮬레이션 환경이 설명된다. 3.2절과 3.3절에서는 2가지 유형의 외란을 가정하고, 이에 따른 선형 연구의 관절 공간 유연 동작 제어와 본 논문에서 제안하는 CoM 유연 동작 제어의 시뮬레이션 결과가 비교 및 분석된다. 3.2절에서는 제자리에서 업무 수행 중인 로봇을 가정하여 두 발이 모두 지면에 닿아 있는 상태의 로봇에 y축과 z축이 혼합된 형태의 외란 (유형 1)이 가해지는 시뮬레이션이 수행되었다. 3.3절에서는 제자리에 있는 로봇에 특정 위치까지 이동하는 물체가 로봇의 pelvis에 충돌하는 시뮬레이션이 수행되었다. 시뮬레이션에서는 제안되는 CoM 유연 동작 제어는 y축 방향으로만 구현되어 이에 따른 유연 동작을 확인할 수 있었다.

3.1 로봇 및 시뮬레이션 환경 설명

본 연구에서 제안되는 CoM 유연 동작 제어를 검증하기 위해 휴머노이드 로봇 DYROS-JET([Fig. 3] 참조)와 ROBOTI LLC에서 개발된 동역학 시뮬레이터 MuJoCo가 사용되었다. 로봇의 전체 높이는 1.63 m, 골반까지의 높이는 0.72 m이고, 무게는 48 kg이다. 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 [Table 2]와 같이 제시된다.

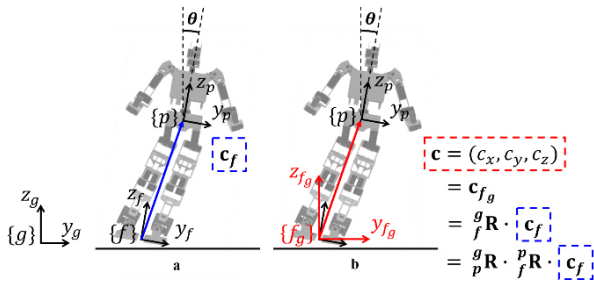
본 논문에서 CoM 위치를 측정하는 방식이 [Fig. 4]에 제시되었다. 먼저, [Fig. 4]의 (a)와 같이 관절 엔코더 값을 기반으로 두 지지 발 중앙에 위치한 좌표계 ($\{f\}$) 기준 CoM 위치인 c_f 가 계산된다. 그다음 골반 ($\{p\}$)에 위치한 IMU 센서로부터 회전 변환 행렬 pR 이 계산되고, 관절 엔코더 값으로 지지 발 중앙 좌표계 ($\{f\}$)와 골반 ($\{p\}$) 사이의 회전 변환 행렬 fR 이 계산된다. 이를 통해 지지 발의 기울기가 반영된 글로벌 좌표계 ($\{f_g\}$) 기준 CoM 위치 $c = {}^gR \cdot {}^fR \cdot c_f$ 가 계산된다.



[Fig. 3] Humanoid Robot DYROS-JET

[Table 2] Specification of DYROS JET

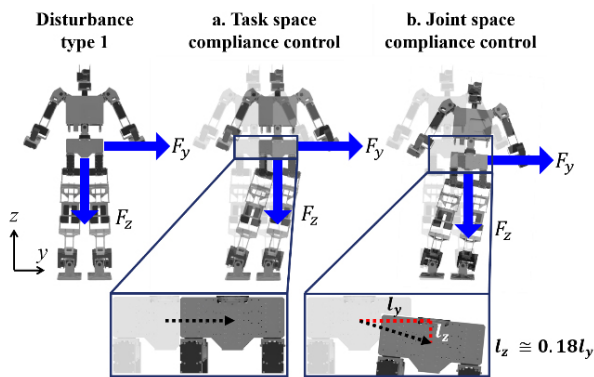
| | | |
|-------------------|------------|---|
| Degree of Freedom | Upper Body | 20 |
| | Lower Body | 12 (6 for each leg) |
| Height | Overall | 1.63 m |
| | Pelvis | 0.72 m |
| Weight | 48 kg | |
| Sensors | Pelvis | IMU Sensor (3DM-GX4-25™) |
| | Ankle | Two 6-axis force/torque Sensor (ATI mini85)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



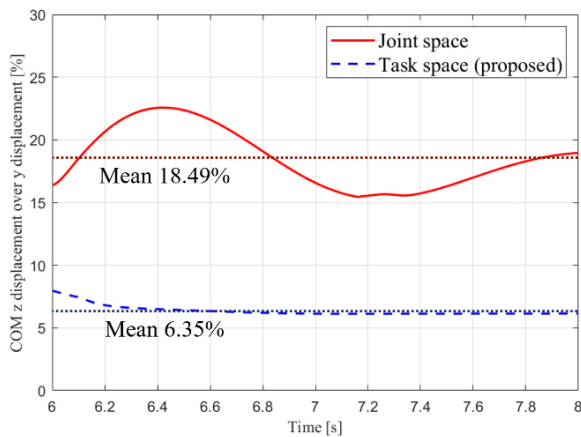
[Fig. 4] Computation of CoM position in global coordinate

3.2 외란 유형 1 시뮬레이션

외란 유형 1 시뮬레이션은 [Fig. 5]의 첫 번째 그림과 같이 두 발이 지면에 닿아 있는 휴머노이드의 pelvis에 y축과 z축 방향이 혼합된 형태의 외란이 2초 동안 가해지는 상황으로 설정되었다. 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.



[Fig. 5] Schematic figure of disturbance type1 simulation result



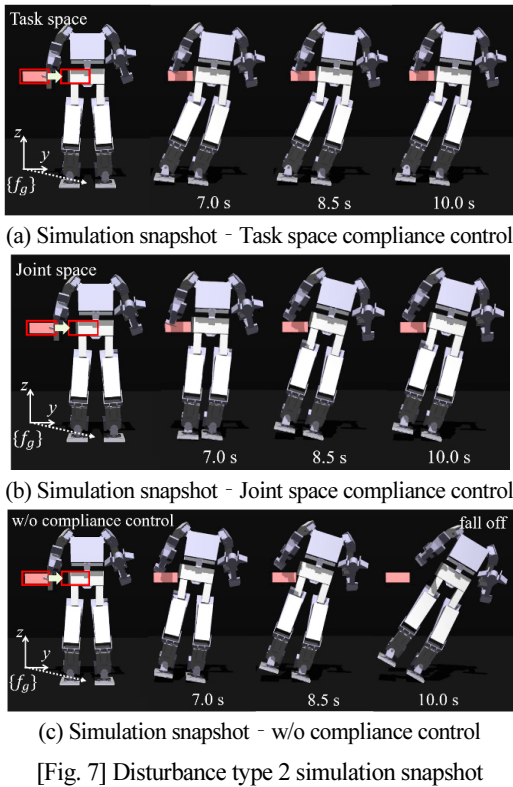
[Fig. 6] Ratio of z-axis displacement to y-axis displacement

제어 방식 별로 외란 유형 1 시뮬레이션에 의해 발생한 y축 변위에 대한 z축 변위의 비율을 [Fig. 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. 각 제어 방법이 외란에 대응한 결과를 단순화하여 [Fig. 5]의 (a), (b)에 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 z 축으로는 일정하게 유지하여 CoM 동작의 유연성을 방향 별로 직관적이고, 독립적으로 제어할 수 있음을 확인하였다.

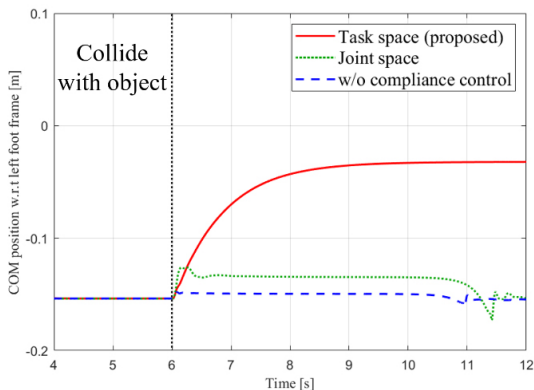
3.3 외란 유형 2 시뮬레이션

외란 유형 2 시뮬레이션은 [Fig. 7(a)]의 첫 번째 그림과 같이 사람 혹은 다른 위치 제어 로봇과의 상호작용에 의해 발생할 수 있는 형태로, 로봇의 pelvis가 차지하고 있는 공간 내 특정 위치까지 이동하는 물체가 로봇에 충돌하는 상황을 가정하였다. 물체는 y축을 따라 이동하여 로봇의 골반에 6초에 충돌하였다. 외란 유형 2 시뮬레이션을 통해 제안되는 CoM 유연 동작 제어가 외란 대응 시 안정적인 균형 제어에 기여하는 것을 확인하고자 했다.

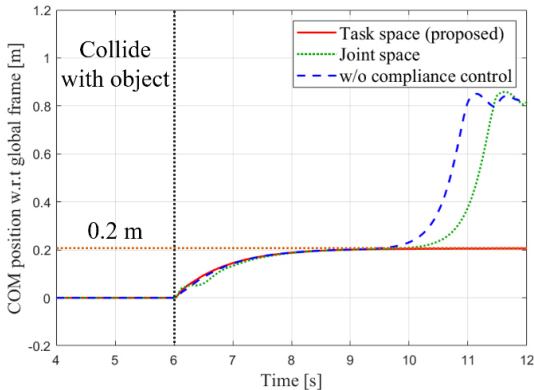
외란 유형 2가 가해졌을 때, 목표 CoM 경로 (c_x^{des})는 (10)와 같이, \hat{d} 을 k_{dp} 에 비례하게 참조 CoM 경로 (c_x^{ref})에 더하여 생성된다. 참조 CoM 경로는 제자리에서 CoM의 움직임 없이 업무 수행하는 상황을 가정하여 글로벌 좌표계 기준 0 m로 일정한 값을 가진다. 생성된 목표 CoM 경로를 통해 CoM이 외란에 유연하게 대응하게 된다. 글로벌 좌표계 기준 실제 CoM y 위치를 나타낸 [Fig. 8(b)]와 원발 좌표계 기준 실제 CoM y 위치를 나타낸 [Fig. 8(a)]를 통해 이를 확인할 수 있다. 초기에 글로벌 좌표계 기준으로 0 m에 위치했던 CoM은 외란으로 인해 0.2 m까지 이동하였는데 ([Fig. 8(b)] 적색 실선), 이 과정에서 외란 방향으로 유연 동작을 생성하여 ([Fig. 8(a)] 적색 실선) 안정적으로 균형을 유지한 것을 확인할 수 있었다 ([Fig. 7(a)] 참조). 이는 pelvis의 roll 축 기울기에서도 확인할 수 있는데, CoM 유연 동작 제어의 경우 pelvis의 roll 축 기울기가 최대 3.5도에 도달하였다. CoM 유연 동작 제어로 인해 외란에 대응하여 y축 방향의 유연 동작과 독립적으로 pelvis orientation이 유지된 것을 확인할 수 있었다[Fig. 9].



[Fig. 7] Disturbance type 2 simulation snapshot

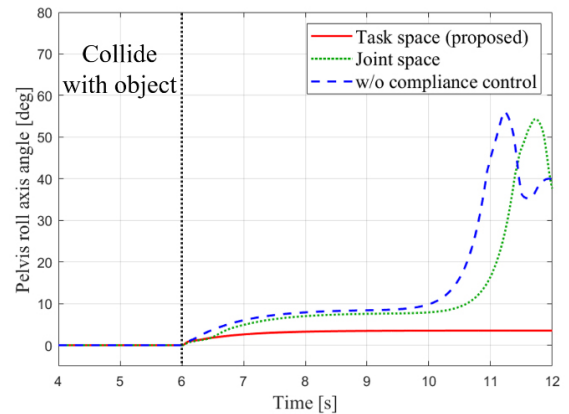


(a) CoM y position w.r.t left foot frame



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

[Fig. 8] CoM y position in compliance control under disturbance type 2



[Fig. 9] Pelvis roll-axis angle w.r.t global frame in compliance control under disturbance type 2

선행 연구에서 제안된 관절 공간 유연 동작 제어에서도 CoM이 글로벌 좌표계 기준 0.2m까지 이동하였고 ([Fig. 8(b)] 녹색 점선), 유연 동작을 생성하였으나([Fig. 8(a)] 녹색 점선), 물체가 정지한 이후에도 외란을 버티지 못하고 로봇이 균형을 잃었다 ([Fig. 7(b)] 참조). Pelvis의 roll 축 기울기에서도 균형을 잃은 것을 확인할 수 있었다[Fig. 9].

유연 동작 제어가 적용되지 않은 경우에는 CoM이 외란에 의해 이동하는 과정에서([Fig. 8(b)] 청색 점선) 유연하게 동작하지 않았으며([Fig. 8(a)] 청색 점선), 물체가 정지한 이후에도 관절 공간 유연 동작 제어보다 빠른 시점에 외란을 버티지 못하고 로봇이 균형을 잃었다([Fig. 7(c)] 참조). Pelvis의 roll 축 기울기에서 역시 관절 공간 유연 동작 제어보다 빠르게 균형을 잃은 것을 확인할 수 있었다[Fig. 9].

외란 유형 2 시뮬레이션을 통해 두 제어 프레임워크 사이의 balancing 유지에 대한 성능 차이를 확인할 수 있었다. CoM 유연 동작 제어에서는 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.

스탠딩 자세에서 업무를 수행하는 상황에서는, 본 논문에서 제안되는 프레임워크를 통해 원하는 방향에만 유연 동작 제어를 구현하여 외란에 대응하는 것이 유리할 수 있다.

4. 결론

본 논문에서는 CoM 동작의 유연성을 방향 별로 독립적으로 제어할 수 있는 휴머노이드 CoM 유연 동작 제어 프레임워크를 제안한다. 선행 연구인 관절 공간에서의 유연 제어 방법

은, 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 시뮬레이션을 통해 검증되었다. 결과적으로 특정 방향 외란이 로봇에 가해졌을 때, CoM 동작을 특정 방향으로만 유연하게 제어하여 이에 대응할 수 있었고, 이를 통해 로봇의 안정적인 균형 유지도 가능한 것이 확인되었다.

하지만, 본 논문에서 제안하는 알고리즘은 선행 연구의 관절 공간 유연 동작 제어를 작업 공간 상의 CoM 움직임에만 적용하였기에, CoM이 아닌 다른 작업들의 유연 동작을 생성하기는 어려웠다. 또한, 업무 수행 중인 상황을 가정한 양발 지지 상황에서만 적용되어, 알고리즘의 효용성에 대해 제한이 있다. 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.

References

- [1] K. Kaneko, K. Harada, F. Kanehiro, G. Miyamori, and K. Akachi, "Humanoid robot HRP-3," *2008 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, Nice, France, 2008, DOI: 10.1109/IROS.2008.4650604.
- [2] 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*, Tsukuba, Japan, 2005, DOI: 10.1109/ICHR.2005.1573587.
- [3] S. Lohmeier, T. Buschmann, and H. Ulbrich, "Humanoid robot LOLA," *2009 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Kobe, Japan, 2009, DOI: 10.1109/ROBOT.2009.5152578.
- [4] E. Krotkov, D. Hackett, L. Jackel, M. Perschbacher, J. Pippine, J. Strauss, G. Pratt, and C. Orłowski, "The DARPA Robotics Challenge finals: Results and perspectives," *Journal of Field Robotics*, vol. 34, no. 2, pp. 229-240, 2017, DOI: 10.1002/rob.21683.
- [5] 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, DOI: 10.1002/rob.21571.
- [6] 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, DOI: 10.1002/rob.21685.
- [7] Avatar Xprize Contest, [Online], <http://www.xprize.org/prizes/avatar>, Accessed: March 07, 2022.
- [8] C. Lenz and S. Behnke, "Bimanual Telemanipulation with Force and Haptic Feedback and Predictive Limit Avoidance," *2021 European Conference on Mobile Robots (ECMR)*, Bonn, Germany, 2021, DOI: 10.1109/ECMR50962.2021.9568842.
- [9] K. Kaneko, F. Kanehiro, M. Morisawa, E. Yoshida, and J.-P. Laumond, "Disturbance observer that estimates external force acting on humanoid robots," *2012 12th IEEE International Workshop on Advanced Motion Control (AMC)*, Sarajevo, Bosnia and Herzegovina, 2012, DOI: 10.1109/AMC.2012.6197026.
- [10] J.-Y. Kim and Y.-S. Kim, "ZMP Tracking Control of an Android Robot Leg on Slope-Changing Ground Using Disturbance Observer and Dual Plant Models," *International Journal of Humanoid Robotics*, vol. 13, no. 3, 2015, DOI: 10.1142/S0219843615500437.
- [11] R. J. Griffin, A. Leonessa, and A. Asbeck, "Disturbance compensation and step optimization for push recovery," *2016 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, Daejeon, South Korea, 2016, DOI: 10.1109/IROS.2016.7759792.
- [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, DOI: 10.1109/TCST.2004.824320.
- [13] J. Park, "Impedance control for biped robot locomotion," *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, vol. 17, no. 6, pp. 870-882, Dec., 2001, DOI: 10.1109/70.976014.
- [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)*, Tsukuba, Japan, 2007, DOI: 10.1109/WHC.2007.59.
- [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)*, Brisbane, QLD, Australia, 2018, DOI: 10.1109/ICRA.2018.8460618.
- [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)*, Montreal, QC, Canada, 2019, DOI: 10.1109/ICRA.2019.8794174.



박 경 재

2021 서울대학교 기계항공공학부(학사)
2021~현재 서울대학교 지능정보융합학과 석사과정

관심분야: Bipedal walking of humanoid robot



김 명 주

2017 서울과학기술대학교 기계시스템디자인공학과(학사)
2019 서울과학기술대학교 기계설계로봇공학과(석사)
2019~현재 서울대학교 지능정보융합학과 박사과정

관심분야: Bipedal walking of humanoid robot



박 재 흥

1995 서울대학교 항공우주공학과(학사)
1999 서울대학교 항공우주공학과(석사)
2006 Stanford University Aero/Astro(박사)
2009~현재 서울대학교 융합과학기술대학원 교수

관심분야: Robot-environment Interaction, Contact Force Control, Multi Contact Control, Whole-body Dynamic Control, Bio-mechanics