



질량중심-역기구학과 모델 스위칭을 이용한 이족 로봇의 효과적인 지면 적응 보행 전략

여명훈^a, 김정엽^{a*}

Effective Ground-Adaptive Walking Strategy for Biped Robots Using Center-of-Mass-Inverse Kinematics and Model Switching

Myung-Hun Yeo^a, Jung-Yup Kim^{a*}^a Department of Mechanical Design and Robot Engineering, Seoul National University of Science and Technology

ARTICLE INFO

Article history:

Received	9	February	2022
Revised	16	March	2022
Accepted	1	April	2022

Keywords:

Walking strategy
Biped robot
Computed torque control
Model switching
Center of mass inverse kinematics

ABSTRACT

This study describes a walking motion control algorithm capable of effective ground adaptation without using a specific balance control algorithm when a biped robot walks on irregular ground. Through preview control, a center-of-mass trajectory capable of stable walking was derived, and motion control was performed using center of mass-inverse kinematics (CoM-IK) and computed torque control (CTC) in the task space. By switching the dynamic model according to the support/swing state of the leg, the motion control gain of the support leg and the swing leg can be maintained to a minimum. Therefore, when the foot lands on an irregular ground, joint rigidity is always minimized so that it can be easily adapted. Finally, the performance of the proposed algorithm was verified by comparing and analyzing three motion control methods on level and irregular grounds in the Gazebo dynamic simulation environment.

1. 서론

Covid-19로 인해 우리의 생활양식은 많은 변화를 가지게 되었다. 특히 물건을 사러 마트, 시장에 가거나 외식을 하러 나가는 비중이 줄어들었고 온라인 쇼핑물에서 장을 보거나 배달 어플을 이용해 집에서 음식을 시켜 먹는 비중이 늘어났다. 따라서 비대면 실외배달 서비스의 필요성이 대두되었고 그에 따라 실외배달로봇의 연구가 진행되고 있다^[1]. 실외배달로봇에는 바퀴형 로봇이 현재 연구되고 있고 일반적으로 배송지까지 로봇이 자율주행을 하면 주문자가 로봇에 있는 보관함에서 물건을 가져가는 방식을 채택하고 있다. 하지만 주문자가 마스크를 끼고 승강기나 계단을 타고 1층까지 내려와서 물건을 받아가는 것은 비대면 배달의 취지에 부합하

지 못한다. 따라서 로봇이 직접 승강기를 조작하거나 계단을 올라가서 주문자의 문 앞까지 배송해 줄 수 있는 보행로봇의 연구가 필요하며 또한, 행인들에게 방해가 되지 않도록 가능한 작은 지지영역을 가지는 이족 보행 로봇의 연구가 필요하다.

이러한 이족 보행 로봇은 기존에 전통적인 산업용 로봇과 달리 협동로봇처럼 사람과 같은 공간을 점유하기 때문에 과거에 ASIMO^[2], HUBO^[3]와 같이 관절공간에서 높은 강성의 관절공간 PD제어는 사람에게 있어 안전한 모션제어라 보기 어렵다.

최근, computed torque control(CTC)을 적용하여 작업공간에서 로봇의 댄핑이득과 강성이득을 조절하여 사람과 같은 공간에 있어도 유연하고 안전한 로봇 모션이 구현되도록 하는 연구의 필요성이 대두되고 있다. 도호쿠(Tohoku)대학교의 Fahad Raza 의

* Corresponding author. Tel.: +82-2-970-6355

E-mail address: jyk76@seoultech.ac.kr (Jung-Yup Kim).

2인은 wheel-legged 타입의 이족로봇에 매니퓰레이터를 장착하여 CTC와 linear quadratic regulator(LQR)로 로봇을 제어하였고, 로봇이 8자그리기로 움직이면서 매니퓰레이터를 독립적으로 조작하는 방법을 가제보(Gazebo) 동역학 시뮬레이션을 이용하여 제시하였다⁴⁾. 다만 매니퓰레이터의 경우 지지하는 베이스가 고정되어 있어 CTC제어이득 값이 상수로 정해져 있다. 그런데 이족 보행 로봇의 하체 모션제어의 경우, 한양대학교 민인준 외 3인의 연구⁵⁾와 같이 대부분 역기구학을 풀고나서 관절공간에서 높은 이득의 PD 제어기로 관절을 제어하는 사례가 많았다⁶⁻⁸⁾. 문제는 관절 강성이 높으면 지면 높낮이 변화에 대응이 어렵다. 이족 보행 로봇의 경우 매니퓰레이터와 달리 높은 수치의 지면 반발력이 주기적으로 발에 가해지므로 작업공간제어라도 높은 이득을 설정하게 되면 사실상 관절공간에서의 위치제어와 큰 차이가 없게 된다. 하지만 빠른 동적 모션을 수행하기 위해서는 작업공간에서의 CTC가 유리하다. CTC의 효과적인 적용을 위해 본 논문에서는 발의 스윙/지지상태에 따른 동역학 모델 스위칭을 통해 스윙다리와 지지다리의 강성을 항상 최소화하여 지면 적응력을 극대화하고 모델 천이가 부드럽게 이루어지도록 하였다. 따라서 별도의 균형제어 알고리즘 없이 지면 적응력을 키워 로봇이 원래 다녀야 할 발의 높이가 변화되었을 때, 착지가 부드럽게 이루어질 수 있는 방법을 가제보 동역학 시뮬레이션과 함께 제시하고자 한다.

2장에서는 로봇의 전반적인 사양을 소개하며, 3장에서는 본 논문에서 제시하는 제어전략과 그 안에 있는 핵심요소로서, 질량중심 역기구학, 프리뷰 제어 그리고 작업공간 CTC의 모델 스위칭 전략에 대하여 소개한다. 4장에서는 이러한 제어전략을 동역학 시뮬레이션을 통해 검증할 하게 되며 그에 따른 결론과 향후 연구과제를 5장에서 서술하고자 한다.

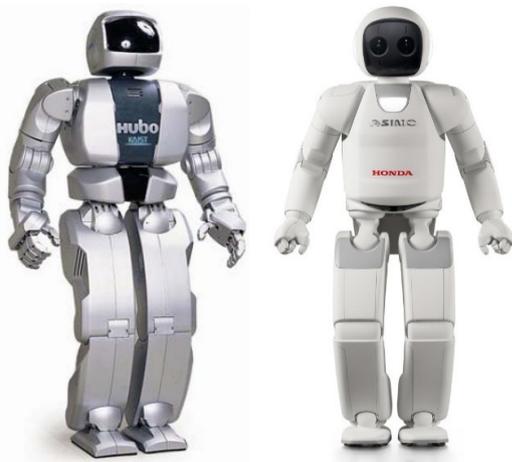


Fig. 1 Joint control based robot HUBO and ASIMO

2. 이족 보행 로봇 SUBO-2

2.1 로봇의 전반적 사양

본 논문에서는 이족보행 로봇 SUBO-2의 하드웨어 사양을 소개하며, 이를 기반으로 하여 가제보 동역학 시뮬레이션 환경을 구축하였다. SUBO-2는 두 개의 다리와 한 개의 몸통으로 구성되어 있으며, 각 다리는 6개의 자유도를 가지고 있다. 전체중량은 약 21 kg이며, 0.945 m의 키를 가지고 있다. 우선, 실제 로봇의 적용에 앞서 가제보 시뮬레이션 환경을 구축하였다. Fig. 2에 SUBO-2의



Fig. 2 Photograph and 3D model of SUBO-2

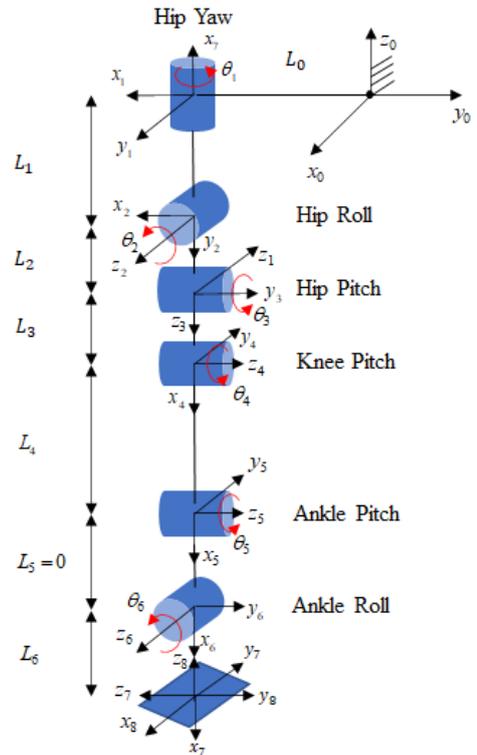


Fig. 3 Kinematic chains of SUBO-2 (right leg)

Table 1 D-H parameters (right leg)

Link	a_i (mm)	α_i (radian)	d_i (mm)	θ_i (radian)
1	$L_0 = 60$	0	0	$-\frac{\pi}{2}$
2	0	$-\frac{\pi}{2}$	0	θ_1
3	0	$-\frac{\pi}{2}$	0	$\frac{\pi}{2} + \theta_2$
4	$L_3 = 250$	0	0	θ_3
5	$L_4 = 250$	0	0	θ_4
6	0	$\frac{\pi}{2}$	0	θ_5
7	$L_6 = 110.5$	$-\frac{\pi}{2}$	0	θ_6
8	0	$-\frac{\pi}{2}$	0	$-\frac{\pi}{2}$

사진과 3D를 나타내었다. 로봇에 관한 물성치, 관절배치는 가제보에서 구현될 수 있는 SDF파일로 만들었고 그 정보는 Fig. 3의 관절배치와 Table 1인 D-H parameters, 그리고 Table 2의 물성치에서 참고하였다. 그리고 실제 로봇에서 발생할 수 있는 마찰을 구현하기 위해 감속기의 데이터시트와 발바닥소재인 폴리우레탄의 마찰계수(0.47)를 참고하여 적용하였다.

3. 보행 제어 전략

3.1 전략 개요

본 논문의 보행 제어 전략은 아래의 Fig. 4와 같다. 여기서, ZMP_{ref} 는 참조 zero moment point(ZMP), θ_{ref} 는 참조관절각도, ${}^{PC}P_{RF}^{yref}$ 는 골반 중심 좌표계에서 바라본 오른발의 y방향 참조위치,

Table 2 Hardware specifications

Mass	21.215 kg		
Overall size	Width	Height	Depth
	0.28 m	0.945 m	0.184 m
DOF	Leg	Hip	3DOFs
		Knee	1DOF
		Ankle	2DOFs
		Total	6×2=12DOFs
Actuator	DC motor		
	Maxon RE30 : hip roll, hip pitch, hip yaw		
	Maxon RE35 : knee pitch		
	Maxon EC-4pole 30 200 W : ankle roll ankle pitch		
Motor controller	Maxon MAXPOS 50/5 : hip pitch, hip yaw, knee pitch		
	Maxon EPOS4 50/15 : knee pitch, ankle roll, ankle pitch		
Sensor	(1) IMU : pelvis, left foot, right foot		
	(2) 6-axis F/T sensor : left foot, right foot		
Power	5 V, 12 V, 24 V		

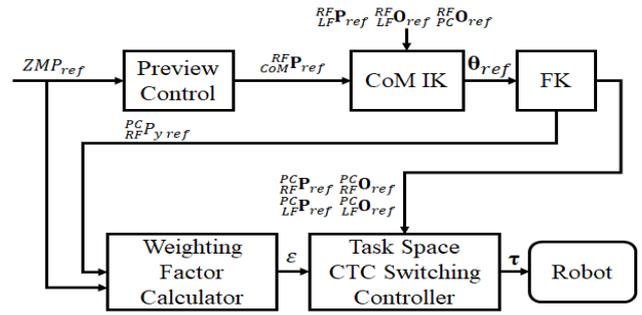


Fig. 4 Block diagram of the proposed strategy

${}^{RF}P_{ref}$ 는 오른발중심에서 바라본 질량중심의 참조위치, ${}^{PC}O_{ref}$ 는 오른발중심에서 바라본 골반중심의 참조방위, ${}^{RF}P_{ref}$ 는 오른발중심에서 바라본 왼발중심의 참조위치, ${}^{RF}O_{ref}$ 는 오른발중심에서 바라본 왼발중심의 참조방위, ${}^{RC}P_{ref}$ 는 골반중심에서 바라본 오른발의 참조위치, ${}^{RC}O_{ref}$ 는 골반중심에서 바라본 오른발의 참조방위, ${}^{RC}P_{ref}$ 는 골반중심에서 바라본 왼발의 참조위치, ${}^{RC}O_{ref}$ 는 골반중심에서 바라본 왼발의 참조방위, ϵ 는 가중 지수 (weighting factor), τ 는 관절 토크이다.

먼저, 참조 ZMP궤적을 preview control^[9]에 입력하여 필요한 질량중심의 참조 궤적을 산출한다. 그런 다음 CoM-İK에 질량중심 위치와 양발의 참조 위치와 방위를 입력하여 참조 관절각도를 구한 다음 정기구학(FK)을 풀어서 골반중심 좌표계에서 바라본 양 발의 참조 위치와 참조 방위를 생성한다. 여기서 각 다리에 대해서 지지상태에 따라 양발지지 상태, 한발지지 상태, 스윙 상태로 나누고 이에 따른 서로 다른 베이스 좌표계, 동역학 모델, 작업공간에서의 댐핑이득과 강성이득을 적용한다. 이때 부드러운 이득 천이를 위해서 가중 지수에 따라 각 발에 적용할 CTC 모드의 가중치 ϵ 가 결정되고 여기서 나온 각 관절의 토크 값이 로봇에게 최종적으로 전달된다. 참고로 알고리즘 주파수는 1 kHz이다.

3.2 보행 모션 생성

이족 보행 로봇의 안전한 보행 모션 생성을 위해 preview control을 사용하였다. Preview control^[9]은 미래의 참조 입력을 고려하여 미래의 오차와 제어입력의 크기, 그리고 상태변수의 변화가 최소화될 수 있도록 제어 입력을 결정한다. 예를 들면, 로봇의 현재 시점에서 2초 뒤까지 Fig. 4의 알고리즘과 같이 참조 ZMP를 입력하게 되면 이를 만족하는 로봇의 질량중심의 참조 궤적을 실시간으로 연산하게 된다. 질량중심의 참조 궤적과 스위칭 높이 궤적은 Fig. 5와 같으며, 이때 사용된 보행 파라미터와 모션은 각각 Table 3과 Fig. 6에 나타내었다.

본 논문에서는 preview control에서 도출된 질량중심의 위치를

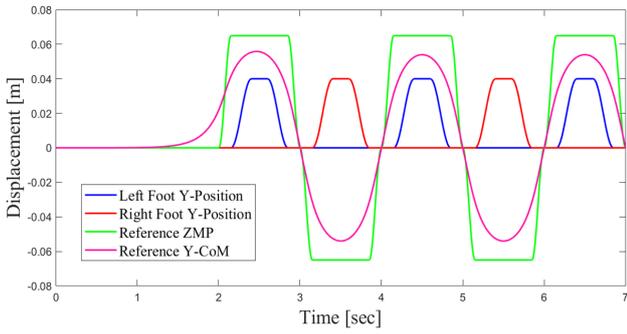


Fig. 5 Walking motion generation

Table 3 Walking parameters

Step time	1 sec
Stride time	2 sec
Double support phase (DSP) ratio	30%
Swing height	40 mm

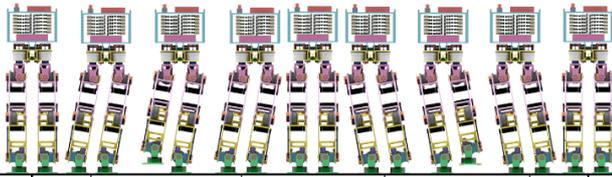


Fig. 6 Gait cycle

참조 값으로 하여 로봇을 제어하고자 CoM-IK를 제안하였다. Fig. 7과 같이 수치적인 방법을 통하여 CoM-IK의 해를 구하였으며, 핵심전략으로써 오른쪽에 장착된 좌표계를 베이스 좌표계로 보았을 때 질량중심의 위치, 골반중심의 방위, 왼발의 위치와 방위의 총 12개 정보에 대해서 자코비안을 이용하여 12개의 참조관절각도를 수치적으로 도출하였다. CoM-IK의 구현이 가능함을 보여주기 위해 Fig. 5에서 도출된 참조 질량중심 궤적을 입력하였을 때의 참조 관절각도를 Fig. 8에서 도시하였다. 참고로 Table. 4는 CoM-IK에 설정하는 파라미터를 표로 정리하였다.

그런데, 본 논문에서 구현하고자 하는 CTC 모델 스위칭은 작업 공간 CTC이므로 참조 입력이 두 발의 위치와 방위이어야 한다. 따라서 CoM-IK에서 구한 관절 각도를 정기구학으로 연산하여 Fig. 9와 같이 두 발의 참조 위치와 방위를 최종적으로 구하였다.

3.3 Task-space CTC 모델 스위칭

다물체 동역학이 고려된 inverse dynamics control을 수행하기 위해 본 연구에서는 작업 공간에서의 computed torque control

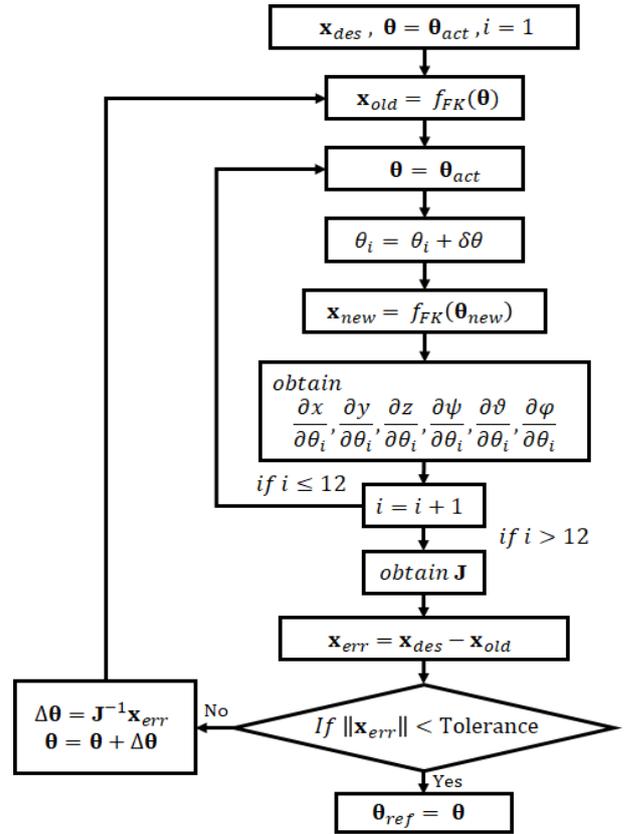


Fig. 7 Flow chart of the CoM-IK algorithm

Table 4 Parameters of CoM-IK algorithm

x	$\begin{bmatrix} {}^{RF}P_{ref} \\ {}^{CoM}P_{ref} \\ {}^{RF}O_{ref} \\ {}^{PC}O_{ref} \\ {}^{RF}P_{ref} \\ {}^{LF}P_{ref} \\ {}^{RF}O_{ref} \\ {}^{LF}O_{ref} \end{bmatrix}$
$\delta\theta$	0.0001 rad
Tolerance	15×10^{-7}

(CTC)을 수행하였다. 실제 로봇의 물성치가 적용된 3D모델링으로 만들어진 SDF파일에서 inertia matrix를 도출하고 rigid body dynamics library^[10]를 이용하여 gravity matrix, 그리고 coriolis & centrifugal matrix를 도출한 후, Fig. 10과 같은 작업공간 CTC를 구현하였다. 여기서 K_s 는 작업공간의 강성이득을 의미하며, K_d 는 작업공간의 댐핑이득을 의미한다. 식(1)에서 $\ddot{\mathbf{x}}_{ctc}$ 는 연산된 작업공간의 가속도, 각각속도 벡터, $\dot{\mathbf{q}}_{ctc}$ 는 연산된 관절공간의 각각속도 벡터, \mathbf{q} 는 관절의 각도벡터, $\dot{\mathbf{q}}$ 는 관절의 각속도벡터이다. \mathbf{J}_k 는 해석적 자코비안이며, 식(2)에서 $\hat{\mathbf{M}}(\mathbf{q})$ 는 inertia matrix, $\hat{\mathbf{G}}(\mathbf{q})$ 는 gravity matrix이고 $\hat{\mathbf{V}}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})$ 는 coriolis & centrifugal matrix이다. Fig. 10에서 \mathbf{x}_{des} 와 \mathbf{x}_{act} 는 각각 양발의 목표 및 현재 위치와 방위이며, 마지막으로 $\boldsymbol{\tau}_{ctc}$ 는 식(2)와 같이 CTC로 계산된 관절의 입력토크벡터이다.

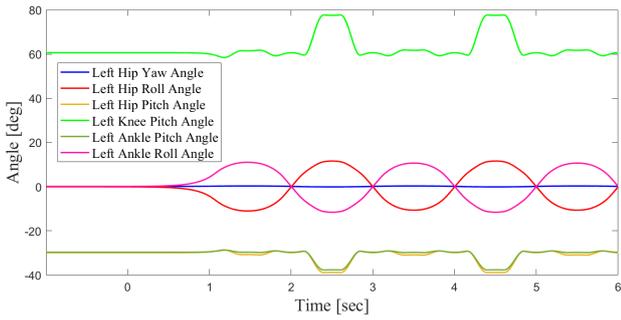


Fig. 8 Reference joint angle trajectories obtained by CoM-IK

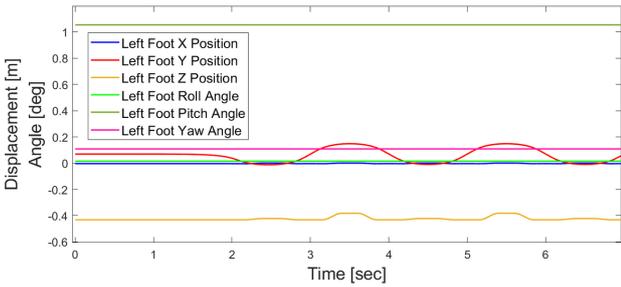


Fig. 9 FK solved reference position & orientation

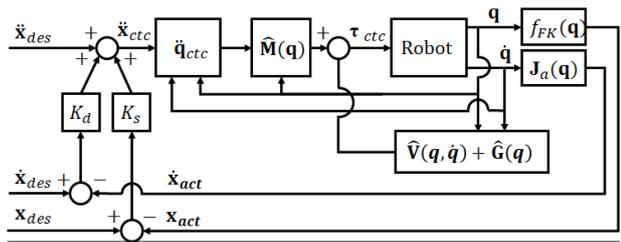


Fig. 10 Block diagram of task-space CTC

$$\ddot{\mathbf{q}}_{ctc} = \mathbf{J}_a^{-1} (\ddot{\mathbf{X}}_{ctc} - \dot{\mathbf{J}}_a \dot{\mathbf{q}}) \quad (1)$$

$$\boldsymbol{\tau}_{ctc} = \hat{\mathbf{M}}(\mathbf{q})\ddot{\mathbf{q}}_{ctc} + \hat{\mathbf{V}}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) + \hat{\mathbf{G}}(\mathbf{q}) \quad (2)$$

로봇다리의 지지/스윙 상태에 따라 작업공간 CTC 모델 스위칭을 적용하기 위해서는 상태를 구분할 수 있는 지표가 필요하다. 먼저 모드를 3가지로 구분하였으며 Fig. 11과 같이 양발지지 상태, 한발지지 상태, 스윙 발 상태로 나누어 각각의 경우 서로 다른 $\hat{\mathbf{M}}$, $\hat{\mathbf{V}}$, $\hat{\mathbf{G}}$ 를 갖는 동역학 모델과 베이스 좌표계를 정의하였다. 양발지지 상태의 경우 베이스 좌표계를 발바닥에 두었고, 로봇의 절반을 동역학 모델로 가정하였다. 한발지지 상태의 경우 베이스 좌표계를 지지다리의 발바닥에 두었고 로봇전체를 동역학 모델로 가정하였다. 이때 스윙다리는 하나의 질량으로 간주하였다. 마지막으로 스윙 발 상태는 베이스 좌표계를 골반중심에 두었고, 스윙다리만 동역학 모델로 가정하였다.

본 연구에서는 부드러운 CTC 모델 스위칭을 위해 식 (3)과 같이

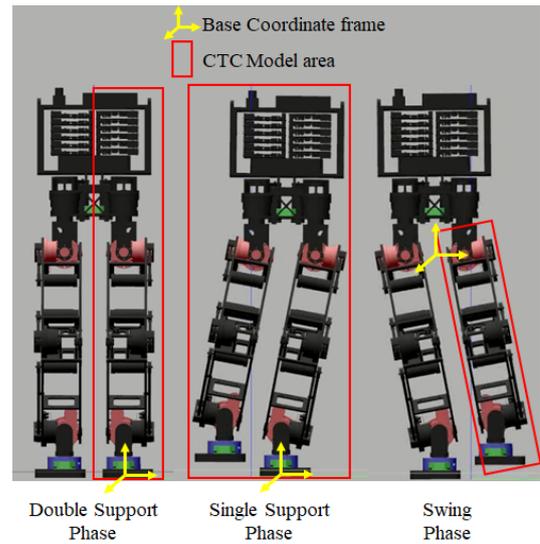


Fig. 11 Different dynamic model based on support state (left leg)

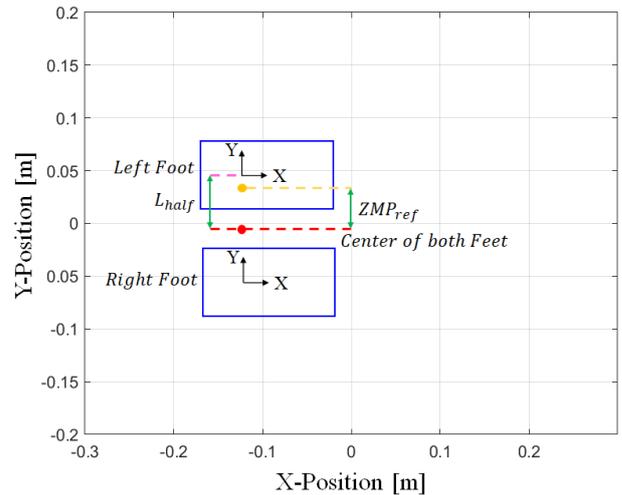


Fig. 12 Description of support ratio

CTC 관절토크를 정의하였다. ϵ^{DSP} , ϵ^{SSP} , ϵ^{SP} 는 각각의 CTC모드의 가중치를 의미하며 각각의 가중치는 식 (4), 식 (5), 식 (6)과 같이 정의된다. Fig. 12와 식 (5)와 같이 support ratio a 가 1일 때 완전한 한발지지 상태이고 0일 때 완전한 양발지지 상태임을 의미한다. 이족보행 로봇이 보행할 때 지지/스윙 상태가 짧은 시간 동안 빠르게 천이되기 때문에 마찬가지로 빠르게 CTC모드를 천이시켜야 한다. 활성화 함수에 대표적으로 사용되는 hyperbolic tangent function과 삼각함수인 sine function을 비교하였고, Fig. 13와 같이 hyperbolic tangent function이 양발지지 상태에서 한발지지 상태로 천이 될 때 빠른 변화율을 나타내는 것을 알 수 있다. 따라서 ϵ 를 hyperbolic tangent function으로 적용하였으며, a 의 경우 한발지지 상태일 때, ZMP가 지지발에 수렴하기 때문에 양발의 중심거리의 절반 중 ZMP가 차지하는 비율로 정의하여

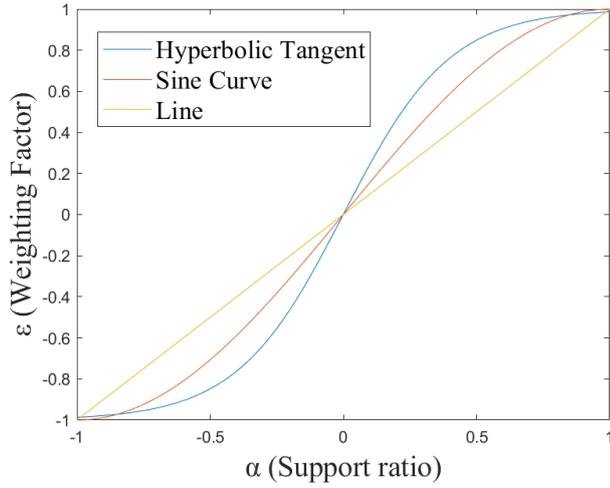
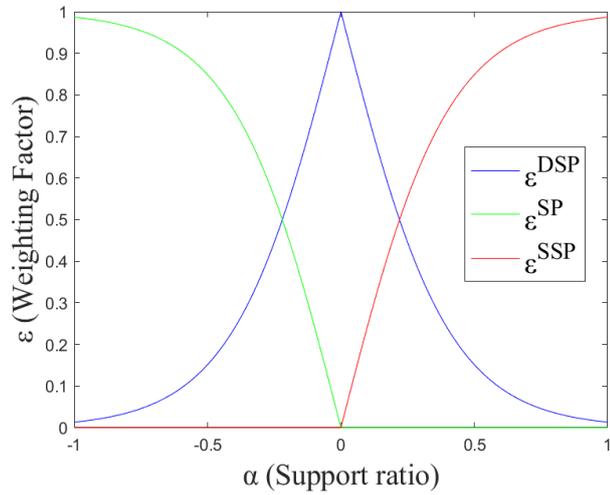


Fig. 13 Comparison of functions

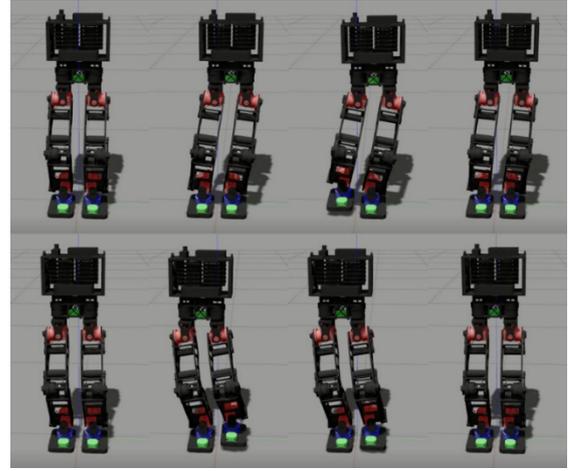
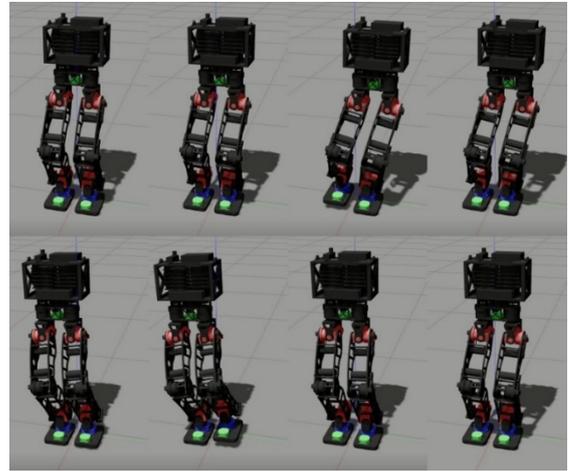

 Fig. 14 Weighting factors according to α (left leg)

-1~1사이의 값을 갖도록 하였다. 최종적으로 이를 이용하여 지지/스윙 상태에 따라 CTC모드를 변환하는 모션제어를 구현하였고 원다리를 기준으로 α 에 따른 세가지 모드의 ϵ 그래프를 Fig. 14에 표현하였다.

$$\tau_{ctc}^{Final} = \epsilon^{DSP} \tau_{ctc}^{DSP} + \epsilon^{SSP} \tau_{ctc}^{SSP} + \epsilon^{SP} \tau_{ctc}^{SP} \quad (3)$$

$$\epsilon^{SSP} = \begin{cases} \frac{2}{1+e^{-4\alpha}} - 1 & (\alpha \geq 0) \\ 0 & (\alpha \leq 0) \end{cases} \quad (4)$$

$$\epsilon^{SP} = \begin{cases} 0 & (\alpha \geq 0) \\ -\frac{2}{1+e^{-4\alpha}} + 1 & (\alpha \leq 0) \end{cases} \quad (5)$$


 Fig. 15 Walking using joint-space PD control mode ^[11]

 Fig. 16 Walking using of pelvis center based computed torque control mode ^[11]

$$\epsilon^{DSP} = \begin{cases} -\frac{2}{1+e^{-4\alpha}} + 2 & (\alpha \geq 0) \\ \frac{2}{1+e^{-4\alpha}} & (\alpha \leq 0) \end{cases} \quad (6)$$

$$\alpha = \frac{ZMP_{ref}}{L_{half}} \quad (7)$$

4. 동역학 시뮬레이션 검증

4.1 평지에서의 제자리 보행 성능 비교 분석

세 가지 모션제어방법에 대해서 가제보 동역학 시뮬레이터를 이용하여 제어모드 별 제자리 보행 시뮬레이션을 Fig. 15~17과 같이 수행하였다^[11]. 그리고 시뮬레이션결과로써, 주어진 참조 ZMP 궤적에 대한 프리뷰제어에 의해 도출된 참조 질량중심 궤적과 실제

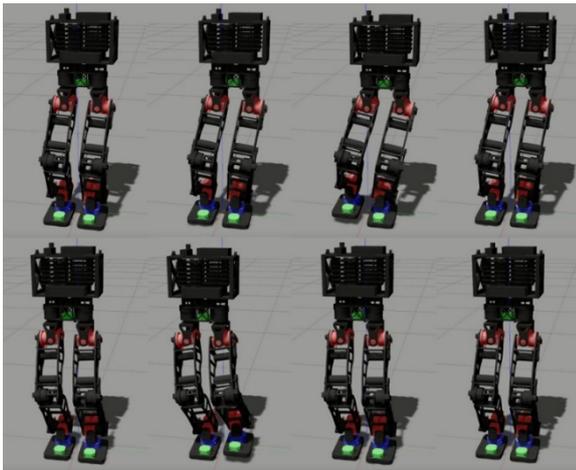


Fig. 17 Walking using of model switching computed torque control mode [11]

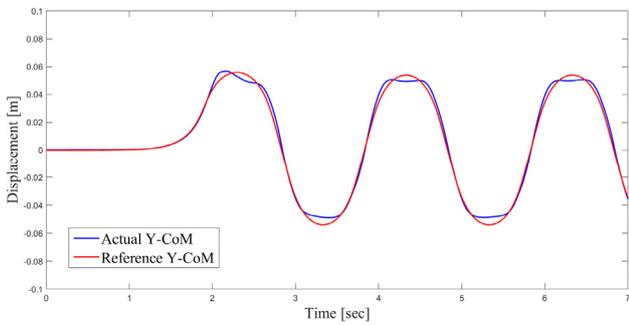


Fig. 18 Y-CoM position of joint-space PD control

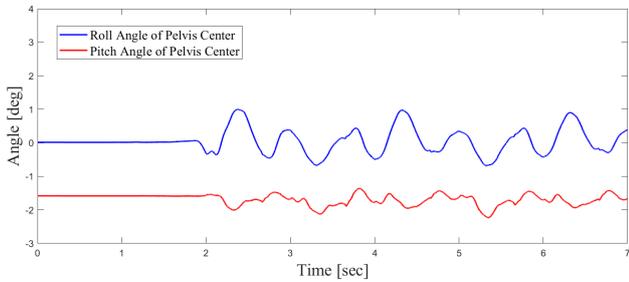


Fig. 19 Pelvis center inclination of joint-space PD control

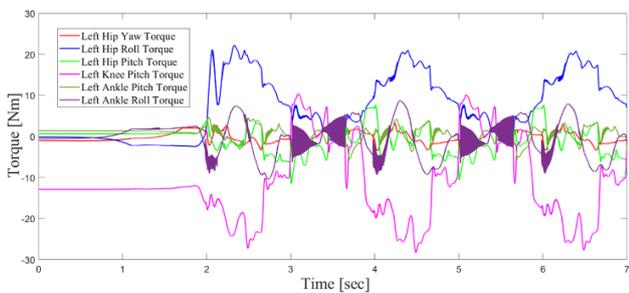


Fig. 20 Joint torque of joint-space PD control

질량중심 궤적을 도시하였다. 또한, 골반중심의 롤, 피치 기울기를 도시하여 표준편차를 비교해 보았다. 먼저 관절공간 PD제어의 경

Table 5 Gains of joint-space PD control

Gain	Hip yaw	Hip roll	Hip pitch	Knee pitch	Ankle pitch	Ankle roll
$K_p^{joint} [Nm/rad]$	3,000	3,000	3,000	3,000	3,000	3,000
$K_d^{joint} [Nm.s/rad]$	7	7	7	7	7	7

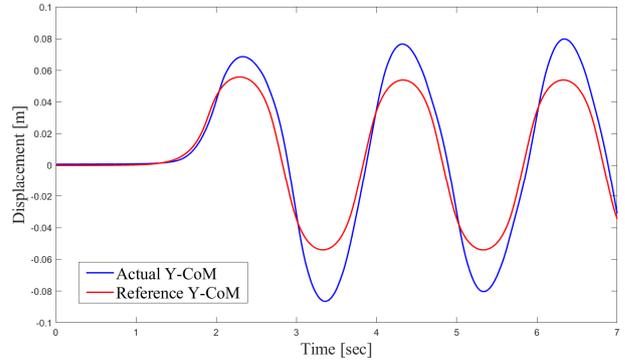


Fig. 21 Y-CoM position of pelvis center based computed torque control mode

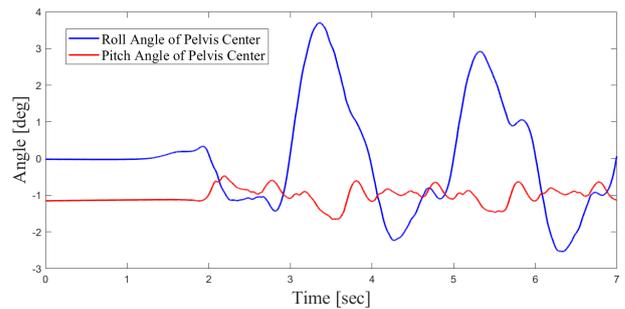


Fig. 22 Pelvis center inclination of center based computed torque control mode

우 Fig. 18과 같이 질량중심 궤적을 대체로 잘 추종하나 참조 질량중심 궤적의 변곡점에서 추종을 하지 못하는 경향이 있으며 특히 Fig. 20과 같이 한발지지 상태에서 발목 롤관절에서 약 8Nm크기의 관절토크의 고주파진동이 발생하여 불안정한 상태를 알 수 있다. 참고로 선정한 PD제어계인은 아래의 Table 5와 같다.

둘째, 골반중심 좌표계 기반의 고정 모델 CTC의 경우, Fig. 21과 같이 참조 질량중심의 변곡점 즉, 한발지지 상태에서 중력보상이 부족하여 참조치를 초과하는 경향이 있다. 또한, Fig. 23과 같이 로봇의 지지상태에 따른 모델링이 반영되지 않았기 때문에 골반, 무릎 관절에서 고주파 진동이 여전히 발생하는 것을 알 수 있다. 참고로 선정한 이득은 아래의 Table 6의 값과 같으며, K_s^{SP} 는 골반중심 좌표계 기반의 고정 모델 CTC의 강성이득, K_d^{SP} 는 댐핑이득이며 이들은 후술할 모델 스위칭 CTC에서 스윙 발 상태의 이득과 같은 개념이다.

셋째, 모델 스위칭 CTC의 경우, Fig. 24과 같이 높은 성능으로

Table 6 Gains of pelvis center based computed torque control

Gain	X	Y	Z	Roll	Pitch	Yaw
$K_s^{SP}[1/sec^2]$	8,000	8,000	8,000	80,000	80,000	80,000
$K_d^{SP}[1/sec]$	100	100	100	100	100	100

Table 7 Gains of model switching computed torque control

Gain	X	Y	Z	Roll	Pitch	Yaw
$K_s^{SP}[1/sec^2]$	1,500	1,500	1,500	2,000	2,000	2,000
$K_d^{SP}[1/sec]$	4	4	4	4	4	4
$K_s^{DSP}[1/sec^2]$	500	500	500	1,000	1,000	1,000
$K_d^{DSP}[1/sec]$	4	4	4	4	4	4
$K_s^{SSP}[1/sec^2]$	500	500	500	1,000	1,000	1,000
$K_d^{SSP}[1/sec]$	4	4	4	4	4	4

Table 8 Comparison of the pelvis center inclination

Standard deviation (SD)	Joint-space PD control	Pelvis center CTC	Model switching CTC
Roll angle of pelvis center [deg]	0.3668	1.4560	0.1318
Pitch angle of pelvis center [deg]	0.1605	0.2235	0.1547

참조질량중심 궤적을 추종하는 것을 알 수 있다. 관절 토크의 경우 Fig. 26 과 같이 관절토크의 고주파진동이 거의 없는 것을 확인할 수 있다. 세 가지 모션제어방법에 대한 몸통 기울기의 표준편차를 Table 7에 정리하였다. 골반중심 좌표계 기반의 고정 모델 CTC의 경우 관절공간 PD제어보다 오히려 몸통 기울기 편차가 크게 나타나는 것을 통해 단일 모델 CTC제어는 보행로봇에 적합하지 않음을 알 수 있다. 반면 CTC 모델 스위칭 제어의 경우 몸통 롤 기울기 편차가 64.1%로 크게 감소되었고 피치 기울기 편차는 3.6%로 큰 차이 없이 감소되었음을 알 수 있었다. 참고로 선정하 이득은 아래의 Table 7의 값과 같으며 선정기준은 Fig. 26과 같이 다수의 시뮬레이션을 통한 시행착오를 통해서 보행 중 관절에서 발생할 수 있는 관절 토크의 고주파 진동을 최소화하고 참조 질량 중심을 적절히 추종할 수 있도록 선정하였다. K_s^{DSP} 는 양발지지 상태의 강성이득, K_d^{DSP} 는 양발지지 상태의 댐핑이득, K_s^{SSP} 는 한발지지 상태의 강성이득, K_d^{SSP} 는 한발지지 상태의 댐핑이득이다.

4.2 지면 장애물에 대한 제자리 보행 성능 비교 분석

4.1절에서 세 가지 제어모드에 대하여 평지에서서의 제자리 걸음 모션을 수행하였을 때 제자리 보행 모션이 모두 구현되는 것을 확인하였다. 하지만 본 논문의 가장 큰 목적은 로봇의 스윙다리

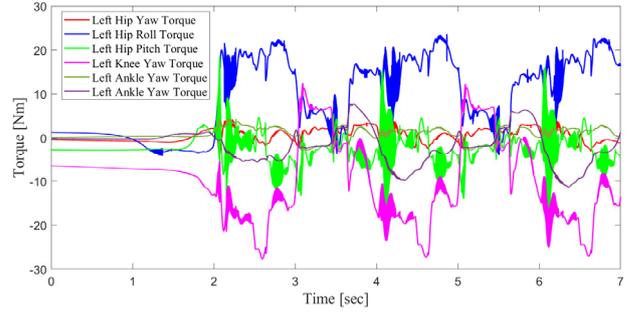


Fig. 23 Joint torque of pelvis center based computed torque control mode

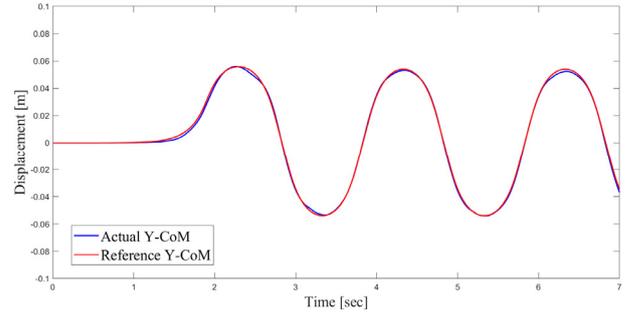


Fig. 24 Y-CoM position of model switching computed torque control mode

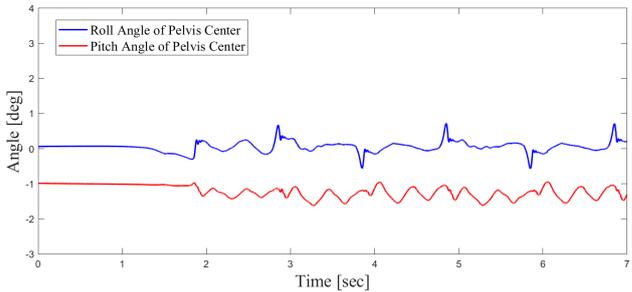


Fig. 25 Pelvis center inclination of model switching CTC mode

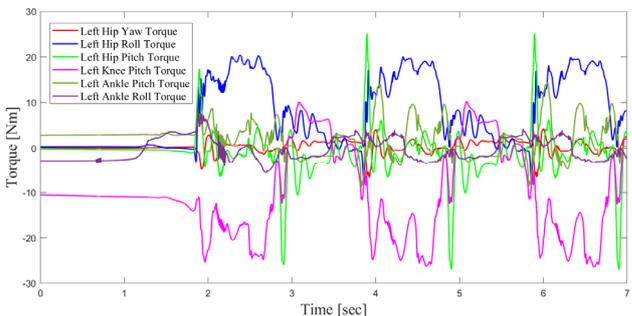


Fig. 26 Joint torque of model switching computed torque control mode

지시다리의 강성이득을 최소화하고 지면적응력을 최대화하여 별도의 균형제어 알고리즘이 없더라도 비평탄지형에서 보행 모션을 수행할 수 있는 알고리즘을 제시하는 것이다. 따라서 가제보 영역

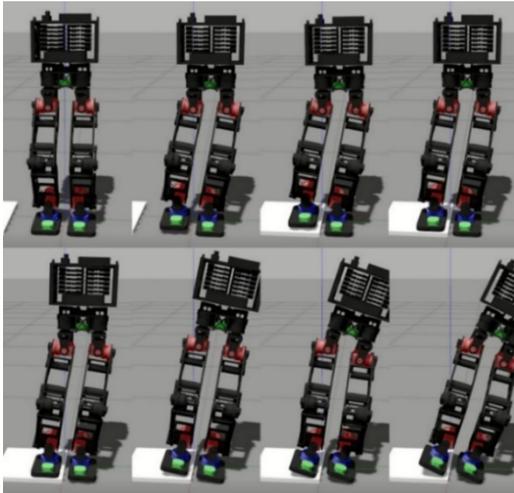


Fig. 27 Walking on an obstacle using joint-space

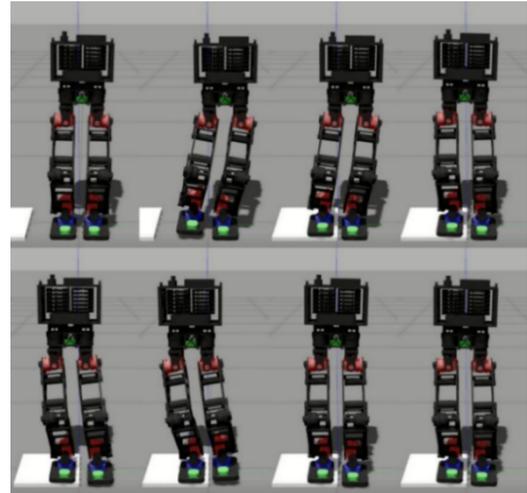


Fig. 29 Walking on an obstacle using model switching computed torque control mode^[11]

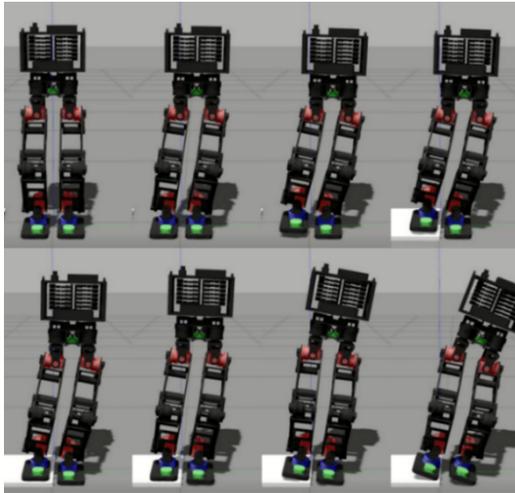


Fig. 28 Walking on an obstacle using pelvis center based computed torque control mode^[11]

학 시뮬레이션으로 20 mm 두께의 지면 장애물을 이족보행 로봇이 밟으면서 제자리 보행을 수행할 수 있는지 검증하였다. 첫째, 관절 공간 PD제어모드의 경우 Fig. 27과 같이 높은 강성이득에 의해 지면을 차고 로봇이 균형을 잃고 쉽게 넘어가는 모습을 확인할 수 있다. 둘째, 고정 모델 CTC모드의 경우 Fig. 28과 같이 부족한 중력보상토크를 보완하기 위한 높은 CTC 강성 이득 때문에 마찬가지로 지면을 차고 로봇이 균형을 잃고 넘어가는 모습을 확인할 수 있다. 마지막으로 CTC 모델 스위칭 모드의 경우 Fig. 29와 같이 낮은 강성 이득과 정확한 역동역학 모델링에 의해 지면 장애물을 밟으면서 제자리걸음이 가능한 것을 확인할 수 있다^[11]. 참조 질량중심 궤적을 적절히 추종하지만 Fig. 30과 같이 평지에서만큼 성능이 완벽하지는 않다. 골반중심 좌표계의 롤, 피치 기울기 역시 Fig. 31에 도시하였고, 이에 대한 표준편차가 Table 9와 같이 도출

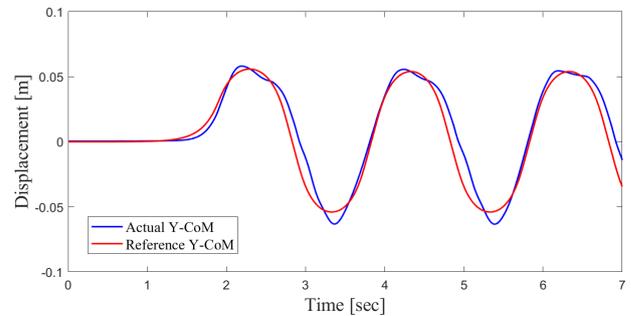


Fig. 30 Y-CoM position of model switching computed torque control mode

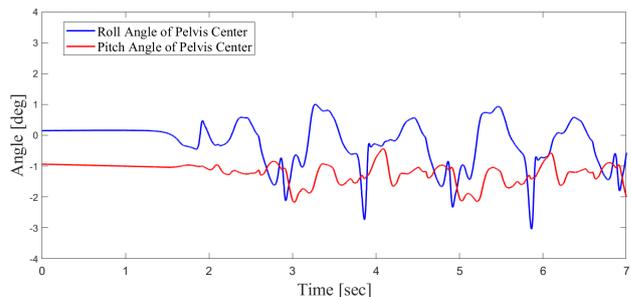


Fig. 31 Pelvis center inclination of model switching CTC mode

Table 9 Comparison of the pelvis center inclination for the ground obstacle

Standard deviation (SD)	10 mm	20 mm	30 mm
Roll angle of pelvis center [deg]	0.3163	0.7050	Fall
Pitch angle of pelvis center [deg]	0.1944	0.3210	Fall

되었으며, 평지에서의 CTC 모델 스위칭 모드보다 다소 높게 나왔으나 안정한 제자리 보행이 가능하였다. 참고로, 10 mm와 30 mm 두께에 대한 실험을 추가적으로 진행하였다. 10 mm와 20 mm 두

개의 지면 장애물의 경우 로봇이 넘어지지 않았으나 30 mm 두께의 지면 장애물의 경우 로봇이 넘어지는 것을 확인하였다. 이에 대한 표준편차를 Table 9에 나타내었다.

5. 결론

본 논문은 이족보행 로봇이 불규칙한 지면에서 보행할 때 별도의 균형제어 알고리즘이 없더라도 효과적인 지면적응을 할 수 있는 모션제어 알고리즘을 제안하였고, 관절공간 PD제어, 골반중심의 고정 모델 CTC제어와 함께 다물체 동역학 시뮬레이션을 이용하여 비교 분석하였다. 우선, 시뮬레이션을 위하여 실제 저자들이 제작 중인 SUBO-2을 SDF형식으로 시뮬레이션에 구현하였고, 프리뷰 제어를 통해 안정한 보행이 가능한 질량중심 궤적을 도출하였다. 질량중심-역기구학과 지지/스윙상태에 따른 weighting factor의 적용하였고, 작업공간 CTC을 이용하여 보행 모션제어를 수행하였다. 특히, 다리의 지지/스윙상태에 따라 동역학 모델을 스위칭 함으로써, 지지다리와 스윙다리의 모션제어 이득을 최소화될 수 있도록 구현하였다. 따라서, 발이 불규칙한 지면에 착지할 때 유연성을 유지하여 20 mm 두께의 지면 장애물을 밟고 제자리 보행 모션을 수행 시 별도의 균형제어 알고리즘 없이 로봇이 넘어지지 않고 제자리 걸음을 반복하여 수행할 수 있음을 확인하였다.^[11]

본 연구로부터 기울기센서나 force/torque센서를 이용한 균형제어 알고리즘 없이 20 mm 이하의 불규칙한 노면을 극복할 수 있는 알고리즘을 제시하였다. 이러한 유연 보행 모션의 이용한 전략은 센서가 없는 저가형 이족 보행 로봇의 안전한 보행 방법을 제시할 수 있고 연산시간을 줄이고, 로봇의 무게를 줄일 수 있다는 장점이 있다. 또한 균형제어 알고리즘을 적용하더라도 이를 보조하여 균형 제어성능을 극대화할 수 있다고 생각한다.

현재 제안된 CTC 모델 스위칭 방법은 Fig. 30, 31과 같이 불규칙 지면에 대해 참조질량중심 궤적을 완벽하게 추종하지 못하고 있으며, 골반중심 좌표계의 롤, 피치 기울기의 표준편차도 평지에서만큼 작지 않은 문제를 갖는 부족한 점이 있다. 따라서 이러한 점을 보완하기 위해 도립 진자 모델을 이용한 몸통균형제어를 사용하여 각 발의 최적 지면 반발력을 도출하고, 추가적으로 외부력이 가해졌을 때, 착지점과 착지 시점을 수정하는 알고리즘을 향후 구현하고자 한다. 최종적으로 보행 알고리즘의 완성도가 높아졌을 때 마찰보상 알고리즘을 적용하여^[12]이를 실제 제작중인 SUBO-2로 적용하여 실험적으로 구현할 계획이다.

후 기

이 연구는 2022년도 정부(산업통상자원부)의 재원으로 한국산

업기술진흥원의 지원을 받아 수행된 연구임(P0008473, 2022년 산업혁신인재성장지원사업). 또한, 산업통상자원부 민군기술협력 사업의 재원으로 민군협력진흥원의 지원을 받아 수행된 연구임(과제번호 : 21-CM-MU-01, 과제명 : 선저 어망제거를 위한 수중 로봇 기술 개발).

References

- [1] Chung, Y. J., 2020, Untact Technology Trends Due to the Diffusion of Covid19 - A study on the Service Robot, J. Korea Contents Assoc., 18:2 18-23.
- [2] Park, I. W., Kim, J. Y., Oh, J. H., 2008, Oline Walking Pattern Generation and Its Application to a Biped Humanoid Robot - KHR-3 (HUBO), Adv. Robot., 22:2-3 159-190, <https://doi.org/10.1163/156855308X292538>.
- [3] Takenaka, T., Matsumoto, T., Yoshiike, T., Hasegawa, T., Shirokura, S., Kaneko, H., Orita, A., 2009, Real Time Motion Generation and Control for Biped Robot -4th Report: Integrated Balance Control-, 2009 IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems, 1601-1608, <https://doi.org/10.1109/IROS.2009.5354522>.
- [4] Raza, F., Zhu, W., Hayashibe, M., 2021, Balance Stability Augmentation for Wheel-Legged Biped Robot Through Arm Acceleration Control, IEEE Access, 9 54022-54031, <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3071055>.
- [5] Min, I. J., Yoo, D. H., Ahn, M. S., Han, J. K., 2020, Body Trajectory Generation Using Quadratic Programming in Bipedal Robots, 20th Int. Conf. on Control, Automation and Systems (ICCAS), 255, <https://doi.org/10.23919/ICCAS50221.2020.9268204>.
- [6] Cho, B. K., Kim, J. Y., 2018, Dynamic Posture Stabilization of a Biped Robot SUBO-1 on Slope-Changing Grounds, Int. J. Precis. Eng. Manuf., 19:7 1003-1009, <https://doi.org/10.1007/s12541-018-0118-8>.
- [7] Joe, H. M., Oh, J. H., 2018, Balance Recovery through Model Predictive Control based on Capture Point Dynamics for Biped Walking Robot, Robot. Auton. Syst., 105 1-10, <https://doi.org/10.1016/j.robot.2018.03.004>.
- [8] Yi, S. J., Hong, D., Lee, D. D., 2013, A Hybrid Walk Controller for Resource-Constrained Humanoid Robots, 13th IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots(Humanoids), 89-93, <https://doi.org/10.1109/HUMANOIDS.2013.7029960>.
- [9] Kajita, S., Kanehiro, F., Kaneko, K., Fujiwara, K., Harada, K.,

- Yokoi, K., Hirukawa, H., 2003, Biped Walking Pattern Generation by using Preview Control of Zero-Moment Point, 2003 IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, 1620-1626, <https://doi.org/10.1109/ROBOT.2003.1241826>.
- [10] Martin, F., 2011, viewed 12 Jun 2021, RBDL Reference, RBDL GitHub, <<https://rbdل.github.io/>>, <<https://github.com/rbdل/rbdل>>.
- [11] Yeo, M. H., Kim, J. Y., 2022, viewed 7 February 2022, Effective Ground Adaptive Walking Strategy of Biped Robot Using CoM-IK and Model Switching CTC, <<https://youtu.be/CvmbwskjqM4>>.
- [12] Cho, S. H., Kim, J. Y., 2020, Rotational Friction Compensation Algorithm of Articulated Robot, 2020, Proc. Korean Soc. Manuf. Technol. Eng. Autumn Conf., 157-157.



Myung-Hun Yeo

M.Sc candidate in the Department of Mechanical Design and Robot Engineering, Seoul National University of Science & Technology.

His research interests include mechanical design, dynamics control, dynamics simulation of lagged robots.

E-mail: mhyeo22@naver.com



Jung-Yup Kim

Professor in the Department of Mechanical System Design Engineering, Seoul National University of Science & Technology.

His research interests are lagged robot, assistive and rehabilitation robots.

E-mail: jyk76@seoultech.ac.kr