

# 위상평면을 이용한 유압식 이족 휴머노이드 로봇의 보행제어

## Walking Control Using Phase Plane of a Hydraulic Biped Humanoid Robot

최 동 일, 김 정 훈, 김 정 업\*  
(Dongil Choi<sup>1</sup>, Jung-Hoon Kim<sup>2</sup>, and Jung-Yup Kim<sup>3</sup>)

<sup>1</sup>KAIST

<sup>2</sup>Yonsei University

<sup>3</sup>Seoul National University of Science and Technology

**Abstract:** This paper proposes a novel control method using phase plane for a hydraulic biped humanoid robot. In biped walking control, it is much more difficult to control the posture of a biped robot in the coronal plane because the supporting area formed by the both feet in the coronal plane is much narrower than that of the sagittal plane. When the biped robot walks stably, the phase portrait of the pelvis in the coronal plane makes an elliptical shape. From this point of view, we develop an ankle torque controller and a foot placement controller for tracking the desired phase portrait during walking. We design these controllers by using simulations of a simplified compass gait biped model to regulate the desired phase portrait of pelvis. The effectiveness of the proposed control method is proved through full-body dynamic walking simulations and real experiments of the SARCOS hydraulic biped humanoid.

**Keywords:** biped walking control, hydraulic humanoid, phase plane

### 1. 서론

지금까지 대부분의 휴머노이드 로봇들은 전기 모터와 높은 감속비의 기어를 사용하여 관절을 구동하고 있다[1-3]. 이러한 전기식 휴머노이드 로봇은 일반적으로 PWM (Pulse Width Modulation) 신호와 엔코더 피드백을 이용하여 정확한 관절위치제어를 수행하며, ZMP (Zero Moment Point)를 제어함으로써 균형을 유지한다. 이전 연구에서 저자들은 전기식 휴머노이드 로봇 휴보(HUBO)에 사용해왔던 관절위치제어 및 ZMP 기반의 이족 보행 알고리즘[1]을 본 연구의 로봇 플랫폼인 사코스(SARCOS) 유압식 이족 휴머노이드 로봇에 적용하여 실험을 수행하였다[4] (그림 1). 결과적으로, 유압 구동기는 감속기 부재에 따른 외란에 대한 고민감성과 유체의 비선형성에 따른 제어의 어려움 등으로부터 모터/감속기 조합에 비해 관절위치제어 성능이 상대적으로 낮아 보행 성능이 전기식 휴머노이드 휴보에 비해 뒤떨어졌다. 그러나 유압 구동기는 감속기가 필요없으며, 피스톤 로드에서 쉽게 로드셀을 부착할 수 있기 때문에, 토크 피드백을 이용한 정확한 관절 토크 제어가 모터/감속기 조합의 구동기에 비해 훨씬 용이한 장점이 있다.

본 연구에서는 기존의 ZMP 제어 방식과 다르게 접근하고자 관절위치제어와 관절토크제어를 융합하여 ZMP 제어 대신에 발목 토크 제어를 추가하여 사코스 유압식 이족 휴머노이드에 적용하였으며, 더 나아가 외란에 대비한 발디딤 위치 제어기 또한 추가 적용하여 새로운 보행 알고리즘을 구성

하였다. 발목 토크 제어를 설계하기 위해 컴퍼스 이족 보행 모델 (그림 2)을 이용하여 시뮬레이션을 하였다. 컴퍼스 이족 보행 모델은 주로 수동보행(passive walking)에 관한 연구를 할 때 사용되어왔다[5]. Spong [6]과 Goswami [7] 등은 컴퍼스 이족 보행 모델을 이용하여 수동보행에 대해 연구하였고 이는 주로 시상면(sagittal plane) 상의 운동에 국한되어 있었다. Morimoto 등은 결합된 위상 발진 모델(coupled phase oscillator)을 이용하여 관상면상(coronal plane)에서의 보행 패턴을 정현 곡선 형태로 생성하는 연구를 하였다[8,9]. 위상 발진 모델에서는 발바닥의 압력 중심점(CoP: Center of Pressure)의 위치와 속도를 피드백 변수로 사용하였다.

저자들은 Hemami [10-12] 등의 연구에 기초하여 균형제어에 더욱 중요하고 어려운 관상면에서의 보행에 대해 초점을 맞추었다. 사람이 보행할 때 골반의 움직임은 좌우로 주기적으로 움직이는 형태를 취하므로 측 방향 골반의 위치와 속도

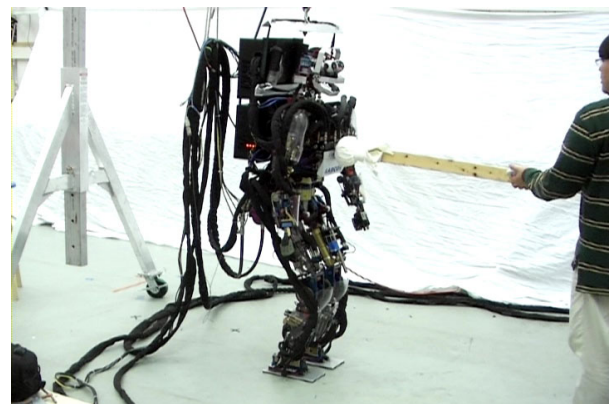


그림 1. 사코스 유압식 이족 휴머노이드 로봇.  
Fig. 1. A photograph of the SARCOS hydraulic biped humanoid.

\* 책임저자(Corresponding Author)

논문접수: 2010. 7. 5., 수정: 2010. 10. 6., 채택확정: 2011. 1. 24.

최동일: 한국과학기술원 기계공학과(garland@kaist.ac.kr)

김정훈: 연세대학교 토목환경공학과(junghoon@yonsei.ac.kr)

김정업: 국립서울과학기술대학교 기계설계자동화공학부

(jyk76@seoultech.ac.kr)

를 정현 곡선을 이용하여 타원형태의 참조 위상 묘사(phase portrait)를 설계하였다. 이러한 골반의 측 방향 위치와 속도를 피드백 변수로 사용하여 참조 위상 묘사를 추종하는 발목 토크 제어기를 설계한 후, 컴퍼스 이족 보행 시뮬레이션에 적용하여 결과로부터 얻은 골반의 위상 묘사와 참조 위상 묘사의 차이를 분석하였다. 이러한 분석을 기반으로 표로 구성된 개선된 참조 위상 묘사를 최종적으로 얻어내었다.

한편으로 발바닥이 지면에 고정되어 있지 않고 그 폭이 이미 정해져 있으므로, 발목에서 제어 가능한 토크는 제한적이다. 즉, 로봇에 외란이 가해졌을 경우 발목의 토크 제어만으로는 균형 제어의 한계가 있을 수 있다. 이 문제를 해결하기 위하여, 발디딤 위치 제어를 제안하였고, 외란이 가해져도 발 디딤 위치를 변경하여 골반의 위치와 속도가 설계된 참조 위상 묘사를 안정적으로 추종하도록 하였다.

저자들은 이전 연구에서 위에 제시된 알고리즘을 사코스 로봇에 이미 실험적으로 적용한 바 있다[13]. 그러나 실험 당시 외란을 정량적으로 가하는 것이 불가능하였고, 각각의 제어기 유무에 따른 성능 추이를 확인할 수 없었기 때문에 연구 결과의 설득력이 다소 불충분하였다. 따라서 본 논문에서는 이전 연구 결과에 사코스 로봇의 전신 동역학 시뮬레이션을 추가함으로써 제어기 각각의 성능을 객관적으로 평가하였고, 알고리즘의 성능을 종합적으로 검증하였다.

**II. 컴퍼스 이족 보행 모델**

관상면상의 이족 휴머노이드 로봇을 그림 2에 도시된 컴퍼스 이족 보행 모델을 이용하여 단순화 하였다.  $M$ 은 상체의 등가 질점이고  $m$ 은 다리의 질량이며 질량 중심은 다리의 중간 지점에 위치한다. 다리의 질량 관성 모멘트는  $I$ 이며 길이는  $l$ 이다. 지면과 접촉하고 있는 다리를 지지다리라고 하며 그 반대쪽은 스윙다리라고 지칭한다.  $\theta_1$ 은 수직축에서 지지다리에 이루는 각이며  $\theta_2$ 는 지지다리에서 스윙다리로 이루어진 각도이다.  $\tau_1$ 는 지지다리에 작용하는 발목토크이며,  $\tau_2$ 는 스윙다리에 작용하는 골반토크이다.  $x_{pel}$ 은 기준점  $O$ 로부터 상체의 등가 질점까지의 변위를 나타낸다. 여기서 기준점  $O$ 는 두 발 끝의 수평방향 중심점으로 설정하였기 때문에 스윙다리의 움직임에 따라 동적으로 변할 수 있다고 가정하였다. 지지다리와 스윙다리의 변환은 스윙다리가 지면에 닿는 순간

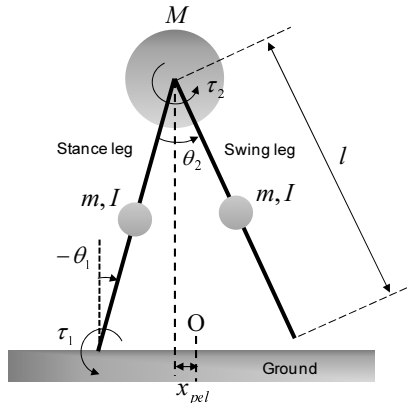


그림 2. 관상면상의 컴퍼스 이족 보행 모델.  
Fig. 2. A compass gait biped model in the coronal plane.

일어나며 두 다리의 전후 각속도는 각운동량 보존 법칙에 따라 계산된다. 지면은 비탄성적이며 무한대의 마찰력을 가진 것으로 가정하여 지지다리의 미끄러짐을 배제하였다.

**1. 운동 방정식**

컴퍼스 이족 보행 모델의 운동방정식은 다음과 같다.

$$\mathbf{M}(\theta) \cdot \ddot{\theta} + \mathbf{V}(\theta, \dot{\theta}) \cdot \dot{\theta} + \mathbf{G}(\theta) = \boldsymbol{\tau} \tag{1}$$

$$\mathbf{M}(\theta) = \begin{bmatrix} 2I + \frac{3}{2}ml^2 + Ml^2 - ml^2 \cos(\theta_2) & I + \frac{1}{4}ml^2 - \frac{1}{2}ml^2 \cos(\theta_2) \\ I + \frac{1}{4}ml^2 - \frac{1}{2}ml^2 \cos(\theta_2) & I + \frac{1}{4}ml^2 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{V}(\theta, \dot{\theta}) = \begin{bmatrix} ml^2 \sin(\theta_2) \cdot \dot{\theta}_2 & \frac{1}{2}ml^2 \sin(\theta_2) \cdot \dot{\theta}_2 \\ -\frac{1}{2}ml^2 \sin(\theta_2) \cdot \dot{\theta}_1 & 0 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{G}(\theta) = \begin{bmatrix} -\frac{3}{2}mgl \sin(\theta_1) - Mgl \sin(\theta_1) + \frac{1}{2}mgl \sin(\theta_1 + \theta_2) \\ \frac{1}{2}mgl \sin(\theta_1 + \theta_2) \end{bmatrix}$$

$$\boldsymbol{\theta} = \begin{bmatrix} \theta_1 \\ \theta_2 \end{bmatrix}, \quad \boldsymbol{\tau} = \begin{bmatrix} \tau_1 \\ \tau_2 \end{bmatrix}$$

여기서  $\mathbf{M}(\theta)$ 는 관성 행렬,  $\mathbf{V}(\theta, \dot{\theta})$ 는 원심력 및 코리올리 행렬,  $\mathbf{G}(\theta)$ 는 중력에 의한 토크 벡터,  $\boldsymbol{\tau}$ 는 관절의 토크 벡터,  $\boldsymbol{\theta}$ 는 관절의 각도 벡터이다. 시뮬레이션을 위해 사용된 파라미터들은 실제 사코스 휴머노이드 로봇과 대등하도록 다음과 같이 설정되었다.  $m=12.6 \text{ kg}$ ,  $M=50 \text{ kg}$ ,  $I=0.21 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$ ,  $l=1 \text{ m}$ .

**2. 지면 접촉 모델**

시뮬레이션상에서 지지다리와 스윙다리의 변환은 순간적으로 일어난다. 스윙다리가 지면에 닿는 순간 스윙다리는 지지다리가 되고 지지다리는 스윙다리가 된다. 변환 후의 각 다리의 각속도는 각운동량 보존 법칙에 따라 결정된다. 즉, 지지다리가 지면에 닿았을 때, 충돌전의 골반에 대한 지지다리의 각운동량과 지면 접촉점에 대한 전체 시스템의 각운동량은 보존된다. 따라서 다음 관계식으로부터 충돌 후의 관절의 각속도를 구할 수 있다.

$$\mathbf{M}^-(\theta_2) \cdot \dot{\theta}^- = \mathbf{M}^+(\theta_2) \cdot \dot{\theta}^+ \tag{2}$$

$$\boldsymbol{\theta}^- = \begin{bmatrix} \theta_1^- \\ \theta_2^- \end{bmatrix}, \quad \boldsymbol{\theta}^+ = \begin{bmatrix} \theta_1^+ \\ \theta_2^+ \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{M}^-(\theta_2) = \begin{bmatrix} I - \frac{1}{4}ml^2 & 0 \\ 2I + (M+m)l^2 \cos(\theta_2) - \frac{3}{2}ml^2 & I + ml^2 \cos(\theta_2) - \frac{1}{4}ml^2 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{M}^+(\theta_2) = \begin{bmatrix} I - \frac{3}{4}ml^2 & I + \frac{1}{4}ml^2 + \frac{1}{2}ml^2 \cos(\theta_2) \\ 2I + Ml^2 + \frac{1}{2}ml^2 [1 - \cos(\theta_2)] & I + \frac{1}{4}ml^2 \end{bmatrix}$$

여기서  $\mathbf{M}^-(\theta_2)$ ,  $\mathbf{M}^+(\theta_2)$  는 충돌 전후의 각운동량 행렬,  $\dot{\theta}^-$ ,  $\dot{\theta}^+$  는 충돌 전후의 관절의 각속도이다.  $\mathbf{M}^+(\theta_2)$  의 역행렬을 취하면 충돌후의 각 다리의 각속도를 다음의 식을 이용하여 계산할 수 있다.

$$\dot{\theta}^+ = [\mathbf{M}^+(\theta_2)]^{-1} \mathbf{M}^-(\theta_2) \cdot \dot{\theta}^- \quad (3)$$

충돌 후 관절의 각도는 다음 관계에 의해 계산된다.

$$\begin{bmatrix} \theta_1^+ \\ \theta_2^+ \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \theta_1^- + \theta_2^- \\ -\theta_2^- \end{bmatrix} \quad (4)$$

### III. 보행 제어기 설계

#### 1. 자유 보행 시뮬레이션

우선, 컴퍼스 이족 보행 모델의 자유 보행 시뮬레이션으로부터 보행 시 관상면상에서 골반의 위상 묘사를 도시하고자 한다. 스윙다리의 초기 각도,  $\theta_2$ 는 0.25rad으로 설정하였는데, 이 값은 두 발 사이의 간격이 약 0.2m가 되도록 하기 위함이며, 이는 사코스 휴머노이드 로봇의 양 발 사이의 간격과 비슷하다. 지지다리의 초기 각도,  $\theta_1$ 는 0rad으로 설정하였고, 지지 발목 토크,  $\tau_1$ 은 작용하지 않으며, 골반토크  $\tau_2$ 만 스윙다리의 초기 각도 0.25rad를 유지시키기 위해 PD 서보제어기로부터 작용한다. 시뮬레이션 결과로써, 50회의 스텝에 대한 골반의 위상묘사를 그림 3에 나타내었다. 여기서  $TD_R$ 는 오른발 착지,  $TD_L$ 은 왼발 착지, (I, II, III, IV)은 사분면, 위상 각도,  $\phi$ 는 x축으로부터 반 시계방향으로 측정되었다. 발목토크가 작용하지 않으므로 초기 에너지만으로 보행을 하다가 충돌에 의해 에너지가 줄어들면서 위상 묘사가 리미트사이클에 수렴함을 알 수 있다. 최초 보행에 의한 골반의 위치와 속도가 위상 묘사상에서 최댓값을 가지게 되며 이 값을 참조 위상 묘사의 최댓값으로 선정하였다. 따라서 최대 반지름은 0.05m 이고 최대 속도는 0.3m/s이므로 참조 위상 묘사를 타원형으로 가정하여 관계식을 정의하면 다음과 같다.

$$\begin{cases} x_{pel}^{des}(\phi) = r_\phi \cos \phi \\ v_{pel}^{des}(\phi) = r_\phi \cdot \lambda \sin \phi \end{cases} \quad (5)$$

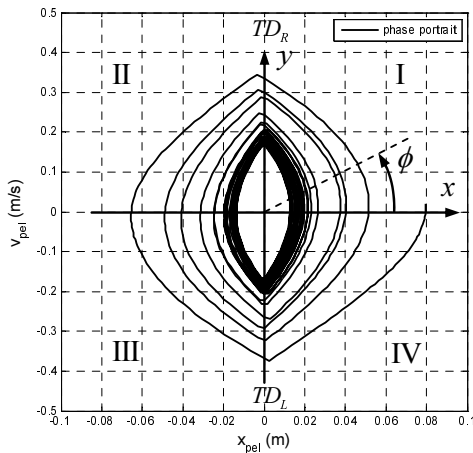


그림 3. 자유 보행 시뮬레이션 (50 스텝).  
Fig. 3. Free walking simulation (50 steps).

$$\phi = \tan^{-1} \left[ \frac{v_{pel}}{\lambda \cdot x_{pel}} \right] \quad (6)$$

여기서  $r_\phi$  (=0.05)는 위상 묘사의 반지름,  $\lambda$  (=0.3/0.05=6)는 위상 묘사에서 위치에 대한 속도의 비율,  $\phi$  는 위상 각도,  $x_{pel}^{des}$  와  $v_{pel}^{des}$  는 골반의 측 방향 참조 위치와 속도,  $x_{pel}$ ,  $v_{pel}$  는 실제 위치와 속도이다.

#### 2. 발목 토크 제어기

앞에서 설정한 참조 위상 묘사를 컴퍼스 이족 보행 모델이 추종하며 보행하기 위하여 발목 토크 제어기를 다음과 같이 PD 제어방식을 이용하여 설계하였다.

$$\tau_1 = Kp_{atc} (x_{pel} - x_{pel}^{des}) + Kd_{atc} (v_{pel} - v_{pel}^{des}) \quad (7)$$

여기서  $Kp_{atc}$  와  $Kd_{atc}$  는 발목 토크 제어기에서 비례 및 미분 게인값이다. 사코스 유압식 휴머노이드 로봇의 물성치를 반영한 컴퍼스 이족 보행 모델에 대한 두 게인값은 LQR 제어기 설계 기법에 의해 다음과 같이 정해졌다.  $Kp_{atc} = 1741.9$ ,  $Kd_{atc} = 441.3$ . 참조 위상 상태  $(x_{pel}^{des}, v_{pel}^{des})$  는 참조 위상 묘사상에서 현재 상태  $(x_{pel}, v_{pel})$  에서 가장 근접한 상태로 결정되며, 다음과 같은 가중 유클리드 거리 미터법(Weighted Euclidean distance metric)이 사용되었다.

$$d^2 = \lambda^2 (x_{pel} - x_{pel}^{des})^2 + (v_{pel} - v_{pel}^{des})^2 \quad (8)$$

즉, 발목 토크 제어기는 매 순간마다  $d$  값이 최소가 되는 참조 위상 상태,  $(x_{pel}^{des}, v_{pel}^{des})$  를 추종하게 된다. 그림 4는 발목 토크 제어기를 이용하여 50회의 스텝에 대한 컴퍼스 이족 보행의 시뮬레이션 결과를 나타내었다. 그래프에서 볼 수 있듯이, 컴퍼스 이족 보행 모델의 골반 위상 묘사가 참조 위상 묘사를 비교적 잘 추종함을 알 수 있다. 본 시뮬레이션에서

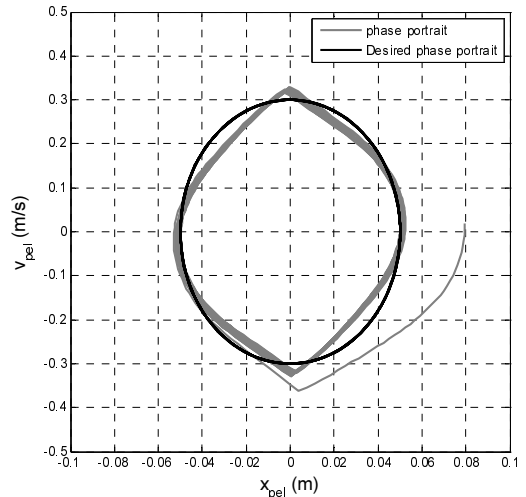


그림 4. 타원형 참조 위상 묘사에 대한 발목토크제어기 사용에 따른 골반의 위상 묘사 시뮬레이션 (50 스텝).  
Fig. 4. Phase portrait simulation of the pelvis using ankle torque controller with respect to the elliptical desired phase portrait (50 steps).

발목 토크의 최대값을 40Nm로 제한하였는데, 이는 사코스 유압식 휴머노이드 로봇의 약 80kg의 중량과 0.1m의 발바닥 너비를 고려하여 최대 40Nm의 발목 토크를 생성할 수 있다고 가정하였기 때문이다.

3. 표로 구성된 새로운 참조 위상 묘사

그림 4에서 골반의 위상 묘사가 참조 위상 묘사를 추종하며 보행을 하였음을 알 수 있었다. 하지만 참조 위상 묘사와 실제 위상 묘사가 완벽히 일치하지는 못하며, 약간의 차이를 보임을 알 수 있었다. 참조 위상 묘사의 속도 함수의 경우 사인 함수를 이용하였으나 실제 골반의 속도가 사인함수 보다 날카로운 형태를 취하고 있기 때문이다. 결과적으로 참조 위상 묘사의 경우 타원형의 형태를 취하나 실제 위상 묘사의 경우 양파처럼 위쪽과 아래쪽이 뾰족한 형태를 취하게 된다. 이러한 차이는 발목 토크 제어기에 불필요한 제어 입력을 만들어 에너지 소모가 크게 된다. 이것을 최소화하기 위하여 그림 4의 50회 스텝에 대한 위상 묘사의 평균값을 취하고 이

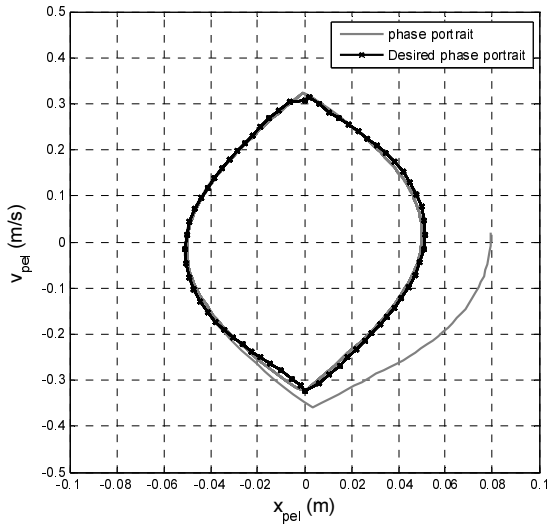


그림 5. 표로 구성된 참조 위상 묘사에 대한 발목토크제어기에 따른 골반의 위상 묘사 시뮬레이션 (25 스텝).

Fig. 5. Phase portrait simulation of the pelvis using ankle torque controller with respect to tabularized desired phase portrait (25 steps).

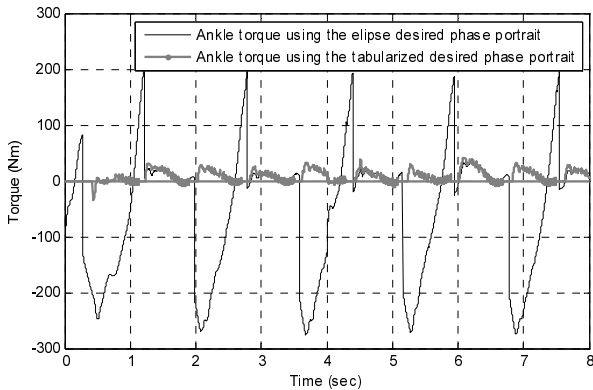


그림 6. 타원형 및 표로 구성된 참조위상에 따른 발목토크. Fig. 6. Ankle torque comparison between elliptic desired phase portrait and tabularized desired phase portrait.

를 표로 만들어 새로운 참조 위상 묘사를 설계하였다. 이렇게 표로 구성된 참조 위상 묘사를 이용하여 25회 스텝에 대한 시뮬레이션을 실행한 결과를 그림 5에 도시하였다. 표로 구성된 참조 위상 묘사의 경우 'x'로 표시하였으며, 골반의 위상 묘사가 참조 위상 묘사를 매우 잘 추종하는 것을 알 수 있다. 참고로, 그림 6은 표로 구성된 참조 위상 묘사가 훨씬 적은 발목 토크 제어를 만들어주는 것을 보여준다.

4. 발디딤 위치 제어기

앞에서 발목 토크 제어기를 이용하여 컴퍼스 이족 보행 모델의 안정한 보행이 가능하도록 하였다. 하지만 실제 휴머노이드 로봇에서는 많은 외란들이 존재하기 때문에, 발목 토크를 이용하여 감당할 수 있는 외란에는 한계가 있다. 예를 들어, 수평방향으로 50N의 외란이 0.5초 동안 골반에 작용할 경우 발목 토크 만을 이용하여 자세 제어를 해본 결과, 컴퍼스 이족 보행 모델은 안정된 자세를 유지하지 못하고 발산하였다. 안정된 걸음을 위하여 보다 강인한 제어 알고리즘이 필요하다. 사람이 걸음을 걸을 때 쓰러지지 않기 위한 가장 적극적인 방법은 발디딤이다. 한번 균형이 무너졌을 경우 발디딤을 새로 하지 않고는 균형을 유지시키기 어렵다. 따라서 본 논문에서는 균형이 무너지지 않고 외란에 대해서도 안정적으로 걸음을 유지하기 위한 발디딤 위치 제어기를 추가적으로 제안한다. 제어 법칙은 다음과 같다.

$$\theta_2^{des} = \theta_2^* + \Delta\theta_2 \tag{9}$$

$$\Delta\theta_2 = -Kp_{fpc}(x_{pel} - x_{pel}^{des}) - Kd_{fpc}(v_{pel} - v_{pel}^{des}) \tag{10}$$

여기서  $\theta_2^*$  는 스윙다리의 기본각도, 0.25rad,  $\Delta\theta_2$  는 발디딤 제어기에 의해 추가되는 스윙다리의 각도,  $Kp_{fpc}$ ,  $Kd_{fpc}$  는 발디딤 제어기의 위치와 속도에 대한 게인값으로 시뮬레이션을 통해 선정된 게인값은 다음과 같다.  $Kp_{fpc} = -1.3$ ,  $Kd_{fpc} = -0.2$ . 원하는 발디딤 각도  $\theta_2^{des}$  를 만들기 위하여 허리 토크,  $\tau_2$  를 사용한다. 다음식은 허리 토크 제어 법칙을 나타낸다.

$$\tau_2 = Kp_{lqr}(\theta_2 - \theta_2^{des}) + Kd_{lqr}(\dot{\theta}_2 - \dot{\theta}_2^{des}) \tag{11}$$

여기서  $Kp_{lqr}$ ,  $Kd_{lqr}$  은 허리 토크 제어기의 위치와 속도에 대한 게인값으로 LQR 제어기 설계방식에 의해 선정된 게인값은 다음과 같다.  $Kp_{lqr} = 827.9$ ,  $Kd_{lqr} = 74.3$ . 발디딤 위치 제어기의 성능을 검증하기 위해, 발목 토크 제어기와 발디딤 위치 제어기를 동시에 사용하여 50N의 외란이 0.5초 동안 골반에 수평방향으로 작용할 경우의 컴퍼스 이족 보행 시뮬레이션을 다시 수행하였다. 시뮬레이션 결과를 그림 7에 나타내었으며, 외란에 의해 골반의 위상 묘사가 참조 위상묘사에서 일시적으로 벗어나지만 발디딤 제어기의 영향에 의하여 몇 번의 발디딤 이후 안정된 참조 위상 묘사로 수렴함을 알 수 있었다. 참고로, 막대 도형 시뮬레이션을 그림 8에 나타내었다. 발디딤 제어기를 통하여 외란에 대해서 안정된 걸음을 유지하기 위해 스윙다리의 착지점이 계속적으로 변하는 것을 확인 할 수 있다. 특히, 외란이 가해진 시점에서 이족 보행 모델이 왼쪽으로 쓰러지는 것을 방지하기 위하여 발 디딤 위치가 급격히 왼쪽으로 변한 것을 알 수 있다.

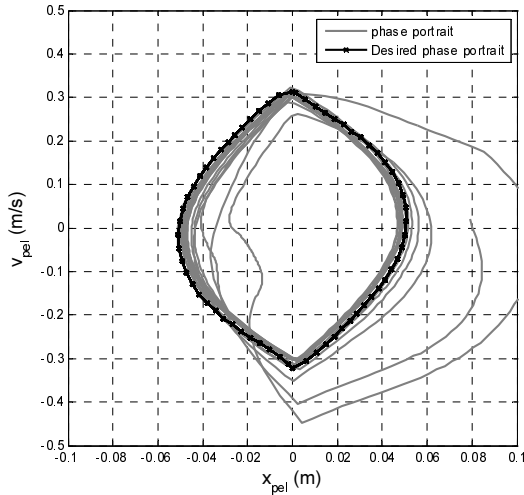


그림 7. 외란 작용시 발디딤제어기와 발목토크제어기에 따른 골반의 위상 묘사 시뮬레이션 (25 스텝).

Fig. 7. Phase portrait simulation of the pelvis using foot placement controller and ankle torque controller with disturbance (25 steps).

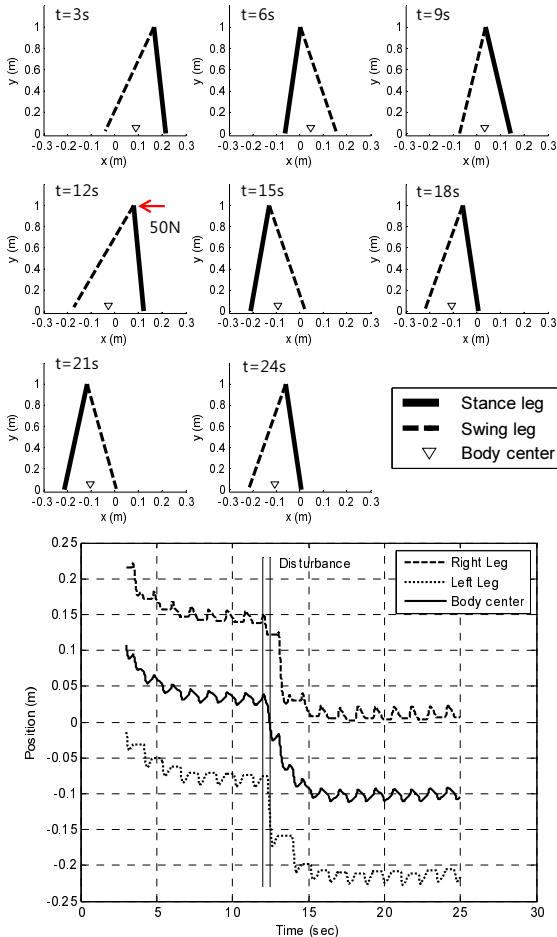


그림 8. 외란 작용시 발디딤제어기와 발목토크제어기에 따른 컴퍼스 이족 보행 모델의 막대 도형 시뮬레이션 (25 스텝).

Fig. 8. Stick figure simulation of the compass gait biped model using foot placement and ankle torque controllers with disturbance (25 steps).

IV. 전신 동역학 시뮬레이션

본 절에서는 제안된 제어기들의 성능을 전신 동역학 시뮬레이션을 통하여 검증해 보았다. 시뮬레이션을 위해 사용된 시뮬레이터는 The SL Simulation and Real-Time Control Software Package [14]가 사용되었고, 모델 파라미터들은 표 1과 같이 실제 사코스 휴머노이드 로봇과 대응하도록 설정되었다. 또한, 시뮬레이션 로봇에 실험적으로 구한 유압 구동기 동역학 방정식이 적용되었다[4].

본 시뮬레이터를 이용하여 평평한 지면에서의 보행 시뮬레이션을 수행하였다. 우선, 발목 토크 제어, 발 디딤 위치 제어 및 ZMP 제어를 모두 사용하지 않은 상태에서의 위상 묘사를 그림 10(a)에 나타내었다. 위상 묘사가 참조 위상 묘사보다 더 반경이 크고 선이 일정치 않으며, 양의 위치 방향으로 전반적으로 치우쳐져 있는 것을 알 수 있다. 이에 비해 그림 10(b)는 발목 제어기를 사용했을 경우의 위상 묘사를 나타낸다. 그림에서 쉽게 알 수 있듯이 위상 묘사가 매우 일정하며, 반경도 참조 위상 묘사와 비슷하게 작아졌다. 그러나 위상 묘사가 여전히 양의 위치 방향으로 치우쳐져 있는 것을 알 수 있다. 다음으로 발목 토크 제어와 발 디딤 제어를 모두 사용하여 위상 묘사를 구해보았다. 그림 10(c)에서 알 수 있듯이 위상 묘사 형태는 그림 10(b)와 거의 같으나 양쪽으

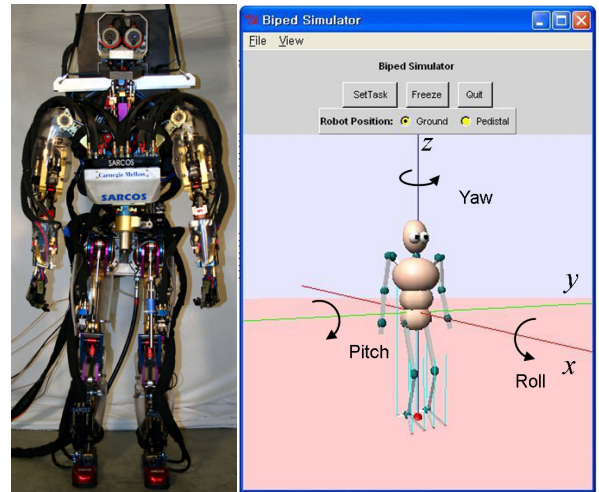


그림 9. 사코스 휴머노이드 로봇 및 시뮬레이터 [14].

Fig. 9. SARCOS humanoid robot and simulator [14].

표 1. 사코스 휴머노이드 로봇의 사양.

Table 1. Specification of the SARCOS humanoid robot.

DOF	Eye	2	Neck	3
	Mouth	1	Shoulder	3
	Elbow	1	Wrist	3
	Hand	6	Waist	3
	Hip	3	Knee	1
	Ankle	3		
Weight	75 kg			
Dimensions (m)				
Upper leg	0.38174	Shoulder to shoulder	0.39145	
Lower leg	0.38075	Upper arm	0.25771	
Foot size	0.3 x 0.1		Lower arm	0.24082
Hip to hip	0.17780		Eye to eye	0.07188
Hip to neck	0.59365		Neck to eye	0.13622

로 균형을 잘 이루고 있다. 이는 상체의 불균형을 보행 시 발 디딤 위치를 수정함으로써 균형있는 위상 묘사를 나타낸 것으로 판단된다. 이러한 발 디딤 제어의 성능을 좀 더 알아보기 위하여 발 디딤 제어를 사용하지 않은 상태에서 0.5초 동안 50 N의 수평 외란을 가하였다. 그 결과 그림 10(d)와 같이 위상 묘사가 발목 토크 제어에도 불구하고 참조 위상 묘사와 차이가 크게 생기는 것을 알 수 있다. 마지막으로, 발목 토크 제어와 발 디딤 제어를 수행하는 도중에 같은 외란을 가하였고 위상 묘사를 그림 10(e)에 도시하였다. 결과는 이전과 다르게 보행 성능이 외란에도 불구하고 지속적으로 잘 유지됨을 알 수 있었다. 이러한 시뮬레이션을 통하여 제안된 제어기들의 효과와 효용성을 검증할 수 있었다.

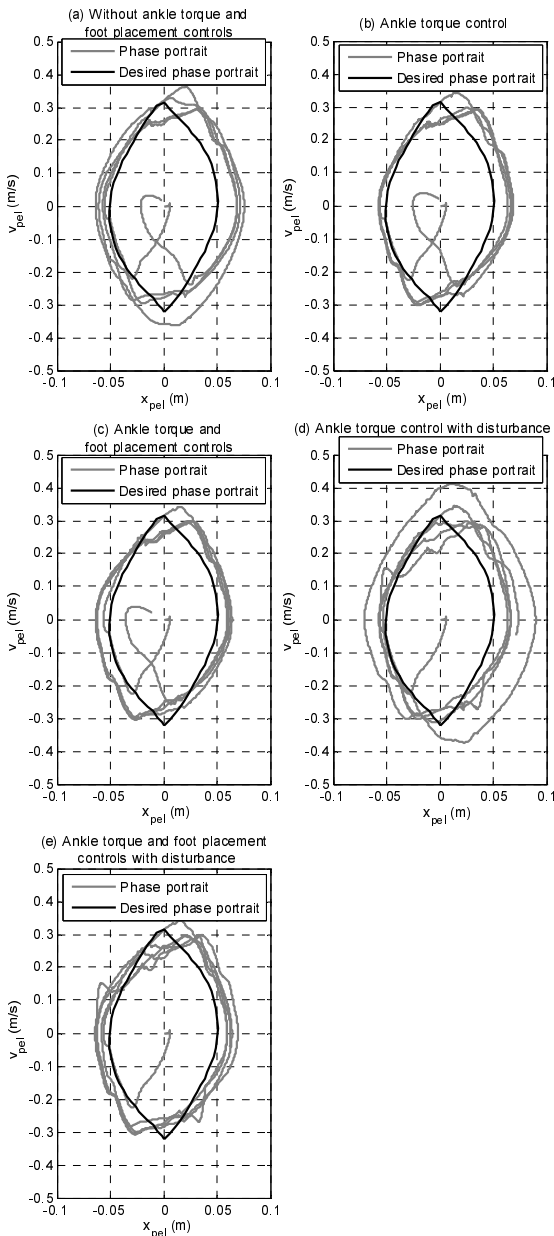


그림 10. 전신 동역학 보행 시뮬레이션에 따른 결과 위상 묘사.

Fig. 10. Resultant phase portraits after full-body dynamic walking simulations.

V. 보행 실험

본 연구의 실험용 로봇은 사코스 유압식 휴머노이드 로봇이다. 사코스 로봇의 키는 1.65m, 무게는 약 75kg이며, 자유도는 53개이다. 무그사(Moog co.)의 유량 제어 서보 밸브가 장착된 선형 유압 구동기가 사용되었으며 최대 3000psi의 유압이 외부 펌프로부터 공급된다. 또한, 각 구동기에는 로드셀이 장착되어 토크 피드백이 가능하다.

저자들에게 의해 개발된 초기 사코스 로봇의 이족 보행 알고리즘은 그림 11과 같다. 본 알고리즘의 핵심은 균형 유지를 위한 ZMP 제어로서 참조 ZMP 궤적을 정확하게 추종하는 것이 매우 중요하다. 또한, 보행 시 착지 충격을 완화하고, 착지 시점과 착지 높이를 조정하는 두 개의 로컬 제어기들이 안정한 보행을 돕는다. 이러한 보행 알고리즘은 정확한 관절 위치 제어를 기반으로 수행되기 때문에, 사코스 로봇에 장착된 다수의 유압 구동기의 정확한 위치제어를 위해 스위칭 제어 전략이 제안되었다[4].

본 논문에서는, 앞서도 언급했듯이, 유압 구동기의 장점을 활용하고자 발목 토크 제어와 외란에 좀 더 강인한 발 디딤 위치 제어가 제안되었다. ZMP 제어가 배제된 새로운 보행 알고리즘을 그림 12에 나타내었으며, 점선 블록이 새로 제안된 블록이다. 골반의 위치와 속도는 관절 각도를 측정함으로써 간접적으로 계산할 수 있으며, 발목 토크 제어기는 관상면상에서 지지 발목의 참조 토크를 계산하며, 로봇 시스템 내부 제어 루프에서 5kHz의 제어 주파수로 토크 제어를 수행한다. 단, 발목 토크 제어기는 한 발 지지 상태의 지지 발목에만 작동을 하며, 이외의 구간이나 스윙발목은 보행 패턴의 각도 궤적을 추종한다. 이외에도, 발 디딤 위치 제어기

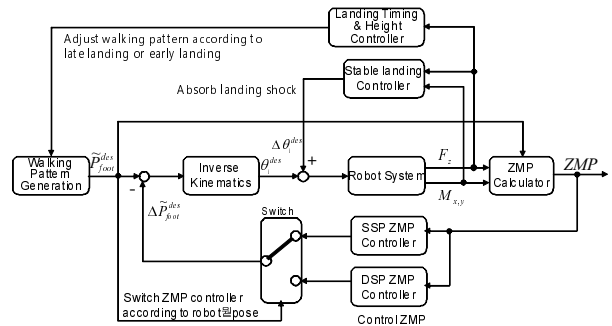


그림 11. 사코스 휴머노이드 로봇의 이전 보행 알고리즘.

Fig. 11. The previous walking algorithm of the SARCOS humanoid.

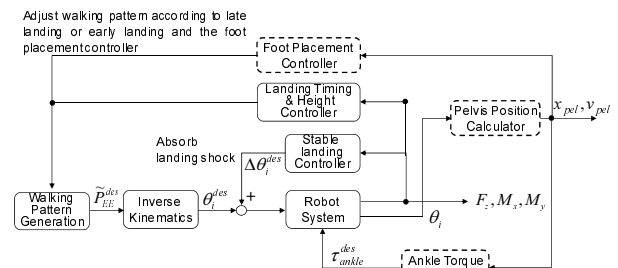


그림 12. 사코스 휴머노이드 로봇의 새로운 보행 알고리즘.

Fig. 12. The new walking algorithm of the SARCOS humanoid.



를 통해 발 디딤 위치를 기본 위치에서 지정된 범위 내에서 변화하도록 하였다.

우선, 이전 보행 알고리즘을 이용한 사코스 휴머노이드 로봇의 실제 보행에 대한 위상 묘사와 컴퍼스 이족 보행 시뮬레이션에서 사용된 참조 위상 묘사를 그림 13에 함께 나타내었다. 그림 13에 나타난 실제 사코스 휴머노이드 로봇의 위상 묘사는 그림 11의 이전 보행 알고리즘을 이용하였으며, 실험으로 얻은 위상묘사와 참조 위상 묘사의 형태가 매우 유사함을 알 수 있다. 특히, 허리 위치의 최댓값이 잘 일치함을 알 수 있다. 본 결과를 통해 시뮬레이션에서 사용된 파라미터들이 잘 결정되었음을 확인할 수 있었다.

다음으로 발목 토크 제어기와 발디딤 위치 제어기를 이용

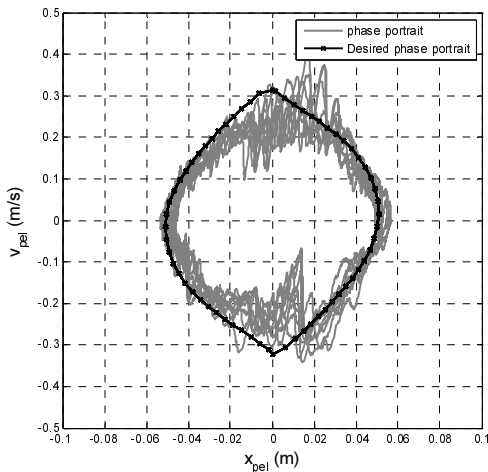


그림 13. 이전 보행 알고리즘을 이용한 사코스 로봇의 보행 실험으로부터의 위상 묘사 및 참조 위상 묘사의 비교.

Fig. 13. Experimental comparison between the phase portrait of the SARCOS humanoid robot using the previous walking algorithm and the desired phase portrait (25 steps).

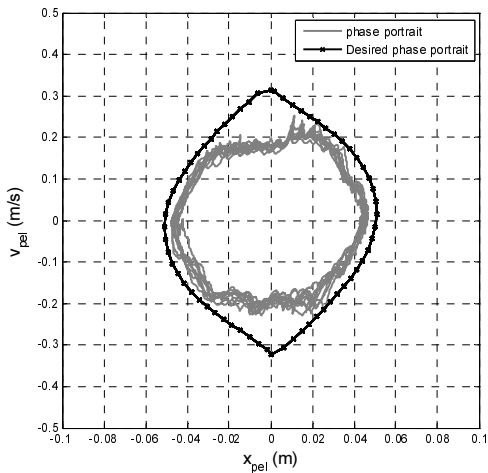


그림 14. 새로운 보행 알고리즘을 이용한 사코스 로봇의 보행 실험으로부터의 위상 묘사 및 참조 위상 묘사의 비교.

Fig. 14. Experimental comparison between the phase portrait of the SARCOS humanoid robot using the new walking algorithm and the desired phase portrait (25 steps).

한 사코스 휴머노이드 로봇의 위상 묘사를 참조 위상 묘사와 함께 그림 14에 나타내었다. 실제 위상 묘사가 참조 위상 묘사에 비해 전체적인 크기가 작아 졌지만 보다 균일하며 노이즈가 훨씬 적음을 알 수 있다. 즉, 실제 로봇이 보행 시 좌우로 반복되는 몸통 이동량과 진동이 이전 보행 알고리즘에 비해 더 적었으며, 이러한 사실은 위상 평면을 이용한 보행 제어의 효용성이 충분하다는 것을 말해준다. 결과적으로, 발목 토크 제어기와 발디딤 위치 제어기를 이용한 실제 휴머노이드 로봇의 위상 묘사 제어가 가능함을 확인 할 수 있었다.

VI. 토론 및 결론

본 논문에서는 위상 묘사를 이용한 발목 토크 제어기와 발디딤 위치 제어기를 제안하였다. 컴퍼스 이족 보행 모델을 이용하여 골반에 대한 표로 구성된 참조 위상 묘사를 설계하였다. 이를 이용한 발목 토크 제어기와 발 디딤 위치 제어기를 전신 동역학 시뮬레이터와 실제 사코스 유압식 휴머노이드 로봇에 적용하여 안정된 균형제어가 가능함을 보였다. 이전의 보행 알고리즘을 이용한 위상 묘사는 그림 13에서 볼 수 있는 바와 같이 그래프의 중간 하단부분(허리의 위치가 0.01m, 속도가 약 -0.2m/s 되는 지점)에서 참조 위상 묘사와 갑작스런 큰 차이점이 있음을 알 수 있다. 본 지점에서 빠른 속도 감소가 존재하는데, 이것은 착지 타이밍 제어기의 영향에 의한 것으로 착지가 예상보다 지연될 경우 걸음 패턴을 일시적으로 정지하는 기능을 한다. 착지 지연은 외부에서 외란이 가해졌을 때나 균형 제어 성능이 낮을 경우 발생한다. 새로운 보행 알고리즘을 사용한 그림 14에서는 발목 토크 제어기의 사용에 의해 발목의 위치 제어 오차가 줄어 착지 타이밍 제어기가 덜 개입하게 되었다. 착지 타이밍 제어기가 덜 개입할수록 보행이 계획대로 잘 수행되고 있다고 할 수 있으며 이로부터 새로운 보행 알고리즘 역시 높은 성능을 보인다고 할 수 있다. 참고로 사코스 로봇의 실험 사진을 그림 15에 나타내었다.

본 연구의 향후 연구로써 세 가지를 제안하고자 한다. 첫째로, 제안된 알고리즘을 전기식 휴머노이드 로봇 휴보2에 적용하여 ZMP 제어 알고리즘과의 혼합으로부터 더욱 안정된 보행 알고리즘을 구축하고자 한다. 둘째로, 위상 묘사 제어를 관상면상뿐만 아니라 시상면상에도 적용하여 시상면과

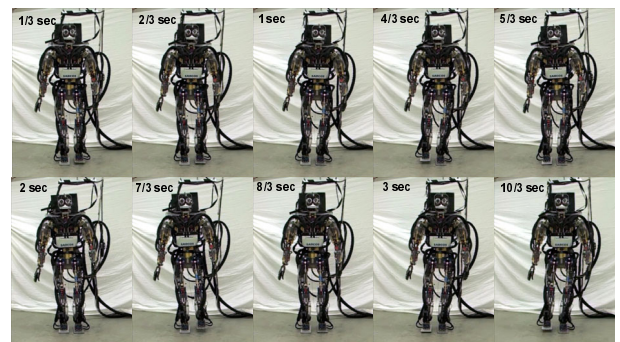


그림 15. 새로운 보행 알고리즘을 이용한 사코스 휴머노이드 로봇의 보행 실험 스냅샷.

Fig. 15. Snapshots of walking experiment of the SARCOS humanoid robot using the new walking algorithm.

관상면상의 위상 묘사 제어를 동시에 수행할 수 있도록 제어 알고리즘을 확장할 계획이다. 마지막으로, 발 디딤 위치 제어는 자칫 징검다리문제와 같이 정확한 발자국 위치가 필요한 상황에서는 단점이 될 수 있다. 따라서 외란에 대해 발 디딤 위치 대신에 몸통이나 팔의 운동을 이용한 균형 제어에 대해서도 향후 연구를 수행할 계획이다.

### 참고문헌

- [1] J. Y. Kim, I. W. Park, J. Lee, M. S. Kim, B. K. Cho, and J. H. Oh, "System design and dynamic walking of humanoid robot KHR-2," *Proc. IEEE-RAS Int. Conf. on Robotics and Automation*, Barcelona, Spain, pp. 1443-1448, 2005.
- [2] Y. Sakagami, R. Watanabe, C. Aoyama, S. Matsunaga, N. Higaki, and K. Fujimura, "The intelligent ASIMO: system overview and integration," *Proc. IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems*, Lausanne, Switzerland, pp. 2478-2483, 2002.
- [3] K. Akachi, K. Kaneko, N. Kanehira, S. Ota, G. Miyamori, M. Hirata, S. Kajita, and F. Kanehiro, "Development of humanoid robot HRP-3P," *Proc. IEEE-RAS Int. Conf. on Humanoid Robotics*, Tsukuba, Japan, pp. 50-55, 2005.
- [4] J. Y. Kim, C. G. Atkeson, J. K. Hodgins, D. C. Bentivegna, and S. J. Cho, "Online gain switching algorithm for joint position control of a hydraulic humanoid robot," *Proc. IEEE-RAS Int. Conf. on Humanoid Robotics*, Pittsburgh, USA, pp. 13-18, 2007.
- [5] T. McGeer, "Passive dynamic walking," *International Journal of Robotics Research*, vol. 9, no. 2, pp. 62-82, 1990.
- [6] M. W. Spong, "Passivity based control of the compass gait biped," *Proc. of IFAC World Congress*, Beijing, China, July 1999.
- [7] A. Goswami, B. Espiau, and A. Keramane, "Limit cycle in a passive compass gait biped and passivity-mimicking control laws," *Autonomous Robotics*, vol. 4, pp. 273-286, 1997.
- [8] J. Morimoto, C. G. Atkeson, G. Endo, and G. Cheng, "Improving humanoid locomotive performance with learnt approximated dynamics via Gaussian processes for regression," *Proc. IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, San Diego, USA, pp. 4234-4240, 2007.
- [9] J. Morimoto, G. Endo, J. Nakanishi, S. Hyon, G. Cheng, D. Bentivegna, and C. G. Atkeson, "Modulation of simple sinusoidal patterns by a coupled oscillator model for biped walking," *Proc. IEEE-RAS Int. Conf. on Robotics and Automation*, Orlando, Florida, pp. 1579-1584, 2006.
- [10] H. Hemami and B. F. Wyman, "Modeling and control of constrained dynamic systems with application to biped locomotion in the frontal plane," *IEEE Transactions on Automatic Control*, vol. AC-24, no. 4, Aug. 1979.
- [11] R. E. Goddard JR., H. Hemami, and F. C. Weimer, "Biped side step in the frontal Plane," *IEEE Transactions on Automatic Control*, pp. 179-187, vol. AC-28, no. 2, Feb. 1983.
- [12] K. Iqbal, H. Hemami, and S. Simon, "Stability and control of a frontal four-link biped system," *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, vol. 40, no. 10, Oct. 1993.

- [13] D. Choi, C. G. Atkeson, S. J. Cho, and J. Y. Kim, "Phase plane control of humanoid," *Proc. IEEE-RAS Int. Conf. on Humanoid Robotics*, Daejeon, Korea, pp. 145-150, 2008.
- [14] S. Schaal. "The SL simulation and real-time control software package," Technical report, University of Southern California, 2004. URL <http://www-clmc.usc.edu/publications/S/schaal-TRSL.pdf>



### 최 동 일

2005년 KAIST 기계공학과(공학사). 2007년 KAIST 기계공학과(공학석사). 이룬 자기 균형 이동차, 휴보웨이 (HUBOWAY) 개발. 2008년 미국 카네기 멜론 대학교 로봇 연구소 방문 연구, 유압식 휴머노이드 로봇 제어. 2007년~현재 KAIST 휴머노이드로봇 연구센터(HUBO Lab) 박사과정. 관심 분야는 이룬 자기 균형 모바일 로봇의 설계 및 제작, 사륜 고속 모바일 로봇의 동역학 운동 제어. 이족 휴머노이드 로봇의 균형 제어.



### 김 정 훈

1997년 연세대학교 기계설계학과(공학사). 1999년 KAIST 기계공학과(공학석사). 2004년 KAIST 기계공학과(공학박사). KAIST 후보시리즈(KHR-1, KHR-2) 개발. 2004년 미국 U.C. Berkeley의 Human Engineering and Robotics Lab에서 Post doctoral Researcher, 착용형 근력증강로봇 BLEEX 개발에 참여. 2005년~2006년 삼성전자 메카트로닉스센터 책임연구원. KIST와 공동으로 마루II, 아라II 휴머노이드 로봇 개발 참여. 2006년~2008년 명지대학교 기계공학과 조교수. 2008년~현재 연세대학교 토목환경공학과 조교수. 관심 분야는 착용형 외골격 로봇 및 휴머노이드 로봇 설계 및 제어, 건설 로봇 및 자동화.



### 김 정 업

1999년 인하대학교 기계공학과(공학사). 2001년 인하대학교 기계공학과(공학석사). 2006년 KAIST 기계공학과(공학박사). KAIST 후보시리즈(KHR-2, HUBO, Albert HUBO, HUBO FX-1) 개발. 2006년 KAIST 휴머노이드로봇 연구센터(HUBO Lab) 포스트닥터. 2007년 미국 카네기 멜론 대학교 로봇 연구소 포스트 닥터. 유압식 휴머노이드 로봇 제어. 2008년~현재 국립서울과학기술대학교 기계설계자동화 공학부 조교수. 관심 분야는 휴머노이드 로봇의 설계 및 제작, 다관절 로봇의 동역학 운동 제어, 센서 퓨전, 영상 처리, 인간 모션 캡처 기술.