

# 유압식 이족 휴머노이드 로봇의 경사면 보행 연구

## Biped Walking of Hydraulic Humanoid Robot on Inclined Floors

김 정 업\*  
(Jung-Yup Kim<sup>1</sup>)

<sup>1</sup>Seoul National University of Science and Technology

**Abstract:** This paper describes a biped walking algorithm for a hydraulic humanoid robot on inclined floors. To realize stable and robust biped walking, the walking algorithm was divided into five control strategies. The first is a joint position control strategy. This strategy is for tracking desired joint position trajectories with a gain switching. The second is a multi-model based ZMP (Zero Moment Point) control strategy for dynamic balance. The third is a walking pattern flow control strategy for smooth transition from step to step. The fourth is an ankle compliance control, which increases the dynamic stability at the moment of floor contact. The last is an upright pose control strategy for robust walking on an inclined floor. All strategies are based on simple pendulum models and include practical sensory feedback in order to implement the strategies on a physical robot. Finally, the performance of the control strategies are evaluated and verified through dynamic simulations of a hydraulic humanoid on level and inclined floors.

**Keywords:** hydraulic humanoid robot, biped walking, inclined floor, ZMP

### I. 서론

인간은 이족 보행을 구현하기 위해서 여러 다른 종류의 전략을 활용한다고 저자는 믿고 있다. 기본적으로 인간의 뇌는 오랫동안 학습된 기준 보행 패턴을 저장하고 있으며 이를 수행하기 위해 적절한 기준 신호를 근육에 전달시킨다. 이러한 기준 신호들은 다양한 전략을 통해 어떠한 환경에서도 넘어 지지 않도록 정밀하고 빠르게 수정되며, 이러한 메커니즘은 자신도 모르게 항상 백그라운드 상태에서 수행된다.

인간의 보행을 자세히 관찰해보면[1] 우선, 인간은 일정하지 않은 바닥의 굴곡에 적응하거나 착지 시 충격을 흡수하기 위하여 발목 및 무릎 관절의 동작을 매 착지마다 수정한다. 그리고 동적 균형을 유지하기 위하여 몸통, 팔 및 발목 동작을 계속적으로 수정한다. 이러한 작업은 주로 발바닥의 지면 반발력과 정전기판의 신호를 기반으로 한 피드백(feedback) 제어 형태로 이루어진다. 더 나아가 바닥 환경을 미리 예측하기 위하여 좌우 눈을 센서로 사용하며 이에 따라 기준 보행 걸음새를 미리 수정하며, 이러한 작업은 일종의 피드포워드(feedforward) 제어 형태로 이루어진다.

위와 같은 사실은 인간이 한 가지가 아닌 여러 가지 전략을 사용하여 복합적으로 이족 보행을 수행한다는 것을 잘 보여준다. 이러한 관점에서 우리는 이족 휴머노이드 로봇의 보행 제어로서 다수의 제어 전략을 구축하는 것을 고려할 수 있다. 실제로 안정한 이족 보행의 구현은 매우 높은 수준의 문제이기 때문에, 간단하고 독립적인 제어 전략을 여러 개 사용하는 것이 매우 복잡한 단일 제어 전략을 구축하는 것보다 보행 문제를 해결하는 데 있어서 더욱 효율적일 수 있다. 따라서 본 논문에서는 여러 가지의 보행 제어 전략을 제

안하여 지면 기울기가 변하는 환경에서 안정한 보행을 구현하기 위한 알고리즘을 개발하고자 한다. 특히, 시뮬레이션 로봇 플랫폼으로 사코스 유압식 휴머노이드 로봇(그림 1)을 사용하였으며 자세한 사양과 치수들을 표 1에 나타내었다.

유압 구동기의 가장 큰 장점은 크기 및 중량대비 높은 힘과 감속기 부재에 따른 효과적인 힘 제어성을 들 수 있으며, 단점으로는 높은 역구동성에 의해 외란에 민감하여 다축관절 위치제어가 어렵고 회전 반경에 제한이 있다는 것이다. 지금까지의 휴머노이드 로봇은 대부분 모터구동식 로봇[2-5]이었으나 최근 들어 본 논문의 저자를 포함해서 유압식 휴머노이드 로봇의 연구가 새롭게 수행되고 있다[6-11]. 특히 이러한 연구들 중에서 기울기가 변하는 지면 환경에서의 유압식 이족 휴머노이드의 보행 제어 연구는 알려진 사례가 없다.

본 논문에서는 다섯 가지 복합 제어전략을 제안함으로써

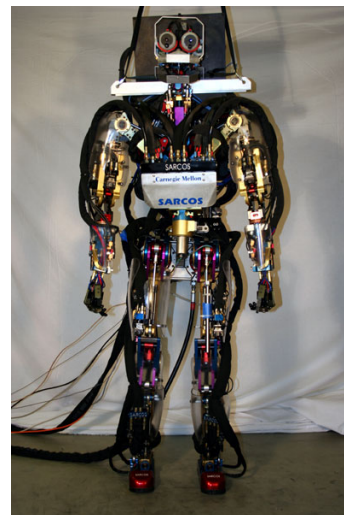


그림 1. 사코스 유압식 휴머노이드 로봇.  
Fig. 1. SARCOS hydraulic humanoid robot.

\* 책임저자(Corresponding Author)

논문접수: 2011. 7. 17., 수정: 2011. 11. 14., 채택확정: 2011. 12. 14.  
김정업: 국립서울과학기술대학교 기계설계 자동화공학부 조교수  
(jyk76@seoultech.ac.kr)

※ 본 연구는 서울과학기술대 교내연구개발비에 의하여 연구되었음.

표 1. 사코스 로봇의 사양 및 치수.

Table 1. Specifications and dimensions of SARCOS robot.

DOF	Eye	2	Neck	3
	Mouth	1	Shoulder	3
	Elbow	1	Wrist	3
	Hand	6	Waist	3
	Hip(roll/pitch/yaw)	3	Knee(pitch)	1
	Ankle(roll/pitch/yaw)	3	Toe	1 (passive)
Weight	91 kg including hydraulic lines			
Sensors	Potentiometers and force sensors at all hydraulic joints, two 6-axis force/torque sensors on the soles of the feet, two IMUs in the head and body, and a stereo camera			
Control rate	1 kHz main control rate, 5 kHz local control rate			
Hydraulic actuator	Max 3000 psi , flow control servo valve			
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	

최근 시도되고 있는 유압식 휴머노이드 로봇의 경사면 환경에서의 보행 알고리즘을 제시하였다. 특히 ZMP 제어를 위해 더블링크 도립 진자를 새롭게 도입하였고, 경사 각도 유추를 관성센서가 아닌 발바닥의 힘/모멘트 센서로 수행하여 논문의 특수성을 강조하였다. 기본적인 관절위치제어전략과 여러 보행제어전략들은 실제 사코스 로봇의 각 관절에 장착된 포텐쇼미터와 로드셀 그리고 힘/모멘트 센서를 기반으로 이뤄지도록 하였으며, 제안된 보행 알고리즘은 실제 로봇의 물리적 데이터와 유압 구동기가 적용된 전신 동역학 시뮬레이터를 통하여 성공적으로 검증되었다.

II. 관절 위치 제어 전략

본 논문에서 제안되는 모든 제어 전략은 관절 위치 제어방식을 기반으로 이루어진다. 즉, 모든 관절은 참조 궤적을 정확히 추종해야 한다. 기존의 모터/감속기 형식의 구동기의 경우, 높은 기어비의 감속기를 가지고 있기 때문에 모터가 외란에 매우 둔감하여 관절 위치 제어가 각도귀환만으로 원활히, 유압식 관절의 경우, 감속기의 부재로부터 외란에 민감하게 반응하기 때문에 정확하고 빠른 위치제어를 수행하기 위해서는 토크귀환을 이용한 상태귀환제어가 필요하다. 또한, 기존의 제어 이득이 일정한 모터/감속기 형식과 달리 지면과의 접촉조건에 따라 이득 스위칭 알고리즘이 필요하다[10]. 이러한 고급관절제어전략은 보행 시 지면 반발력에 강인한 제어가 필요한 하체부에 적용하였으며, 상체부의 경우는 비례미분(PD) 제어를 통하여 관절 위치제어를 수행하였다. 본 절에서는 하체부에 적용되는 관절 위치 제어전략에 대해서 서술하였다.

1. 관절의 선형 상태 공간 방정식

상태귀환제어를 설계하기 위해서는 각 관절의 선형 상태 공간 방정식이 필요하다. 따라서, 실험적으로 얻은 유압 구동기의 운동방정식과 두 가지 종류의 질량 댐퍼 모델을 이용하여 관절의 선형 상태공간 방정식을 수립하였다[12]. 우선, 아래 식은 유압 구동기의 동역학 방정식을 나타낸다.

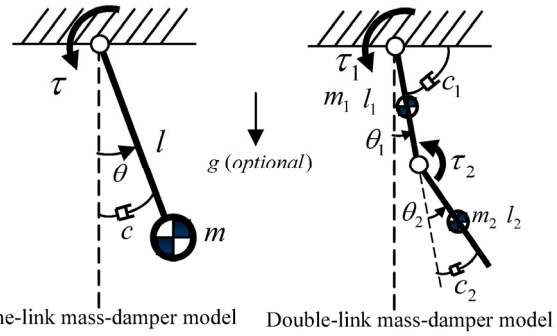


그림 2. 두 가지 형태의 질량-댐퍼 모델.

Fig. 2. Two types of mass-damper models.

$$\dot{t} = a_1\dot{\theta} + a_2\tau + a_3u \tag{1}$$

여기서  $\dot{\theta}$  은 관절의 각속도이고,  $\tau$  은 관절 토크, 그리고  $u$  는 유량 제어식 서보 밸브 명령으로 -32,000 ~ +32,000 범위의 D/A (Digital to Analog) 단위이다. 식 (1)의 첫 번째 항은 피스톤의 선속도에 의한 토크의 변화율을 의미하고, 두 번째 항은 피스톤과 실린더벽 사이의 오일 누유에 의한 토크 변화율을 의미하며, 세 번째 항은 밸브 열림양에 따른 토크 변화율을 나타낸다.

위의 유압 구동기의 동역학 방정식은 아래와 같이 두 종류로 나뉜다.

- 1) 발목 유압 구동기:  $\dot{t} = -3078.9\dot{\theta} - 4.43\tau + 1.44u$
- 2) 나머지 구동기:  $\dot{t} = -4441.3\dot{\theta} - 14.14\tau + 1.97u$  (2)

위 그림 2는 단일 링크 질량-댐퍼 모델과 더블 링크 질량-댐퍼 모델을 나타낸다. 여기서  $l$  은 링크 길이,  $m$  은 질량,  $c$  는 댐핑 계수,  $\tau$  은 관절 토크 그리고  $g$  는 중력가속도이다. 이렇게 제시된 질량-댐퍼 모델의 운동 방정식과 유압 구동기의 운동 방정식을 혼합하여, 사코스 휴머노이드 로봇 하체부의 관절에 대해서 선형 상태 공간 모델을 얻어낼 수 있다. 따라서 더블 링크 질량-댐퍼 모델은 엉덩이 피치/무릎 피치 관절 세트와 엉덩이 요/발목 요 관절 세트에 적용되며, 단일 링크 질량-댐퍼 모델은 나머지 관절에 적용된다. 예를 들면, 엉덩이 피치/무릎 피치 관절 세트의 선형 상태공간 방정식은 아래와 같다.

- 엉덩이 피치/무릎 피치 관절 세트:

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{x}} &= \mathbf{Ax} + \mathbf{Bu}, \\ \mathbf{x} &= [\theta_1, \dot{\theta}_1, \tau_1, \theta_2, \dot{\theta}_2, \tau_2]^T, \quad \mathbf{u} = [u_1, u_2]^T \end{aligned} \tag{3}$$

여기서

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{\partial \ddot{\theta}_1}{\partial \theta_1} & \frac{\partial \ddot{\theta}_1}{\partial \dot{\theta}_1} & \frac{\partial \ddot{\theta}_1}{\partial \tau_1} & \frac{\partial \ddot{\theta}_1}{\partial \theta_2} & \frac{\partial \ddot{\theta}_1}{\partial \dot{\theta}_2} & \frac{\partial \ddot{\theta}_1}{\partial \tau_2} \\ 0 & -4441.3 & -14.14 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ \frac{\partial \ddot{\theta}_2}{\partial \theta_1} & \frac{\partial \ddot{\theta}_2}{\partial \dot{\theta}_1} & \frac{\partial \ddot{\theta}_2}{\partial \tau_1} & \frac{\partial \ddot{\theta}_2}{\partial \theta_2} & \frac{\partial \ddot{\theta}_2}{\partial \dot{\theta}_2} & \frac{\partial \ddot{\theta}_2}{\partial \tau_2} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -4441.3 & -14.14 \end{bmatrix}$$

$$B = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 1.97 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 1.97 \end{bmatrix}$$

• 발목 피치 관절:

$$\dot{x} = Ax + Bu, \quad x = [\theta \ \dot{\theta} \ \tau]^T \quad (4)$$

여기서

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ -\frac{g}{l} & -\frac{c}{ml^2} & \frac{1}{ml^2} \\ 0 & -3078.9 & -4.43 \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1.44 \end{bmatrix}$$

식 (3)에서 상태변수들은 각각의 관절에서 각도, 각속도, 및 토크이며 제어 입력들은 각 관절에 장착된 유압 구동기의 밸브 명령으로 이루어진다. 상태 행렬 **A**의 둘째와 다섯째행들은 더블 링크 질량-댐퍼 모델의 평형점  $\theta = 0$ 에서의 선형화된 강제 운동 방정식  $\ddot{\theta} = M(\theta)^{-1}(\tau - C(\theta, \dot{\theta}) - G(\theta))$ 의 편미분으로부터 얻어지고, 셋째와 여섯째 행은 유압 구동기의 운동 방정식으로부터 얻어진다. 입력 행렬 **B**의 셋째와 여섯째 행 역시 유압 구동기의 운동 방정식으로부터 얻어진다. 식 (4) 역시 식 (3)과 같은 방식으로 유도되었다.

2. 상태 귀환 제어기의 설계

사코스 휴머노이드 로봇의 하체부 관절 위치제어를 위해 다음과 같은 상태 귀환 제어기를 각 관절에 적용하였다.

$$u = -Kx + K_r r \quad (5)$$

여기서 **K**는 상태 귀환 이득이고, **K<sub>r</sub>**는 추종제어를 위한 피드포워드 이득이며, **r**은 참조 명령이다. 상태 귀환 이득에서 위치 이득은 오차에 따른 높은 반응속도를 위한 것이고, 속도 이득은 진동 감쇠를 위한 것이며, 토크 이득은 관절의 유연성을 위한 것이다. 특히, 이러한 상태 귀환 이득은 LQR (Linear Quadratic Regulator)로 부터 설계되었으며, 양 발의 지면 접촉 상태에 따라 세 가지 세트로 분류된다. 참고로, 그림 3은 세 가지 이득 모드를 보여준다. 낮은 이득 모드는 한 발 지지상태에서 스윙 다리의 이득을 나타내고, 높은 이득 모드는 한 발 지지상태에서 지지 다리의 이득을 나타내며, 중간

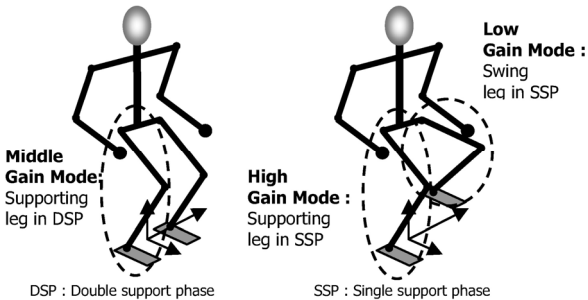


그림 3. 세가지 게인 모드.

Fig. 3. Three gain modes.

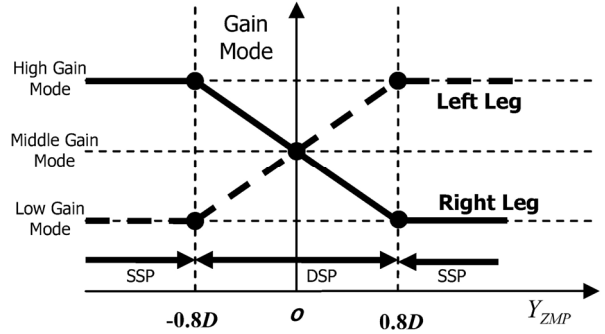


그림 4. 온라인 이득 스위칭 알고리즘의 개략도.

Fig. 4. A schematic of online gain switching algorithm.

이득 모드는 양 발 지지 상태에서 양 다리의 이득을 나타낸다. 이렇게 이득 모드를 나눈 이유는 외란 조건에 상관없이 항상 관절 위치 오차를 최소로 유지하기 위함이다.

3. 온라인 상태 귀환 이득 스위칭 알고리즘

윗 절에서 제시된 세 가지 모드를 부드럽게 스위칭하기 위하여 두 다리간의 동적 하중 분포를 알아내기 위해 지면 반발 분포 하중의 중심 위치인 ZMP [13]를 이용하였다. 자세히 설명하자면, 이득 스위칭 알고리즘의 원리는 ZMP의 위치에 따라 세 가지 이득 모드에서 모드간의 사이 구간을 보간을 이용하여 적절하게 이득을 분배한다. 그림 4는 온라인 이득 스위칭 알고리즘의 개략도를 나타낸다. 여기서 *D*는 ZMP 좌표계의 원점과 발목 관절 사이의 축 방향 거리를 나타낸다. 그림에서 만약 ZMP가 0.8*D* 보다 크면, 동적 하중이 왼발에 치우쳐져 있다는 것이므로 왼발은 높은 이득 모드가 되고, 오른발은 낮은 이득 모드가 된다. 이와 반대로, ZMP가 -0.8*D* 보다 작으면, 왼발은 낮은 이득 모드가 되고, 오른발은 높은 이득 모드가 된다. 만약, ZMP가 정확히 영점 위에 존재한다면, 양 발은 모두 중간 이득 모드가 된다. 그런데 ZMP가 0과 0.8*D* 사이에 있거나 0과 -0.8*D* 사이에 있다면, 부드러운 이득 모드의 스위칭을 위해 각 이득 모드의 이득값들(위치게인, 속도게인 및 토크게인)을 선형적으로 보간하여 양 발의 관절들에 적용한다. 이렇게 0.8*D*를 기준점으로 설정한 이유는 동적 하중이 지지발까지 거리의 약 80%에 진입할 때 높은 이득 모드로 변환하는 것이 매우 좋은 관절 위치 제어 결과를 보여줬기 때문이며, 이득의 보간 시 시스템의 안정성이 꾸준히 유지됨을 시뮬레이션을 통하여 확인하였다. 이러한 이득 스위칭 알고리즘을 통하여 사코스 휴머노이드 로봇은 운동 시 하체부의 상태 귀환 이득들을 부드럽고 효과적으로 변경하고 이로부터 빠르고 정확한 관절 위치 제어가 가능하다.

III. 이족 보행 전략

본 논문에서는 II절에 제시한 관절 위치 제어 전략을 기반으로 하여 그림 5와 같은 이족 보행 전략을 제시한다. 이족 보행은 크게 보행 패턴 생성과 자세 안정화로 구성된다. 보행 패턴 생성은 외부 지면 환경이나 로봇 자체의 동적 특성 및 보행 흐름에 알맞도록 주기적으로 생성되어야 하며, 자세 안정화의 경우 실시간 센서 피드백을 활용하여 로봇의 균형을 항상 유지시켜야 한다. 결국, 보행 패턴 생성은 일종의 피드포워드제어이며, 자세 안정화는 피드백제어라고 할 수 있

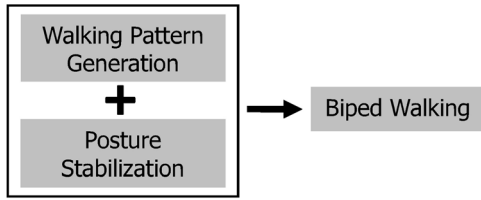


그림 5. 이족 보행 전략.  
Fig. 5. Biped walking strategy.

다. 참고로, 관절 위치 제어 성능이 동일하다면, 유압식 로봇의 이족 보행 전략은 기존의 모터/감속기 형식의 로봇과의 차별성을 가지지 않는다.

1. 기준 전진 보행 패턴

모든 사람들이 제각기 조금씩 다른 걸음새를 가지고 있지만, 기준되는 패턴은 같다고 할 수 있다. 기준 패턴이 같은 이유는 모든 사람은 다리가 두 개이며, 허반신의 관절 개수가 같기 때문이다. 이러한 관점에서 로봇 역시 로봇에 적합한 기준 보행 패턴이 필요하다. 그림 6은 본 연구에서 사용하는 기준 전진 보행 패턴을 보여준다. 본 기준 패턴은 저자의 이전연구[14]에서 이미 개발되었으며, 지면 고정 좌표계에 대한 골반 중심의 측 방향(y) 및 전진 방향(x), 양 발의 수직(z) 방향 및 전진방향(x) 위치 궤적들을 나타낸다. 양 발의 측 방향 위치의 경우 초기 자세의 양 발 너비를 유지하며, 발목의 방향은 기본적으로 지면과 수평하게 유지된다. 그림 6의 자세한 보행 파라미터는 스텝시간은 1초, 스텝길이는 25 cm, 측 방향 골반 스윙 진폭은 7 cm, 한 보행 주기 내 양 발 지지 비율은 10 % 이다. 보행 시 특이점(singularity)을 방지하기 위해 무릎을 굽혀서 상체를 낮추는 양은 4 cm 이다.

2. 복합 모델 기반의 ZMP 제어 전략

보행 시 동적 안정성을 유지하기 위하여 ZMP 제어 전략을 수행한다. ZMP 는 로봇의 발바닥이 지면과 접촉하고 있다고 가정하면 발바닥 압력 중심(CoP: Center of Pressure)과 일

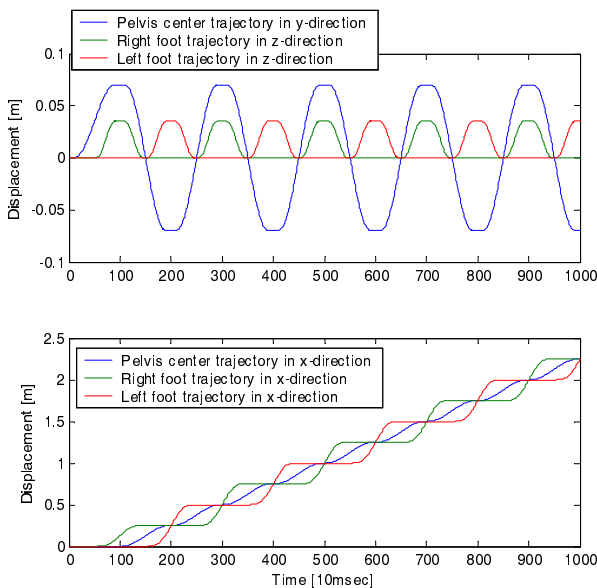


그림 6. 기준 전진 보행 패턴.  
Fig. 6. Standard forward walking pattern.

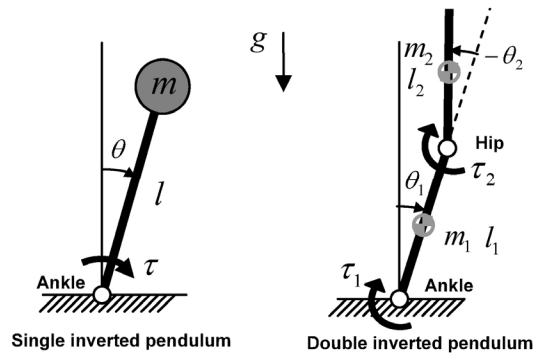


그림 7. 두 가지 단순화된 수학적 모델.  
Fig. 7. Two simplified mathematical models.

치하며 일반적으로 힘모멘트 센서를 발바닥에 장착하여 ZMP 를 계산한다. 본 연구에서는 두 가지 ZMP 제어기를 제안하였다. 첫째는 한 발 지지 ZMP 제어기이며 둘째는 양 발 지지 ZMP 제어기이다. 이러한 제어기들은 그림 7과 같이 로봇을 두 가지의 단순한 수학적 모델로 가정하여 설계되었다. 양 발 지지 ZMP 제어기의 경우 단일링크 도립 진자 모델을 사용하였고, 한 발 지지 제어기의 경우 더블링크 도립 진자 모델을 사용하였다. 일반적으로 휴머노이드 로봇 제어를 위해 단일링크 도립 진자를 이용하는데, 한 발 지지상태에서 더블링크 도립 진자를 특별히 사용하는 이유는 한 발 지지 시 지지 영역이 상대적으로 더 작고 상체의 움직임이 더 커서 자세 안정화 성능을 높이기 위해 복잡한 모델을 사용하게 되었다. 각각의 모델에서 아래와 같은 강체 운동 방정식을 얻을 수 있다.

$$M(\theta)\ddot{\theta} + C(\theta, \dot{\theta})\dot{\theta} + G(\theta) = \tau \tag{6}$$

각각의 관절이 스프링 상수  $K_p$  와 댐핑 계수  $K_d$  를 가지고 있다고 가정하면, 관절 토크  $\tau$  는 아래와 같이 쓸 수 있다.

$$\tau = K_p(\theta_d - \theta) - K_d\dot{\theta} \tag{7}$$

따라서 식 (6)은 아래와 같이 유도된다.

$$M(\theta)\ddot{\theta} + (C(\theta, \dot{\theta}) + K_d)\dot{\theta} + G(\theta) + K_p\theta = K_p\theta_d \tag{8}$$

위의 식에서  $\theta_d$  는 참조 관절 각도로써 이는 단일링크 도립진자의 경우 기울기가 작다고 가정하면 무게 중심의 참조 수평 변위  $u_d$  와 다음과 같은 관계를 갖는다.

$$\theta_d = u_d / l \tag{9}$$

따라서 식 (9)를 식 (8)에 대입하여 입력을 참조 수평 변위로 설정하고 단일링크 도립진자의 동역학 방정식으로부터 선형 상태 공간 방정식을 유도하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \dot{x} &= Ax + Bu_d \\ y = ZMP &= Cx + Du_d \end{aligned} \tag{10}$$

여기서

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ \frac{g}{l} - \frac{K_p}{ml^2} & -\frac{K_d}{ml^2} \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{K_p}{ml^3} \end{bmatrix}, \quad C = \begin{bmatrix} \frac{K_p}{mg} & \frac{K_d}{mg} \end{bmatrix},$$

$$D = -\frac{K_p}{mgl}, \quad \mathbf{x} = [\theta \ \dot{\theta}]^T$$

다음으로 더블링크 도립 진자의 경우, 상위 링크의 수직 자세를 위하여 하위 링크의 참조 관절 각도  $\theta_{1d}$  와 상위 링크 참조 관절 각도  $\theta_{2d}$  는 아래와 같은 관계를 갖는다.

$$\theta_{2d} = -\theta_{1d} \tag{11}$$

또한 엉덩이 관절의 참조 수평 변위를  $u_d$  라고 하면, 하위 링크의 참조 관절 각도와 다음과 같은 관계를 얻는다.

$$\theta_{1d} = u_d / l_1 \tag{12}$$

영점을 기준으로 한 더블링크 도립 진자의 선형 동역학 방정식을 구하고, 식 (11)과 식 (12)을 대입하여 선형 상태 공간 방정식을 구하면 아래와 같다.

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{x}} &= \mathbf{Ax} + \mathbf{Bu}_d \\ \mathbf{y} &= \mathbf{ZMP} = \mathbf{Cx} + \mathbf{Du}_d \end{aligned} \tag{13}$$

여기서

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ \frac{\partial \ddot{\theta}_1}{\partial \theta_1} - K_{p1} \frac{\partial \ddot{\theta}_1}{\partial \tau_1} & \frac{\partial \ddot{\theta}_1}{\partial \dot{\theta}_1} - K_{d1} \frac{\partial \ddot{\theta}_1}{\partial \tau_1} & \frac{\partial \ddot{\theta}_1}{\partial \theta_2} - K_{p2} \frac{\partial \ddot{\theta}_1}{\partial \tau_2} & \frac{\partial \ddot{\theta}_1}{\partial \dot{\theta}_2} - K_{d2} \frac{\partial \ddot{\theta}_1}{\partial \tau_2} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ \frac{\partial \ddot{\theta}_2}{\partial \theta_1} - K_{p1} \frac{\partial \ddot{\theta}_2}{\partial \tau_1} & \frac{\partial \ddot{\theta}_2}{\partial \dot{\theta}_1} - K_{d1} \frac{\partial \ddot{\theta}_2}{\partial \tau_1} & \frac{\partial \ddot{\theta}_2}{\partial \theta_2} - K_{p2} \frac{\partial \ddot{\theta}_2}{\partial \tau_2} & \frac{\partial \ddot{\theta}_2}{\partial \dot{\theta}_2} - K_{d2} \frac{\partial \ddot{\theta}_2}{\partial \tau_2} \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ K_{p1} \frac{\partial \ddot{\theta}_1}{\partial \tau_1} & K_{p2} \frac{\partial \ddot{\theta}_1}{\partial \tau_2} \\ 0 & 0 \\ K_{p1} \frac{\partial \ddot{\theta}_2}{\partial \tau_1} & K_{p2} \frac{\partial \ddot{\theta}_2}{\partial \tau_2} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{C} = \begin{bmatrix} K_{p1} & K_{d1} & 0 & 0 \\ mg & mg & 0 & 0 \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{D} = \begin{bmatrix} -\frac{K_{p1}}{mgl_1} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{x} = [\theta_1 \ \dot{\theta}_1 \ \theta_2 \ \dot{\theta}_2]^T$$

위에서 얻은 선형 상태 공간 방정식을 이용하여 그림 8과 같은 ZMP 제어 블록 선도를 설계하였다. 관측기와 상태 귀환 제어기로 구성된 보상기로부터 ZMP 오차를 보상하기 위한 제어 입력  $u_d$  를 생성시키고 이는 기준 보행 패턴의 골반 수평 궤적  $u_{wp}$  에 추가된다. 이러한 제어 블록 선도는 양 발 지지 상태와 한 발 지지 상태에서 각각 x 축 및 y 축 방향으로 설계되어 총 4개의 제어 블록 선도가 존재하며 보행 주기 내의 지정된 구간에서 작동된다.

3. 보행 패턴 흐름 제어 전략

기준 보행 패턴은 미리 정해진 보행 파라미터들로부터 보

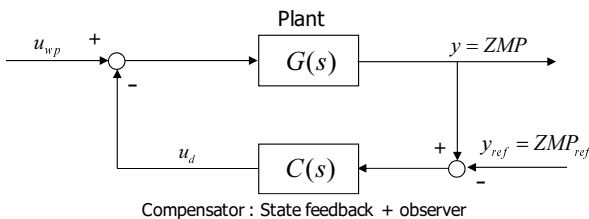


그림 8. ZMP 제어 블록 선도.  
Fig. 8. Block diagram of ZMP control.

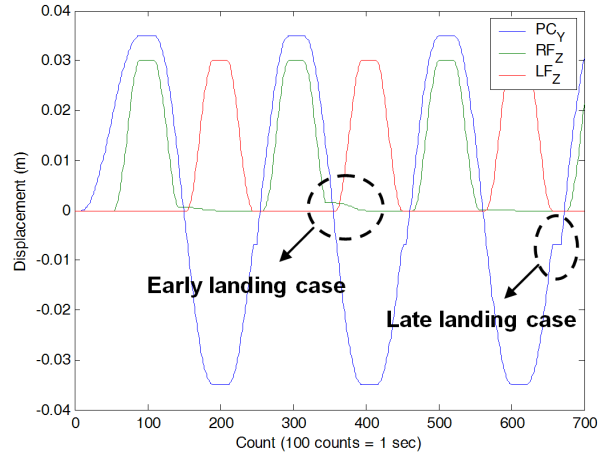


그림 9. 보행 패턴 흐름 제어 전략의 예.  
Fig. 9. An example of the walking pattern flow control strategy.

행 전에 결정된다. 여기서 로봇이 정해진 시간에 맞춰 발 착지가 이뤄지면 문제가 없으나, 일반적으로 발 착지 타이밍이 정해진 시간보다 더 빠르거나 더 느리기 때문에 안정적인 보행을 보장할 수 없다. 본 연구에서는 착지 상태를 이른 착지와 늦은 착지로 구분하였다. 이른 착지는 정해진 시간 이전에 발 착지가 이뤄지는 것을 뜻하며, 늦은 착지는 정해진 시간 이후에 발 착지가 이뤄지는 것을 말한다. 이른 착지는 로봇의 착지 발이 지면을 강하게 밀어내기 때문에 자칫 로봇이 착지 반대 방향으로 넘어질 수 있으며, 늦은 착지는 발 착지 전에 지지 발을 들어올리기 때문에 지지 다리 방향으로 기울게 된다. 결국, 이러한 경우들을 대비하여 실제 인간이 보행시 행하는 두 가지 전략을 다음과 같이 구성하였다.

- 늦은 착지 시: 로봇이 정해진 보행 패턴으로부터 스윙 발의 착지 순간에 만약 10 N 이상의 수직 지면 반발력이 발에 측정되지 않는 경우, 로봇은 10 N 이상의 수직 지면 반발력이 측정될 때까지 보행 패턴 흐름을 정지한다.
- 이른 착지 시: 스윙 발의 착지 이전에 10 N 이상의 수직 지면 반발력이 발에 측정되는 경우, 스윙 발의 수직 방향 운동을 정지하고 다른 방향 운동은 계속 진행한다. 그리고 반대 발을 들어올리는 동안 지지 발의 수직 방향 위치를 원래 계획된 위치로 코사인 함수를 이용하여 부드럽게 수렴시킨다.

참고로 10 N의 기준점은 실제 힘 센서의 잡음 크기와 옵션 등을 고려하여 결정하였으며, 그림 9는 보행 패턴 흐름 제어 전략의 예를 보여준다. 보는 것과 같이, 이른 착지 제어로부터 수직방향 궤적이 잠시 정지했다가 반대 발이 상승하면서 원래 위치로 부드럽게 수렴하는 것을 알 수 있으며, 늦은 착지 제어로부터 보행 패턴 흐름이 잠시 정지되는 것을 볼 수 있다.

4. 발목 유연 제어 전략

본 제어 전략은 컴플라이언스 제어 기반의 가상 스프링 댐퍼 시스템을 이용하여 착지 충격을 줄이기 위한 것이다. 또한, 지면의 형상에 적응할 수 있도록 도와준다. 그림 10은 발목 유연 제어 전략의 개략도를 보여준다.  $\theta_{ankle\ pitch}$  와  $\theta_{ankle\ roll}$  은 미리 지정된 기준 보행 패턴에서의 발목 각도 궤적이며,  $z_1$ 과  $z_2$ 는 임피던스 제어에 의한 보상 각도이다. 이러한 보상

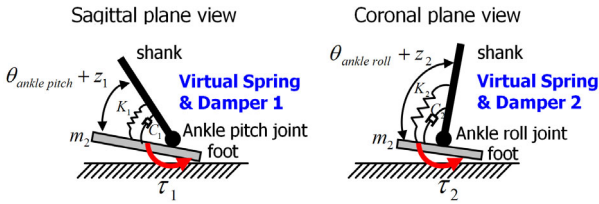


그림 10. 발목 유연 제어 전략의 개략도.  
Fig. 10. A schematic of ankle compliance control strategy.

각도는 아래 식으로부터 계산된다.

$$z(s) = \frac{1}{ms^2 + Cs + K} \tau(s) \quad (14)$$

위 식에서  $m$ 은 발의 질량이고,  $K$ 와  $C$ 는 가상 스프링-댐퍼의 스프링 상수 및 댐핑 계수이다. 이러한 가상 파라미터들은 보상 각도의 피크치가 정상 보행 시 일반 지면에서 약 1도 이하가 되도록 반복적인 시뮬레이션으로부터 결정된다. 자세한 전략은 아래와 같다.

- 착지하는 발에 10 N 이상의 수직 지면 반발력이 검출되면, 가상 스프링-댐퍼 모델이 작동되며, 로봇 체중의 1/3 이상이 착지된 발에 측정되면 작동을 멈춘다. 그리고, 발목에 추가된 보상 각도는 착지 시간 시 계속 일정하게 유지되다가 해당 발을 들어올리는 구간에 코사인 함수를 이용하여 영으로 부드럽게 수렴시킨다.

참고로 체중의 1/3 지점을 기준점으로 설정한 것은 시뮬레이션을 이용한 경험에 의거한 것이다. 이렇게 착지 순간에 짧게 발목 유연 제어를 적용하여 충격을 흡수하고 지면 적용력을 높인 후, ZMP 제어로부터 동적 균형을 유지하는 것이 매우 중요하다.

5. 수직 자세 제어 전략

위에 제시된 제어 전략들은 지면이 완전히 평평하고 기울기가 없다는 것이 미리 가정되었다. 그러나 실제 환경에서는 일반 방바닥의 경우라 해도 약  $\pm 3$ 도 정도의 국부 기울기를 가지고 있고, 일상 생활 환경에서는 약  $\pm 10$ 도 정도의 경사를 흔히 볼 수 있다. 인간의 보행을 관찰해보면, 경사진 지면에서 상체를 항상 수직으로 유지하는 것을 알 수 있다. 이러한 관점에서 본 연구에서는 수직 자세 제어 전략을 제안하였다. 수직 자세 제어는 로봇의 관상면(coronal plane)과 시상면(sagittal plane)에서 독립적으로 적용된다. 그림 11은 이러한 수직 자세 제어의 개략도를 나타낸다. 보는 것과 같이 양 다

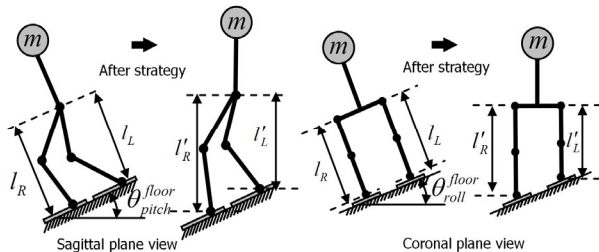


그림 11. 수직 자세 제어 전략의 개략도.  
Fig. 11. Schematic of upright pose control strategy.

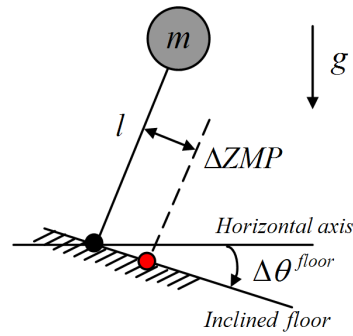


그림 12. 평균 ZMP 를 이용한 바닥 기울기 유추.  
Fig. 12. Estimation of floor inclination using averaged ZMP.

리의 발목 롤, 피치 관절들과 엉덩이부터 발목까지의 거리가 지면 기울기에 따라 반드시 변해야 수직 자세를 유지할 수 있다. 그런데, 기준 보행 패턴의 경우 양 발 지지 시 두 다리의 엉덩이부터 발목까지의 거리가 같고, 발바닥의 방위는 중력 방향에 항상 수직이므로 경사면에서의 안전한 보행을 위해 보상 변위 및 각도가 필요하다.

따라서 본 연구에서는 지면의 기울기를 ZMP 정보로부터 유추하는 간단한 전략을 새롭게 시도하였다. 일반적으로 지면의 기울기를 몸통에 장착된 관성센서로부터 유추할 수 있으나 주로 정지 시에 사용한다. 보행 시에는 지면에서 몸통까지의 거리가 너무 멀고 중간에 유연한 관절들이 많아 흔들림으로부터 큰 오차가 발생하여 사용하기에 부적절하다. 그림 12는 경사면에서의 단일링크 도립 진자를 나타낸다. 만약, 바닥 경사각도  $\theta^{floor}$  가 작다고 가정하면, 도립진자 모델의 정역학 방정식은 아래와 같다.

$$\tau = mgl\theta^{floor} \quad (15)$$

위의 식의 양 변을  $mg$  로 나누고,  $\tau/mg$  를 ZMP 로 대체하면 다음의 식을 얻는다.

$$ZMP = l\theta^{floor} \quad (16)$$

따라서 지면의 기울기는 아래와 같다.

$$\theta^{floor} = \frac{ZMP}{l} \quad (17)$$

또한 같은 원리로 아래와 같이 ZMP 변화량에 대한 기울기 변화량을 알 수 있다.

$$\Delta\theta^{floor} = \frac{\Delta ZMP}{l} \quad (18)$$

위의 식 (18)은 정역학 방정식으로부터 얻었기 때문에 한 스텝 동안 양 발의 중심 위치를 기준점으로 하고 ZMP의 상대 위치를 평균하여  $\Delta ZMP$  를 계산한다. 이러한 방식을 기반으로 아래와 같은 제어 법칙을 제안하였다.

- 발목 각도 보상:

$$\Delta\theta_{ankle}^{k+1} = \Delta\theta_{ankle}^k + \Delta\theta^{k, floor} \quad (19)$$

- 엉덩이와 발목 사이의 거리 보상:

$$\Delta l^{k+1} = d \cdot \tan \Delta\theta^{k, floor} \quad (20)$$

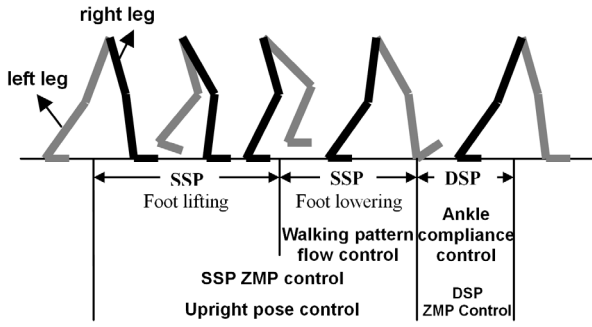


그림 13. 한 스텝 동안의 제어 전략 스케줄.  
Fig. 13. Schedule of the control strategies during a step.

식 (19)에서  $\Delta\theta_{ankle}^k$  는  $k$  번째 스텝에서의 발목 관절 궤적에 추가되는 보상 각도이고,  $\Delta\theta^{k, floor}$  는  $k$  번째 스텝에서 유추된 바닥 경사 변화량이다. 식 (20)에서  $\Delta l^{k+1}$  는 다음 스텝에서의 스윙다리와 지지다리의 엉덩이와 발목 사이의 거리 차이이다.  $d$ 는 양 발목의 수평 거리이다. 이러한 제어 법칙은 관상면과 시상면에서 각각 독립적으로 적용되며, 보상 각도 및 변위는 기준 보행 패턴에 중첩된다.

6. 제어기 스케줄링

지금까지 제시되었던 제어 전략들은 보행 스텝 안의 적절한 구간에서 적용된다. 그림 13은 이러한 제어 전략의 스케줄을 나타낸다. 한 스텝은 한 발 지지상태와 양 발 지지 상태로 나뉘며, 두 상태의 구분은 발바닥의 지면 반발력을 측정하여 로봇 중량의 약 30% 이상의 힘이 착지하는 발에 가해질 경우 양 발 지지 상태의 시작점으로 가정한다. 그림에서 보는 것과 같이 5가지의 전략들이 각각의 구간에서 동시다발적으로 이뤄진다.

IV. 전신 동역학 시뮬레이션

제안된 경사 보행 제어 전략의 성능을 시험하기 위해 전신 동역학 시뮬레이션을 수행하였다. 시뮬레이터로써 The SL Simulation and Real-Time Control Software Package [15]이 사용되었으며, 실제 사코스 로봇의 물성적 수치와 동일한 치수들이 시뮬레이터에 적용되었으며 식 (2)에 나타난 유압구동기의 동역학 방정식이 수치적으로 적용되었다.

1. 수평 바닥에서의 보행

기울기가 없는 수평 바닥에서 0.2 m의 스텝길이를 가진 전진 보행 시뮬레이션을 수행하였다. 우선 그림 14는 보행 시 하체부 관절 위치 제어 전략의 성능을 보여준다. 그림에서 파란색 선은 참조 관절 위치 궤적이고 초록색 선은 실제 관절 위치 궤적을 나타낸다. 참고로, LHR, LHP, LHY, LKP, LAY, LAP, LAR은 각각 왼다리의 엉덩이, 무릎, 발목, 무릎, 발목, 무릎, 발목 요, 피치, 롤 관절을 뜻한다. 모든 관절에서 초록색 선과 파란색 선이 거의 겹쳐있는 것을 알 수 있으며 이는 보행 시 관절 위치 오차가 매우 작다는 것을 의미하는 동시에 게인 스위칭 알고리즘이 적용된 상태 귀환 제어가 원활하게 작동한다는 것을 뜻한다. 참고로 평균 약 0.1도 정도의 추종 오차를 나타내었다. 다음으로 시뮬레이션 결과로써 보행 시 ZMP 궤적을 그림 15에 도시하였다. 보는 바와 같이, ZMP 궤적이 매우 깨끗하고 영점을 기준으로 좌우 대칭적인

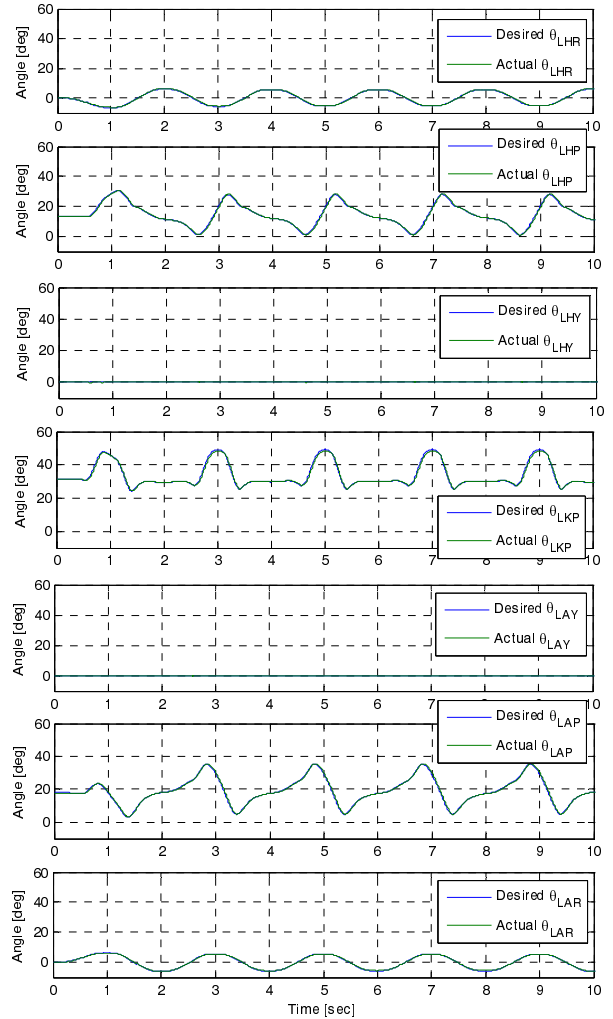


그림 14. 보행 시 왼 다리의 관절 위치 제어 성능(파란색: 참조 관절 위치 궤적, 초록색: 실제 관절 위치 궤적).  
Fig. 14. Joint position control of the left leg (blue lines: reference joint position trajectories, green lines : actual joint position trajectories).

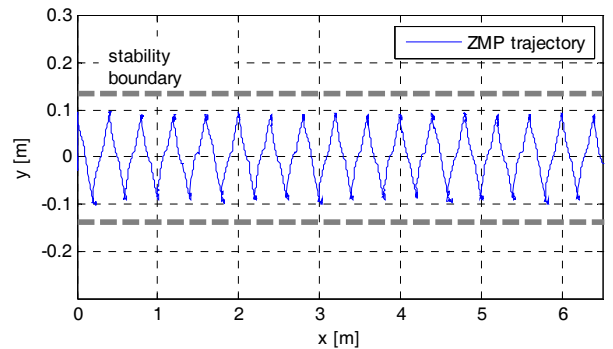


그림 15. 수평 바닥에서의 보행 시 ZMP 궤적.  
Fig. 15. ZMP trajectory on a level floor during walking.

삼각과 형태를 갖고 있다. 골반 중심과 엉덩이 관절 사이의 거리가 0.0889 m 이고, 발바닥의 너비가 0.1 m인 것을 고려할 때, 진폭이 약 0.1 m인 ZMP 궤적은 항상 양 발이 생성하는 안전한 경계 (회색 점선) 내에 존재하며 이는 안정적인

보행을 수행하였음을 보여준다.

2. 경사면 보행

다음으로 기울기가 변하는 경사면에서의 0.2m 의 스텝길 이틀 가진 전진 보행 시뮬레이션을 수행하였다. 바닥의 기울 기는 그림 16과 같이 시상면에서 0도부터 16도까지 2도 간격 으로 점진적으로 변화한다. 시뮬레이션 결과 그림 17은 보행 중의 ZMP 궤적과 지면 기울기에 의한 발목 롤 및 피치 각도 보상량을 보여준다. 그림에서 잘 알 수 있듯이 발목 피치 각 도는 지면의 경사각을 따라 선형적으로 잘 변화하며 정확히 16도까지 변화하는 것을 알 수 있다. 이는 ZMP 를 이용한 경사각도 유추가 비교적 정확하다는 것을 증명한다. ZMP 궤 적 역시 영점을 기준으로 대칭을 이루면서 삼각과 형태를 나 타내며 ZMP 궤적의 진폭도 회색 점선의 안정 범위내에서 변화하여 안정적인 보행을 수행한 것을 알 수 있다. 그런데 ZMP 궤적의 꼭지점에서 이전에 볼 수 없었던 노이즈가 존 재한다. 이는 수직 자세를 위한 발목 각도 보상이 그림 13과 같이 한 발 자세를 시작할 때 계단입력으로 적용되기 때문이 며 이는 지면기울기에 대해서 최대한 빨리 반응하기 위함이다. 즉, 조금이라도 지연되면 보행 안정성이 위협받을 수 있 기 때문에 계단입력 형태로 보상이었다.

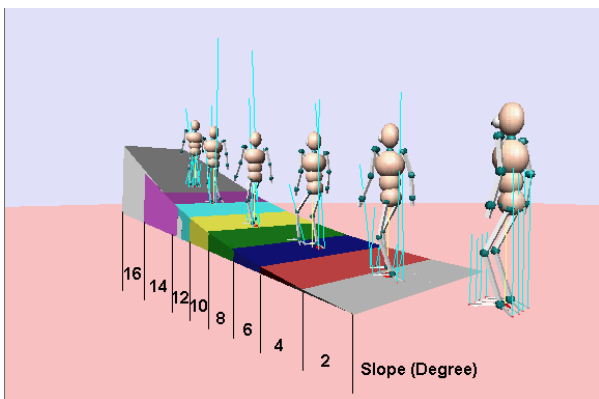


그림 16. 경사면에서의 보행 스냅샷.  
Fig. 16. Snapshots during walking on an inclined floor.

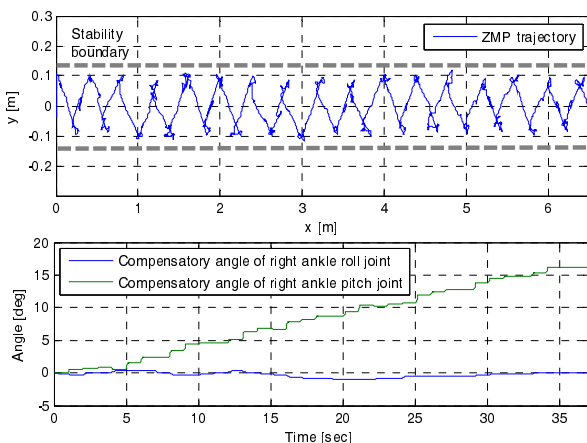


그림 17. 경사면에서의 보행 시 수직 자세 제어에 의한 오른 발목 각도 및 ZMP 궤적.  
Fig. 17. ZMP trajectory and compensatory angles of right ankle of upright pose control during walking on an inclined floor.

V. 결론

본 논문은 유압식 휴머노이드 로봇의 경사면 보행을 위한 복합 제어 전략을 제시하였다. 본 연구의 목표는 사코스 휴머노이드 로봇이 실제 환경에서의 다양한 지형위에서 안정하게 보행하도록 하는 것으로서 합리적인 센서 피드백을 이용하여 단순하고 효과적인 전략을 구축하는 것이다. 따라서 ZMP 기반의 온라인 이득 스위칭을 이용한 관절위치제어전략, 단일 링크 및 더블 링크 도립 진자를 복합적으로 이용한 ZMP 제어전략, 보행 패턴 흐름 제어 전략, 발목 유연 제어 전략 그리고 힘 기반의 수직자세 제어 전략들이 설계되었고 본 논문의 특수성이 설명되었다. 본 알고리즘의 첫 단계 검증으로써 전신 동역학 시뮬레이션을 이용하여 경사각이 점진적으로 변화하는 지면에서 동적 보행을 성공적으로 수행하였다.

현재 제안된 알고리즘의 단점은 ±5도 이상의 지면 경사각의 급격한 변화를 대처하기에는 아직 힘들다. 그 대표적인 이유는 로봇의 보행 제어 전략들이 관절 위치 제어 기반으로 이루어져 있기 때문이다. 따라서, 급경사에 원활히 대처하기 위해서 발목과 같은 특정 관절 부위에는 부분적으로 관절 토크 제어를 수행할 필요가 있다. 따라서 향후 연구로써 관절 토크 제어와 관절 위치 제어를 복합적으로 적용하여 급격한 경사 변화에 대처할 수 있도록 알고리즘을 보강할 계획이다. 또한, 현재의 보행 알고리즘에는 몸통의 관성 센서를 활용하고 있지 않고 있는데, ZMP 제어 시 관성 센서에 의한 각속도 데이터를 추가하여 보다 정확한 상태변수 관측으로부터 제어 성능을 극대화할 것이며, 급격한 지면 경사 변화 시 몸통의 실시간 자세 제어에 적극 활용할 계획이다. 최종적으로 실제 사코스 로봇의 보행 실험을 이용하여 유압 구동기 방식식의 신뢰성부터 관절 위치 제어 및 보행 제어 알고리즘의 성능을 면밀하게 실험적으로 검증할 것이다.

참고문헌

- [1] J. Perry, *Gait Analysis: Normal and Pathological Function*, SLACK Inc., 1992.
- [2] Y. Sakagami, R. Watanabe, C. Aoyama, S. Matsunaga, N. Higaki, and K. Fujimura, "The intelligent ASIMO: system overview and integration," *Proc. of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp. 2478-2483, Sep. 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. of IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots*, pp. 50-55, Dec. 2005.
- [4] 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. of IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 1443-1448, Apr. 2005.
- [5] S. O. Anderson, M. Wisse, C. G. Atkeson, J. K. Hodgins, G. J. Zeglin, and B. Moyer, "Powered biped based on passive dynamic principles," *Proc. of IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots*, pp. 110-116, Dec. 2005.
- [6] S. O. Anderson, C. G. Atkeson, and J. K. Hodgins, "Coordinating feet in bipedal balance," *Proc. of IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots*, pp. 1-5, Dec.



- 2006.
- [7] S. H. Hyon and G. Cheng, "Passivity-based full-body force control for humanoids and application to dynamic balancing and locomotion," *Proc. of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp. 4915-4922, Oct. 2006.
- [8] G. Cheng, S. H. Hyon, J. Morimoto, A. Ude, G. Colvin, and W. Scroggin, "CB: A humanoid research platform for exploring neuroscience," *Proc. of IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots*, pp. 182-187, Dec. 2006.
- [9] S. H. Hyon and G. Cheng, "Gravity compensation and full-body balancing for humanoid robots," *Proc. of IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots*, pp. 214-221, Dec. 2006.
- [10] J. Y. Kim and J. K. Hodgins, "Joint position control using ZMP-based gain switching algorithm for a hydraulic biped humanoid robot," *Journal of Institute of Control, Robotics and Systems*, vol. 15, no. 10, pp. 1029-1038, 2009.
- [11] D. C. Choi, J. H. Kim, and J. Y. Kim, "Walking control using phase plane of a hydraulic biped humanoid robot," *Journal of Institute of Control, Robotics and Systems (in Korean)*, vol. 17, no. 7, pp. 269-276, 2011.
- [12] D. C. Bentevegna, C. G. Atkeson, and J. Y. Kim, "Compliant control of a hydraulic humanoid joint," *Proc. of IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots*, pp. 483-489, Dec. 2007.
- [13] M. Vukobratovic and B. Borovac, "Zero Moment Point-thirty five years of its life," *International Journal of Humanoid Robotics*, vol. 1, no. 1, pp. 157-173, 2004.
- [14] J. Y. Kim, I. W. Park, and J. H. Oh, "Experimental realization of dynamic walking of biped humanoid robot KHR-2 using ZMP feedback and Inertial measurement," *Advanced Robotics*, vol. 20, no. 6, pp. 707-736, 2006.
- [15] 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>.



**김 정 업**

1976년 12월 7일생. 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 휴머노이드 로봇 연구센터(HUBO Lab.) 포스트닥터, 2007년 미국 카네기 멜론 대학교 로봇 연구소 포스트 닥터. 유압식 휴머노이드 로봇 제어. 2008년~현재 국립서울과학기술대학교 기계설계자동화공학부 조교수. HUBO-2 및 KIBO보행 제어 알고리즘 개발 수행 중. 관심 분야는 휴머노이드 로봇의 개발, 다관절 로봇의 동역학 시뮬레이션 및 제어, 센서 퓨전, 영상 처리, 인간 모션 캡처 기술.