

# 이족보행로봇의 궤적 추종 오차 감소를 위한 걸음새 분석

## Walking Pattern Analysis for Reducing Trajectory Tracking Error in a Biped Robot

노 경 곤, 공 정 식, 김 진 걸  
(Kyung-Kon Noh, Jung-Shik Kong and Jin-Geol Kim)

**Abstract :** This paper deals with the reduction of trajectory tracking error by changing the initial postures of a biped robot. Gait of a biped robot depends on the constraints of mechanical kinematics and the initial states including the posture. Also the dynamic walking stability in a biped robot system is analyzed by zero moment point(ZMP) among the stabilization indices. Path trajectory, in which knee joint is bent forward like human's cases, is applied to most cases considered with above conditions. A new initial posture, which is similar to bird's gait, is proposed to decrease trajectory tracking error and it is verified through real experimental results.

**Keywords :** biped robot, ZMP, initial posture, trajectory tracking error

### I. 서론

최근 인간을 보조하고 대신할 수 있는 다양하고 복잡한 환경에 대처 가능한 로봇의 작업능력이 증대되고 있다. 인간과 유사한 관절 형태를 가지는 이족 또는 다족 로봇의 걸음새에 관한 연구는 1970년대부터 꾸준히 발전되고 있다. 초기 보행로봇에 관한 연구는 한 다리 기구구조 안정화를 구현하는 연구에서 시작됐으며 이후 도립진자의 안정도 해석 그리고 다리관절뿐만 아니라 인간과 유사한 몸체 전반에 관한 연구까지 계속되고 있다[1][2].

이족보행로봇의 걸음새에 관한 연구는 다리 관절만으로 안정도를 구현하는 연구와 다리 관절의 걸음새에 따라 별도의 독립된 균형관절의 움직임을 결정하는 연구로 나눌 수 있는데[3]-[5], 본 논문은 자체 제작한 이족보행로봇을 이용하여 다리관절에 의한 다양한 걸음새에 대해 균형관절로 보상 모멘트를 발생시켜 안정도를 해석하며[6]-[8], 이족보행로봇의 균형점(ZMP)이 안정 영역 내부에 위치하도록 균형관절 제어 방정식을 이용하여 균형점의 움직임을 결정하고 균형점 검정 방정식으로 이족보행로봇의 안정도를 판별한다[9]-[14]. 이때 궤적추종오차가 상대적으로 작으면 작을수록 보다 확실한 이족보행로봇의 안정성이 보장되는데, 본 논문에서는 무릎 관절의 초기자세와 보행자세를 역보행 방향으로 변화시킨 새로운 걸음새 궤적을 제안하여 궤적 추종 오차가 감소될 수 있음을 실험을 통해 분석한다.

### II. 이족보행로봇 시스템

#### 1. 전체 시스템 구성

이족보행로봇의 전체 시스템 구성은 그림 1과 같이 양쪽

다리와 균형 관절로 구성된 8자유도의 이족보행로봇과 각 관절을 구동시키기 위한 AC 서보 모터/드라이브, 8축 동시 제어기 그리고 모의실험기 등으로 구성된다.

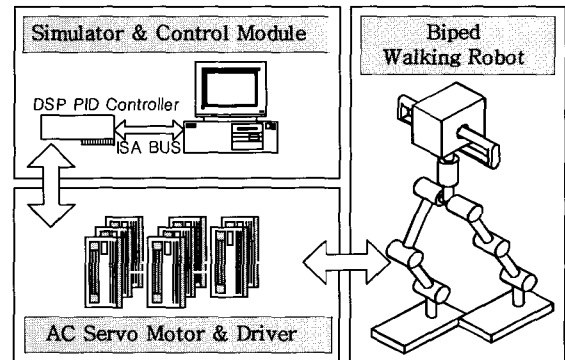


그림 1. 이족보행로봇 실험 시스템.

Fig. 1. Experiment system of a biped robot.

#### 2. 이족보행로봇의 기구 및 좌표계 구성

이족보행로봇의 기구부는 그림 2와 같이 같이 크게 양쪽다리와 보행의 균형을 맞추기 위한 균형관절로 구성된다. 각 다리는 3자유도로 발목, 무릎, 허벅지의 회전관절로 구성되며 허리 회전관절과 직진 균형 관절로 총 8 자유도를 가진다. 각 관절의 설정은 그림 2와 같이  $\theta_1, \theta_2, \theta_3$ 는 왼쪽 다리의 발목, 무릎, 대퇴부 회전관절을 나타내고,  $\theta_4, \theta_5, \theta_6$ 는 오른쪽 다리의 발목, 무릎, 대퇴부 회전관절을 나타낸다. 또한  $\theta_7$ 은 균형 회전 관절이며  $d_8$ 은 균형 직진관절을 나타낸다. 전체 기준 좌표계는 이족보행로봇의 전면 진행 방향으로 X축을 정의하며 지면의 수직인 방향을 Z축으로 정의한다.

각 관절은 이족보행 걸음새 구현에 요구되는 힘을 구동하기 위해 1회전 당 10000펄스의 해상도를 가지는 200W

논문접수 : 2001. 11. 29., 채택확정 : 2002. 5. 15.  
노경곤 : 인하대학교 자동화공학과(as900515@hotmail.com)  
공정식 : 인하대학교 자동화공학과(tempus@dreamwiz.com)  
김진걸 : 인하대학교 전자·전기공학부(john@inha.ac.kr)

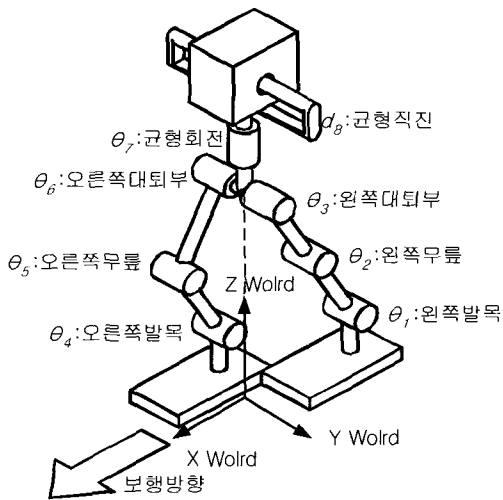


그림 2. 이족보행로봇의 좌표계.  
Fig. 2. Coordinate system of a biped robot.

AC 서보 모터와 60:1의 감속기를 사용하였다. 가장 많은 힘이 요구되나 상대적으로 저속인 발목 관절은 100:1의 감속기가 사용되고, 고용량의 힘과 고속의 운동이 요구되는 무릎 관절은 400W 용량의 모터를 사용하였으며 무 동력 시 기존 자세의 유지를 위해 브레이크가 장착되었다.

3. 구동 드라이브 및 제어기 구성

이족보행로봇의 양쪽다리 관절 궤적과 균형관절 궤적의 안정적인 추종을 제어하기 위한 AC 서보 드라이브의 내부 제어 방법은 그림 3과 같다.

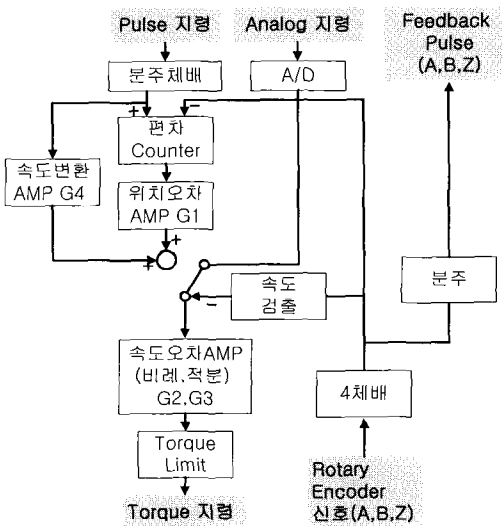


그림 3. 서보 드라이브의 내부 제어도.  
Fig. 3. Diagram of a AC servo drive control system.

본 논문은 이족보행로봇의 초기자세 구현 시 펄스 위치 제어를 사용하고, 보행 시에는 아날로그 속도제어를 사용하여 보행에 필요한 각 관절의 궤적 명령과 궤적추종오차를 제어기를 통해 교환한다. 드라이브 내부 제어 매개변수 G1

은 위치 이득값, G2는 속도 이득값, G3은 속도 적분 시정수, G4는 속도 앞먹임 (feedforward) 이득값이다.

이족보행로봇의 제어기는 8축 동시 구동이 가능한 MMC (Multi Motion Controller) 제어기가 사용 되었다. 제어기의 주요 사양은 8축 동시 PID & 앞먹임 제어가 가능한 DSP(Digital Signal Processor)가 사용되며 원활한 데이터 통신과 범용성을 고려한 IBM 호환 ISA BUS 형태로 구성되어 있다. 제어기는 10ms 단위의 위치명령을 해독하고 1ms의 주기로 AC 서보모터와 드라이브를 (1)에 의한 PID & 앞먹임 제어를 한다. 제어기는 각 관절의 속도 및 가속도 명령에 대하여 (1)의 제어값을 아날로그 전압 출력으로 변환한다.

$$Y_n = K_r [K_{pp} * PE_n + K_{pi} * PS_n + K_{pd} * (PE_n - PE_{n-1}) + K_{vf} * V_n + K_{vp} * VE_n + K_{vi} * VS_n + K_{vd} * (VE_n - VE_{n-1}) + K_{vf} * A_n]$$

위 (1)의 각 계수와 변수는 다음과 같다.

- $Y_n$  = 샘플기간 n의 제어 출력 값
- $K_r$  = 크기계수(1/512)
- $K_{pp}, K_{vp}$  = 위치, 속도 비례 (Proportional) 이득값
- $K_{pi}, K_{vi}$  = 위치, 속도 적분 (Integral) 이득값
- $K_{pd}, K_{vd}$  = 위치, 속도 미분 (Derivative) 이득값
- $K_{pf}, K_{vf}$  = 위치, 속도 앞먹임 (Feedforward) 이득값
- $PE_n, VE_n$  = 위치, 속도 오차
- $V_n$  = 속도명령 (Velocity Reference)
- $A_n$  = 가속도명령 (Acceleration Reference)
- $PS_n, VS_n$  = 위치오차(PE<sub>n</sub>), 속도오차(VE<sub>n</sub>)의 합

4. 균형점 해석과 균형 관절 제어 방정식

이족보행로봇의 걸음새 분석과 안정도 해석을 위한 동역학적 가정은 다음과 같다. 첫째, 각 링크의 하중은 링크의 무게중심에 집중되어 있으며 해석상 9개의 무게 중심을 갖는 질량중심으로 가정한다. 둘째, 지지평면은 외력이나 외부 모멘트에 의해 영향을 받지 않는다. 셋째, 지지평면과 발바닥 사이의 미끄러짐은 일어나지 않는다. 따라서 다리의 움직임과 균형관절의 움직임으로 인한 몸체의 회전은 고려되지 않았다. 위의 가정과 D'Alambert 원리에 의한 모멘트 운동 방정식을 정리하여 다음과 같은 균형점 검증 방정식을 유도한다.

$$x_{ZMP} = \frac{\sum_{i=0}^8 m_i (\ddot{z}_i + G_z) x_i - \sum_{i=0}^8 m_i (\ddot{x}_i + G_x) z_i}{\sum_{i=0}^8 m_i (\ddot{z}_i + G_z)} \tag{2}$$

$$y_{ZMP} = \frac{\sum_{i=0}^8 m_i (\ddot{z}_i + G_z) y_i - \sum_{i=0}^8 m_i (\ddot{y}_i + G_y) z_i}{\sum_{i=0}^8 m_i (\ddot{z}_i + G_z)} \tag{3}$$

(2)와 (3)은 각각 균형점의 X축과 Y축 방향성분을 나타낸 식으로 i는 각 링크의 번호이고,  $m_i$ 는 그림 4에 표시된 각

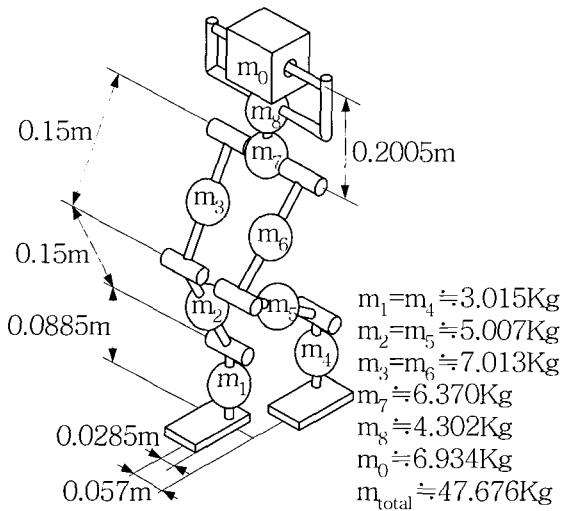


그림 4. 이족보행로봇의 링크길이와 질량.  
Fig. 4. Link parameters and mass property of a biped robot.

링크의 질량이다.  $x_i, y_i, z_i$ 는 각 링크의 기준 좌표계에 대한 직교좌표 위치 성분이며  $\ddot{x}_i, \ddot{y}_i, \ddot{z}_i$ 는 직교좌표 가속도 성분이다. 또한  $G_x, G_y, G_z$ 는 X축, Y축, Z축 중력 가속도를 성분을 나타내고, 보행 중 접촉평면이 중력방향과 수직일 경우  $G_x, G_y$ 는 '0' 값을 가진다.

그림 4는 각 링크의 길이와 질량을 나타내고, (2)와 (3)을 이용하여 균형점의 X-Y좌표 평면상의 위치와 이족보행로봇의 지지각으로 이루어진 다각형과의 상관관계로써 안정성을 관측 할 수 있다. 또한 (2)와 (3)으로부터 균형추  $m_0$ 의 x 방향, y방향 움직임은 다음과 같이 이차 미분 방정식의 형태로 유도된다.

$$\ddot{x}_0(t) - Cx_0(t) = a(t) \tag{4}$$

$$\ddot{y}_0(t) - Cy_0(t) = \beta(t) \tag{5}$$

여기서 (4)와 (5)의 C는 (6)과 같이 균형추의 Z방향 운동이 없을 경우에 시불변상수이고, (4)의  $a(t)$ 와  $\beta(t)$ 는 다음과 같이 주어진다.

$$C = \frac{(\ddot{z}_0 + G_z)}{z_0} \tag{6}$$

$$a(t) = \frac{\sum_{i=1}^8 m_i (\ddot{z}_i + G_z)(x_i - x_{ZMP}) - m_i (\ddot{x}_i + G_x)z_i}{m_0 z_0} - \frac{(\ddot{z}_0 + G_z)x_{ZMP}}{z_0} - G_x \tag{7}$$

$$\beta(t) = \frac{\sum_{i=1}^8 m_i (\ddot{z}_i + G_z)(y_i - y_{ZMP}) - m_i (\ddot{y}_i + G_y)z_i}{m_0 z_0} - \frac{(\ddot{z}_0 + G_z)y_{ZMP}}{z_0} - G_y \tag{8}$$

III. 초기자세 변화에 따른 걸음새 분석

1. 기존 이족보행로봇 초기자세 분석

기존 이족보행로봇의 초기 자세와 보행 자세는 단위 보폭 0.14m 구현에 따른 각 관절의 회전량과 가감속 속도를 고려하여 그림 5와 같이 직립자세로부터 대퇴부 관절은 30°, 무릎 관절은 -60° 그리고 발목 관절은 30°의 초기자세를 구성하고 있다.

기존의 초기자세는 무릎 관절이 보행의 진행 방향과 같아짐으로서 전체적인 하중과 모멘트는 로봇의 전방으로 위치하게 되는 문제점을 유발한다. 이로 인해 균형관절의 움직임은 균형을 유지하기 위해 전반적으로 후방에서 운동하게 되고 다시 다음 보행과 몸체 추진을 위해 전후방으로의 많은 움직임을 요구하게 되고, 이는 전체적으로 위치추종 오차를 증대시키는 원인이 된다.

2. 기존 초기자세를 개선하기 위한 제안

앞에서 살펴본 바와 같이 기존 초기자세가 가지는 문제점을 극복하기 위하여 그림 6과 같이 직립자세로부터 대퇴부 관절은 -30°, 무릎 관절은 60° 그리고 발목 관절은 -30°로 구성된 초기자세를 고려한다.

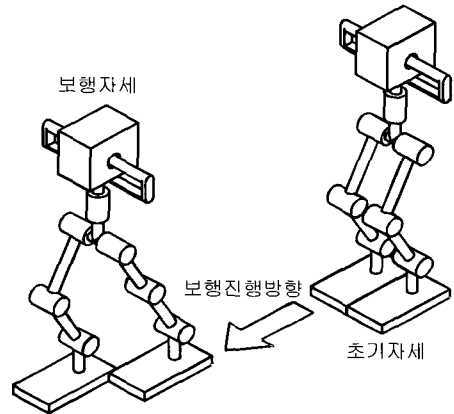


그림 5. 이족보행로봇의 기존 초기자세.  
Fig. 5. Conventional initial posture of a biped robot.

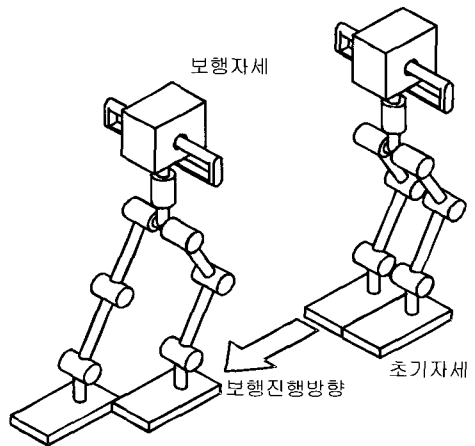


그림 6. 제안된 이족보행로봇의 초기자세.  
Fig. 6. Proposed initial posture of a biped robot.

따라서 제안된 초기자세는 기존 자세와 비교하여 이족보행로봇의 전체 질량과 모멘트를 몸체 중앙에 위치하게 한다. 이로써 균형관절의 전체적인 움직임의 감소를 꾀하여 걸음새 추종오차를 줄일 수 있다.

IV. 모의 실험 및 구현

1. 모의실험

그림 7은 초기자세와 경유점 데이터를 입력받아 이족보행로봇의 걸음새를 생성하고 안정성을 검증하기 위한 모의 실험기의 구조이다. 모의실험기는 초기자세와 경유점을 입력받아 양쪽 다리 궤적과 목표 균형점을 생성하고 이를 경계조건으로 균형추의 이차 미분 방정식의 해를 계산한다. 이에 따라 균형추의 운동을 결정하고 실제 균형점을 도출하여 이족보행로봇 걸음새의 안정성을 판별한다. 여기서 기존 초기자세에 의한 다리 및 균형추 궤적을 제안된 초기자세에 의한 데이터와 비교 및 분석하기 위해, 경유점은 사다리꼴의 5차 스플라인을 이용하고 경유점 조건을 동일하게 설정하였다[13].

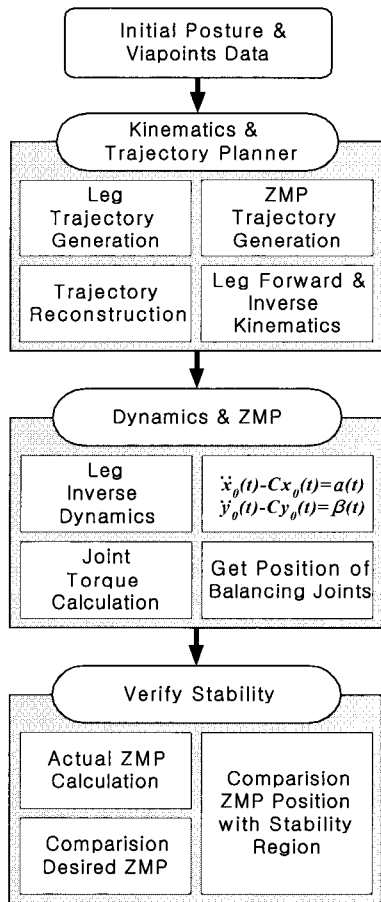


그림 7. 모의실험기 구조.  
Fig. 7. Simulator structure.

그림 8은 단위보폭 14cm를 한 걸음으로 총 18초 동안 6 걸음을 이동하는 기존 초기자세에 의한 각 관절 궤적과 제안된 초기자세에 의한 관절들의 궤적을 모의실험기에 의해

도출한 그래프이다. 6걸음 중 첫 번째 걸음은 모뎀발에서 오른쪽다리를 내딛는 시작 보행이고, 두 번째 걸음과 네 번째 걸음은 후방에 위치한 왼쪽다리를 들어 진행방향으로 걷는 동작이다. 세 번째 걸음과 다섯 번째 걸음은 후방에 위치한 오른쪽다리를 들어 진행방향으로 걷는 동작이며, 마지막 여섯 번째 걸음은 후방의 왼쪽다리를 초기자세의 모뎀발로 움직이는 동작이다. 따라서 그림 8에서 나타난 바와 같이 두 번째와 세 번째 걸음인 3~9초의 궤적 데이터가 네 번째 걸음과 다섯 번째 걸음인 9~15초 동안에 반복됨을 알 수 있다.

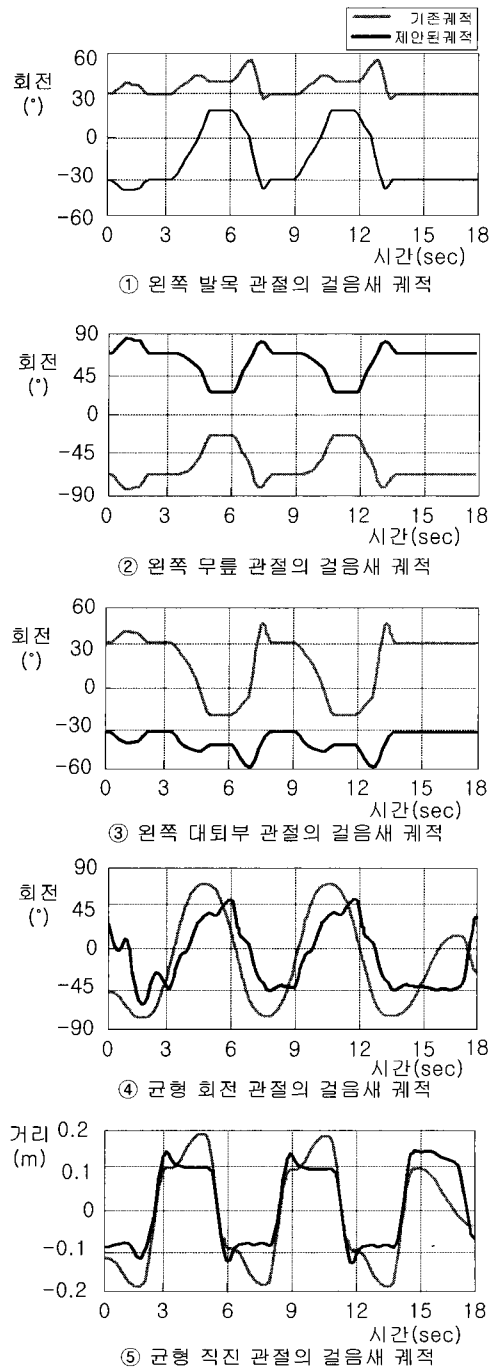


그림 8. 이족보행로봇의 걸음새 궤적 비교.  
Fig. 8. Comparison of a biped robot gait.

그림 8의 ①은 왼쪽 발목 관절의 회전량을 비교한 데이터인데 제안된 궤적이 2배 가량 증가하고 ③은 제안된 궤적의 회전량이 50%가 감소함을 볼 수 있다. 그림 8의 ④와 ⑤는 균형관절의 회전관절과 직진관절 궤적을 비교한 데이터이다. 여기서 균형 회전 관절의 회전량은 20% 정도 감소하나 속도와 가속도의 변화량이 상대적으로 증대됨을 그래프의 변화로 알 수 있다. 또한 균형 직진관절의 이동량은 15초까지는 30% 정도 감소하지만, 15초에서 18초 동안은 20% 정도 증가함을 알 수 있다.

그림 9는 기존 초기자세에 의한 걸음새 궤적에 대한 목표 균형점과 실제 균형점의 추종과 제안된 초기자세에 의한 균형점의 운동을 모의실험기에 의해 비교한 그래프이다. 그림 9의 ①과 ②는 기존 걸음새에 의한 목표균형점과 실제 균형점의 X·Y 성분을 각각 나타내며, 그림 9의 ③과 ④는 제안된 걸음새에 의한 균형점의 X·Y 성분을 나타낸다.

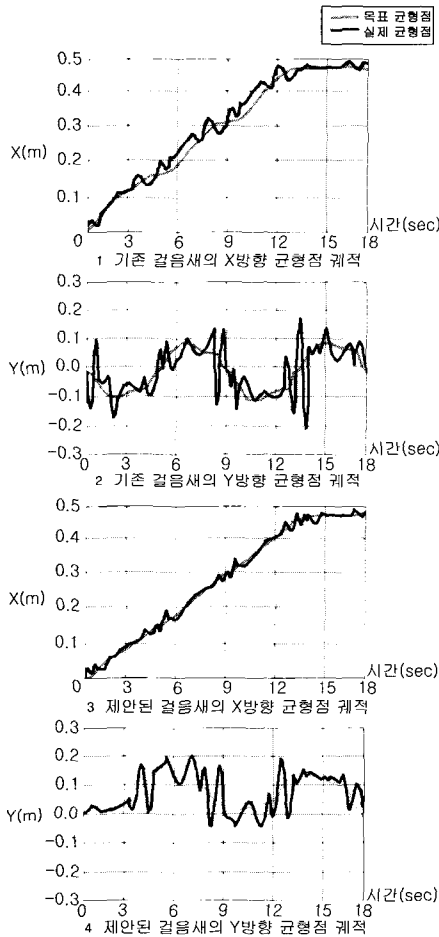


그림 9. 균형점 궤적 비교.  
Fig. 9. Comparison of ZMPs.

그림 9의 ①과 ③을 비교해보면 제안된 걸음새에 의한 균형점의 X방향 추종이 더 나아짐을 알 수 있고, 균형점의 Y방향 가속도 운동이 ④에서 보는바와 같이 기존 걸음새의 ②보다 전반적으로 감소됨을 확인할 수 있다. 그림 10은 균형추의 움직임을 비교한 데이터이다. 그림 10의 ①은 전체 6걸음 중에서 첫 번째 걸음에 대한 기존 초기자세에 의한

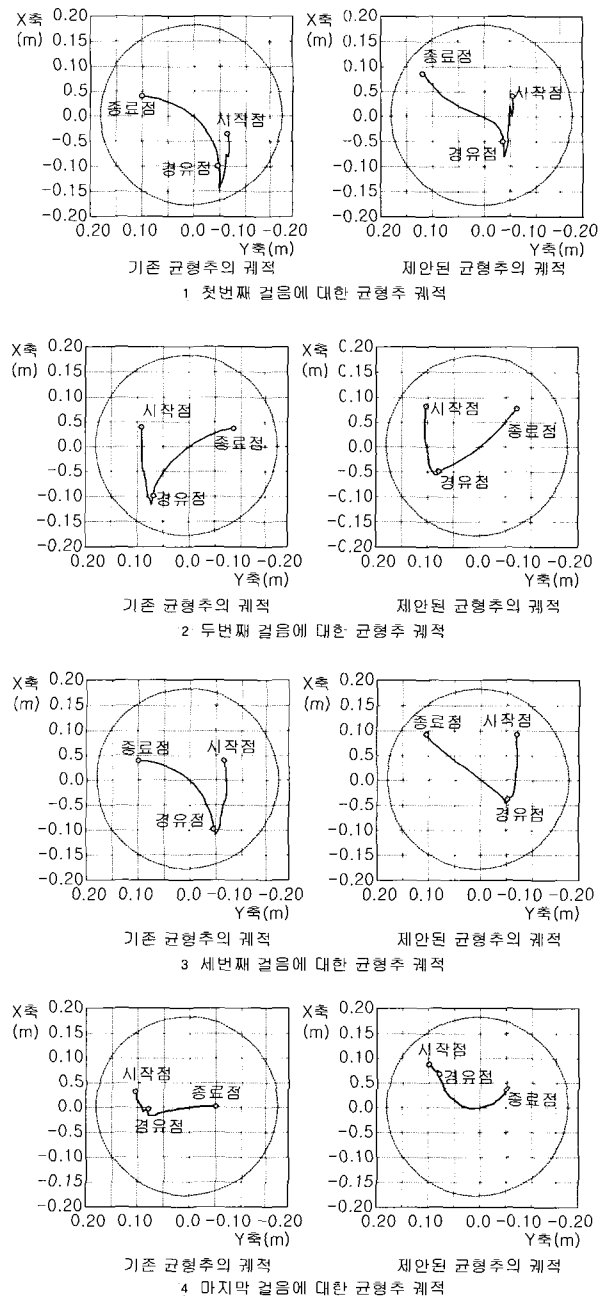


그림 10. 균형추 궤적 비교.  
Fig. 10. Comparison of a balance weight trajectory.

보행과 제안된 초기자세에 의한 보행간의 균형추 궤적을 비교한 것이다.

그림 10의 ①에서 제안된 보행의 균형관절 궤적은 예측한 결과와 동일하게 기존의 궤적보다 상대적으로 전체적인 운동이 몸체 중심에서 이루어지고 있음을 알 수 있다. 그림 10의 ②는 두 번째 걸음에 대한 균형추 궤적이고 ③은 세 번째 걸음에 대한 균형추의 궤적을 비교한 것이다. 이후 네 번째와 다섯 번째 걸음은 ②와 ③과 동일하다. 그림 10의 ④는 마지막 걸음에 관한 균형추 궤적을 비교한 것이다. 제안된 보행의 균형관절 궤적은 Y축으로 약 0.1m의 이동범위를 나타내고, 기존 균형관절 궤적의 Y축 이동범위는 약 0.07m 가량 됨을 알 수 있다.

그림 10의 균형관절 궤적 데이터의 비교에서 나타난 바와 같이 제안된 초기위치에 따른 걸음새 구현은 전체적인 균형관절의 운동범위를 기존의 걸음새와 비교하여 상대적으로 이족보행로봇의 중심에 위치되었다.

2. 실험

그림 11은 이족보행로봇 실험에서의 각 구성요소 간의 입출력 자료의 흐름을 나타낸다.

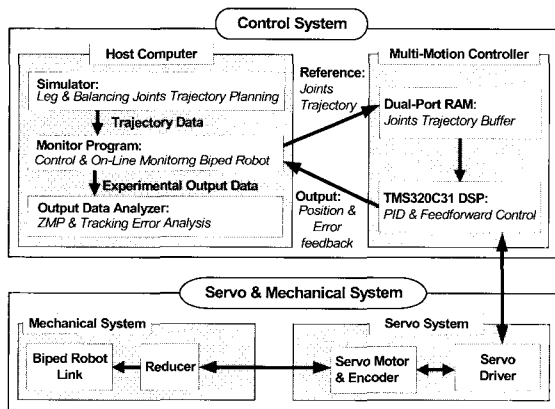


그림 11. 이족보행로봇의 실험 구성.

Fig. 11. Diagram of experimental system.

Servo ON	ON Line	View Graph	View 3D	Position Clear
Calibration Data Load	Path Data Load		Goto Data HOME	Left Leg Stand
TEST	Inverse Run Path	Run Path		종료
<input type="checkbox"/> Work Finish	초기화	위치	High Speed	
왼쪽 발목	ON	0.0	Open	- +
왼쪽 무릎	ON	0.0	Open	- +
왼쪽 허벅지	ON	0.0	Open	- +
오른쪽 발목	ON	0.0	Open	- +
오른쪽 무릎	ON	0.0	Open	- +
오른쪽 허벅지	ON	0.0	Open	- +
허리	ON	0.0	Open	- +
균형추	ON	0.0	Open	- +

그림 12. 이족보행로봇의 제어 프로그램.

Fig. 12. Control program of a biped walking robot.

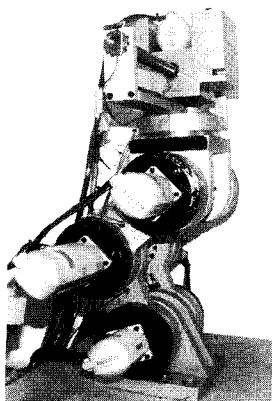


그림 13. 이족보행로봇의 제안된 초기자세.

Fig. 13. Proposed initial posture of a biped robot.

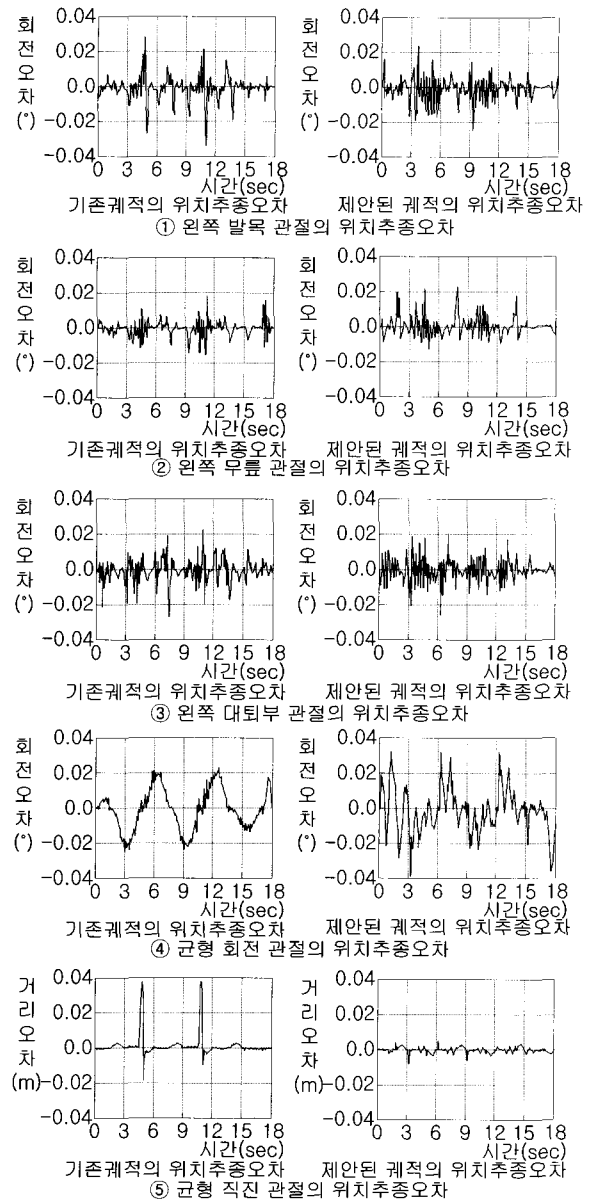


그림 14. 여섯 걸음 구현에 따른 위치 추종오차.

Fig. 14. Trajectory tracking errors during six steps.

실험은 기존방법과 제안된 방법 모두 동일한 경유점 조건하에서 3초 단위보행의 6보 18초 걸음새를 모의실험기에 의해 균형점과 균형추의 움직임을 검증하고 각 관절의 궤적을 얻어낸다. 각관절 궤적은 그림 12의 제어프로그램을 통해 제어기와 연동하여 서보 드라이브와 서보 모터를 구동 및 제어하고, 이족보행로봇의 보행 상태인 위치 및 궤적추종오차를 모니터링한다. 제어프로그램 그림 12의 주요 기능은 이족보행로봇의 초기화를 위한 외부신호 통신과 초기 위치의 교정기능, 서보 모터와 드라이브 및 제어기의 각종 제어 매개변수 조절기능, 걸음새 궤적의 입출력 및 저장기능 등이다.

그림 13은 본 연구실에서 개발한 이족보행로봇의 제안된 초기자세를 나타내고 그림 14는 이족보행로봇의 보행 실험 결과이다.

그림 14의 ①은 이족보행로봇의 왼쪽 발목 궤적에 대한 위치 추종 오차를 나타내며 기존 초기자세에 의한 방법과 제안된 방법간의 큰 변화량이 없음을 알 수 있다. 그림 14의 ②와 ③은 각각 무릎 관절과 대퇴부 관절의 위치 추종 오차를 기존 방법과 제안된 방법간에 비교한 그래프이다. 그래프에서 나타난 바와 같이 위치 추종 최대 오차는 서로 비슷하지만 제안된 방법이 평균적인 오차가 다소 증가함을 알 수 있다. 그림 14의 ④와 ⑤는 균형 회전 관절과 균형 직진 관절의 걸음새 추종오차를 비교한 그래프로써, 균형 직진관절은 제안된 방법이 기존보다 최대 위치 추종오차가 약 700% 감소함을 알 수 있다.

### V. 결론 및 향후과제

기존의 이족보행로봇 걸음새 구현에 따른 위치추종오차를 감소하기 위해 새로운 초기 자세를 제안했고, 모의실험기를 이용하여 새로운 초기자세에 따른 걸음새 궤적과 균형추의 궤적을 얻었다. 도출된 균형추 궤적은 기존 걸음새와 달리 전후방 균형적인 운동으로 구성되었으며, 이에 각 관절의 움직임도 기존과 다른 양상을 나타냈다. 발목관절의 운동량은 기존 보행에 비해 100% 정도 상승한데 반하여, 허벅지관절은 50% 감소하였다. 또한 허리 회전 관절과 균형 직진 관절도 20% 감소 효과를 얻을 수 있었다. 실험결과 균형 회전 관절의 위치 추종오차는 상대적 가속도의 변화로 인해 20% 상승하였고, 균형 직진관절의 최대 위치 추종오차는 700% 감소하였다.

추후 연구방향은 지지평면과 균형추의 움직임이 평행한 환경뿐만 아니라 전후 및 좌우 경사면이나 계단과 같은 다양한 지면상태에서의 보행 안정성 분석이 요구된다. 또한 이족보행로봇의 보행 안정성 판별 및 균형추의 움직임을 결정하기 위한 균형점 해석모델을 좀더 확장하여, 다양한 보행 환경에서의 이족보행로봇 전체 시스템의 라그랑지안 해석을 통해 현대 제어 기법의 적용이 요구된다.

### 참고문헌

- [1] M. Vukobratovic, J. Stepanenko, "Mathematical models of general hropomorphic systems," *Mathematical Biosciences* 17, pp. 191-242, 1973.
- [2] M. Vukobratovic, J. Stepanenko, "Legged locomotion robot," Nikkan Kogyo Shinbunsha, 1975.
- [3] A. Takanishi, M. Ishida, Y. Yamazaki, I. Kato, "The realization of dynamic walking by the biped walking robot

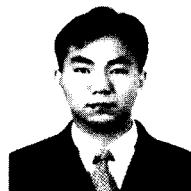
WL-10RD," *Journal of the Robotics Society of Japan*, Vol. 3, No. 4, pp. 325-336, 1985.

- [4] C. L. Shin, Y. Z. Li, S. Churr.g, T. T. Lee, W. A. ruven, "Trajectory synthesis and physical admissibility for a biped robot during the single support phase," *IEEE*, pp. 1646-1650, 1990.
- [5] S. H. Lim, J. G. Kim, "Development of adaptive gait algorithm for IWR biped robot," *KACC*, pp. 113-118, 1993.
- [6] K. J. Waldron, "Realization of dynamic biped walking stabilized with truck motion under known external force," *Advanced Robotics*, pp. 299-310, 1989.
- [7] A. Takanishi, Y. Egusa, M. Tochizawa, M. Takeya, I. Kato, "Realization of dynamic biped walking stabilized with trunk motion," *RoManSy 7:Proc, Seventh CISM - IFTToMM Symposium on Theory and Practice of Robots and Manipulators*, Eds.Hermes, Paris, pp. 68-79, 1990.
- [8] J. Yamaguchi et al., "Development of a biped walking robot compensating for three-axis moment by truck motion," *IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and System*, pp. 561-566, 1993.
- [9] S. H. Lim, J. G. Kim, "Biped locomotion with mechanical compliance," *Korea Robotics and Automation Workshop Conference*, pp. 21-25, 1992.
- [10] J. Yamaguchi et al., "Development of a biped walking robot adapting to horizontally uneven surface," *IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and System*, pp. 1156-1163, 1994.
- [11] S. Kagami, F. Kanehiro, Y. Tamiya, M. Inaba, H. Inoue, "Autobalancer: An online dynamic balance compensation scheme for humanoid robots," *Proc. of Fourth Intl. Workshop on Algorithmic Foundations on Robotics (WAFR'00)*, pp. 79-89, 2000.
- [12] K. D. Mombaur, H. Georg Bock, J. P. Schloder, "Human-Like actuated walking that is asymptotically stable without feedback," *Proc. of the 2001 IEEE Intl. Conf. on Robotics & Automation*, pp. 4128-4133, 2001.
- [13] K. Nagasaka, M. Inaba, and H. Inoue, "Stabilization of dynamic walk on a humanoid using torso position compliance control," *Pro. of 17th Annual Conference on Robotics Society of Japan*, pp. 1193-1194, 1999.
- [14] S. H. Choi, Y. H. Choi and J. G. Kim, "Optimal walking trajectory generation for a biped robot using genetic algorithm," *Pro. of the 1999 IEEE/RSJ Int. Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp. 1458-1459, 1999.



노 경 곤

1972년 2월 17일생. 1997년 인하대 자동화공학과 졸업. 2000년 동대학원 석사졸업. 2000년~현재 동 대학원 박사과정 재학중. 관심분야는 휴머노이드 로봇 제어 및 시뮬레이션.



공 정 식

1976년 1월 7일생. 1998년 인하대 자동화공학과 졸업. 1998년~현재 동 대학원 통합과정 재학 중. 관심 분야는 휴머노이드 로봇 센서 및 제어.



**김진걸**

1955년 7월 4일생. 1978년 서울대 전기공학과 졸업. 1998년 Univ. of Iowa 전기 및 컴퓨터공학과 박사 졸업. 1998년~현재 인하대학교 전자·전기공학부 교수. 관심분야는 로봇 제어 및 비선형제어.