

## 각가속도를 이용한 이족 로봇의 동적 걸음새 구현

# Dynamic Gait embody using angular acceleration for a Walking Robot

박재문\*, 박승엽\*, 고봉진\*

Jae-Mun Park\*, Seung-Yub Park\*, Bong-Jin Ko\*

### 요 약

본 논문에서는 보행 로봇의 자세 안정화 및 동적 걸음새를 구현하였다. 10개의 RC 서보모터가 로봇 관절에 사용되었고, 각 로봇의 관절은 어떤 걸음새 동작에도 충분히 움직일 수 있게 하였다. 각 관절 궤적은 3차 스플라인 보간법에 의해 생성되며, 궤적의 안정성은 로봇 모델링에 의한 ZMP(Zero Moment Point)를 이용하여 입증하였다. 또한 복잡한 구조와 표현을 피하기 위해 각 가속도를 이용한 ZMP방법을 구현 하였고, 로봇의 안정 상태를 측정하기 위해 기울기 센서와 자이로 센서가 사용되었다. 10개의 서보모터 제어, 궤적 생성, ZMP 보상, 센서 측정 등 과 같은 대부분의 계산 과정은 DSP에서 이루어지며, PC에서는 단순히 로봇의 상태, 데이터 처리 등의 모니터링에 이용하였다.

### Abstract

In this paper, we embodied posture-stabilization and dynamic gait in a walking robot. 10 RC servo motors are used to operate joints. And the joints have enough moving ranges suitable in any walking pattern. Each joint trajectory is generated by cubic spline interpolation method and the stability of the trajectory is verified by using Zero Moment Point from the robot modeling. To avoid complex structure and expression, Zero Moment Point of the biped robot used angular acceleration is suggested. To measure the stability of the biped robot, Tilt sensor and gyro sensor are used. Finally, Personal Computer is used computer monitoring and data processing. Most of computation, such as 10 RC servo motor control, joint trajectory generating, ZMP compensation, sense measuring, etc, was used Digital Signal Processor.

Key words : Cubic Spline Interpolation, Zero Moment Point, Digital Signal Processor,

### I. 서 론

다양한 환경 하에서 보행하기 위해 이족보행로봇은 반드시 걸음주기나 보폭, 방향전환 등과 같은 걸음새를 변경할 수 있어야 한다. 그러나 다리부분으로만 구성된 이족보행로봇은 그렇지 않은 이족보행로봇에 비해 걸음새 변경능력이 미미하거나 더 복잡한

알고리즘을 필요로 하며, 보행전 균형점 궤적이나 균형운동을 검증 또는 결정하기 어려운 단점이 있다[1].

이족 로봇이 보행하는데 중요한 점은 넘어지지 않고 균형을 유지해야 한다. 움직이는 로봇의 안정성을 판별하기 위해 Vukobratovic[2]의 ZMP (Zero Moment Point)가 많은 연구에서 안정성 판별법으로 사용되고 있다.

\* 창원대학교 전자공학과

· 제1저자 (First Author) : 박재문

· 접수일자 : 2007년 5월 2일

이족 로봇이 보행을 할 때, 보행을 하면서 공간상에 궤적을 생성 한다. ZMP 안정성 판별법에 의한 여러 가지 보행 궤적생성법이 연구 되었는데, 크게 보행 궤적을 off-line상으로 만들고 이를 실제 보행 패턴에 이용하는 방법과 매 순간마다 로봇의 동역학 식을 계산 하여 궤적을 생성하는 방법으로 구분할 수 있다 [3][4].

현재 ZMP를 이용하여 안정성을 판별하는 방법 중 많이 사용되는 방법은 FSR(Force Sensing Resister)를 이용하여 로봇의 발을 구성한 방법이다[5][6]. FSR을 이용한 방법의 장점으로는 지면과 닿는 발에서 직접적으로 센싱을 하기 때문에 간편하고 정확한 ZMP값을 얻을 수 있고, 다수의 FSR을 이용함으로써 높은 정도를 기대할 수 있다. 단점으로는 여러 개의 FSR을 발바닥 구조에 맞게 배치해야 하고, 압력센서인 FSR을 발의 구조에서 동일한 압력을 주어야 함으로 구성과 제작에 어려움이 따른다. 이런 FSR의 단점을 개선하기 위한 한 가지 방안으로서 가속도를 이용한 ZMP 보상을 제안한다.

FSR을 대신하여 자이로 센서와 기울기 센서를 실험에 사용하였다. 보행 로봇의 궤적생성방법으로 3차 스플라인 보간법을 이용하였고 보행 시 골반의 높이는 일정하게 유지하였다.

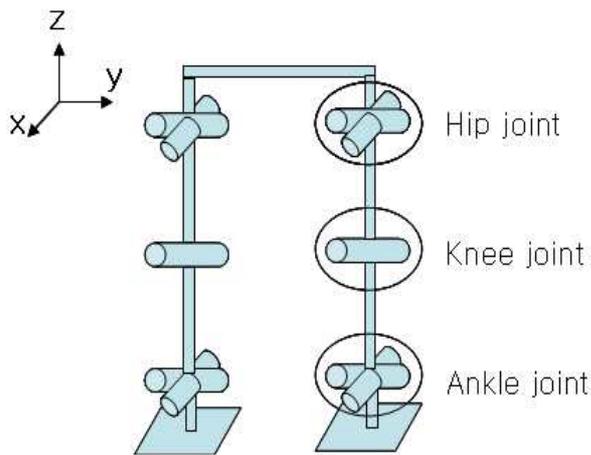


그림 1. 사용된 로봇의 구조  
Fig. 1. The structure of leg.

## II. 로봇의 구조

로봇의 각부는 허벅지, 종아리, 발목으로 되어 있고, 각각의 joint 에는 서보모터가 액츄에이터로 사용되며, 각 부의 무게는 중심에 있다고 가정하였고, x방향을 로봇의 진행방향으로 보았다.

일반적인 로봇의 다리구조는 Hip joint에 3 자유도, Knee joint에 1 자유도, Ankle joint에 2 자유도를 가져 총 12 자유도를 가진다. 12 자유도의 로봇을 구성할 경우 x, y, z 축의 회전운동을 고려할 수 있어 보행 시 직선운동과 곡선운동 등 인간과 유사한 보행이 가능하다.

본 논문에서 사용 되어진 로봇은 Hip joint에서 1 자유도를 뺀 총 10 자유도를 가지는 로봇을 구성하여 실험을 하였다. 10 자유도로 구성된 로봇의 경우 정면과 측면에 대한 움직임은 가능하나 방향전환은 불가능하다. 그러므로 논문에서는 방향전환을 배제하고 기타 요소의 간섭을 없앤 보행의 안정성을 판단하기 위해 그림 1과 같은 간단한 구조의 로봇을 사용하였다.

## III. 보행의 안정성

### 3-1 정적 보행[3]

2족 로봇이 보행 시 로봇에는 여러 가지 힘이 복합적으로 작용된다. 중력, 마찰력, 외부환경 요소 등으로 볼 수 있다. 로봇에 작용하는 힘을 다른 요소는 영향을 미치지 않는다고 가정하고, 중력만을 고려할 때 로봇의 양발에 있는 무게중심을 적절히 이동하면 보행 시 로봇은 넘어지지 않고 이동할 수 있다.

$$x_{cog} = \frac{\sum_{i=1}^7 m_i G x_i}{\sum_{i=1}^7 m_i} \quad (1)$$

$$y_{zmp} = \frac{\sum_{i=1}^7 m_i G y_i}{\sum_{i=1}^7 m_i} \quad (2)$$

여기에서  $m_i, x_i, y_i$  는 각 링크의 공간상의 좌표를 말하고,  $G$ 는 중력가속도를 나타낸다.

식(1)-(2)을 이용하여 구한 무게중심의 좌표는 다음과 같다.

$$COG = (x_{cog}, y_{cog}, 0) \quad (3)$$

### 3-2 동적 보행[3]

이족 로봇이 보행을 할 때, 정적보행에서 언급한 요소 이외에도 로봇 자체의 움직임에 의한 모멘트도 작용한다. 이는 보행 시 상체가 흔들리거나 균형을 잃을 수 있으므로 반드시 고려되어야 한다.

ZMP의 수학적 표현을 구하기 위해 그림 1의 로봇 모형을 바탕으로 동역학식을 구하면 다음과 같다.

$$\sum_{i=1}^7 m_i (r_i - r_{zmp}) \times (-r_i'' + G) = 0 \quad (4)$$

여기에서,  $m_i$ 와  $r_i$ 는 각 링크의 무게와 위치벡터를,  $r_{zmp}$ 는 ZMP의 벡터를,  $r_i''$ 는  $r_i$  링크의 가속도 벡터를,  $G$ 는 중력 가속도를 의미한다.  $\times$ 는 Vector product를 의미한다.

식(4)을 이용하여 ZMP를 구하면 다음과 같다.

$$x_{zmp} = \frac{\sum_{i=1}^7 m_i (z_i'' + G) x_i - \sum_{i=1}^7 m_i x_i z_i''}{\sum_{i=1}^7 (z_i'' + G)} \quad (5)$$

$$y_{zmp} = \frac{\sum_{i=1}^7 m_i (z_i'' + G) y_i - \sum_{i=1}^7 m_i y_i z_i''}{\sum_{i=1}^7 (z_i'' + G)} \quad (6)$$

## IV. 걸음세 보상

로봇의 걸음걸이는 연속적인 동작의 연결로 이루어진다. 3차 스플라인 보간법을 이용한 궤적 생성을 통하여 각 관절에 이러한 동작들을 구현할 수 있다. 그러나 이러한 연속된 동작이 이루어 질 때 로봇은

인간의 관점에서 아주 부자연스러운 동작처럼 보일 것이다. 인간의 몸은 지지 역할을 하는 뼈와 근육, 근육을 조정하는 수억 개의 신경으로 이루어져 있어 의식하지 않아도 자연스러운 동작을 할 수 있다. 반면에 로봇은 일정한 토크를 가지는 액추에이터, 인간에 미치지 못하는 감각기관(센서)을 가지고 있기 때문에 인간과 같은 행동은 불가능하고 흉내 내기 만이 가능하다. 그러므로 로봇이 인간과 유사한 동작을 하기 위해서는 사용되는 액추에이터에 적절한 보상이 필요하게 된다.

인간이 보행을 할 때 힘이라는 것은 무게중심을 포함하여 몸의 각 부분이 가속을 할 때의 효과가 합해져서 나타날 것이다. 이것은 서있던 상태에서부터 걷기 시작할 때에는 가속을 하고, 걷고 있는 상태에서 정지할 때에는 감속을 하는 것인데, 이것은 로봇의 전체의 가속도로 작은 크기의 값을 가진다. 그것보다도 팔, 다리를 흔들거나 상체를 움직일 때 효과가 더 크다.

ZMP를 이용한 로봇의 제어에서 정밀한 보상이 이루어지기 위해서는 각 관절의 질량과 몸체의 질량에 대한 가속도 모멘트에 대한 계산이 필요하다. 이렇게 로봇 바디 전체에 대한 모멘트를 계산할 경우 정확한 ZMP를 구할 수는 있지만 계산 량이 너무 많아져서 보행주기 내에 계산이 힘들거나 더 고성능의 프로세서를 사용해야 할 것이다.

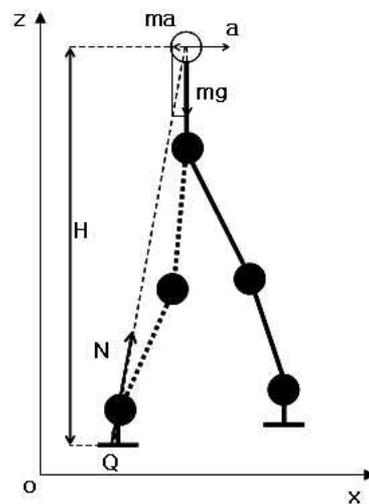


그림 2. 가속도와 ZMP  
Fig 2. Acceleration and ZMP.

그러므로 본 논문에서는 계산 량을 줄이고, 모든 부분에 대하여 모멘트를 계산한 경우와 비슷한 결과를 도출하기 위하여 FSR을 이용한 방법의 결과를 기준으로 비교하고 가장 영향이 많은 머리 부분의 각속도와 가속도를 측정하여 ZMP에 적용하였다.

가속도와 ZMP의 관계는 그림 2에 보인 것과 같다. ZMP가 위치하는 지점은 진행방향으로 a의 가속도를 가질 때 작용하는 힘의 반작용과 높이 H에 따라 결정된다. Q는 계획상의 ZMP로서 로봇이 임의의 가속도 a를 가질 때의 ZMP가 된다. 반대로 말하면 계획상의 ZMP인 Q는 가속도의 변화에 따라 그 값을 역으로 구할 수 있다.

그림 2에서 반작용에 해당하는 힘은  $ma + mg = N$ 으로 나타낼 수 있다. 가속도에 의해 작용하는 힘이 균형을 이루므로 계획상의 ZMP인 Q가 로봇의 발바닥 내에 존재하면 무게중심이 지지하는 발의 내부에 존재하지 않거나, 또는 움직이는 과정 중에도 로봇은 균형을 유지 할 수 있을 것이다.

또한 Q점이 지지하는 발의 앞이나 혹은 뒤에 있는 경우에는 무게중심이 발의 내부에 존재하더라도 Q가 위치하는 지점의 반대 방향으로 로봇은 넘어지게 된다.

높이 H와 ma와 mg가 이루는 각가속도 W를 이용하면 간단한 비례식에 의하여 임의의 가속도에 대한 Q점의 ZMP를 구할 수 있다.

$$QZMP\_X = H \tan WX , \quad (7)$$

$$QZMP\_Y = H \tan WY . \quad (8)$$

식(6)-(7)을 ZMP에 대한 값으로 보면 그림 3과 같이 나타낼 수 있다.

그림 3은 한 주기 보폭에 대한 이상적인 ZMP와 x축과 y축의 계획상의 ZMP를 도식화 한 것이다. 실제 실험에서 각속도 센서와 각 센서를 사용하여 구했기 때문에 그림에서와 같은 결과는 얻지 못하고 센서 측정 시 잡음으로 인하여 이상적인 ZMP의 값에서 흔들리는 값을 얻을 수 있었다. 그러므로 보상과정에서 여러 개의 값을 평균하여 사용하였다.

그림 2와 식(6)-(10)을 이용하여 각속도를 이용한 식으로 변환하면 식(11)-(12)과 같은 식을 얻을 수 있다.

$$a = v^2/r , \quad (9)$$

$$v = r\omega . \quad (10)$$

$$XZMP = H^2 \times \omega X^2 / g , \quad (11)$$

$$YZMP = H^2 \times \omega Y^2 / g . \quad (12)$$

여기에서, g는 중력 가속도  $\omega$ 는 각가속도 H는 높이 이다.

### V. 실험 결과

본 논문에서는 로봇의 궤적생성, 모터의 각도 및 속도제어, 보상 알고리즘 등을 모두 DSP를 이용하여 구현 하였으며 컴퓨터는 모니터링과 시뮬레이션에 사용하였다. 인간의 다른 지시가 없어도 로봇 스스로 행동하는 로봇의 그 첫 단계로 하나의 DSP를 이용한 로봇으로 구성 하였다.

FSR센서를 이용한 로봇의 단점, 즉 로봇 발바닥 구조의 복잡성과 여러 개의 FSR을 사용할 때 감도 오차 그리고 발바닥이 지면에 닿아야만 측정가능 등에 대한 개선의 한 방안으로 가속도를 이용한 ZMP 보상 방법을 적용하였다.

실험의 순서는 먼저 궤적 생성 후 보상이 없는 경우에 대한 실험을 하였고 다음으로 기울기 센서에 의한 각 보상, 마지막으로 각속도를 이용한 ZMP 보상

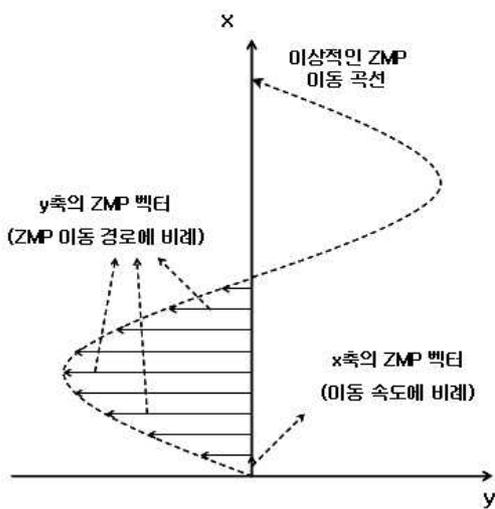


그림 3. x, y 축의 ZMP  
Fig 3. ZMP of x and y axis

을 적용하였다. 보행 시 보폭을 5cm, 한걸음 걷는 시간을 약 2초 정도로 고정 하여 위의 경우에 대한 실험을 하였다.

5.1 보상이 없는 보행

그림 4와 5는 각각 정지 상태와 보상이 없는 상태에 대한 x, y 축에 대한 각과 ZMP를 측정된 그래프이다.

그림 4 (a)-(b) 그림은 y축은 100ms 시간 간격으로 측정된 각의 변화와 그때의 ZMP 변화이다. 어느 정도 잡음이 존재하고 ZMP값이 각속도 변화에 대하여 민감하게 변하므로 보상 시에는 리미터와 오프셋 값을 사용하였다.

그림 5 (b)에서 ZMP가 불안하여 보행이 원활하지 않음을 보여주고 있다.

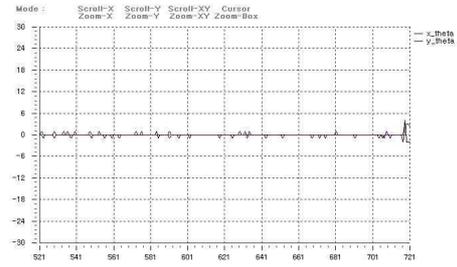
5.2 기울기 센서를 이용한 자세 제어

기울기 센서로부터 받은 센싱 값은 잡음이 포함하고 있어 그대로 로봇제어에 사용하기는 불가능하다. 그러므로 일정 수의 값을 읽어 그 값을 평균하여 사용한다. 이 때 많은 수의 값을 평균하여 사용하면 잡음 제거 효과가 커지지만 처리 속도가 늦어져 로봇의 반응속도가 떨어지고, 작은 수의 값을 평균으로 하면 잡음 제거의 효과가 떨어지므로 평균을 취하는 수가 중요하게 된다. 실험에서 보행주기가 2초 이고, 사용되는 모터의 반응 속도를 고려하여 10개의 개수로 평균을 취하여 사용하였다.

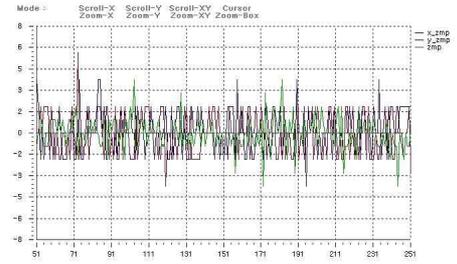
또한 센싱 과정에서 DSP의 레지스터를 이용하여 센서 값을 읽을 때는 범위를 크게 하고, 적용 할 때는 범위를 줄여서 잡음에 대한 오차를 줄였다.

그림 6은 기울기 센서를 이용한 자세 제어의 x, y 축 각과 ZMP 변화를 보여준다.

ZMP그래프인 그림 5 (b)와 그림 6 (b)을 비교해 보면 기울기 센서를 이용한 상체의 움직임과 발목의 보상을 통하여 보행이 개선되었음을 알 수 있다. 실제 보행의 형태는 유사 하였으나 상체에 대한 흔들림이 줄어들어 ZMP값은 보상이 없는 경우에 비해 발의 중심이 있는 곳에 근접 하고 있다.

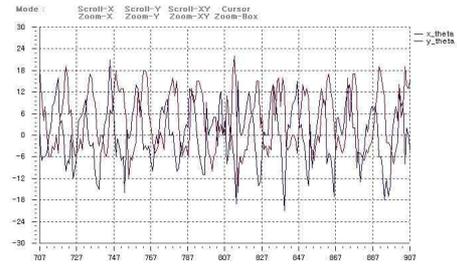


(a) 정지상태의 x, y 축의 각도

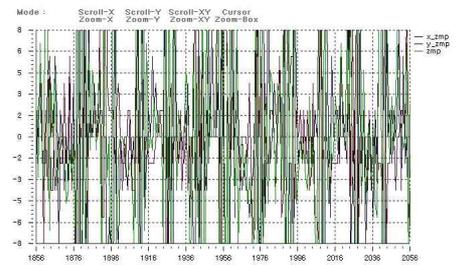


(b) 정지상태의 ZMP

그림 4. 정지상태의 각과 ZMP  
Fig 4. Angle and ZMP for stop state.

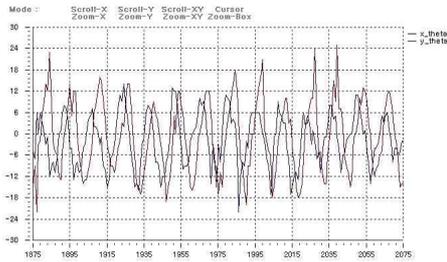


(a) 보행상태의 x, y 축의 각도

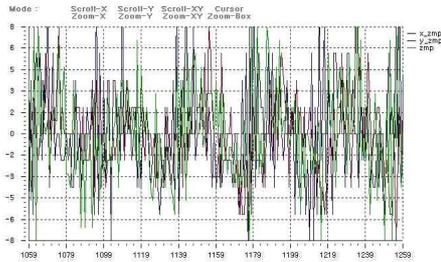


(b) 보행상태의 ZMP

그림 5. 보상이 없는 보행  
Fig 5. Walking which is not compensation.



(a) 보행상태의 x, y 축의 각도



(b) 보행상태의 ZMP

그림 6. 기울기 센서를 이용한 보상  
Fig 6. Compensation using Tilt sensor.

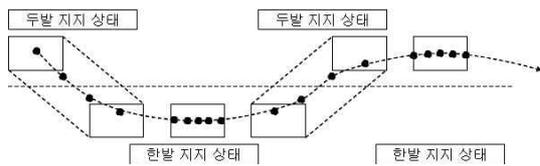


그림 7. ZMP 보행  
Fig 7. ZMP walking.

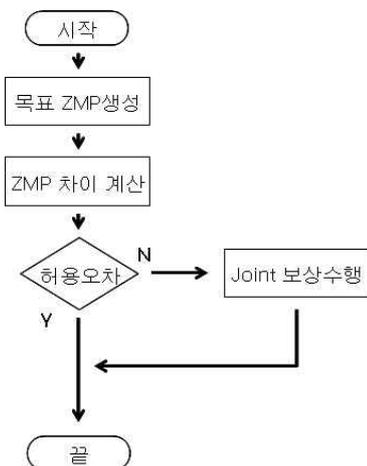


그림 8. ZMP 보상  
Fig 8. Compensation of ZMP.

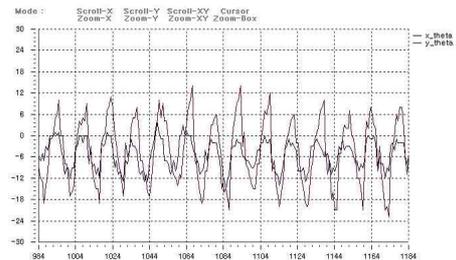
### 5.3 각속도 보상을 이용한 보행

ZMP는 실제 힘이 작용하는 모멘트의 합이 0인 점이다. 즉 로봇에 작용하는 중력과 움직일 때 발생하는 모든 모멘트를 고려하였을 때 그 합이 0인 지점을 말하는 것으로 ZMP는 로봇이 움직일 때 두발 또는 한발 지지 상태에서 발바닥 내에 위치해야만 균형을 유지 할 수 있다.

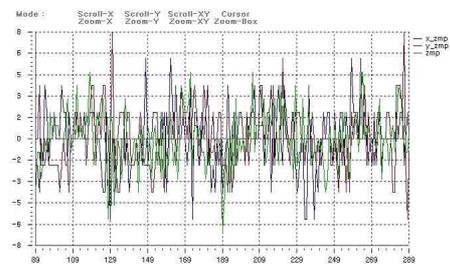
그림 7은 이상적인 보행 시 ZMP변화이다.

그림 8과 같은 보상알고리즘을 이용하여 이상적인 ZMP를 기준으로 목표 ZMP를 생성하고 허용오차를 초과하면 보상한다.

모든 실험에서 걷는 속도를 저속으로 하였으며 그림 9 (b)에서 앞의 두 경우에 비해 ZMP가 안정되었음을 보여 준다. 또한 그림 9 (a)에서 각도가 한쪽으로 조금 치우쳐 있음에도 불구하고 ZMP는 일정한 것을 보았을 때 각속도의 변화에 따라서 ZMP가 변화됨을 알 수 있다.



(a) 보행상태의 x, y 축의 각도



(b) 보행상태의 ZMP

그림 9. ZMP 보상  
Fig 9. Compensation of ZMP.

## VI. 결 론

본 논문에서 사용된 로봇은 높이 30cm 무게 약 1.5kg 정도의 소형 로봇이다. 로봇의 다리 구조는 Hip joint에서 1 자유도를 뺀 총 10 자유도이며, 3차 스플라인 보간법을 이용하여 궤적을 생성하였고 그 궤적을 이용하여 로봇의 걸음새를 구현하였다. 기울기 센서와 각속도 센서를 이용하여 기본적인 자세 제어와 ZMP 보상을 하였다.

FSR을 이용한 로봇의 구조의 단점을 개선하기 위한 방안으로 각속도를 이용한 ZMP 보상 방법을 이용하였으며, 유사한 결과를 얻을 수 있었다. 그리고 로봇 스스로 움직이는 개념으로 컴퓨터에서는 모니터링과 시뮬레이션을 실행 하였고, 로봇 움직임에 대한 연산 과정은 DSP를 이용하였다.

실험은 보상이 없는 경우, 기울기 센서를 이용한 자세제어, 각속도 보상을 이용한 보행의 3가지 경우에 대하여 실행하였다. 실험 결과의 비교는 먼저 x, y축의 각도 변화를 조사하고 그때 발생한 ZMP를 이용하여 보행 시 안정도를 판별하였다. 각속도 보상을 이용한 보행은 앞의 두 경우 보다 개선되었고, 이는 측정된 ZMP의 변화 그래프에서 확인할 수 있다. 또한 이것은 서론에서 제안한 FSR을 이용한 보상방법의 단점에 대해 한 가지의 대안으로 사용될 수 있음을 보여준다.

## 감사의 글

본 논문은 2005년도 창원대학교 교내 연구비에 의하여 연구되었음.

## 참 고 문 헌

- [1] 최형식, "인체형 이족보행로봇", *월간자동화기술*, pp108-116, 2001.
- [2] M. Vukobratovic and D. Juricic, "Contribution to the Synthesis of Biped Gait", *IEEE trans. on Bio-Medical Engineering*, Vol. BME-16, No. 1, pp. 1-6. 1969
- [3] 박재호, "A Periodic Gait Algorithm for Biped Robot

based on a Human Walking Pattern", 한국과학기술원 전자전산학과 석사학위 논문, 2001.

- [4] 김정훈, "인간형 이족 보행 로봇의 동적 걸음새 구현에 관한 연구", 한국과학기술원 기계공학과, 석사학위 논문, 2004.
- [5] 문춘경, "힘 감지 저항을 이용한 이족 보행 로봇의 ZMP 보상법", 한국과학기술원 전자전산학과, 석사학위 논문, 2003.
- [6] 김태욱, "이족 보행로봇을 위한 ZMP 기반의 동작 패턴 생성과 실시간 자세제어", 한국과학기술원 전자전산학과, 석사학위 논문, 2003.
- [7] J. Furusho and A. Sano, "Sensor-Based Control of a Nine-Link Biped", *Int. J. of Robotics Research*, Vol. 9, No. 2, pp. 83-98, 1990
- [8] Y. Fujimoto, et al. "Robust Biped Walking with Active Interaction Control between Foot and Ground", *Proc. of ICRA*, pp. 2030-2035, 1998

## 박재문 (朴載紋)



2005년 2월 : 창원대학교 전자공학과 (공학사)

2007년 2월 : 창원대학교 전자공학과 (공학석사)

관심분야 : 모터제어, 로봇제어 시스템, 로봇제어 알고리즘

## 박승엽 (朴勝燁)



1981년 2월 : 고려대학교 전기공학과(공학사)

1984년 2월 : 고려대학교 자동제어(공학석사)

1988년 2월 : 고려대학교 자동제어(공학박사)

1988년 ~ 현재 : 창원대학교 교수

1993년 ~ 1994년 : 미국 텍사스 대학 교환교수

2002년 ~ 2003년 : 고려대학교 연구교수

관심분야: 제어시스템 해석 및 설계, DSP응용제어기 설계, 인공지능응용, 고장검출 및 진단, VHDL을 이용한 FPGA 설계

## 고봉진 (高鳳震)



1986년 2월 : 한국항공대학교 통신공학과(공학사)

1988년 2월 : 한국항공대학교 전자공학과(공학석사)

1995년 2월 : 한국항공대학교 전자공학과(공학박사)

1994년 3월 ~ 1996년 8월 : 인하공전 통신과(조교수)

1997년 : 한국전자통신연구원(ETRI) 초빙연구원

1996년 8월 ~ 현재 : 창원대학교 전자공학과(교수)

관심분야: 이동통신, USN/RFID, OFDM