

신경망을 이용한 2족 보행로봇의 자세 제어

김낙현, 이현구, 김동원, 박귀태
고려대학교 전기공학과

Improvement of Stability of Biped Walking Robot
Using Neural Network

Nack-hyun Kim, Hyun-goo Lee, Dong-won Kim, Gwi-tae Park
Department of Electrical Engineering, Korea University

Abstract - 2족 보행로봇은 그 구조적인 특성상 인간 생활환경에 적용이 용이하며 바퀴형 로봇이 이동하기 어려운 환경에서도 이동이 가능하다. 그러나 2족 보행로봇은 높은 자유도와 직렬형 링크 구조로 인해 안정도 해석과 제어가 어려운 점이 있으며 이는 로봇을 제작하는데 있어 난점으로 작용한다.

본 연구에서는 로봇의 발바닥에 압력센서를 설치하여 ZMP(Zero moment point)를 측정하여 안정도를 판별하고 신경망 이론을 이용하여 보행 안정도를 개선하도록 로봇의 자세를 제어하였다.

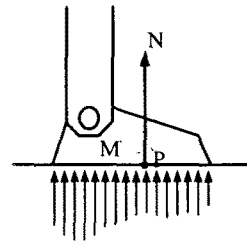


그림 2.1 ZMP의 개념

1. 서 론

2족 보행로봇은 인간 생활환경에 적용이 용이하며 계단이나 문턱과 같은 거친 지면에서도 이동이 가능하다. 또한 높은 자유도로 인해 다양한 일을 수행할 수 있으며, 엔터테인먼트 로봇, 인력 보조 로봇, 서비스 로봇 등 많은 분야에서 활용되고 있다. 그러나 2족 보행로봇은 높은 자유도와 직렬형 링크 구조로 인해 안정도 해석과 제어가 어려운 점이 있으며 이는 로봇을 제작하는데 있어 난점으로 작용한다[9].

최근의 보행로봇의 안정도를 개선하기 위한 연구는 최적화된 보행 패턴을 생성하거나 자세 제어를 중심으로 진행되었다[1-4]. 그러나 보행 패턴의 생성은 주로 시뮬레이션에 한정되어 있으며, 로봇의 자세 제어 또한 기구적인 오차를 고려하지 않기 때문에 오차가 적은 고성능의 로봇을 필요로 한다.

본 논문에서는 2족 보행로봇을 제작하고 신경망을 이용하여 로봇의 자세 제어를 구현하였다. 로봇의 발바닥에 압력센서를 부착하여 ZMP를 측정하여 로봇의 안정도를 판별하고 이를 개선하도록 로봇의 자세 제어를 구현하였다. 2족 보행로봇의 자세 제어에 신경망을 이용할 경우 로봇의 안정도에 대한 정확한 모델링이 필요없으며, 기구적인 요인에 의해 생기는 오차 또한 로봇 스스로 학습할 수 있기 때문에 사용자가 이를 고려하지 않아도 된다. 로봇의 안정도는 측정된 ZMP를 이용해 판별하고 이를 통해 신경망을 이용한 제어 성능을 검증하였다.

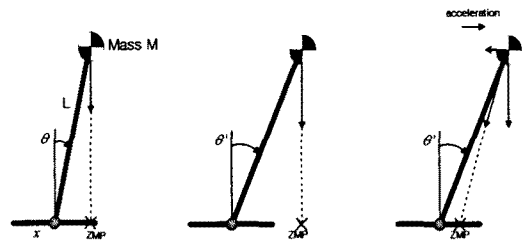
2. 본 론

2.1 ZMP의 개념

로봇의 발바닥에 분포하는 지면으로부터의 반력은 임의의 점 P에서 수직항력 N과 모멘트 M의 합력으로 대체될 수 있다. 여기서 ZMP는 모멘트 M이 0이 되는 점이다. 수직항력 N은 중력방향이며, 모멘트 M은 지면과 평행한 방향으로 작용한다. 그림 2.1은 이러한 ZMP의 개념을 보여주고 있다[5].

ZMP는 2족 보행로봇의 안정도를 판단하는 중요한 기준이 된다. 로봇이 넘어지지 않기 위해서는 ZMP의 위치가 항상 로봇이 지면을 지지하는 면적의 내부에 있어야 한다. 또한 ZMP의 위치가 지지면적의 중앙에 올수

록 로봇이 안정하게 된다. 만약 ZMP가 지지면적의 밖에 있게 되면 지지면적의 가장자리에는 모멘트가 존재하게 되어 로봇이 넘어지게 된다. ZMP의 위치는 로봇의 무게중심의 위치와 가속도 및 외부에서 가해지는 힘을 이용하여 구할 수 있다. 그림 2.2는 2족 보행로봇을 독립자로 간략화하고 ZMP의 위치에 따른 안정도의 예를 들었다.



(a)정적 안정 (b)정적 불안정 (c)동적 안정
그림 2.2 ZMP의 위치에 따른 안정도

그림 2.2(a)에서 로봇에 가해지는 외력이 없을 경우 ZMP의 위치는 무게중심에 작용하는 중력의 투영점이 되며, 이 점의 위치가 지지면적 내에 있을 경우 로봇이 넘어지지 않고 안정하다. 그림 2.2(b)의 경우 각 θ' 의 크기가 커져서 로봇의 무게중심의 위치가 지지면적 밖으로 나갔을 경우 ZMP의 위치가 지지면적 밖에 있게 되어 로봇이 불안정해진다. 만약 로봇 전체가 그림 2.2(c)와 같이 오른쪽으로 가속하고 있다면 로봇의 무게중심은 왼쪽으로 힘을 받게 된다. 이때 로봇의 무게중심에 작용하는 힘과 중력의 합력의 방향이 지면과 만나는 점이 ZMP의 위치가 되며, 그림 2.2(c)와 같이 ZMP의 위치가 지지면적 내에 있는 경우는 로봇이 안정하다 할 수 있다.

그림 2.3은 실제 인간이 보행을 할 때의 ZMP경로를 단순화하여 나타낸 그림이다. 발바닥 사이의 화살표는 ZMP의 경로 및 이동 방향을 나타내며, 점선은 양 발바닥의 가장자리를 연결한 것으로 두 발로 지면을 지지하고 있을 경우의 지지 면적에 해당한다.

실제 인간이 보행을 할 경우 ZMP의 위치는 ①, ②,

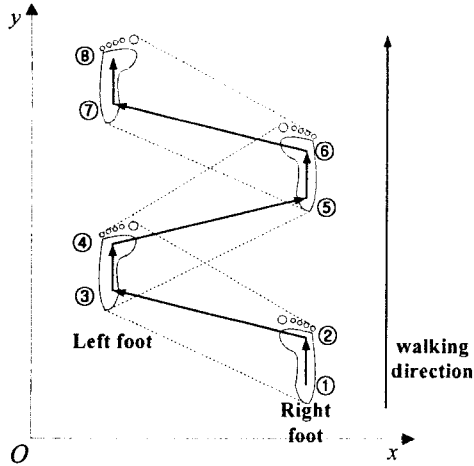


그림 2.3 인간 보행시의 ZMP경로

③, ... ⑦, ⑧의 순서로 이동한다. 여기서 ①~②에 해당하는 구간은 오른발로만 지면을 지지하고 있을 경우이며 ZMP의 위치는 오른발 면적 내에 있게 된다. ②~③에 해당하는 구간은 양 발로 지면을 지지하고 있을 경우이다. 이때의 ZMP의 위치는 양 발의 가장자리를 연결한 면적 내에서 오른발에서 왼발로 이동한다. 그 이후의 ④, ⑤, ⑥, ⑦, ...의 과정도 이러한 과정을 반복하게 된다. 즉, 인간이 보행할 시에 ZMP의 위치는 양 발 사이를 이동하면서 앞으로 나아가게 된다. 본 논문에서는 로봇의 안정적인 보행을 위해 ZMP가 그림 2.3과 비슷한 그림 2.4와 같은 사인파 모양을 따라서 이동하도록 로봇을 제어한다.

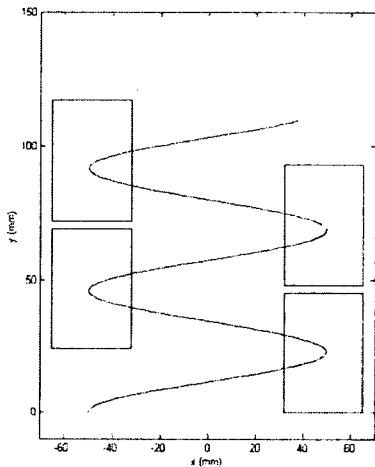


그림 2.4 로봇의 이상적인 ZMP 경로

ZMP의 위치는 각 링크의 질량과 가속도를 이용해 구할 수도 있지만 직접 로봇의 발바닥의 압력 분포로부터 직접 측정할 수도 있다. 그림 2.5는 발바닥에 부착된 압력센서의 위치벡터 r_i 과 각 압력센서에서 측정된 압력 값 f_i 를 나타내고 있다. 이와 같이 ZMP의 위치는 압력센서의 위치와 측정된 압력값을 이용하여 식(2.1)에 의해 간단히 구할 수 있다.

식(2.1)에서 P 는 ZMP의 위치이며 r_i 과 같이 바닥에서

의 x 좌표와 y 좌표로 이루어진 2차원 벡터로 주어진다. 각 압력센서에서 측정된 압력값 f_i 는 스칼라이며 압력들의 상대적인 값만 알면 되기 때문에 단위를 환산할 필요는 없다.

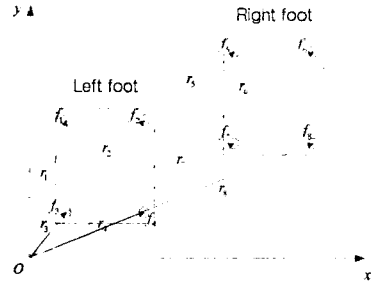


그림 2.5 로봇 발바닥의 압력센서

$$P_{ZMP} = \frac{\sum_{i=1}^8 f_i r_i}{\sum_{i=1}^8 f_i} \quad (2.1)$$

2.2 로봇과 센서의 설계

제작된 로봇의 링크/조인트 구조는 그림 2.6과 같다. 각 링크는 두꺼운 실선으로 표시했으며, 회전 조인트는 원통으로 표시하였으며 회전축은 점선으로 표시하였다. 하체는 12자유도를 가지며 다리 하나당 6자유도를 가진다. 각 관절은 골반이 3자유도를 가지며 무릎 1자유도, 발목에 2자유도를 가지는 보편적인 2족 보행로봇의 구조이다. 상체는 7자유도로 되어있고 보행 이외의 동작을 구현하기 위해 제작하였다. 이 논문에서는 보행중 상체를 사용하지 않기 때문에 상체 동작은 고려하지 않는다.

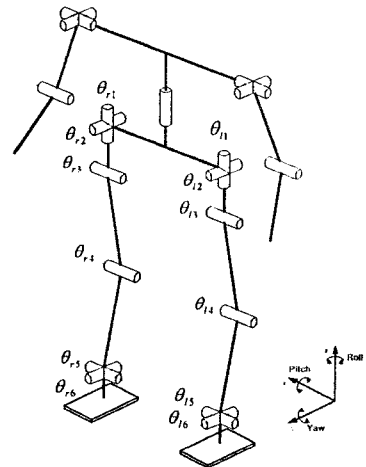


그림 2.7 제작된 로봇의 링크/조인트 구조

로봇은 16bit, 40Mhz의 ARM7 코어 프로세서로 제어되고 있으며 내부에 내장되어 있는 AD컨버터를 사용하여 발바닥의 압력센서로부터 입력된 값을 읽어들이고 있다. 액추에이터로는 13kg·cm의 토크를 갖는 RC서보모터를 사용한다. RC서보모터는 내부에 DC모터와 감속기어, 제어기가 패키지 형태로 내장되어 있어서 외부에서 전원과 제어 신호를 넣어주면 원하는 각도를 유지하는

모터이다. RC서보모터를 이용하면 별도의 제어기나 드라이버 회로를 구성할 필요가 없기 때문에 로봇 전체의 구조가 간단해지며, 제작이 용이한 장점이 있다. 그러나 RC서보모터는 외부적으로는 오픈루프(open-loop)로 제어되고 있기 때문에 현재 모터가 어떤 상태에 있는지 알 수가 없으며, 부하의 크기에 의해 출력에 변형이 생기는 단점이 있다. 이러한 특성 때문에 동역학 해석을 통해 ZMP의 위치를 구하기에는 오차가 커지게 된다. 이로 인해 로봇의 발바닥에서 직접 ZMP경로를 측정하는 방법을 선택하였다.

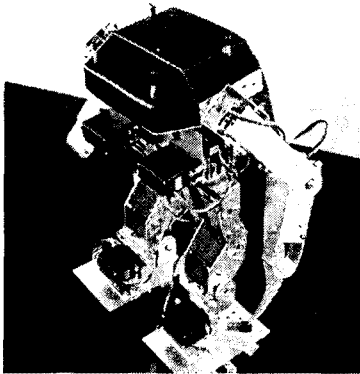


그림 2.8 제작된 2축 보행로봇

로봇의 발바닥에 부착되는 센서는 Force sensing resistor(FSR)를 이용하였다. 이는 센싱 부위의 압력이 변함에 따라 저항값이 변하는 소자이다. 실험에서 사용된 FSR은 가능 감지 범위 내에서는 저항이 선형적으로 변하기 때문에 간단한 회로를 통해서 압력을 감지할 수 있다. 그림 2.8은 로봇이 직진 보행을 하면서 측정된 ZMP의 경로이다.

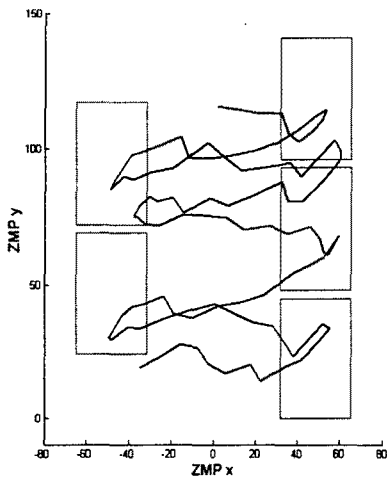


그림 2.9 측정된 로봇의 ZMP 경로

그림 2.8에서 알 수 있듯이 로봇의 ZMP의 경로는 매우 불규칙하며 로봇이 불안정해 질 수 있음을 알 수 있다. 본 연구에서는 이러한 방법을 통해 얻어진 ZMP의 경로를 이용해 로봇의 안정도를 판별하고, 이를 개선하기 위해 ZMP의 위치가 그림 2.4와 같은 경로를 따라가도록 로봇의 자세를 제어하고자 한다.

2.3 신경망을 이용한 자세 제어

인공 신경망(Artificial neural network)은 인간의 뇌 구조를 모델링한 알고리즘으로 패턴 인식이나 시스템 모델링, 제어 분야에서 많이 활용되고 있다[7,8]. 신경망은 경험을 통해 학습하고 이러한 과정을 통해 얻어진 지식을 새로운 상황에 일반화시킬 수 있는 특성이 있다. 이러한 특성에 의해서 수학적으로 나타내기 어려운 비선형적이거나 불확실한 시스템을 모델링하거나 제어하는데 적합하다.

로봇의 전체적인 동작에 영향을 받지 않고 일반화된 자세 제어가 가능하도록 로봇을 그림 2.9와 같이 측면과 정면에 대해 각각 1자유도를 갖는 도립진자로 간략화하였다.

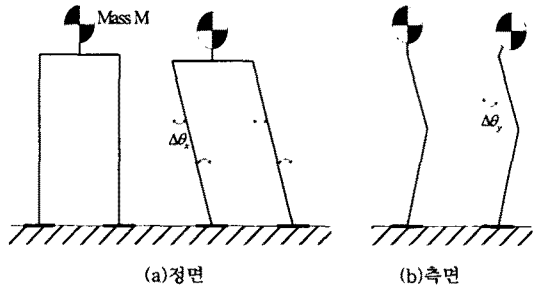


그림 2.10 간략화된 로봇

그림 2.9(a)는 간략화된 로봇의 정면의 모습이다. 여기서 $\Delta\theta_x$ 는 로봇의 좌우 무게중심 이동을 위해 그림 2.6의 조인트 각도인 $\theta_{12}, \theta_{16}, \theta_{23}, \theta_{26}$ 에 더해주는 각도값이다. 골반과 발목의 요우(yaw)에 해당하는 이 조인트들은 로봇이 보행을 할 때 좌우 무게중심 이동을 위한 조인트이다. 직진 보행시 이 네 개의 조인트는 동일한 크기의 각도로 움직이기 때문에 네 조인트에 같은 크기의 $\Delta\theta_x$ 를 적용하여 로봇의 x 축 방향 즉, 로봇의 좌우방향으로 무게중심을 이동하여 ZMP의 위치를 변화시킬 수 있다.

그림 2.9(b)는 간략화된 로봇의 측면의 모습이다. $\Delta\theta_y$ 는 로봇의 앞뒤 무게중심 이동을 위해 그림 2.6의 조인트 각도인 θ_{15}, θ_{19} 에 더해주는 각도값이다. 골반의 피치(pitch)에 해당하는 조인트는 로봇이 보행을 할 때 상체가 항상 수직을 유지하도록 하기 때문에 이 조인트에 같은 크기의 $\Delta\theta_y$ 를 적용하여 로봇의 y 축 방향인 앞뒤 방향으로 무게중심을 이동하여 ZMP의 위치를 변화시키도록 한다.

ZMP와 신경망을 이용한 로봇의 자세 제어 구조는 그림 2.10과 같다. 사용자가 로봇의 보폭(Step length)과 발을 들어올리는 높이(Foot lift height)를 정하면 PC에서 로봇의 보행 패턴을 생성하게 된다. 이렇게 생성된 보행 패턴은 로봇의 메모리에 저장되어 로봇이 이에 따라 동작을 하게 된다. 이러한 동작에 따른 발바닥의 압력의 변화를 8개의 압력센서를 이용해 측정을 하고 ZMP의 위치를 계산해 낸다. 센서를 통해 측정된 ZMP의 위치와 미리 정해져 있는 원하는 ZMP의 위치와의 차이를 에러로 보고, 이를 신경망의 입력으로 넣는다. 신경망에서는 에러를 이용해 현재 로봇의 자세를 어떠한 방향으로 수정해야 할지 $\Delta\theta_x, \Delta\theta_y$ 를 결정하여 현재 로봇의 자세에 수정을 하게 된다.

그림 2.10과 같은 제어기를 구성하기 위해서 ZMP의 x 축 성분과 y 축 성분을 입력으로 갖고, $\Delta\theta_x, \Delta\theta_y$ 를 출력으로 갖는 2입력 2출력의 다층 퍼셉트론(Multi-layer perceptron)을 사용하였으며 역전파(Back-propagation) 알고리즘을 이용하여 학습하였다.

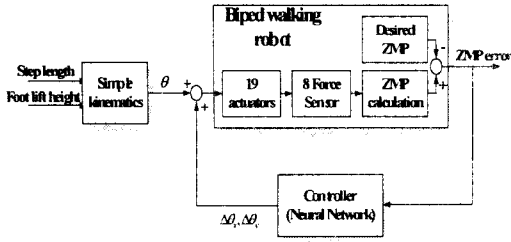
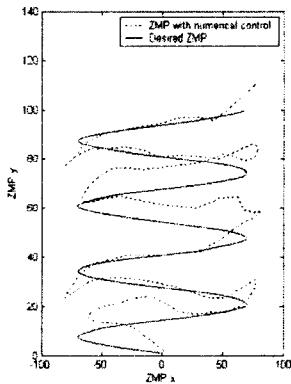


그림 2.13 로봇의 제어 구조

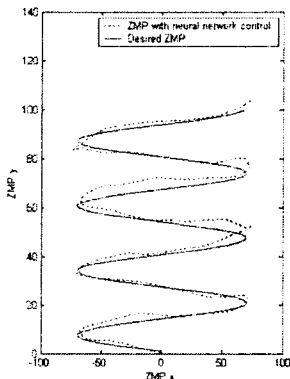
2.4 실험 결과

구현된 로봇은 평지 및 10° 의 오르막과 내리막에서 보행을 하고 ZMP의 위치를 이용해 그 안정도를 판별하였다. 또한 이렇게 해서 얻어진 결과는 로봇의 자세 제어를 하지 않은 경우와, 액추에이터의 변형을 고려하지 않은 동역학 해석에 의한 제어와 비교하여 그 성능을 검증하였다.

그림 2.11은 동역학 해석에 의한 수치적인 제어와 신경망을 이용한 제어를 이용했을 경우 로봇의 ZMP 경로를 2차원 평면상에 나타낸 것이다.



(a) 수치제어



(b) 신경망을 이용한 제어

그림 2.11 평면상의 ZMP 경로

수치적인 제어의 경우 신경망을 이용한 제어와 동일한 방법으로 그림 2.10과 같이 로봇을 독립진자로 단순화하고 상체를 추가적인 링크로 가정하였다. 즉 동역학적인 해석을 이용하여 상체의 질량, $\Delta \theta_x$, $\Delta \theta_y$ 와 ZMP와의

관계를 모델링하여 제어하였다. 그림 2.11에서 실선은 원하는 ZMP의 경로이며 그림 2.11(a)의 점선은 동역학 해석에 의한 자세 제어를 적용했을 경우, 2.11(b)의 점선은 신경망을 이용한 자세 제어를 적용했을 경우의 ZMP 경로를 나타낸다. 그림에서 알 수 있듯이 신경망을 이용해서 제어했을 경우의 ZMP의 경로가 이상적인 ZMP 경로에 훨씬 가까움을 알 수 있다.

그림 2.12는 평지 보행에서의 ZMP 경로의 오차를 시간에 따라 x 축 성분과 y 축 성분으로 나타내었다. 즉 이 그래프가 0에 가까울수록 ZMP 경로가 그림 2.4에 가까우며 로봇이 안정적인 보행을 한다고 할 수 있다.

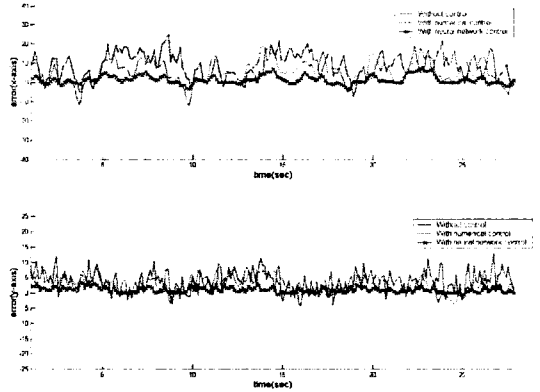


그림 2.12 평지 보행에서의 ZMP 오차

그림 2.12에서 실선은 제어를 하지 않았을 경우의 ZMP 오차이며, 점선은 동역학 해석에 의한 수치적인 제어를 적용했을 경우의 ZMP의 오차, x표시가 마킹된 선은 신경망을 이용한 자세 제어를 적용했을 경우의 ZMP의 오차이다. 위쪽의 그래프는 x 축 성분의 오차이며 아래쪽의 그래프는 y 축 성분의 오차를 나타내고 있다. 그림에서 알 수 있듯이 로봇의 자세 제어를 적용했을 경우 오차의 크기나 변화량이 줄어들었음을 알 수 있으며 신경망을 이용한 제어가 수치적인 제어에 비해 오차의 폭이나 변화량이 더욱 크게 줄어들었음을 알 수 있다.

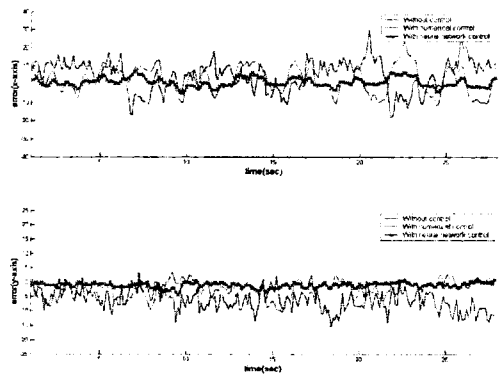


그림 2.13 $+10^\circ$ 경사의 오르막에서의 ZMP 오차

그림 2.13은 로봇이 $+10^\circ$ 경사의 오르막을 보행하면서 측정된 ZMP의 오차를 나타내었다. 제어를 하지 않았을 경우 ZMP의 y 축 성분, 즉 앞뒤방향 성분이 로봇의 뒤쪽으로 치우쳤음을 알 수 있으며 신경망을 이용한 제어 성능이 좀 더 나음을 알 수 있다.

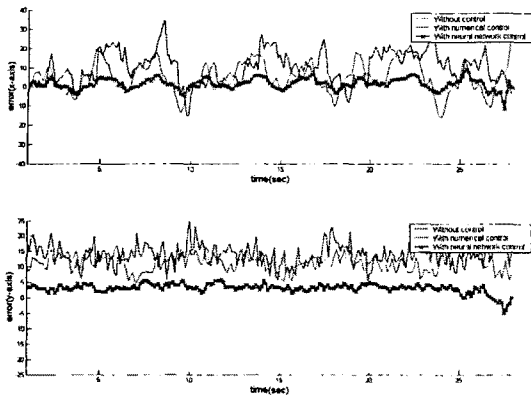


그림 2.14 -10° 경사의 내리막에서의 ZMP 오차

그림 2.14는 -10° 경사의 내리막에서의 ZMP 오차를 나타내고 있다. 역시 제어를 하지 않았을 경우 ZMP의 y축 성분이 로봇의 앞쪽으로 치우쳤음을 알 수 있으며 신경망을 이용한 제어 성능이 좀 더 나음을 알 수 있다.

표 2.1은 제어 성능을 수치적으로 비교하기 위해서 평지와 오르막, 내리막에 대한 ZMP의 오차를 RMSE (Root mean square error)값으로 나타내었다. 표 2.1의 값을 통해 신경망을 이용한 제어는 동역학 해석을 이용한 제어에 비해 성능이 우수함을 알 수 있다.

표 2.1 지면의 기울기에 따른 RMSE

| | | 제어 없음 | 수치 제어 | 신경망 제어 |
|-----------|----|---------|---------|--------|
| 평면 | x축 | 10.7973 | 7.3230 | 2.7914 |
| | y축 | 5.0807 | 3.2781 | 1.4495 |
| 오르막(+10°) | x축 | 9.6741 | 7.0494 | 2.9514 |
| | y축 | 11.7984 | 3.5885 | 1.4923 |
| 내리막(-10°) | x축 | 13.0752 | 8.6287 | 3.5209 |
| | y축 | 19.3734 | 10.7212 | 3.8024 |

3. 결 론

본 연구에서는 2족 보행로봇을 제작하고 신경망을 이용한 자세 제어를 구현하였다. 구현된 로봇은 평면 및 경사면에서 보행을 하고 동역학 해석에 의한 제어 결과와 비교하여 그 성능을 검증하였다. 이를 통해 신경망을 이용한 제어는 2족 보행로봇의 안정도 개선에 좋은 효과를 보이는 것을 알 수 있었다.

제작된 로봇은 발바닥에 압력센서를 부착하여 직접 ZMP의 위치를 측정하고 이를 이용해 로봇의 안정도를 판별하였다. 이렇게 판별된 안정도와 로봇의 자세와의 관계를 신경망을 이용해 학습하고 안정도를 개선할 수 있도록 로봇의 자세를 제어하였다. 이렇게 학습된 로봇은 평지 보행 및, 오르막, 내리막, 측방향 경사면에서 보행을 하고 안정도를 측정하였다. 또한 동역학적인 해석에 의한 제어와 비교하여 그 성능의 우수성을 검증하였다.

신경망을 이용하여 로봇을 제어할 경우 안정도와 자세의 관계를 로봇 스스로 학습하기 때문에 로봇에 대한 정확한 모델링이 필요없게 된다. 또한 로봇의 기구적인 오차 역시 신경망에 의해 학습되기 때문에 기구적인 부분에 어느정도 오차가 있어도 안정적인 보행을 구현할 수 있게 된다. 이로 인해 로봇의 제작 난이도를 줄일 수 있

고 낮은 가격의 액추에이터나 부품을 사용할 수 있게 되기 때문에 로봇의 제작 기간이나 제작비용을 절감할 수 있게 된다.

[참 고 문 헌]

- [1] D. Ito, T. Murakami, K. Ohnishi, "An approach to generation of smooth walking pattern for biped robot", International Workshop on Advanced Motion Control, pp. 98 - 103, July 2002.
- [2] W. T. Miller III, "Real time neural network control of a biped walking robot", Control Systems Magazine, Vol. 14, Issue 1, pp.41 48, Feb. 1994.
- [3] A.L. Kun, W.T. Miller III, "Control of variable speed gaits for a biped robot", IEEE Robotics & Automation Magazine, Vol. 6, Issue 3, pp. 19 29, Sept. 1999.
- [4] D. Katic, M. Vukobratovic, "Intelligent soft computing paradigms for humanoid robots", IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and System, Vol. 3, pp.2533 2538, Sept - Oct. 2002.
- [5] K. Erbatur, A. Okazaki, K. Obiya, T. Takahashi, A. Kawamura, "A study on the zero moment point measurement for biped walking robots", International Workshop on Advanced Motion Control, pp.431 436, July 2002.
- [6] John J.Craig, Introduction to Robotics Mechanics and Control, Silma Inc., 1989.
- [7] Simon Haykin, "Neural Networks a Comprehensive Foundation", Prentice Hall, 1999.
- [8] H. Tsoukalas, E.Uhrig, "Fuzzy and Neural Approaches in Engineering", John Wiley & Sons, Inc., 1997.
- [9] Hirai, K., et al, "The development of Honda humanoid robot", Proceedings of ICRA 2:1321 1326, 1998.