

두 팔 달린 두 바퀴 형태의 모바일 역진자 시스템의 신경회로망 제어

Neural Network Control of a Two Wheeled Mobile Inverted Pendulum System with Two Arms

노진석 · 김현욱 · 정 슬*

Jin Seok Noh, Hyun Wook Kim and Seul Jung

지능 시스템 및 감성공학 실험실

충남대학교 메카트로닉스공학과

요 약

본 논문에서는 밸런싱 메커니즘의 두 바퀴 형태의 이동로봇(Two Wheeled Mobile Robot:TWMR)을 구현하고 제어한다. TWMR은 역진자 시스템과 이동로봇을 합친 모바일 역진자 구조로 기존의 막대 형태의 진자대신 두 팔 달린 로봇 형태를 나타낸다. 각도와 위치에 대한 동시제어에 있어 외란에 대한 강건성을 부여하기 위해 RBF 신경회로망 제어 방식을 사용한다. 신경회로망 제어 방식으로는 입력보상 방식(RCT)을 사용하여 제어기의 성능을 실험을 통해 검증한다. 또한 원격으로 제어가능하게 하도록 시스템을 구현하여 실험하였다.

키워드 : 두 바퀴 구동 역진자 시스템, 신경회로망 제어, RCT

Abstract

This paper presents the implementation and control of a two wheeled mobile robot(TWMR) based on a balancing mechanism. The TWMR is a mobile inverted pendulum structure that combines an inverted pendulum system and a mobile robot system with two arms instead of a rod. To improve robustness due to disturbances, the radial basis function (RBF) network is used to control an angle and a position at the same time. The reference compensation technique(RCT) is used as a neural control method. Experimental studies are conducted to demonstrate performance of neural network controllers. The robot are implemented with the remote control capability.

Key Words : Two wheeled mobile robot, neural network control, RCT

1. 서 론

이동로봇은 산업로봇과 달리 이동할 수 있다는 큰 장점이 있기 때문에 응용분야가 넓고 우리 실생활에 가장 밀접하다. 이동 로봇의 경로 생성(path planning)과 경로 추종(path tracking)은 많은 연구가 진행되어 왔으며, 이를 이용한 장애물 회피(avoid obstacle)에 관한 다양한 방법들이 제시되고 있다. 연구용 및 산업용으로 개발되는 이동 로봇 뿐만 아니라 가정용 또는 오락용으로의 로봇 개발이 활성화되면서 로봇의 이동 성능 향상을 위한 동역학적인 제한 조건을 고려하여 최적의 이동 성능을 끌어내기 위한 연구가

요구되고 있다.

최근에는 두 바퀴 형태의 역진자 이동로봇에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다[1-9]. 두 바퀴로 된 이동로봇의 장점은 좁은 공간에서의 이동성이 매우 좋다는 것이다. 또한 둔턱과 같은 낮은 장애물에 걸리지 않고 넘어 갈 수 있는 능력이 있다. 최근에는 일인용 운반 수단으로 널리 사용되고 있다[1].

일반적인 역진자 시스템은 고정된 프레임의 역진자 시스템으로 이동로봇 형태의 역진자 시스템보다는 불확실성이 상대적으로 작기 때문에 제어가 쉽다. 이동로봇 형태의 역진자 시스템의 제어가 어려운 이유는 응답이 빨라야 하고 두 바퀴의 균형이 맞아야 각도와 위치의 동시제어가 가능하기 때문이다[2-5]. 위치제어 뿐만 아니라 접촉환경에서 두 바퀴로 외부 힘에 대한 균형을 제어하고자 하였다[6,7]. 또한 균형을 잡기위한 센서의 데이터 처리가 중요한데, 자이로 센서의 드리프트 문제를 해결하고자 하였다[8,13].

본 연구의 선행연구로서, 이동로봇 형태의 역진자에 대한 결과를 실험을 통하여 검증한 바 있다[9]. 기존의 역진자 형태는 균일한 막대 형태의 진자를 사용하여 무게 중심이 가운데로 오도록 설계하여 제어 하여 밸런싱 제어에 초점을

접수일자 : 2010년 1월 13일

완료일자 : 2010년 8월 20일

본 논문의 일부는 본 논문의 일부는 2008년 IEEE Conf. on ROBIO에서 발표되었습니다.

* : Corresponding author

감사의 글 : 본 연구는 교육과학기술부 특정기초사업과 지식경제부 융복합형 로봇 전문인력양성사업의 지원으로 연구되었으며, 이에 감사를 드립니다.

맞추었다[9]. 후에 막대기 형태의 역진자 시스템을 균형제어 뿐만 아니라 위치를 제어하여 움직이면서 균형을 유지하도록 제어를 하였다[12].

본 논문에서는 새롭게 하드웨어를 구현하여 막대기 대신에 두 팔이 달린 복싱로봇의 상체를 제어하고자 한다. 일반적인 형태의 막대기를 복싱로봇의 상체로 교체하므로 두 팔의 움직임에 의한 무게 중심의 변화가 발생하게 되는데 이는 시스템의 비선형성이 강하게 되어 제어가 어려워진다. 또한 기존의 다층 퍼셉트론 넷의 신경망 대신에 RBF 신경망을 사용하여 빠른 학습의 효과를 이용하였다.

RBF넷은 가중치가 은닉층과 출력층 사이에만 존재하기 때문에 학습속도가 빠르다. 기존의 Multi-Layer Perceptron(MLP) net과 비교하여 PID제어기의 보조제어기 역할로 비선형 시스템에 대하여 불확실성을 보상하게 된다. 또한 기존의 토크에 보상하는 방법과는 달리 기준 입력에 보상하는 입력보상 방식을 RCT(Reference Compensation Technique)를 사용하여 신경회로망의 보상입력을 기준 입력에 더하게 된다[9,11].

신경회로망의 학습 방법은 역전과 알고리즘을 사용하였으며, 학습이 가능하도록 학습 알고리즘을 유도하였다. 시스템의 구성은 두 바퀴를 갖은 모바일 형태의 카트와 복싱로봇의 상체로 구성되어 있다.

이전의 선행 연구에서는 평면 바닥에서 TWMR의 각도를 세우며 원 경로 및 곡선 경로 제어를 하였다[12,13]. 본 논문에서는 TI사의 모터제어용 DSP인 TMS320F2812를 사용하여 내부에 PID제어기를 설계하고 RBF 신경회로망의 역전과 알고리즘 연산을 수행하도록 DSP 기반의 지능제어기를 설계 하였다. 무선통신 모듈인 블루투스를 이용하여 원격으로 제어가 가능하게 구현하여 조이스틱의 위치명령을 주어 복싱로봇 형태의 상체를 세우며 자율 이동제어가 가능하도록 하였다. 추가적으로 시스템 변수의 변화에 따른 PID제어기와 신경망 제어기의 성능을 실험적으로 비교 실험하였다. 또한 경사진 면을 균형을 잡으며 경사면을 올라가는 실험을 함으로써, 비선형 제어기인 신경회로망을 이용하여 비선형성에 대한 강건함과 무선통신을 이용하여 자율적인 위치제어를 하여 실험적으로 성능을 평가하였다.

2. 신경회로망 제어

2.1. Radial Basis Function Network

비선형 제어기인 신경회로망 중 RBF는 수식적으로 설명 가능하고 간단하여 제어 분야에서 많이 사용되고 있으며, 출력부분이 간단히 선형적으로 합하게 되므로 가중치의 수도 MLP 네트워크와 비교하여 매우 적다.

그림 1은 RBF 신경회로망의 구조를 나타내고 있다. RBF의 비선형 함수로는 가오시안(Gaussian) 함수가 가장 널리 사용되고 있으며, 본 논문에서도 가오시안 함수를 사용하여 실험하였다.

은닉층의 노드수는 사용자에 의해서 결정이 되며, 그림 1에서와 같이 은닉층과 출력층 사이에는 서로를 연결해 주는 가중치가 존재한다. 은닉층은 비선형 함수로 구성되어 입력으로의 데이터를 비선형적으로 변환시켜 출력층으로 내보낸다. 입력데이터는 은닉층의 가오시안 함수를 거쳐 가중치와 곱해진 후 출력되어 진다. 이는 RBF 신경회로망이 함수의 근사치를 구하는 방법으로부터 유추되었다는 것을 나타

낸다.

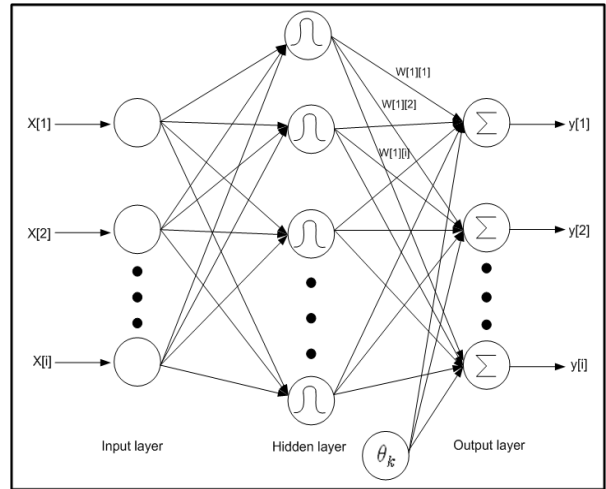


그림 1. Radial Basis Function network 구조
Fig. 1. Radial Basis Function network structure

또한 이러한 간단한 구조로 인해 학습이 빠르다는 장점을 나타내는 것이다. 가오시안 함수의 수식은 다음과 같다.

$$\phi_j(x) = \exp\left(-\frac{|x - \mu_j|^2}{\sigma_j^2}\right), \quad j = 1, 2, \dots, M \quad (1)$$

여기서 ϕ_j 는 비선형 함수로서, 가오시안 함수를 나타낸다. μ_j 는 중심 벡터, 그리고 x 는 입력 벡터이고 σ_j 는 j 번째 공분산이다. 가오시안 함수를 사용하면 거리가 0 일 때 최대 값 1을 출력하게 되고 거리가 멀어지면 0에 가깝게 된다. 은닉층에서는 유클리디안 거리를 계산하며 출력층에서는 w_{jk} 를 곱해 합한다. w_{jk} 는 은닉층과 출력층 사이의 가중치로 사용된다. RBF 신경회로망에서의 출력 층의 출력은 바이어스 가중치 θ_k 를 더한 다음과 같다.

$$y_k = \sum_{j=1}^M w_{jk} \phi_j + \theta_k, \quad k = 1, 2, \dots, N \quad (2)$$

여기서 M 은 은닉층 뉴런의 개수이고, θ_k 는 바이어스 가중치이다.

2.2 입력보상방식

아래의 그림 2는 신경회로망의 제어 방식 중 입력보상 방식을 나타낸다[11].

그림 2의 블록선도를 보면 알 수 있듯이, PID제어기를 기본제어기로 사용하고 비선형 제어기인 RBF 신경망을 이용하여 제어입력을 보상해 주는 시스템이다. 입력보상방식의 장점으로는 공정의 변수나 변화에 대한 불확실성을 보상해 줌으로써 출력 오차를 보상할 수 있다. PID제어기에 사용되는 오차는 $e = q_d - q + \phi_n$ 로 신경회로망의 출력, 즉 보상 신호를 포함한다. 이 보상 신호는 이득값과 곱해져서 제어 입력을 만든다. 따라서 출력오차 $\epsilon = q_d - q$ 를 줄이는 방법으로 학습 알고리즘을 설계한다.

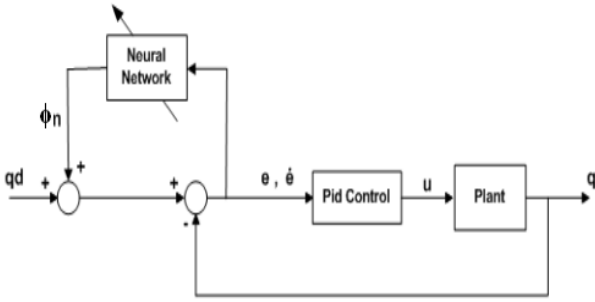


그림 2. RBF 신경회로망을 이용한 입력보상제어
Fig. 2. Reference compensation technique of neural network control

또한 FEL(Feedback Error Learning) 기반의 방식과 구조적으로 비교해서 RCT(Reference Compensation Technique)기반의 방식은 시스템의 내부를 건드리지 않고 외부에서 보상하는 장점이 있다. 입력보상방식은 기준 입력에 신경회로망이 위치하여 마치 선필터(prefilter) 역할을 하는 구조이다. 여기서 신경망의 역할은 기준 입력을 조절하여 시스템의 불확실성을 줄이는 것이다. 조절된 기준 입력 값은 제어기를 거치면서 증폭되어 시스템의 입력으로 들어가게 되는데 이 입력에 보상신호가 포함되어 있는 것이다 [9,11,12].

각도에 대한 제어입력 u_θ 와 Cart의 위치 제어입력 u_x 를 더하여 전체시스템의 입력인 u 를 사용한다. TWMR의 각도에 대한 오차는 다음과 같다.

$$e_\theta = \theta_d - \theta \quad (3)$$

여기서 θ_d 는 TWMR의 원하는 각도이며, θ 는 TWMR의 현재 각도를 나타낸다. 그때의 각도제어에 대한 PID 제어입력은 식 (4)와 같다.

$$u_\theta = k_{p\theta}e_\theta + k_{i\theta} \int e_\theta dt + k_{d\theta} \dot{e}_\theta + k_{p\theta}\phi_1 + k_{i\theta}\phi_2 + k_{d\theta}\phi_3 \quad (4)$$

여기서 $k_{p\theta}$, $k_{d\theta}$, $k_{i\theta}$ 는 각도에 대한 PID Gain을 나타내며 ϕ_1 , ϕ_2 , ϕ_3 는 신경회로망의 출력이다.

TWMR의 위치에 대한 오차는 다음과 같다.

$$e_x = x_d - x \quad (5)$$

이때, x_d 는 cart의 원하는 위치이며, x 는 현재 위치를 나타낸다. 그 때의 위치제어에 대한 PID 입력은 식 (6)과 같다.

$$u_x = k_{px}e_x + k_{ix} \int e_x dt + k_{dx} \dot{e}_x + k_{px}\phi_4 + k_{ix}\phi_5 + k_{dx}\phi_6 \quad (6)$$

여기서 k_{ix} , k_{dx} , k_{px} 는 위치에 대한 PID Gain을 나타내며 ϕ_4 , ϕ_5 , ϕ_6 은 신경회로망의 출력이다.

각도와 위치에 대한 두 가지 PID 제어기의 출력인 u_θ 와 u_x 의 전체 시스템에 대한 입력은 식(7)과 같다[9].

$$u = u_\theta + u_x \quad (7)$$

2.3. 학습방법

RBF 네트워크를 학습하는 방법으로 경사하강 알고리즘의 역전파 알고리즘을 사용한다[12]. 다층 퍼셉트론 넷은 비선

형 함수로 시그모이드 함수를 사용하고 있으나 RBF 넷은 패턴간의 유클리드 거리를 사용한다.

식 (4)(6)에서 학습신호를 다음과 같이 정한다. 학습함수를 다음과 같이 정의 한다.

$$v = v_\theta + v_x \quad (8)$$

여기서, $v_\theta = k_{p\theta}e_\theta + k_{i\theta} \int e_\theta dt + k_{d\theta} \dot{e}_\theta$ 이고, $v_x = k_{px}e_x + k_{ix} \int e_x dt + k_{dx} \dot{e}_x$ 이다. 따라서, 식(7)은 다음과 같다.

$$u = v + \phi_\theta + \phi_x \quad (9)$$

여기서 $\phi_\theta = k_{p\theta}\phi_1 + k_{i\theta}\phi_2 + k_{d\theta}\phi_3$, $\phi_x = k_{px}\phi_4 + k_{ix}\phi_5 + k_{dx}\phi_6$ 이다.

목적함수는 다음과 같이 정의된다.

$$E = \frac{1}{2} v^2 \quad (10)$$

여기서 델타 법칙을 이용하여 각각의 기울기를 구해보면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \Delta w_{jk} &= -\eta_c \frac{\partial E}{\partial w_{jk}} = \eta_c v \phi_j \\ \Delta \theta_k &= -\eta_b \frac{\partial E}{\partial \theta_k} = \eta_b v \end{aligned} \quad (11)$$

$$\begin{aligned} \Delta \mu_j &= -\eta_\mu \frac{\partial E}{\partial \mu_j} = \eta_\mu \phi_j \sum_{i=1}^{N_i} \frac{(x_i - \mu_j)}{\sigma_j^2} \sum_{k=1}^{N_o} v w_{jk} \\ \Delta \sigma_j &= -\eta_\sigma \frac{\partial E}{\partial \sigma_j} = \eta_\sigma \phi_j \sum_{i=1}^{N_i} \frac{(x_i - \mu_j)^2}{\sigma_j^3} \sum_{k=1}^{N_o} v w_{jk} \end{aligned}$$

여기서 η_i 는 학습율이고, N_p, N_o 는 각각 입력과 출력의 개수이다.

3. 실험 환경

3.1 전체 시스템 구성

그림 3은 두 바퀴로 구동하는 TWMR을 나타낸다. 기존의 일반적인 형태인 막대로 되어있던 간단하고 가벼웠던 상체를 두 팔이 달린 복싱로봇 형태의 상체로 만들어 각도제어에 사용하였다.

각도에 대한 신호는 자이로 센서를 사용하였으며, 센서로부터 A/D 처리 후 나오는 각도 값을 받아 제어에 사용하였다. 위치제어에 사용한 센서는 엔코더로부터 나오는 데이터를 처리하여 PWM을 발생시켜 모터드라이브를 통하여 DC 모터에 직접 제어신호를 인가하여 시스템을 제어하게 된다.

그림 4는 전체시스템의 내부 구조로서 크게 제어시스템과 로봇시스템으로 구성되어 있으며, 제어시스템에서는 연산량이 많은 신경회로망을 실시간 처리하여 가중치를 학습하고 PID제어기를 구동하며, 각도제어에 사용하는 자이로 센서의 신호처리, 위치제어에 사용하는 엔코더 센서의 신호처리를 담당하고 PWM을 발생시킨다. 또한 무선 통신을 이

용하여 조이스틱의 데이터를 전송하면 DSP에서 수신하여 위치에 대한 명령을 받아 제어시스템인 TWMR을 제어한다.

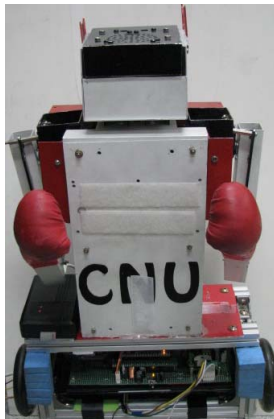


그림 3. 밸런싱 기반의 두 바퀴로봇
Fig. 3. Two wheeled mobile balancing robot

로봇시스템에서는 모터드라이브를 통해 DC모터를 구동하며, 자이로 센서와 엔코더 센서의 신호를 제어시스템의 DSP로 보내어 오차를 계산하여 실시간 제어한다.

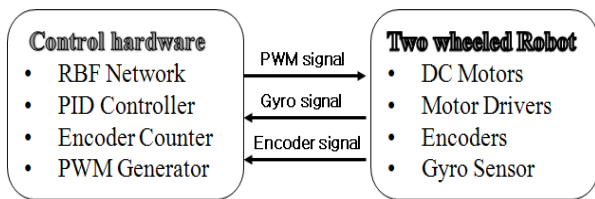


그림 4. 전체시스템
Fig. 4. Overall system

3.2 전체 실험 구조

그림 5는 실제 시스템 구성을 나타내고 있다. 조이스틱의 정보를 ATmega128(AVR)에서 읽어 들여 그 정보를 무선 통신 모듈인 블루투스 모듈로 데이터를 로봇쪽으로 전송한다. 로봇은 전송 받은 데이터 정보를 DSP에서 자율 주행을 위한 위치 목표값으로 사용하게 된다. TWMR에서 측정된 위치 제어에 사용되는 엔코더 신호와 시리얼 통신으로 각도 제어에 사용되는 자이로센서의 신호를 컨트롤러 보드인 DSP에서 받아들여 PID제어기와 신경망제어기의 연산을 수행하여 그 계산된 값으로 DC모터를 제어하게 된다.

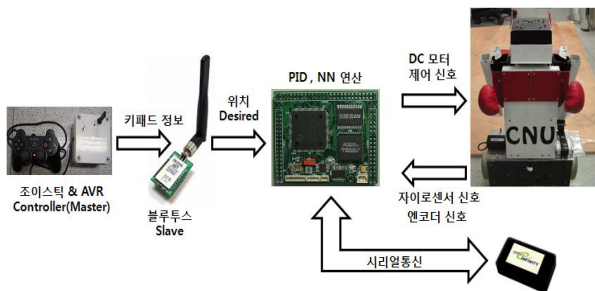


그림 5. 전체시스템의 실험구조
Fig. 5. Overall system structure

3.3 무선 통신을 이용한 조이스틱

그림 6은 무선통신을 이용하여 TWMR의 자율 주행을 할 수 있도록 위치제어를 하기 위한 조이스틱으로, 조이스틱의 키패드에 대한 정보를 받는 AVR 제어기와 무선 통신을 위한 블루투스를 나타낸다. 조이스틱은 5개의 핀으로 DSP와 통신을 하게 된다. 조이스틱의 왼쪽으로는 TWMR의 앞뒤 방향의 위치 명령을 주도록 사용하였고, 오른쪽의 스틱으로는 왼쪽바퀴와 오른쪽바퀴에 대한 조향 각에 대하여 이동하라는 명령을 주도록 사용하였다. 무선방식의 Baud rate는 9600bps 이며 입력전압은 DC 3.3V를 공급한다.



그림 6. 무선통신을 이용한 조이스틱과 제어기
Fig. 6. Joystick and remote controller

3.4 TWMR의 구조

Stand-Alone Type은 TWMR의 로봇 내부에 회로부를 삽입하여 구성하였다. 중앙에 있는 모듈은 TI사의 DSP로서 간단한 PID 제어 알고리즘과 RBF신경회로망의 역전과 연산을 수행하기 위한 하드웨어이다. 또한 각각의 모터를 제어하기 위한 모터드라이버와 자이로센서의 전원공급을 위한 USB 포트모 구성되어 있다.

전원공급은 11.1V 1200mAh인 소형이며, 충전해서 사용이 가능하다는 장점이 있는 리튬 폴리머 배터리 두 개를 병렬로 연결하여 이동로봇 형태의 TWMR의 정역 회전 시 발생하는 고 전류에 대비하여 내부에 장착하여 사용하였다.

오른쪽의 안테나는 무선통신 모듈인 블루투스를 나타내며, 조이스틱에서의 버튼 정보를 로봇의 블루투스로 전송하여 제어시스템인 DSP2812에서 제어하게 된다. 실제로 구현한 지능제어기를 TWMR 시스템에 적용하여 실험적으로 성능을 평가하였다.

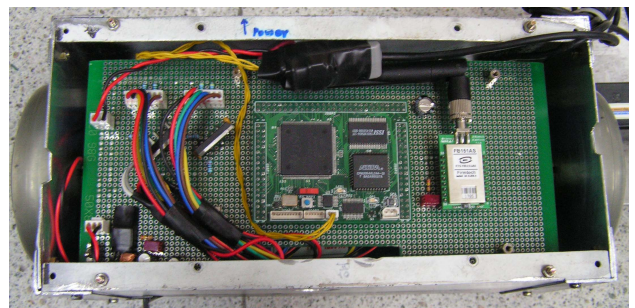


그림 7. TWMR 하드웨어
Fig. 7. TWMR hardware

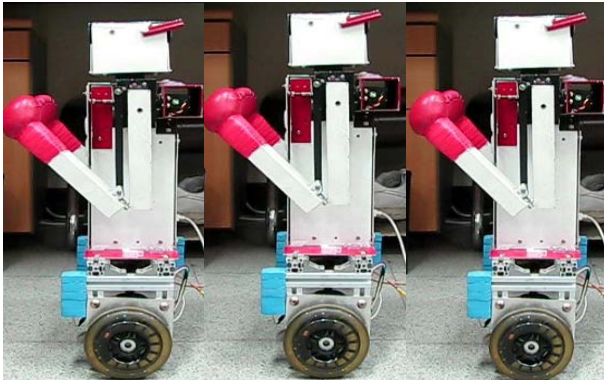
4. 실험결과

4.1. 자세 제어

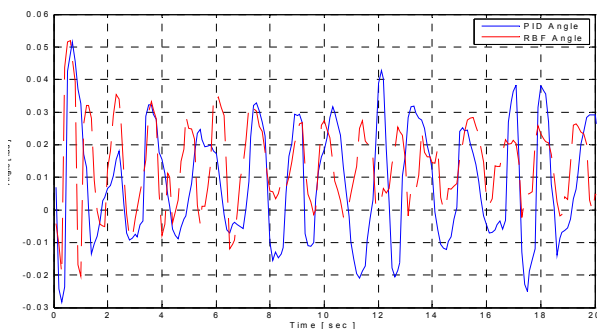
실제 실험의 경우에 조이스틱을 이용하여 무선 통신으로 위치에 대한 기준 경로를 주어 로봇의 앞뒤 주행을 제어 하였다. 왼쪽 바퀴와 오른쪽 바퀴의 각각에 대하여 따로 기준 경로를 주어 각을 세우며 곡선 및 자율주행에 대하여 실험 하였다. 외란을 주어도 각도와 위치가 동시에 제어 가능함을 실험을 통하여 확인 하였으며, 조이스틱을 이용한 성능에 대해서도 실험을 통해 확인 할 수 있었다.

표 1. PID 제어기와 신경회로망의 이득 값
Table 1. Parameters of PID and neural network

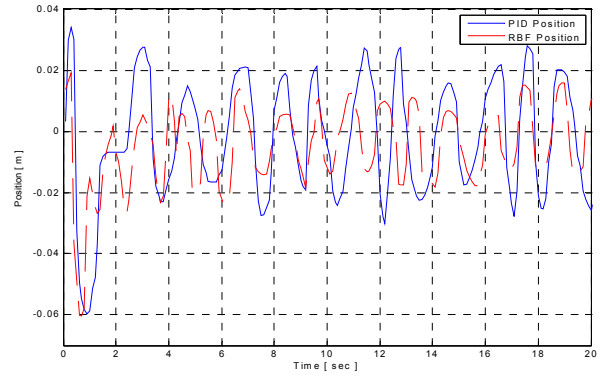
종류	이득값	
각도	$k_{p\theta}$	-200
	$k_{d\theta}$	-8
	$k_{i\theta}$	0
위치	k_{px}	-18
	k_{dx}	-40
	k_{ix}	-0.5
RBF신경망	η_w	0.0003
	η_b	0.0002
	η_μ	0.0001
	η_σ	0.0001



(a) 실제 움직임



(b) 각도



(c) 위치

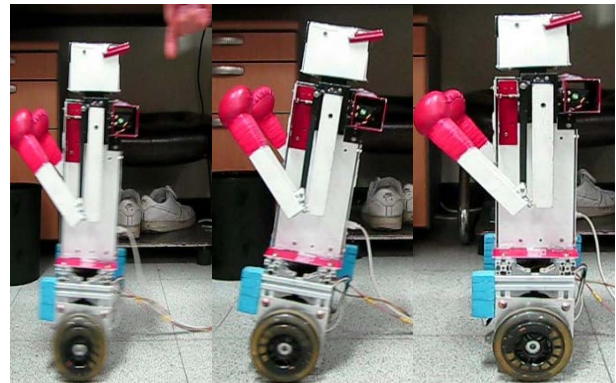
그림 8. TWMR의 밸런싱
Fig. 8. Balancing of TWMR

PID 제어기의 이득 값과 RBF 신경회로망의 학습율은 표 1과 같다. 각각에 대한 이득 값은 실험을 통해 시행착오를 겪으며 최적화된 값이다.

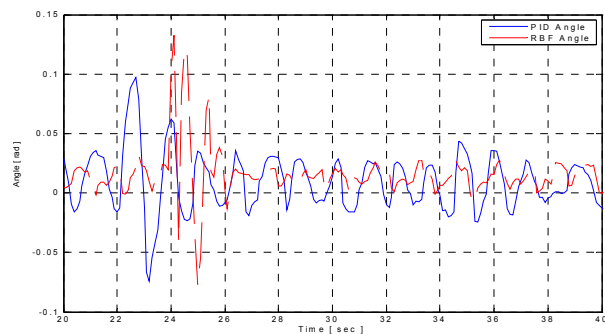
그림 8, 9 그리고 10은 TWMR의 각도와 위치를 동시 제어 하고 있는 실험 결과이다. 먼저 제자리에서 균형을 유지 하는 실험을 하였으며, 결과는 그림 8에 나타나 있다. 두 번 째로 그림 9에서는 외란을 준 실험 결과를 보여준다. 그리고 마지막으로 무게를 달리하였을 때의 실험을 하였다.

4.2. 외란이 있을 때 자세 제어

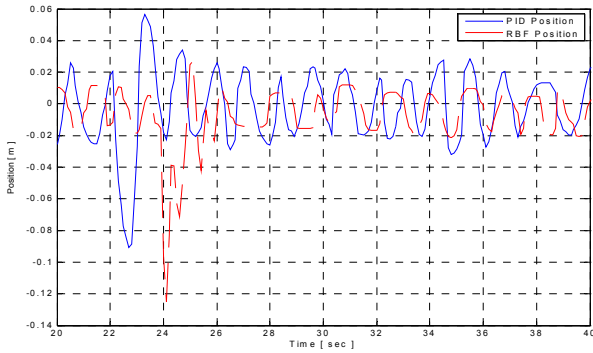
그림 9의 경우는 로봇의 머리 부분에 외란을 주었을 때의 움직임을 나타낸다. PID와 신경망 제어기 모두 안정적인 자세를 유지하였다. 하지만 신경망 제어기의 경우 오차가 작았다.



(a) 실제 움직임

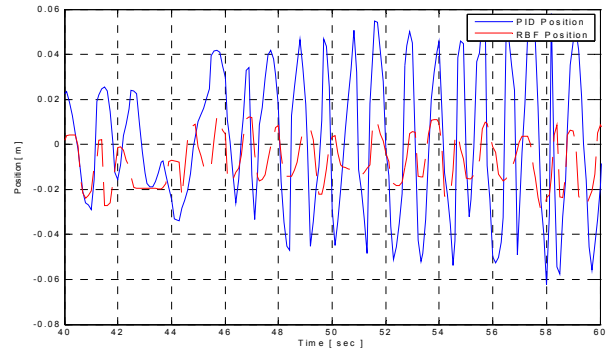


(b) 각도



(c) 위치

그림 9. TWMR에 외란을 주었을 때
Fig. 9. TWMR with disturbance

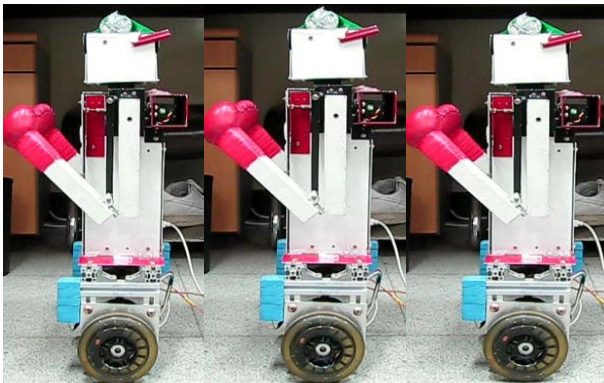


(c) 위치

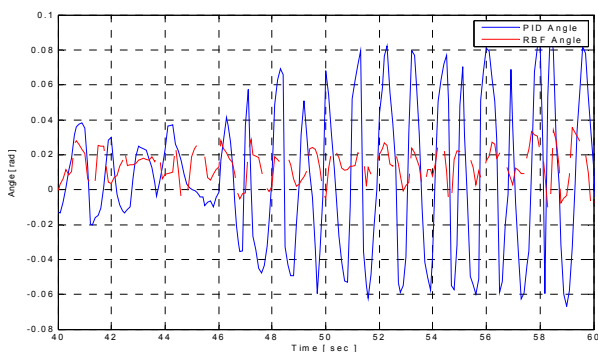
그림 10. TWMR에 200g의 무게 추를 올렸을 때
Fig. 10. TWMR with a 20 Kg weight

4.3. 무게가 달라졌을 경우

다음은 시스템의 변수의 변화에 따른 제어기 성능을 확인하는 실험을 수행하였다. 그림 10(a)에 보여진 것처럼 밸런싱하는 중에 로봇 위에 200g의 무게 추를 올려 시스템 변수의 변화에 의한 응답을 확인해 보았다. 그림 10(b)에 나타난 것처럼 PID제어기의 경우에 점점 발산하다가 자세 제어가 불안정해지는 현상이 발생 하였지만 그림 10 (c)에는 RBF 신경망 제어기와 함께 사용한 PID 제어기의 경우에는 안정적인 자세를 유지함을 볼 수 있었다.



(a) 실제 움직임



(b) 각도

4.4. 등판 제어

그림 11은 각을 세우며 경사면을 이동하게 되는 실험으로서, 무선통신을 이용하여 위치에 대한 명령을 복싱로봇의 각 모터로 주어 아래와 같은 널빤지 형태의 경사면을 오르기 위한 실험이다. 경사면의 높이는 바닥에서부터 약 18cm의 높이이며 로봇의 아랫부분이 닿지 않는 곳까지 전진 할 수 있다.

그림 11은 경사면을 오르는 도중에 위치에 대한 명령을 주지 않았을 경우, 복싱로봇 형태인 TWMR이 현재의 각도와 위치제어를 하는지에 대한 실험결과이다. 그림 11에서 보듯이 경사면에서도 쓰러지는 현상 없는 각도와 위치제어에 대한 성능을 실험을 통하여 확인 할 수 있다.

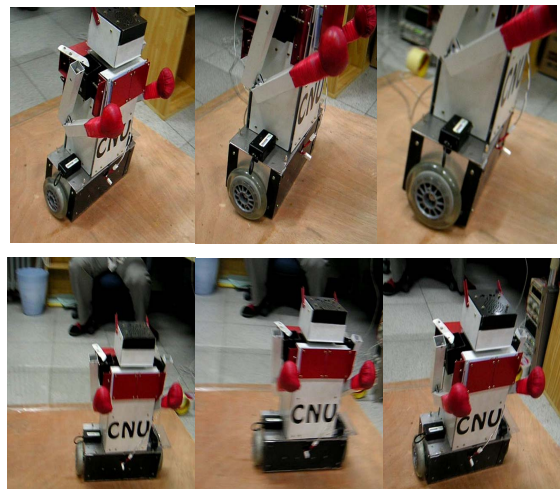


그림 11. 경사면에서의 각도와 위치제어
Fig. 11. Climbing control of TWMR

5. 결 론

본 논문에서는 선행 연구했던 기존의 막대형태의 모바일 역진자 시스템을 두 팔 달린 로봇 형태의 상체로 수정하여 실험하였다. 실험한 결과 각도와 위치제어를 동시에 수행할 수 있었으며, 무선통신 모듈인 블루투스를 사용하여 제어하고 있는 도중에 새로운 위치 명령을 조이스틱으로 보내 무선 자율주행 또한 실험을 통하여 검증하였다. 추가

적으로 경사면 또한 조이스틱을 사용하여 오르게 하였고, 각도와 위치 동시제어를 할 수 있었다. 지능제어기인 RBF 신경회로망을 사용하여 입력보상 방식을 이용한 지능제어기를 설계하였고, 설계된 지능제어기를 실시간으로 TWMR 시스템에 적용하여 그 강건한 성능 또한 실험을 통하여 입증하였다.

감사의 글

본 실험에 일부 도움을 준 충남대 석사 졸업 전형진씨와 복싱로봇을 제작한 전풍우씨께 감사를 드립니다.

참고 문헌

- [1] "Segway.", <http://www.segway.com>
- [2] F. Grasser, A. D'Arrigo, S. Colmbi, Alfred C. Rufer, "JOE:A Mobile, Inverted Pendulum", *IEEE Trans. On Industrial Electronics*, Vol. 49, No. 1, pp. 107-114, 2002,
- [3] K. Pathak, J. Franch, S. K. Agrawal, "Velocity Control of a Wheeled Inverted Pendulum by Partial Feedback Linearization", *IEEE Conference on Decision and Control*, pp. 3962-3967, 2004
- [4] Scott M. Boskovich, "A Two wheeled Robot Control system", *IEEE WESCON* 1995
- [5] S. H. Jeong and T. Takayuki "Wheeled Inverted Pendulum Type Assistant Robot: Design Concept and Mobile Control", *IEEE IROS*, pp. 1932-1937, 2007
- [6] K. Sasaki and T. Murakami, "Pushing operation by two-wheel inverted mobile manipulator", *IEEE Workshop on Advanced Motion Control*, pp.33-37, 2008
- [7] P. K. Abeygunawardhana and M. Toshiyuki, "Environmental interaction of two wheeled mobile manipulator by using reaction torque observer", *IEEE Workshop on Advanced Motion Control*, pp.348-353, 2008
- [8] R. Imamura, T. Takei, and S. Yuta, "Sensor drift compensation and control of a wheeled inverted pendulum mobile robot", *IEEE Workshop on Advanced Motion Control*, pp. 137-142, 2008
- [9] S. S. Kim and S. Jung, "Control experiment of a wheel-driven mobile inverted pendulum using neural network", *IEEE Trans. On Control Systems Technology*, vol. 16, no. 2, pp. 297-303, 2008
- [10] S. Jung, S. J. Lee, and B. R. Kim, "Development of mobile robot system for a boxing game as an undergraduate robotics course project", *URAI*, pp. 535-540, 2008
- [11] S. Jung and T. C. Hsia, "Neural network inverse control techniques for PD controlled robot manipulator", Vol. 19, No. 3, pp. 305-314, *ROBOTICA*, 2002

- [12] 노진석, 이근형, 정 슬, "RBF 신경회로망을 이용한 Mobile Inverted Pendulum의 위치제어", *정보 및 제어 학술대회*, pp. 179-181, 2007
- [13] H. J. Lee and S. Jung, "Control of a mobile inverted pendulum robot system", *ICCAS*, pp. 217-222, 2008

저자 소개



노진석 (Jin Seok Noh)

2005년 : 한밭대 기계공학과 졸업.
 2006년 : 충남대학교 메카트로닉스공학과 석사 입학
 2008년 : 충남대학교 메카트로닉스공학과 석사졸업

관심분야 : 지능 로봇 제어, DSP 제어
 Phone : 042-821-7232
 Fax : 042-823-4919
 E-mail : njs0729@cnu.ac.kr



김현욱 (Hyun Wook Kim)

2009년 : 충남대 메카트로닉스공학과 졸업.
 2009년~현재 : 동 대학원 메카트로닉스공학과 지능로봇 전공 석사과정

관심분야 : 지능 이론, 지능 로봇 제어, 밸런싱 로봇의 차량 응용
 Phone : 042-821-7232
 Fax : 042-823-4919
 E-mail : khw1042@naver.com



정 슬 (Seul Jung)

1988년 : 미국 웨인 주립대 전기 컴퓨터 공학과 졸업.
 1991년 : 미국 캘리포니아대 데이비스 전기 컴퓨터공학과 석사 졸업.
 1996년 : 미국 캘리포니아대 데이비스 전기 컴퓨터공학과 박사 졸업.
 1997년~현재 : 충남대학교 메카트로닉스 공학과 교수

관심분야 : 지능 시스템 및 지능 로봇, 밸런싱 시스템응용
 Phone : 042-821-6876
 Fax : 042-823-4919
 E-mail : jungs@cnu.ac.kr