

신경회로망을 이용한 이동로봇 위의 역진자의 각도 및 로봇 위치제어에 대한 연구

Experimental Studies of Balancing an Inverted Pendulum and Position Control of a Wheeled Drive Mobile Robot Using a Neural Network

김 성 수, 정 슬*
(Sung-Su Kim and Seul Jung)

Abstract : In this paper, experimental studies of balancing a pendulum mounted on a wheeled drive mobile robot and its position control are presented. Main PID controllers are compensated by a neural network. Neural network learning algorithm is embedded on a DSP board and neural network controls the angle of the pendulum and the position of the mobile robot along with PID controllers. Uncertainties in system dynamics are compensated by a neural network in on-line fashion. Experimental results show that the performance of balancing of the pendulum and position tracking of the mobile robot is good.

Keywords : mobile robot pendulum, neural network, on-line learning

I 서론

일반적으로 PID 제어기는 모션 제어에 있어서 가장 많이 사용되며, 쉽게 적용이 가능한 제어기이다. 선형 시스템에 대해서는 간단한 이득값의 조절로 원하는 출력응답을 얻을 수 있지만, 시스템의 변수가 변하거나 외부로부터 외란이 있는 경우 등은 PID 제어기로 원하는 응답을 얻기 어렵다. PID 이득값이 고정되어 있기 때문에 플랜트의 동적 특성이 변화하는 비선형 시스템에 대해서는 제어 성능이 떨어지게 되는 것이다.

역진자 시스템은 대표적인 비선형 시스템으로 교육적으로나 연구에 있어서 많이 사용되고 있다. 역진자 시스템은 그 특성이 비선형이고 SIMO시스템으로 PID 제어기로는 진자를 제어할 수 있으나 수레의 위치까지 제어하기는 매우 어렵다. 따라서 역진자와 같은 비선형 시스템을 제어하기 위해서는 비선형 시스템의 동특성 변화를 보상할 수 있는 비선형 제어기가 필요하다.

비선형 제어기 중에서 신경회로망 제어기는 시스템의 동특성 변화, 외란과 같은 불확실성을 보상함으로써 비선형 시스템에 대해 좋은 제어 성능을 가진다[1]. 신경망 제어기는 모션 제어 시스템, 신호 처리와 같은 다양한 분야에서 응용되고 있다. 특히 비선형성이 두드러진 로봇 팔의 제어에서 비선형 시스템에 대한 신경망 제어기의 성능을 확인할 수 있다[2,3].

그러나 많은 연산량을 필요로 하는 신경망 제어기를 실시간 제어에 적용하기 위해서는 빠른 연산능력을 갖는 DSP와 같은 고성능 컴퓨터가 필요하게 되는 제약조건이 따른다. 최근에는 xy평면에서 움직이는 2자유도 역진자 시스템을 PID 제어기와 함께 신경회로망을 사용하여 제어하였다[4,5]. 하지만 이러한 역진자 시스템은 고정된 프레임의 역진자 시스템

으로 이동로봇 위의 역진자보다는 불확실성이 상대적으로 작다. 이동로봇에서의 역진자 제어는 상대적으로 어려우며, 충분히 빨리 응답하여야 하고 두 바퀴의 균형이 맞아야 역진자의 제어가 가능하기 때문이다. 이러한 이동로봇의 역진자의 대표적인 예로는 Segway 사의 상용화된 이동로봇이 있다. 이 Segway는 성능이 매우 우수하여 미국의 NASA를 포함한 많은 연구기관에서 모바일 플랫폼으로 사용되고 있는 실정이다[6,7]. 하지만 고가의 센서를 많이 사용하므로 값이 매우 비싼 단점이 있다.

본 논문에서는 이전 연구의 연장으로서 빠른 연산 속도를 갖는 DSP를 이용한 신경망 제어기를 이용하여 mobile inverted pendulum을 제어하고자 한다. 제어 알고리즘으로는 PID 제어기와 함께 신경망의 입력보상 방식을 사용한다. 센서로는 저가용 자이로 센서만을 사용하여 역진자의 움직임을 감지하고 이동로봇의 움직임은 엔코더를 사용하여 측정한다. 자이로 센서의 특성을 파악하여 시간 지연에 대한 보상을 설계하여 응답을 잘 측정할수록 하였다. 실제로 역진자를 탑재한 이동 로봇을 제작하여 실험한 결과, 성공적으로 역진자의 각도와 이동로봇의 위치를 제어할 수 있었다.

II 전체시스템 구성

1. 이동 로봇 역진자 구조

아래 그림 1은 이동로봇의 역진자의 구조를 보여준다. 두 바퀴에 의해 구동하는 이동로봇 위의 역진자제어는 기존의 역진자 제어보다 다소 어렵다. 역진자의 균형은 이동로봇의 정확한 움직임에 달려 있기 때문이다. 로봇은 두개의 독립적인 구동 바퀴를 이용해서 균형을 잡거나 경로를 추종하게 된다. 각각의 바퀴는 2개의 DC모터로 구동되며, 각각의 DC모터에는 엔코더가 부착되어 로봇의 위치를 측정하게 된다. 또한 자이로 센서를 이용하여 진자의 각도를 측정할 수 있다. 이와 같은 형태의 로봇은 [8-10]에 의해 이전에 소개된 바 있다.

2. 제어 알고리즘

본 논문에서 구현하고자 하는 제어기는 그림 2에 보여진 입력 보상 방식의 제어 알고리즘이다.

* 책임저자(Corresponding Author)

논문접수 : 2005. 2. 21., 채택확정 : 2005. 8. 10.

김성수, 정슬 : 충남대학교 메카트로닉스공학과

(a741103@harmail.net/jungs@cnu.ac.kr)

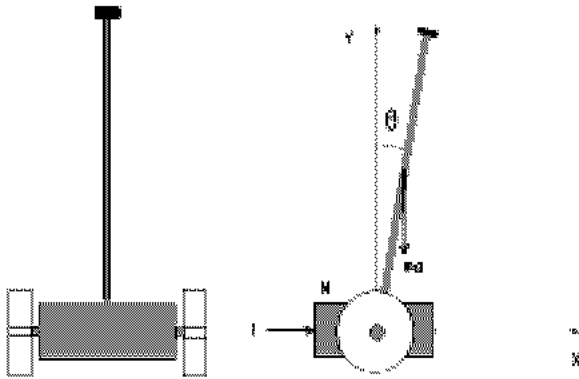


그림 1. 이동로봇 역진자 구조.
Fig. 1. Mobile robot pendulum structure.

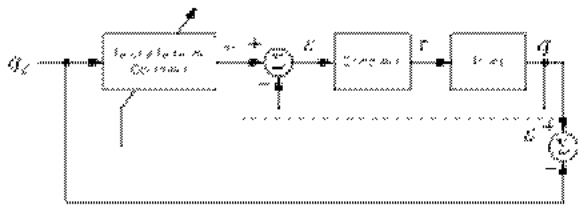


그림 2. 입력 보상 방식 구조.
Fig. 2. Reference compensation control structure.

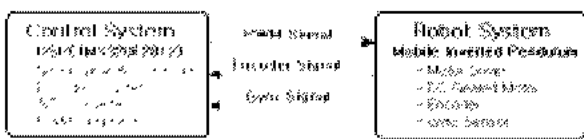


그림 3. 전체 시스템 구조.
Fig. 3. Overall system structure.

기존의 제어기가 있고 신경회로망 제어기가 입력에 보상해 줌으로써 공정의 변수의 변화나 불확실성에서 발생하는 출력 오차를 보상할 수 있다. 대략적인 전체 시스템 구성은 그림 3과 같이 크게 제어 시스템과 로봇 시스템으로 나누어진다. 제어 시스템은 계산량이 많은 신경망 연산을 실시간으로 처리할 수 있어야 하고, 자이로 센서의 데이터 처리, 엔코더 신호 처리, 그리고 모터를 구동하기 위한 PWM신호 발생기가 설계되어야 한다. 이러한 기능을 수행하기 위해서 본 논문에서는 TI사의 부동 소수점 처리 DSP인 TMS320F2812를 사용하였다. 이 DSP는 PWM회로, A/D 컨버터 회로, 엔코더 카운터 회로를 내장하고 있기 때문에 추가적인 회로 추가가 필요 없이 제어기 설계가 가능해진다.

III. 센서 및 신호처리

진자가 쓰러지지 않도록 제어하기 위해서 로봇 각도의 측정은 대단히 중요하다. 본 논문에서는 로봇의 각도를 측정하기 위해 엔코더 센서를 부착할 수 없어 자이로 센서가 사용되었다. 자이로 센서의 출력은 각속도를 적분함으로써 로봇의 각도를 측정할 수 있다. 자이로 센서는 drift와 위상 지연의 문제점을 갖고 있으므로 자이로 센서의 특성을 파악하기 위해 측정장치를 이용하였다.

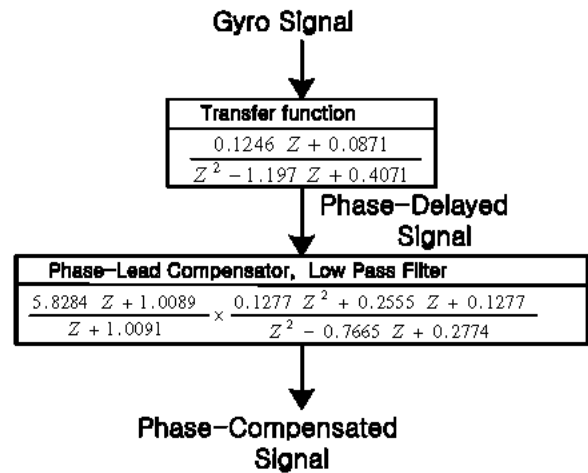


그림 5. 진상 보상기.
Fig. 5. Lead compensator.

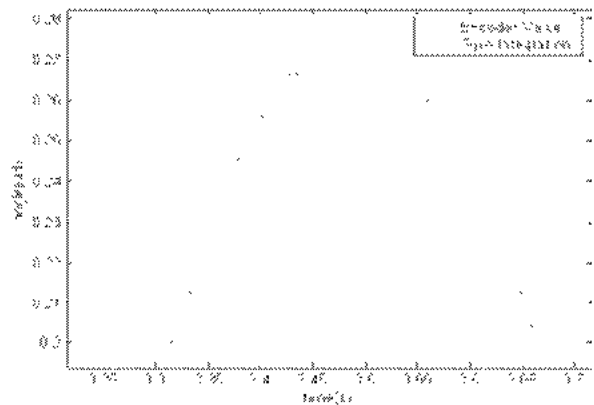


그림 4. 엔코더 신호와 자이로 센서의 비교.
Fig. 4. Comparison between encoder and gyro sensor data.

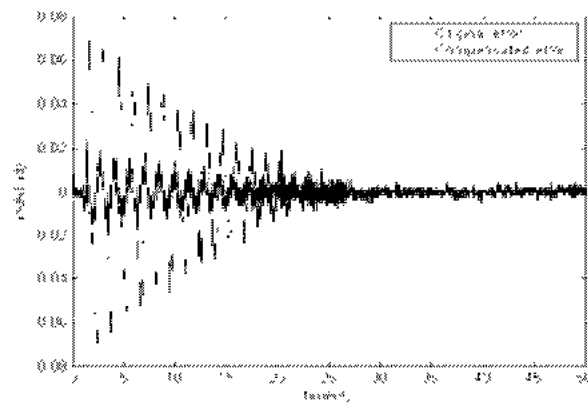


그림 6. 자이로 센서의 보상 전과 보상 후의 에러.
Fig. 6. Errors of gyro sensor after and before compensation.

회전축으로부터 일정 높이에 센서를 위치 시켜 놓고, 회전부에는 엔코더를 부착하였다. 회전운동은 모터를 사용하지 않고 진자처럼 작동하도록 해서 자이로 센서와 엔코더의 값을 측정된 결과 그림 4와 같이 자이로 센서의 데이터가 약 50ms정도의 위상 지연이 발생함을 알 수 있다.

그리고 그림 5와 같은 진상 보상기를 설계하여 자이로 센서의 신호를 보상함으로써 센서의 주파수 응답성을 향상시킬 수 있었다. 그리고 보상기에서 센서 출력의 노이즈까지도 같이 보상되기 때문에 2차 IIR 저주파 통과 필터를 이용하여 노이즈를 최소화 하였다.

그 결과 그림 6과 같이 위상 지연으로 발생하는 자이로 센서의 오차를 어느 정도 감소시킬 수 있었다.

IV. 신경망 제어기

1. 제어 구조

신경회로망은 비선형 함수의 맵핑 능력, 일반화 능력 및 학습 능력이 있어 제어할 공정의 정확한 모델을 실제적으로 얻기 어려운 제어 시스템의 불확실성과 부정확성을 해결하기 위해 보조적으로 사용되어 기존의 PID 또는 PD 제어기와 더불어 보조 제어기 역할로 정상상태에서의 오차를 영으로 수렴하도록 하는 역할로 사용되어지고 있다. 본 논문에서 사용되는 신경회로망 제어방식은 그림7과 같이 입력 경로에 신호를 보상하는 입력보상 방식과 PID 제어기를 사용한다.

신경 회로망은 PID 제어기로 들어가는 경로 오차의 입력 신호를 보상해 주어 PID 제어기로 제어된 공정의 역모델을 학습하고 신경망 제어기의 안정성을 확보할 수 있다. 역진자각의 오차 신호는 다음의 식과 같다.

$$e_{\theta} = \theta_d - \theta \tag{1}$$

각도의 PID 제어기는 다음과 같다.

$$u_{\theta} = k_{p\theta}e_{\theta}(t) + k_{i\theta} \int e_{\theta}(t)dt + k_{D\theta}\dot{e}_{\theta}(t) + k_{p\theta}\phi_1 + k_{i\theta}\phi_2 + k_{D\theta}\phi_3 \tag{2}$$

진자의 각 뿐만 아니라 위치도 제어하므로 로봇의 위치 오차는 다음과 같다.

$$e_x = x_d - x \tag{3}$$

로봇의 위치를 위한 PID제어기는

$$u_x = k_{px}e_x(t) + k_{ix} \int e_x(t)dt + k_{Dx}\dot{e}_x(t) + k_{px}\phi_4 + k_{ix}\phi_5 + k_{Dx}\phi_6 \tag{4}$$

결과적으로 로봇 시스템의 제어 입력은 다음과 같다.

$$u = u_x + u_{\theta} \tag{5}$$

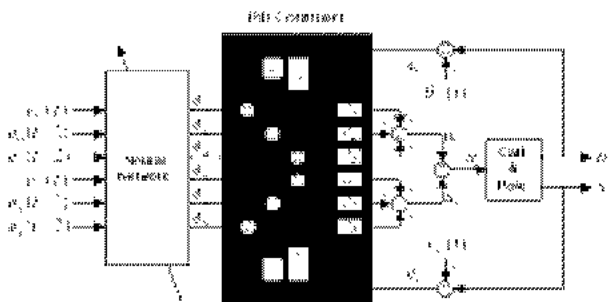


그림 7. Mobile pendulum에 사용된 신경망 제어방법. Fig. 7. Neural control block diagram.

2. 신경망 구조

그림 8은 신경회로망 구조를 나타낸다.

신경망 입력층의 입력으로는 각도와 위치 오차를 사용하였다. 신경망이 시스템의 동적 행동을 학습할 수 있도록 2 step 이전까지의 오차값이 입력된다. 그리고 비선형 함수로는 hyperbolic tangent 함수를 사용하였다. 사용된 입력층, 은닉층 그리고 출력층의 뉴런 개수는 로봇의 각도 및 위치의 오차값이 입력으로 사용되기 때문에 각각 6, 8, 6개이다.

3. 신경망 학습 알고리즘

신경회로망의 역전파 알고리즘을 사용하여 시스템 자코비안이 필요 없이 on-line 학습이 가능하도록 하였다. 신경망의 출력을 다음과 같이 설정한다.

$$\Phi = k_{p\theta}\phi_1 + k_{i\theta}\phi_2 + k_{D\theta}\phi_3 + k_{px}\phi_4 + k_{ix}\phi_5 + k_{Dx}\phi_6 \tag{6}$$

만약 시스템의 동력학식이 $f(\theta, \dot{\theta}, \ddot{\theta}, x, \dot{x}, \ddot{x})$ 이면 (5)는 (7)로 유도할 수 있다.

$$k_p e + k_I \int e dt + k_D \dot{e} = f(\theta, \dot{\theta}, \ddot{\theta}, x, \dot{x}, \ddot{x}) - \Phi \tag{7}$$

여기서, $k_p = [k_{p\theta} k_{px}]$, $k_I = [k_{i\theta} k_{ix}]$, $k_D = [k_{D\theta} k_{Dx}]$,

$e = [e_{\theta} e_x]^T$ 이 때 신경망 학습 신호를 (8)과 같이 설정하고 목적함수를 (9)로 정하여 목적함수가 영으로 수렴하도록 신경망을 학습시킨다. 이렇게 신경망이 학습이 되면 $\Phi \cong f(\theta, \dot{\theta}, \ddot{\theta}, x, \dot{x}, \ddot{x})$ 이 되어 시스템의 inverse dynamics를 수행한다.

$$v = k_p e + k_I \int e dt + k_D \dot{e} \tag{8}$$

오차를 줄이는 목적함수는 다음과 같다.

$$E = \frac{1}{2} v^2 \tag{9}$$

(9)를 가중치에 대해서 미분하면 목적함수 E의 그래디언트를 (10)처럼 구할 수 있다. (7)로부터

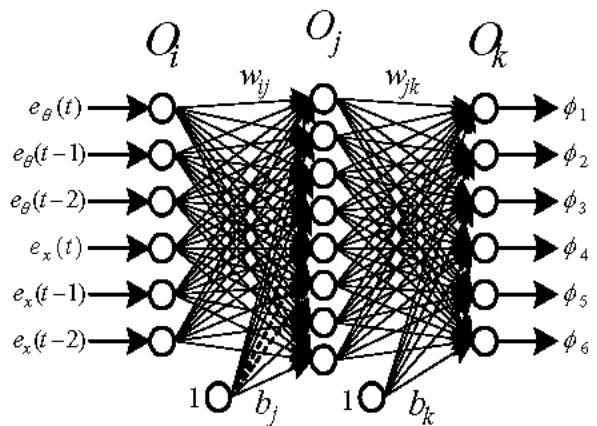


그림 8. 신경망 구조. Fig. 8. Neural network structure.

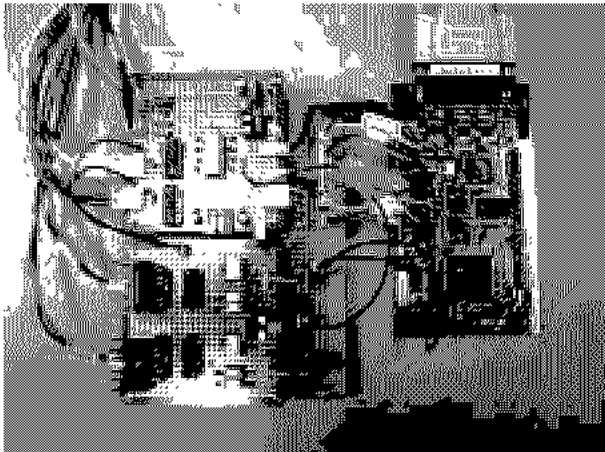


그림 9. 신경망 제어기 하드웨어 사진.
Fig. 9. Neural network control hardware.

$$\frac{\partial E}{\partial w} = \frac{\partial E}{\partial v} \frac{\partial v}{\partial w} = v \frac{\partial v}{\partial w} = -v \frac{\partial \Phi}{\partial w} \quad (10)$$

여기서,

$$\frac{\partial \Phi}{\partial w} = K_P \frac{\partial \phi_1}{\partial w} + K_I \frac{\partial \phi_2}{\partial w} + K_D \frac{\partial \phi_3}{\partial w} \quad (11)$$

위에서 구한 (10), (11)을 이용하여 역전파 알고리즘에 사용하면 다음과 같다.

$$w(t+1) = w(t) + \eta \frac{\partial \Phi}{\partial w} v + \Delta w(t-1) \quad (12)$$

4. 신경망 제어기 하드웨어 구현

사용된 하드웨어는 DSP는 TI사의 TMS320F2812이고 그림 9과 같이 구성되었다.

V. 실험결과

1. 실험환경

그림 10은 로봇 시스템의 사진을 보여주고 있다. 본 실험에서는 이동 로봇 위의 역진자의 위치와 각도를 동시에 제어하는 실험을 수행하였다. 본 실험에서는 각도는 영으로 유지하면서 로봇이 사인파의 궤적을 추종하는 실험과 제자리를 유지하는 실험이 수행되었다.

실험에 사용된 신경망과 PID 이득값은 표 1과 같다. 각각의 이득값은 실험적으로 구하였으며, 시행착오 과정을 통해 최적화 되었다.

2. 실험결과

2.1 PID 제어

그림 11과 12는 PID제어기로 제어한 로봇의 각도와 위치를 나타낸다. 초기에 역진자는 균형을 유지하고 있으나, 이동 로봇은 계속 한 방향으로 움직이는 것을 볼 수 있다. 이는 이전에 역진자 연구에서 PID 제어의 경우 나타난 결과와 같은 결과임을 알 수 있다[4,5]. 특히, 16초 이후에 손으로 역진자를 쳤을 경우에 필름이 점점 크게 오실레이션 하여 불안정해지는 것을 볼 수 있다. 그리고 특정 시간에 외란을 주었을 경우 그림에서 보듯이 발산하는 것을 볼 수 있다.

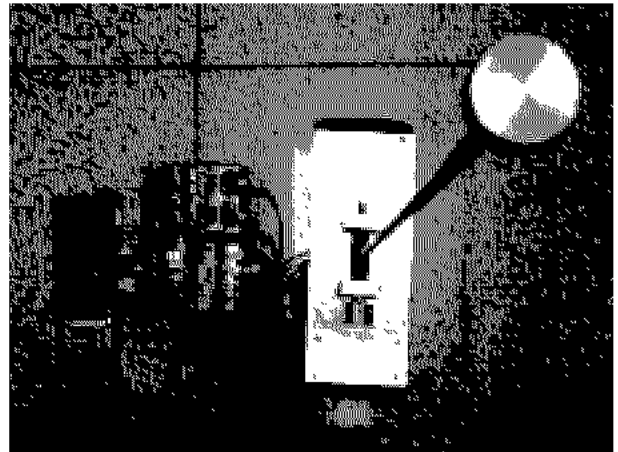


그림 10. 로봇 시스템 사진.
Fig. 10. Robot pendulum system.

표 1. 신경망과 PID 이득값.
Table 1. PID controller gains.

종류		이득값
각도	k_p	-1.1828
	k_i	-0.0004
	k_d	-0.2151
위치	k_p	0.6452
	k_i	0.0003
	k_d	0.4086
학습률(η)		0.04
모멘트(α)		0.2

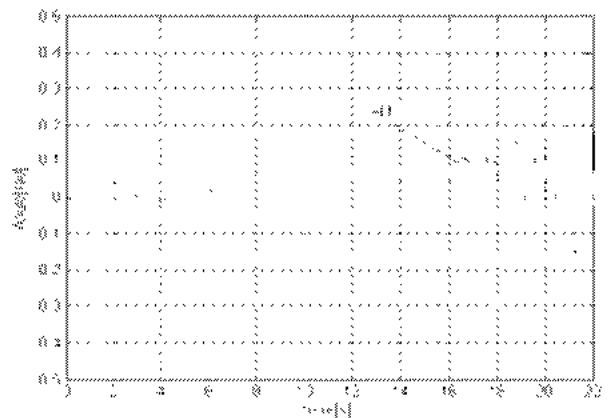


그림 11. PID 제어기로 제어된 로봇의 각도.
Fig. 11. The angle of mobile inverted pendulum by PID controller.

2.2 신경망 제어

2.2.1 한 점으로 이동

다음 실험은 PID 제어기에 신경망 제어기를 더하여 실험하였다. 먼저 로봇의 제어 입력으로 각도와 위치를 영으로 하는 실험의 결과를 그림 13-14에 나타내었다. 로봇을 세워 놓고 그 각도를 원점으로 초기화 한 후, 임의로 진자를 쳤을

때 각도는 영으로 유지하면서 다시 원점으로 돌아오도록 하는 실험을 하였다. 그림 14에서는 이동로봇의 위치는 $\pm 3\text{cm}$ 이내의 영역에서 계속 유지하고 있음을 볼 수 있다. 그림 13에서 보면 각도 역시 진자를 손으로 쳤을 경우, 각도가 커졌

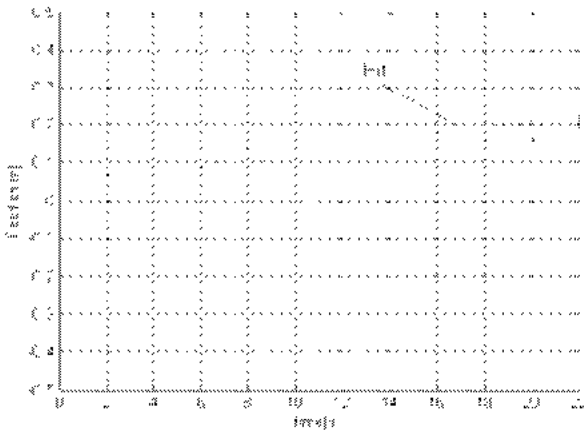


그림 12. PID 제어기로 제어된 로봇의 위치.
Fig. 12. Position of mobile pendulum by PID controller.

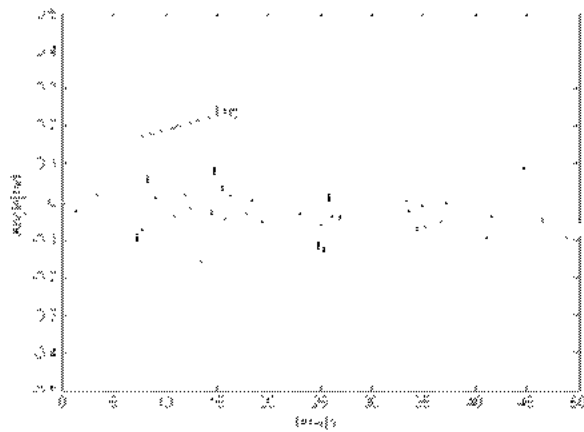


그림 13. 신경망 제어기로 제어된 로봇의 각도.
Fig. 13. Angle of mobile pendulum by neural network controller.

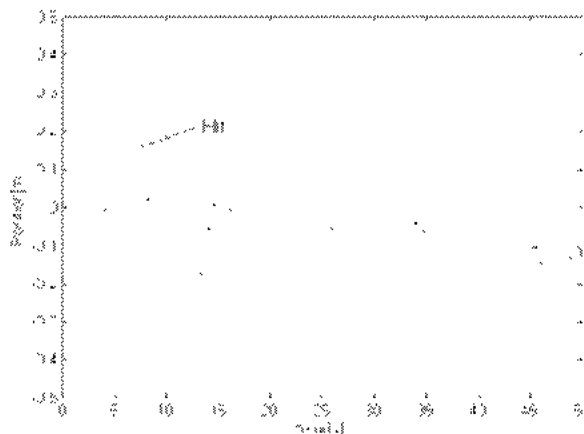


그림 14. 신경망 제어기로 제어된 로봇의 위치.
Fig. 14. Position of mobile pendulum by neural network controller.

다가 다시 영으로 수렴하는 것을 볼 수 있다. 각도는 $\pm 0.04\text{rad}$ 이내의 영역에서 일정하게 유지되고 있다. 이는 그림 11의 PID 제어기의 경우와 비교하면 외란이 있을 시에도 제어기의 강건함을 보여준다. 하지만 그림 14에서 보면 50초에 위치 오차가 10cm정도 나타나는 것을 볼 수 있는데, 이는 자이로 센서의 특성에 의한 drift의 영향이라 볼 수 있다.

2.2.2 역진자의 사인파 위치 추종 제어

역진자의 실험 두 번째로는 로봇 각도는 영으로 유지하면서 이동 로봇의 위치는 사인파의 궤적을 추종하도록 하는 실험을 하였다. 사인파의 주기는 4π 일 때와 8π 의 경우 두 가지에 대해서 실험을 하였다. 그리고 사인파의 크기는 모두 0.25m이다. 로봇은 이전의 실험과 마찬가지로 세워놓고 초기화하였다.

그림 15-17는 사인파의 주기가 4π 일 때의 로봇의 각도, 로봇의 위치, 그리고 로봇 위치의 에러를 나타낸다. 그림 15에서 로봇의 각도는 $\pm 0.1\text{rad}$ 의 오차를 나타내고, 그림 16에서 보면 이동로봇이 사인파 경로를 잘 추종하는 것을 볼 수 있다. 그림 17의 위치에서 보듯이 위치 오차는 $\pm 5\text{cm}$ 이내의 영역에서 일정하게 유지됨을 볼 수 있다.

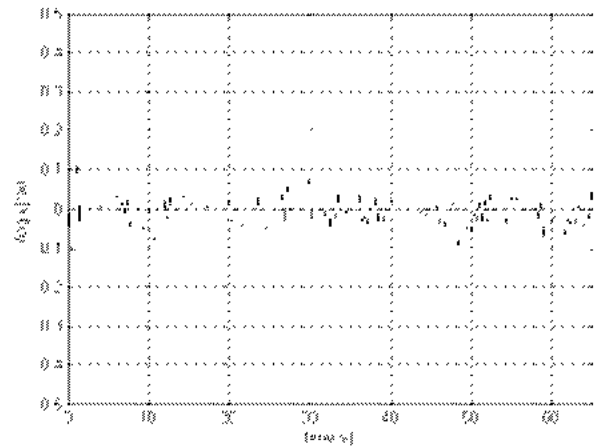


그림 15. 제어된 로봇의 각도, 주기- 4π sec.
Fig. 15. The angle of mobile inverted pendulum, period- 4π sec.

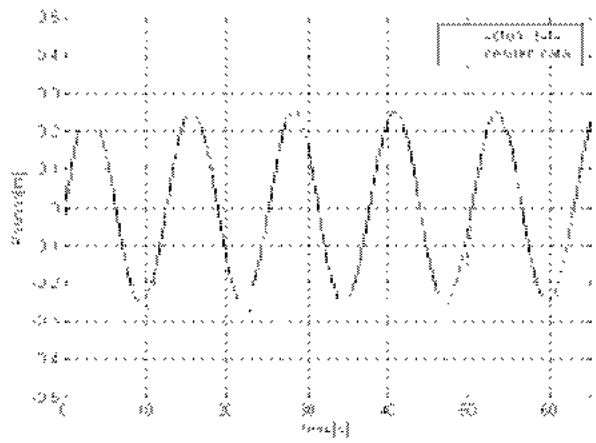


그림 16. 제어된 로봇의 위치, 주기- 4π sec.
Fig. 16. The position of mobile inverted pendulum, period- 4π sec.

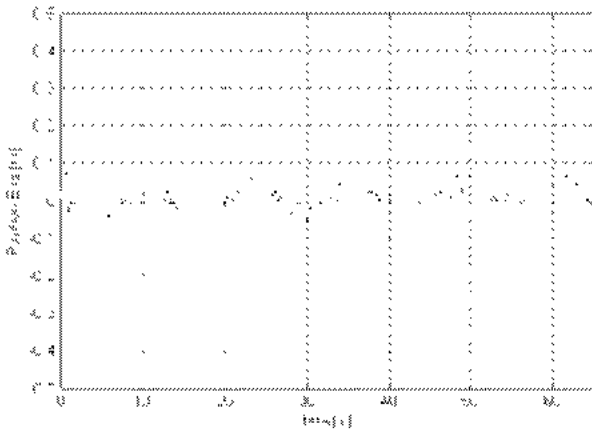


그림 17. 로봇의 위치 에러, 주기- 4π sec.
 Fig. 17. The position error of mobile inverted pendulum, period - 4π sec.

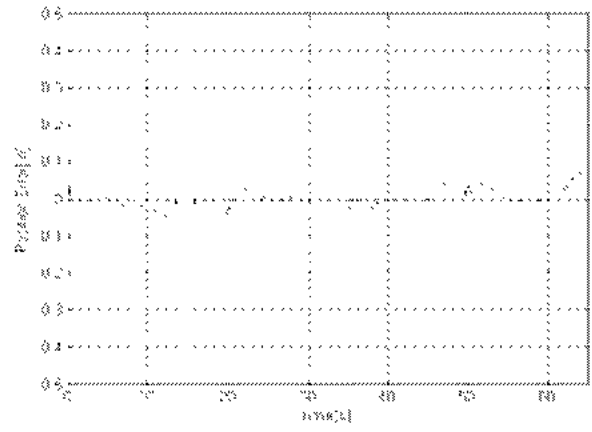


그림 20. 로봇의 위치 에러, 주기- 8π sec.
 Fig. 20. The position error of mobile inverted pendulum, period - 8π sec.

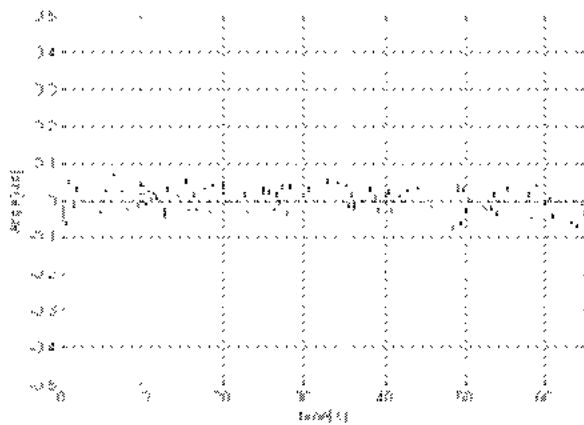


그림 18. 제어된 로봇의 각도, 주기- 8π sec.
 Fig. 18. The angle of mobile inverted pendulum, period - 8π sec.

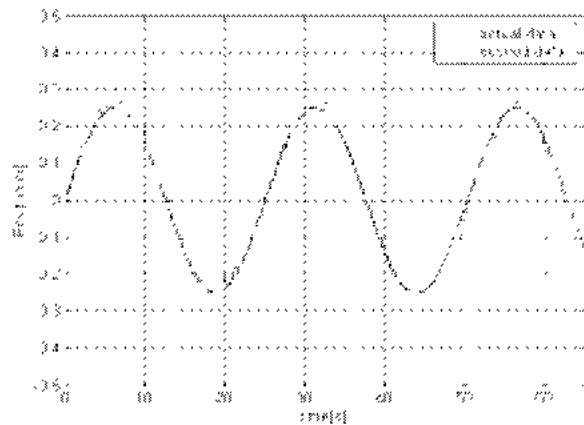


그림 19. 제어된 로봇의 위치, 주기- 8π sec.
 Fig. 19. The position of mobile inverted pendulum, period - 8π sec.

위 실험으로는 사인파 경로의 주기를 두 배로 늦추어 보았다. 그림 18-20은 사인파의 주기가 8π sec 일 때의 각각 로봇의 각도, 로봇의 위치, 그리고 로봇 위치의 에러를 나타낸다. 로봇의 각도와 위치는 각각 $\pm 0.5\text{rad}$, $\pm 5\text{cm}$ 이내의 영역

에서 일정하게 유지됨을 볼 수 있다. 이전의 경우보다 각도 및 위치오차가 작음을 알 수 있다. 그림 19에서 보면 이동로봇이 사인파 경로를 잘 추종하고 있으며, 그 오차가 그림 20에 나타나 있다. 45초 이후에 오차가 커지는 경향이 있는데 이는 자이로 센서에 의한 측정 오차때문이다.

VI. 결론

본 논문에서는 저가형 이동로봇 위의 역진자시스템을 제작하여 역진자의 균형을 잡고 이동로봇의 위치를 제어하였다. DSP를 사용하여 신경회로망 제어기를 구현하였다. PID 제어기와 신경망 제어기를 이용하여 mobile inverted pendulum을 각각 제어해 봄으로써 선형 제어기인 PID제어기의 경우, 비선형성이 강한 시스템에 대해서는 제어성능이 떨어진다는 것을 알 수 있었다. 반면에 신경망 제어기를 이용하여 제어할 경우, 모든 실험에서 각도는 0.1rad 이내의 오차 범위를 가지며, 위치는 5cm의 오차 내에서 유지되는 것을 볼 수 있다. 심지어 손으로 로봇을 쳐서 외란을 주었을 경우에도 로봇은 균형을 유지하면서 위치를 잘 추종함을 실험적으로 확인하였다.

그러나 자이로 센서의 문제점인 drift 현상을 확인 할 수 있다. 추후 연구과제로는 자이로 센서의 drift문제를 해결하여 로봇의 제어 성능을 향상 시키는 것이다.

참고문헌

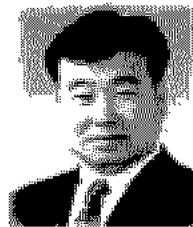
- [1] T. H. Hung, M. F. Yeh, and H. C. Lu, "A pi-like fuzzy controller implementation for the inverted pendulum system," *Proc. of IEEE Conference on Intelligent Processing Systems*, pp. 218-222, 199
- [2] M. E. Magana, and F. Holzapfel, "Fuzzy-logic control of an inverted pendulum with vision feedback," *IEEE Trans. on Education*, vol. 41, no. 2, pp. 165-170, 1998.
- [3] S. S. Kim and S. Jung, "Hardware implementation of a real time neural network controller with a DSP and a FPGA board," *IEEE ICRA*, pp. 4639-4644, 2004.
- [4] S. Jung and H. T. Cho, "Decentralized neural network Reference Compensation Technique for PD Controlled Two Degrees of Freedom Inverted Pendulum," *International Journal of Control*,

- Automations, and Systems*, vol. 2, no. 1, pp. 92-99, 2004.
- [5] H. T. Cho and S. Jung, "Neural Network Position Tracking Control of an Inverted Pendulum by an X-Y Table Robot," *IEEE IROS*, pp. 1210-1215, 2003.
- [6] B. J. Thibodeau, S. W. Hart, D. R. Karuppiah, J. D. Seeney, and O. Block, "Cascaded Filter Approach to Multi-Objective Control," *IEEE ICRA*, pp. 3877-3882, 2004.
- [7] R. O. Ambrose, R. T. Savely, S. M. Goza, P. Strawser, M. A. Diffler, I. Spain, and N. Radford, "Mobile manipulation using NASA's Robonaut," *IEEE ICRA*, pp. 2104-2109, 2004.
- [8] Y. S. Ha, S. Yuta, "Trajectory tracking control for navigation of the inverse pendulum type self-contained mobile robot," *Robotics and autonomous systems*, vol. 17, Issue 1-2, pp. 65-80, 1996.
- [9] F. Grasser, A. D'Arrigo, S. Colombi, A. C. Rufer, "JOE: a mobile, inverted pendulum," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 49, Issue 1, pp. 107-114, Feb. 2002.
- [10] A. Sutherland, T. Braunl, "An Experimental Platform for Researching Robot Balance," *Proceeding FIRA Robot World Congress*, 14-19, 2002.



김성수

1974년 12월 22일생. 2001년 경일대학교 제어계측공학과 졸업. 2003년 충남대학교 메카트로닉스공학과 석사. 현재 원자력 연구소 석사후 연구원. 관심분야는 S.o.C 제어기 설계, DSP 및 마이크로 프로세서 응용, 로보틱스.



정승

1964년 9월 11일 생. 1988년 미국 웨인 주립대 전기 및 컴퓨터 공학과 졸업. 1991년 미국 캘리포니아대 데이비스 전기공학과 석사. 동 대학 박사. 1997년 ~ 현재 충남대학교 메카트로닉스공학과 부교수. 관심분야는 지능 제어 알고리즘 및 하드웨어 구현, 로봇과 인간의 지능적인 상호 작용, 필드 로봇 시스템.