

신경망을 이용한 전기차동장치의 속도오차 보상

Speed Error Compensation of Electric Differential System Using Neural Network

유영재, 이주상, 임영철, 장영학, 김의선, 문채주

(Young-Jae Ryoo, Ju-Sang Lee, Young-Cheol Lim, Young-Hak Chang, Eui-Sun Kim, and Chae-Joo Moon)

Abstract : This paper describes a methodology using neural network to compensate the nonlinear error of driving speed for electric differential system included in electric vehicle. An electric differential system which drives each of the left and right wheels of the electric vehicle independently. The electric vehicle driven by induction motor has the nonlinear speed error which depends on a steering angle and speed command. When a vehicle drives along a curved road lane, the speed unbalance of inner and outer wheels makes vehicle's vibration and speed reduction. To compensate for the speed error, we collected the speed data of the inner wheel and outer wheel in various speed and the steering angle data by using an manufactured electric vehicle and the real system. According to the analysis of the acquired data, we designed the differential speed control system based on a speed error compensator using neural network.

Keywords : electric differential system, neural network, speed compensation

I. 서론

차량이 곡선도로를 진동이나 뒤틀림이 없이 완만하게 주행하기 위해서는 차량의 외측바퀴가 내측바퀴보다 더 빠른 속도로 회전해야 한다. 이러한 작용을 위해 일반적인 엔진구동 차량은 베벨기어를 사용한 기어식 차동장치를 장착하고 있다[1]-[4]. 그러나 전기자동차는 그 구조의 특성상 좌·우륵의 구동원이 각각의 바퀴에 독립된 구동원을 갖추고 있다. 이 때문에 전기자동차에서는 곡선도로를 주행하는 경우나 차선을 변경해야 할 때에 기어식 차동장치의 작용을 대신할 수 있는 전자식 차동장치가 필요하게 된다.

이와같은 전기자동차의 차동장치를 구현하기 위해 유도전동기를 이용한 구동방법이 다양하게 연구되고 있다. C. C. Chan은 유도전동기를 1 개 고정자에 2 개 회전자로 갖도록 구조 설계한 axial flux induction motor (AFIM)을 제안하였다[5]-[7]. A. Kawamura는 고정자가 외측 회전자 기능을 하고, 회전자가 내측 회전자 기능을 갖는 구조의 anti directional twin rotary (ADTR) 전동기를 설계하였다[8][9]. 또한 1개 고정자와 2 개의 독립적인 비동기 회전자로 구성된 electrical differential motor (EDM)가 제안되는 등 전기자동차용으로 전동기를 이용한 다양한 방법이 연구되었다[10]. 전기자동차 구동용 인버터로는 P. Kelecy, R. Lorenz가 유도전동기의 고정자 권선을 병렬로 연결함으로써 1개의 인버터로 동시에 2개의 유도전동기를 구동하기 위한 dual motor machine model을 제안하였다[11][12].

이와 같이 전기자동차의 구동원을 독립적으로 제어하

기 위하여 유도전동기를 이용한 새로운 형태의 다양한 구동장치가 연구되고 있다. 그런데, 유도전동기를 좌우측 바퀴의 독립된 구동원으로 사용하면 차량이 회전할 때 좌우측 바퀴에 속도오차가 발생하게 된다. 이는 차량 바퀴의 속도 불균형을 일으켜 차량의 흔들림이나 속도 저감 등의 문제점을 가져온다.

따라서 본 연구에서는 유도 전동기를 기반으로 한 전기자동차 차동장치의 구동속도에서 발생하는 오차를 보상하기 위한 방법을 제안한다. 실험을 통해 주행시 좌·우측 바퀴의 회전현상을 해석한 후, 이를 이용하여 비선형적 오차를 보상하기 위한 차동 속도 제어기의 구조를 설계하고 학습능력을 가진 신경망을 적용함으로써 속도 오차 보상을 구현한다.

논문의 구성은 2장에서 조향각에 따른 주행궤적의 기구학 모델에 의한 주행 시 좌우측 바퀴의 이상적인 속도모델을 구하고, 학습한 신경망을 이용하여 보상할 수 있는 차동 시스템을 제안한다. 3장은 실험적 검증을 위해 제작한 전기자동차와 실험장치를 기술하고, 실측 데이터를 살펴본다. 전기자동차는 2개 유도전동기를 이용한 후륵 좌·우 독립 구동 방식, 2개 독립 구동 인버터 방식으로 설계하였다. 4장에서는 실측 데이터의 특성분포를 고찰하고 이를 학습하기 위한 신경망 모델을 설계하며, 학습이 완료된 신경망 모델을 이용하여 주행속도와 조향을 다양하게 변화시켰을 때의 내·외측 바퀴의 회전속도 특성분포를 나타낸다. 5장에서는 제안한 신경망 보상에 대하여 간략하게 결론을 정리한다.

II. 전기자동차의 차동 시스템

1. 기구학적 모델

일반적으로 자동차의 주행궤적은 차량의 기구학 모델을 기반으로 해석된다. 차량이 저속으로 주행할 경우 조향각에 따른 주행궤적의 기구학 모델로 Ackermann-Jeantand 모델이 널리 사용되고 있다. 이 모델에서 차량

접수일자 : 2000. 5. 4., 수정완료 : 2000. 7. 25.

유영재, 장영학 : 목포대학교 제어계측공학과

이주상, 임영철 : 전남대학교 전기공학과 및 지역협력연구센터

김의선 : 서남대학교 전기전자멀티미디어공학부

문채주 : 목포대학교 전기공학과

이 곡선도로를 선회주행 할 때 원심력의 영향을 무시할 수 있고, 이 원심력과 평형을 이루는 구심력도 무시할 수 있다고 가정한다. 타이어에는 어떤 힘도 작용하지 않는다고 할 수 있어 타이어의 접지부분도 점 접촉을 하고 있다고 간주할 수 있다. 따라서 이때의 자동차 선회주행 상태는 순수한 기하학적 관계에 따라 이루어진다고 볼 수 있다. 즉 선회 주행 시 회전반경 또는 자동차의 중요한 치수들 예를 들면 차량 좌·우측 바퀴사이의 거리, 앞·뒤 바퀴간의 거리 및 조향 시 앞바퀴 좌·우의 조향각 등의 값을 포함한 기하학적 관계에 따라 이루어진다.

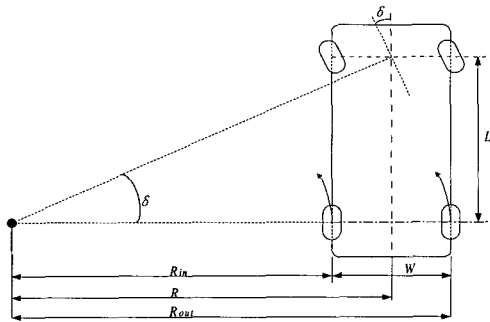


그림 1. Ackermann-Jeantand 기구학 모델.
Fig. 1. Geometric model of Ackermann-Jeantand.

그림 1은 자동차 주행 궤적의 기구학인 Ackermann-Jeantand 기구학 모델을 나타낸다. 모델에서 차량의 좌·우측 바퀴사이 거리는 W , 앞·뒤 바퀴간의 거리는 L , 조향각은 δ , 차량중심의 주행반경은 R , 그리고 후륜 내측바퀴와 외측바퀴의 주행반경은 각각 R_{in} , R_{out} 이다. Ackermann-Jeantand 기구학 모델을 이용하여 후륜 구동형의 전기자동차가 주행할 때 좌·우측바퀴 또는 내·외측바퀴의 속도를 구하면 다음과 같은 관계를 유도할 수 있다.

$$\begin{aligned}
 R &= \frac{L}{\tan \delta} , \\
 C_{in} &= 2\pi R_{in} = 2\pi R - \pi W \\
 C_{out} &= 2\pi R_{out} = 2\pi R + \pi W , \\
 \omega_{in} &= \frac{C_{in}}{T} = \omega_c - \Delta\omega \\
 \omega_{out} &= \frac{C_{out}}{T} = \omega_c + \Delta\omega , \\
 \text{where } \Delta\omega &= \left(1 - \frac{W}{2L} \tan \delta\right) \omega_c .
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

(1)에서 C_{in} 와 C_{out} 은 차량의 주행시 내측바퀴 궤적 거리와 외측바퀴 궤적거리이며, ω_{in} 과 ω_{out} 은 주행 궤적을 따라 움직이는 내측바퀴 속도와 외측바퀴 속도이고, T 는 원궤적 주행시간이다.

이 관계식에 의하면 이상적인 경우 차량의 내외측바퀴는 기준속도 ω_c 에 대해 동일한 속도차 $\Delta\omega$ 로 가감이 되어 회전해야 함을 알 수 있다. 또한 내외측바퀴의 속도차 $\Delta\omega$ 는 기준속도가 증가함에 따라 선형적으로 증가하며, 조향각의 \tan 함수는 적은 각도구간($-20^\circ \sim +20^\circ$)에

서는 비선형적인 성분을 무시할 수 있다.

그러나 유도전동기로 구현된 전기자동차는 이상적인 좌우측 회전의 정도에 따라 구동부에서는 속도가 감소하는 현상이 발생한다. 이는 전륜 조향장치의 구조, 후륜 구동장치의 위치 등에 따라 복잡하고 비선형적인 감속현상을 발생한다. 또한 차량의 주행 시에도 속도와 조향각에 따른 내·외측 바퀴의 속도 관계가 선형적으로 변하지 않는 물리적인 현상이 있다. 때문에 차량은 원하는 속도로 주행하게되거나 좌·우측바퀴의 속도오차로 인하여 차량 진행방향이 틀어지는 문제점을 발생한다.

따라서 전기자동차의 주행속도와 조향각에 따라 내·외측 바퀴가 이상적인 속도차를 가지고 회전할 수 있는 전기자동차시스템을 구현하기 위해서는 물리적인 현상에서 발생하는 좌우바퀴 속도의 불균형을 고려하여 속도를 보상할 수 있는 보상기가 요구된다.

2. 신경망을 이용한 속도보상

실제 전기자동차의 주행속도와 조향각에 따른 내·외측 바퀴 속도의 비선형적인 현상을 해석하고, 이를 선형적인 출력이 발생하도록 보상하기 위한 모델을 만들고, 이를 학습이 가능한 신경망에 적용함으로써 보상기를 설계한다.

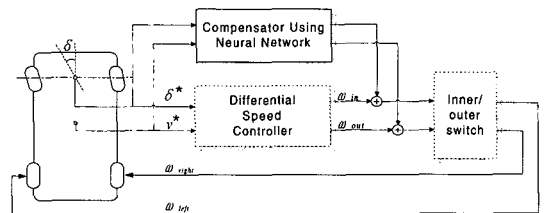


그림 2. 신경망보상기를 이용한 차동제어기의 구조.
Fig. 2. Structure of differential control system using neural network compensator.

그림 2는 신경망 보상기를 이용한 차동속도 제어기의 구조를 나타낸다. 신경망을 이용한 보상기는 전기자동차의 주행속도와 조향각 명령에 따른 후륜 내·외측 바퀴의 보상속도를 출력한다.

III. 실험 및 학습 데이터 획득

1. 전기자동차의 실험장치

본 실험에서는 신경망 학습에 사용할 실측 데이터를

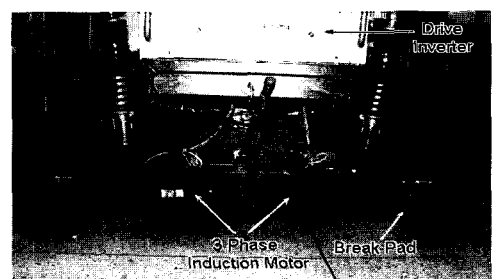


그림 3. 전기자동차 후륜구동부의 구조.
Fig. 3. Structure of rear drive-part of electric

vehicle.

획득하기 위하여 전기자동차를 직접 제작하여 실제 도로에서 주행 실험을 하였다. 전기자동차는 2개 유도전동기를 이용한 후륜 좌·우 독립구동방식, 2개 독립 구동 인버터 방식으로 설계하였다.

그림 3은 실험을 위해 제작한 전기자동차의 전륜 조향부와 후륜 구동부를 나타낸다. 조향장치의 기계적인 구조는 상용차량의 것과 동일한 구조를 채택하고, 구동력은 DC모터를 이용하였다. 주행을 위한 후륜 구동력은 3상 유도전동기에 의해 구동하였다.

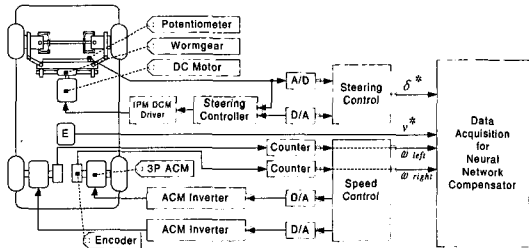


그림 4. 실측 데이터 획득 장치 구성도.

Fig. 4. Block diagram of measurement and acquisition system.

차동 제어 시스템의 신경망을 학습하기 위한 데이터 획득 시스템의 구성은 그림 4와 같다. 컴퓨터에서 설정한 조향 명령은 D/A를 통해 DC 모터에 전달되어 원하는 조향각으로 설정된다. 구동모터의 수평운동축에 설치된 potentiometer에 의해 조향각(좌 20° ~우 20°)에 해당하는 전압(-10~+10volt)이 발생되며 A/D를 이용하여 계측한다. 시스템은 계측된 전압을 조향각/전압의 관계에 의하여 조향각으로 변환한다.

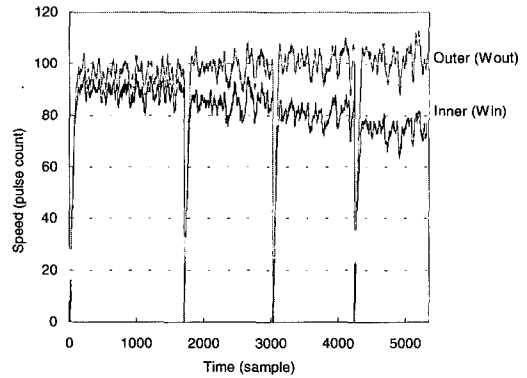
주행하는 동안의 내·외측바퀴의 속도를 검출하기 위해 유도전동기에는 360[pulse/round]의 엔코더가 직결되어 있다. 이 엔코더에서 나오는 펄스는 카운터를 통해 계측하게 된다. 실제 주행을 속도 명령을 내리게 되면 D/A를 통해 인버터로 입력이 되어 3상 유도 전동기를 구동하게 된다.

2. 실측 데이터

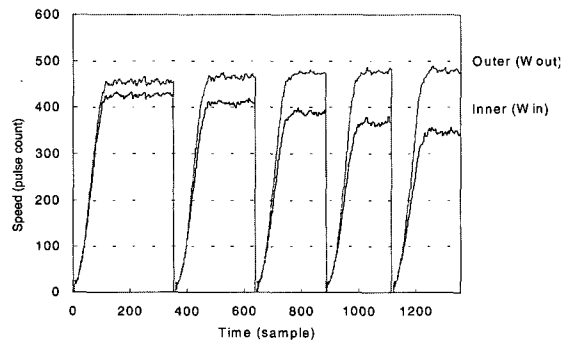
전기자동차의 실제 도로를 선회 주행시켜 실측 데이터를 획득하였다. 선회 주행에서 차량은 90° 회전하게 되며, 이때 차량은 곡률반경 5[m] 이내의 원에서 1/4 원형도로를 주행하게 된다. 주행시 차량의 속도와 조향각의 변화에 따른 좌우 바퀴의 회전속도를 실험 데이터 획득 시스템을 통해 측정하였다.

그림 5는 주행 실험을 통해 계측한 실측 데이터를 나타낸다. 속도를 일정하게 명령치를 준 다음 조향각을 단계별로 증가시켜 획득한 주행 데이터이다. 그림 5의 (a)는 속도를 0.2 (93 pulse count / 50msec)로 고정시킨 후 조향각을 0.2 (4°), 0.4 (8°), 0.6 (12°), 0.8 (16°), 1.0 (20°)로 변화시키면서 획득한 데이터이고, (b)는 속도를 0.8 (441 pulse count / 50msec)로 고정시킨 후 조향각을 0.2 (4°)에서 최대각인 1.0 (20°)까지 점점 증가시켜

얻은 데이터이다. 획득데이터를 살펴보면 외측 바퀴의 회전수가 내측 바퀴의 회전수보다 더 큰을 볼 수 있고, 조향각을 점점 증가시킬수록 그 차이가 더 커짐을 알 수 있다.



(a) 속도 0.2 (93 pulse count) 일 때,



(b) 속도 0.8 (441 pulse count) 일 때.

그림 5. 주행실험에 의한 속도 및 조향각의 변화에 따른 내·외측 바퀴의 회전속도 데이터.

Fig. 5. Speed data of inner and outer wheel in accordance with command speed and steering angle.

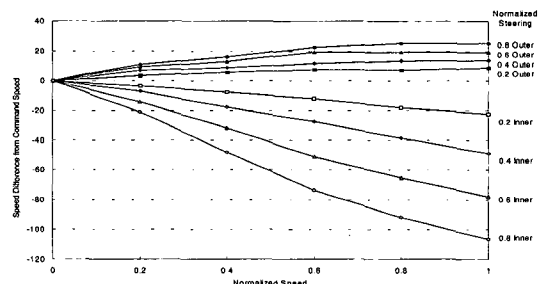


그림 6. 속도명령과 조향각에 따른 내·외측바퀴의 속도차.

Fig. 6. Speed difference of inner and outer wheel in accordance with command speed and steering angle.

IV. 신경망 보상기

1. 실측 데이터에 의한 특성 분포

주행 실험으로 획득한 실측 데이터에서 각 바퀴의 회전수 그리고 차량의 조향각과 속도와의 관계와 특성을 파악하기 위하여, 그림 6과 같이 내측 바퀴, 외측 바퀴 각각에 대한 데이터를 분석하여 보았다.

그림은 기준속도에 대한 내측 바퀴의 속도차와 외측 바퀴의 속도차를 보여준다. 차량 속도의 변화 구간은 0 ~ 25[m/sec]를 0 ~ 1로 정규화 하여 나타내었다. 또한 조향각의 변화 구간은 차량의 조향각도인 0° ~ 20°를 0 ~ 1 사이의 값으로 정규화 하였다. 내측바퀴의 속도차를 보면, 조향각에 따라 비선형적으로 감소함을 알 수 있다. 또한 외측 바퀴의 속도차를 보면, 조향각이 클수록 속도명령에 따른 속도차가 포화됨을 알 수 있다. 또한 내외측의 속도차가 동일하지 않음을 알 수 있다.

2. 신경망에 의한 보상기 설계

신경망을 이용하여 차동 보상기를 모델링하기 위한 구조는 그림 7과 같다. 제작한 전기자동차와 실험장치에 의하여 획득된 주행속도(v^*)와 조향각(δ^*)에 따른 좌·우측 바퀴의 회전속도(W_{left} , W_{right}) 데이터를 이용하여 차동 보상기를 학습한다. 측정된 내·외측 바퀴의 회전속도에서 속도명령을 변환한 기준 회전속도를 제거하여 각 바퀴의 속도차를 얻는다. 선형모델과 실측된 차동속도를 비교하여 보상할 내외측 회전속도를 산출하여 신경망 학습에 적용한다.

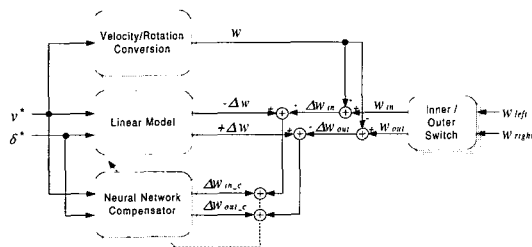


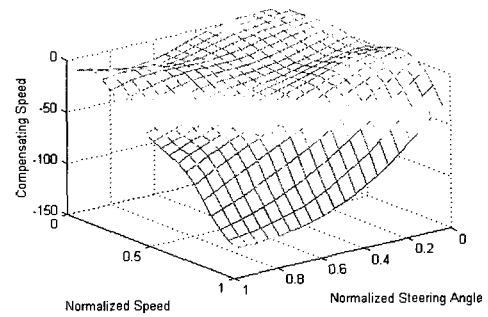
그림 7. 속도오차 보상을 위한 신경망의 학습.
Fig. 7. Learning of neural network to compensate speed error.

신경망 모델은 은닉층을 포함하고 있는 다층 신경망 구조의 역전파 알고리즘을 이용하였다. 입력층의 소자로 차량의 속도와 조향각을 사용하며, 출력층은 내측 바퀴 회전속도와 외측 바퀴 회전속도의 보상속도를 출력한다. 신경망을 학습할 때 사용한 학습율은 0.01로 하였으며, 학습횟수는 5,000회 이상을 반복하였다.

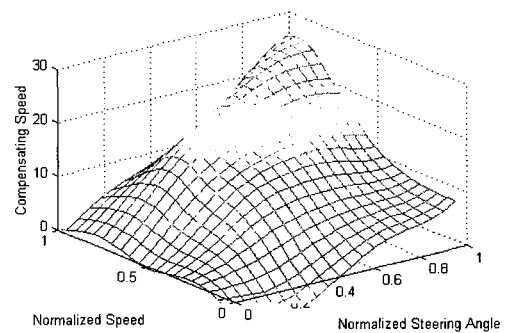
3. 신경망 보상기에 의한 차동속도

신경망을 이용하여 속도보상을 모델링한 결과, 그림 8과 같은 특성분포를 얻을 수 있다. 차량은 곡선도로를 주행할 때 속도 명령값과 비교하면 내측 바퀴는 저속으로, 외측 바퀴는 고속으로 회전하게 된다. 이때 속도 명령값에 의한 내·외측바퀴의 속도차($\Delta\omega$)는 주행속도와 조향각에 따라 비선형적인 오차보상이 필요하다.

그림 8의 (a)는 학습이 완료된 신경망 모델에 의한 속도와 조향각에 따른 내측바퀴 속도보상 특성분포를 나



(a) 내측 바퀴

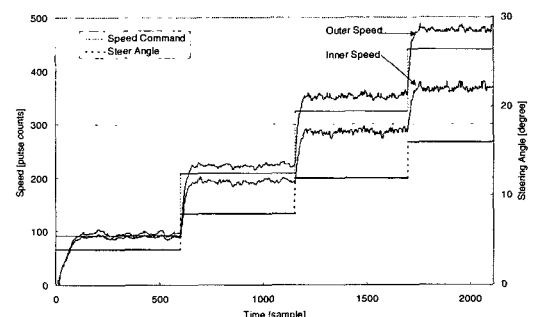


(b) 외측 바퀴

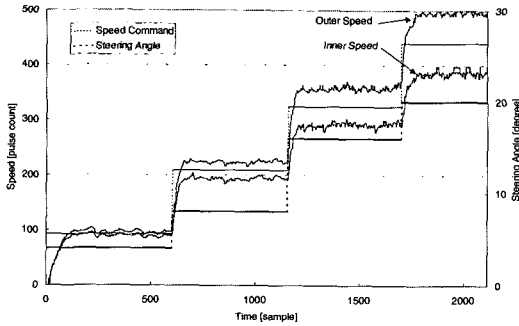
그림 8. 신경망 보상기의 특성분포.
Fig. 8. Property surface of neural network compensator.

타낸다. 조향각이 적고, 속도가 적을 때는 속도 보상이 필요없지만, 조향각과 속도가 커질수록 보상속도가 커짐을 알 수 있다. 외측바퀴 속도보상 특성인 그림 8의 (b)을 보면, 속도가 큰 경우에 외측바퀴의 회전속도 보상이 민감함을 보여준다.

그림 9는 신경망 보상기를 채용한 제어기를 이용하여 곡선도로를 주행하였을 때, 속도명령과 조향각에 따른 좌우측 바퀴의 속도를 측정된 결과이다. 속도명령을 단계별로 93, 209, 325, 441[pulse-count]로 각각 증가시켰으며, 동시에 조향각도 4°, 8°, 12°, 16°의 계단입력형태로 증가시켰다. 측정된 좌우측 바퀴 속도를 살펴보면, 기준 속도명령에 대하여 내측 바퀴와 외측바퀴는 동일한 크기로 각각 가해지고 감해지는 것을 볼 수 있다. 또한 조



(a) 신경망 보상기를 채용하지 않은 경우



(b) 신경망 보상기를 채용한 경우

그림 9. 차동속도 실험결과.

Fig. 9. Experimental result of differential speed.

향각이 증가함에 따라 기준속도명령에 대한 내외측바퀴의 속도차가 선형적으로 증가함을 볼 수 있다.

V. 결론

본 논문에서는 전자차동장치에서 차량바퀴의 속도 불균형을 일으키는 속도오차를 보상하기 위하여 신경망을 이용한 방법을 제안하였다. 실험을 통해 주행시 좌·우측 바퀴의 회전현상을 해석한 후, 이를 이용하여 비선형적 오차를 보상하기 위한 차동 속도 제어기의 구조를 설계하고, 신경망을 적용함으로써 속도오차 보상기를 구현하였다. 이를 위해 조향각에 따른 주행궤적의 기구학 모델에 의한 좌·우측 바퀴의 이상적인 속도모델을 구하고, 신경망을 이용하여 보상할 수 있는 차동 시스템을 설계하였다.

실험적 검증을 위해 2개 유도전동기의 후륜 좌·우 독립 구동 방식, 2개 독립 구동 인버터 방식으로 제작한 전기자동차로 곡선도로를 주행하여 실측 데이터를 확보하였다. 실측 데이터의 특성분포를 고찰하고, 설계한 신경망 보상기를 다양한 주행속도와 조향각에 따른 주행에 적용하여 그 유용성을 검증하였다.

제안한 차동 제어기의 신경망 보상기는 최근 연구되고 있는 전기자동차용 전동기와 구동장치에 적용하면 우수한 주행특성을 나타낼 것으로 예상된다.

참고문헌

[1] K. Shibahata, et al., "Developments of an experimental four-wheel-steering vehicle," *SAE paper*, 860623, 1986.

[2] T. Takiguchi, et al., "Improvement of vehicle dynamics by vehicle-speed-sensing four wheel steering system," *SAE paper*, 860624, 1986.
 [3] S. Sano, et al., "Four wheel steering system with rear wheel steer angle controlled as a function of steering wheel angle," *SAE paper*, 860625, 1986.
 [4] J. C. Whitehead, "Four wheel steering system: Maneuverability and high speed stabilization," *SAE paper*, 880642, 1989.
 [5] C. C. Chan, "Axial-field electrical machine design and applications," *IEEE Trans. on Energy Conversion*, pp. 294-300, 1987.
 [6] F., Caricchi, F., Crescimbin, and E., Santini, "Axial flux electromagnetic differential induction motor," *7th Intern. Conf. on Electrical Machines and Drives*, pp. 1-5, 1995.
 [7] F., Profumo, Zhang Zheng, A., Tenconi, "Axial flux machines drives: A new viable solution for electric cars," *Procs. of IEEE IECON '96*, vol. 1, pp. 34-40, 1996.
 [8] A., Kawamura, T. Yokoyama, and T., Kume, "Anti-directional-twin-rotary motor drive for electric vehicles," *Conf. of IEEE Industry Applications Society 1994*, vol. 1, pp. 453-459, 1994.
 [9] A., Kawamura, N., Hoshi, Tae Woong Kim, T., Yokoyama, and T., Kume, "Analysis of anti-directional-twin-rotary motor drive characteristics for electric vehicles," *IEEE Trans. on Industrial Electronics*, vol. 44, pp. 64-70, 1997.
 [10] O., Crelerot, F., Bernot, and J. M., Kauffmann, "Study of An electrical differential motor for electrical Car," *6th Intern. Conf. on Electrical Machines and Drives*, pp. 416-420, 1993.
 [11] P. M. Kececy and R. D., Lorenz, "Control methodology for single inverter, parallel connected dual induction motor drives for electric vehicles," *IEEE Power Electronics Specialists Conference, PESC '94*, vol. 2, pp. 987-991, 1994.
 [12] P. M. Kececy, R. D., Lorenz, "Control methodology for single stator, dual-rotor induction motor drives for electric vehicles," *IEEE Power Electronics Specialists Conference, PESC '95*, vol. 1, pp. 572-578, 1995.



유 영 재

1991년 전남대학교 전기공학과 (공학사). 1993년 전남대학교 전기공학과 (공학석사). 1998년 전남대학교 전기공학과 (공학박사). 현재 목포대학교 제어계측공학과 전임강사. 관심분야는 신경망 및 퍼지이론, 지능제어시스템, 이동로봇, 자율주행시스템, 전기자동차 구동시스템.



김 의 선

1981년 전남대학교 계측공학과 (공학사). 1987년 전남대학교 전기공학과 (공학석사). 1999년 전남대학교 전기공학과 (공학박사). 현재 서남대학교 전기전자멀티미디어공학부 조교수. 관심분야는 신경망 및 퍼지이론, 자율주행시스템.



이 주 상

1996년 목포대학교 공과대학 전기공학과 졸업(공학사). 1998년 전남대학교 일반대학원 전기공학과 졸업(공학석사). 현재 동대학원 박사과정. 관심분야는 전자식 차동장치, 무인자율주행, 퍼지 및 신경망을 이용한 지능제어.



장 영 학

1981년 전남대학교 계측공학과 (공학사). 1984년 전남대학교 전기공학과 (공학석사). 1991년 전남대학교 전기공학과 (공학박사). 1998년 호주 모나시대 객원교수. 현재 목포대학교 제어계측공학과 부교수. 관심분야는 퍼지이론, 전력전자제어.



임 영 철

1975년 전남대학교 전기공학과 (공학사). 1977년 고려대학교 전기공학과 (공학석사). 1990년 고려대학교 전기공학과 (공학박사). 현재 전남대학교 전기공학과 교수. 전남대학교 고품질전기전자부품및시스템연구센터 소장. 관심분야는 퍼지, 신경망, 지능 제어계측, 전력전자.



문 채 주

1981년 전남대학교 계측공학과 (공학사). 1983년 전남대학교 전기공학과 (공학석사). 1994년 전남대학교 전기공학과 (공학박사). 1986-1997년 한전기술 책임연구원. 현재 목포대학교 전기공학과 조교수 관심분야는 전력시스템 제어, 공정제어.