

면역알고리즘 적응 제어를 이용한 AGV 주행제어에 관한 연구

論 文

49D-4-5

An AGV Driving Control using Immune Algorithm Adaptive Controller

李榮珍*·李權純**·李章明***

(Young-Jin Lee · Kwon-Soon Lee · Jang-Myung Lee)

Abstract - In this paper, an adaptive mechanism based on immune algorithm is designed and it is applied for the autonomous guided vehicle(AGV) driving. When the immune algorithm is applied to the PID controller, there exists the case that the plant is damaged due to the abrupt change of PID parameters since the parameters are adjusted almost randomly. To solve this problem, a neural network is used to model the plant and the parameter tuning of the model is performed by the immune algorithm. After the PID parameters are determined in this off-line manner, these gains are then applied to the plant for the on-line control using immune adaptive algorithm. Moreover, even though the neural network model may not be accurate enough intially, the weighting parameters are adjusted to be accurate through the on-line fine tuning. The computer simulation for the control of steering and speed of AGV is performed. The results show that the proposed controller has better performances than other conventional controllers.

Key Words : Immune Algorithm, Adaptive Control, PID Controller, Neural Network Identifier, Driving Control, Autonomous Guided Vehicle(AGV)

1. 서 론

산업이 고도화됨에 따라 생산 현장이 완전 자동화되고 있고, 사람이 직접 작업할 수 없는 위험하거나 힘든 작업 현장에서 사람을 대신하기 위한 다양한 로봇 개발의 필요성이 증가함에 따라 이동 로봇 분야의 연구가 국내외적으로 활발히 진행되고 있다. 이러한 무인 운송시스템은 운송 수단 발전의 필연적인 요구로서, 인간에게 편리한 시스템의 제공과 더불어 복잡한 교통 문제의 해결, 장애자의 편리한 수단 및 무인 하역 장비에 이르기까지 폭넓게 응용될 수 있는 필수적인 분야로 대두되고 있다. 특히, 산업현장에 널리 이용되는 무인 운반차(autonomous guided vehicle; AGV)는 정해진 주행 경로를 따라 이동하며, 물류를 이송하는 시스템으로서 산업현장의 생산성 향상이 그 목적이라 할 수 있다. 무인 운반차를 운행함에 있어 이러한 목적을 달성하기 위해서는 우선 가급적 고속으로 주행하여 물류 운반에 소요되는 시간을 줄임으로써 전체적인 생산성을 높이는 것이 요구된다. 그러나, 차량이 고속으로 주행하게 되면 곡선 주행시 전복이나 탈선으로 인한 안정성 문제가 야기될 수 있으며, 이는 AGV의 조향(steering) 및 속도제어의 성능이 이를 좌우한다해도 과언

이 아닐 것이다. 따라서 각 제어기들은 다양한 운행환경과 부하변동이나 주위의 환경변화에도 적응적으로 대처할 수 있도록 설계되어야 할 것이다[1,2].

이러한 AGV의 능동제어를 위하여 선행되어야 할 일은 먼저 가장 적절한 제어기를 선택하고, 선택된 제어기를 이용하여 시스템이 최적의 성능이 나올 수 있도록 제어기의 매개변수를 최적 설계하는 것이다. 이를 해결할 수 있는 가장 좋은 방안은 먼저 제어 대상 시스템인 AGV에 대한 해석 모델을 구하고, 그 성능을 수학적으로 직접 분석 및 평가하여 구하는 것이다. 이러한 방법으로는 피드백 제어(feedback control)나 LQG/LQR과 같은 선형 제어이론이 수학적 표현이 비교적 단순하고 기존의 제어용 소프트웨어를 쉽게 활용할 수 있다는 이점으로 많이 적용되어 왔다. 그러나, 일반적으로 대상 시스템에 대한 정확한 모델을 구하는 것은 쉽지 않으며, 설사 적절한 모델이 구해진다 하더라도 기존의 선형 제어기법들은 시스템의 비선형성을 선형화로 전환하여 해석 또는 설계하기 때문에 비선형적 요소를 많이 내포하고 있는 경우 그 동특성을 충분히 표현하기가 어렵다. AGV의 경우에도 다양한 운전 조건이 요구되고, 주행시 주위환경의 변화에 따른 시스템 파라미터의 불확실성(uncertainty)을 항상 내포하고 있어 정량적인 분석 및 설계기법만으로는 해결하기가 쉽지 않다. 이러한 문제점을 해결하기 위한 방안으로서 시스템으로부터 얻을 수 있는 정보를 이용해 플랜트를 동정하여 제어기 설계에 적용하고 있다. 특히, 최근에는 신경회로망을 이용하여 보다 쉽게 모델을 얻음으로써 실제 플랜트에 보다 쉽게 접근할 수 있는 계기를 마련하고 있다.

이러한 기술을 바탕으로 자기동조 제어, 기준모델 적응제

* 正 會 員 : 東亞大 電氣工學科 博士課程

** 正 會 員 : 東亞大 電氣電子컴퓨터工學部 教授 · 工博

*** 正 會 員 : 釜山大 電子工學科 副教授 · 工博

接受日字 : 2000年 1月 25日

最終完了 : 2000年 3月 14日

어, 적응 예측제어, 강인제어 등과 같은 이론들이 발표되고 있으나, 그 구조가 복잡하고 제한된 불확실성 내에서 적용 가능하며, 비선형성이 강하거나 동작점의 범위가 넓은 경우는 또 다른 대책을 강구해야 하는 문제점을 안고 있다[3]. 때문에 최근에는 인간의 학습, 인지, 판단 및 진화능력을 이용한 퍼지논리, 신경회로망 등과 같은 인공지능 기법(artificial intelligence)이 개발되어 연구가 활발히 수행되고 있다. 그러나, 이러한 방법도 제어기 구조적 결합에 의한 국소해에 빠지거나 탐색공간이 좁아 국소해에 머무르는 문제가 발생하기도 하며, 제어기 구조가 더욱 복잡해지면서 제어기 자체의 최적설계가 요구되고 있다. 특히, 제어기 자체의 최적설계를 위하여 유전 알고리즘 등과 같은 최적화 알고리즘을 추가로 결합하여 오프라인(off-line)[4] 혹은 온라인(on-line)[5]으로 적용한 사례가 보고되고 있다. 본 연구에서도 이러한 문제 해결의 한 방안으로서 비결정론적 최적화 알고리즘인 면역알고리즘(immune algorithm)을 이용하여 제어기 파라미터를 오프라인 및 실시간으로 동조하는 적응제어기를 구성하고자 한다.

면역알고리즘은 생체의 정보처리구조에 기반을 둔 면역시스템(immune system)으로서 1970년경 Jerne[6]의 항체 규제 가설이 정립되면서 면역네트워크(immune network)를 이용한 로봇동제어[7]를 비롯하여, TSP문제[8], 전자석의 최적설계[9]와 같은 최적화문제에 이르기까지 다양한 분야에서 응용되고 있다. 지금까지 알려진 바에 따르면, 생체의 면역시스템은 생체내에 투입되는 항원(antigen) 즉, 박테리아(bacteria) 및 병원균세포(germ cell)와 같은 외부 침투물질을 인식하여 이를 방어함과 동시에 생체내부의 안정된 상태를 스스로 조절해 나가는 진화적 생체방어 시스템으로 알려져 있다. 뿐만 아니라, 유전자 교배 및 번식 등을 통한 진화적 학습, 기억 및 인식 등의 능력을 함께 갖추고 있어 이를 활용한 공학적 응용사례가 점차 많아지고 있으며, 최근에는 해의 탐색능력이나 수렴 특성면에서 유전알고리즘보다 그 성능이 보다 우수하다는 보고[9]도 되고 있어 그 활용가치가 더욱 높다고 할 수 있다.

본 논문에서는 이러한 면역알고리즘을 이용하여 다음의 2가지 관점에서 적응제어기를 설계하고자 하며, 이를 AGV의 주행제어 문제에 적용하여 그 성능을 검증하고자 한다. 첫째, 복잡한 제어기설계의 문제를 해결하기 위하여 간단한 구조를 갖는 PID 제어기를 기본 제어기로 구성하고자 하며, 둘째, AGV 주행시스템을 신경회로망으로 모델링하여 제어기 파라미터를 오프라인 및 온라인으로 설계할 수 있도록 함으로써 기존의 오프라인 동조방식의 문제점을 해결하고 실제 플랜트 적용에 대한 방법론도 함께 제시하고자 한다. 아울러, AGV의 기본적인 설계를 통하여 조향 및 속도 제어 시스템을 표현하고, 이를 제어할 수 있는 알고리즘을 개발한 후 모의실험을 통하여 설계된 제어기 및 시스템의 타당성과 구현 가능성을 검증하고자 한다.

2. AGV의 수학적 모델링

실제 UCT의 주행제어를 위한 설계요소로는 주행속도, 위치정밀도, 장애물인식을 위한 센서 등이 기본적으로 요구된다. 주행속도의 경우는 각 회사마다 다르지만 평균 3~

5[m/sec]정도이고, 정지를 위한 위치정밀도는 2.54[cm], 주행시 좌우의 위치정밀도는 ± 10 [cm] 범위이다. 최근 국외의 AGV 제작사들은 최대 주행속도를 8[m/sec]정도로 높이고, 위치결정 정밀도도 1[cm] 이내로 하는 기술개발을 하고 있으며, 실현가능성이 높은 것으로 보고되고 있다[10]. UCT의 구동을 위한 시스템으로는 UCT 제작의 대표적인 회사인 Kamag사의 경우 유압 및 전기 시스템 및 엔진 등을 이용하여 구동장치를 설계 및 제작하고 있다. 본 논문에서 대상으로 한 AGV는 항만에서 컨테이너 수송차량인 UCT(unmanned container transporter)의 시뮬레이터로 제작된 20:1의 축소 모델로 하였고, 구동은 dc 모터, 제어는 AGV에 탑재된 pc와 마이크로 컴퓨터로 수행하며, 주행을 위하여 vision 정보를 이용하였다. 또한, 충돌 안전장치로서 초음파 센서를 이용하였고, 실제 항만 시뮬레이터를 구성할 계획으로 모두 3대의 AGV를 제작중이며, 통제실, 크레인 및 AGV 간의 양방향 무선통신 시스템도 구성하였다. 이상과 같은 AGV의 각 모듈 배치와 구성요소는 그림 1과 같다.

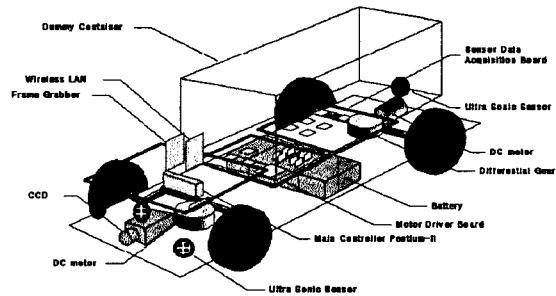


그림 1 AGV 모듈배치와 투시도
Fig. 1 AGV module arrangement and opened-up view

각 구성요소 및 특징을 대략적으로 살펴보면, 메인 컨트롤러(Main controller)는 이미지(Vision)정보, RF정보, 초음파 및 적외선 센서의 정보를 처리하기 위하여 PC 기반으로 구성하였으며, AGV에서 전송되는 Traffic 정보를 받아서 분석 처리, 작업 지시를 위한 주 제어기의 역할을 한다. 주행 및 장애물 회피를 위하여 전방에는 Vision 정보를 획득하기 위한 CCD Camera가 부착되어 있으며, 8[Mbps]의 전송속도를 가지는 스펙트럼 확산방식 Wireless LAN을 이용하여 AGV 간에 Traffic 정보를 교환할 수 있도록 하였다. 뿐만 아니라 이미지 정보만으로는 장애물 회피나 감지가 원활하지 않을 뿐 아니라 전방의 정보 밖에 얻을 수 없으므로, 앞·뒤 및 양측에 각각 1조의 초음파 센서(ultrasonic sensor)를 장착하여 영상 정보를 보조하도록 하였다. 센서는 장거리 정밀 센서를 채용하여 신뢰도를 높임과 동시에 타 AGV와의 간섭을 방지하도록 하였다. 측면(45°) 및 후방의 센서는 각기 근거리의 장애물을 감지하도록 하였다.

AGV Controller PC에 유/무선 접합 장치를 사용하였으며, 정보 융합(data fusion)은 메인 컨트롤러에서 하도록 설계하였다. AGV의 조향 및 주행을 위하여 2대의 dc 모터를 이용하였다. 조향을 위한 DC Servo motor는 자동차와 동일한 원리의 링크로 구성하여 모터의 회전운동을 직선운동으로 바꿔 조향을 하도록 하였다. 주행을 위한 Actuator motor는 더미

컨테이너(Dummy container)의 하중에 충분히 대응 할 수 있는 고성능 모터를 채용하였다. 각 모터는 메인 컨트롤러 및 모터 컨트롤러의 제어를 받으며, 모터 컨트롤러는 DC Servo motor 및 Actuator motor를 구동하기 위해 마이크로 프로세서를 이용한 모터 구동부(Motor driver)로서 메인 컨트롤러와 연결되어 있어 이동 거리나 속도에 대한 정보를 얻을 수 있도록 하였다. 모터 Encoder 신호 처리부와 DIO를 가지며 LCD 인터페이스가 있는 통합 80C196KC 보드를 이용하였다. Battery는 재충전이 가능한 축전지를 이용하였다. 각 제어기, 두 개의 모터, 각종 센서, RF 모듈의 소비 전력에 의거 충분한 구동 시간을 갖도록 패키지로 구성하고, Logic 부분과 모터 부분은 독립적으로 구성하였다. 이와 함께 충전 보호 회로와 Negative voltage 공급을 위한 DC/DC Converter 모듈도 함께 제작하였다. 본 논문에서는 이상과 같은 구조로 제작된 AGV의 조향 및 속도제어 알고리즘을 개발하고자 하며, 사전 단계로서 각 제어기의 수학적 모델을 설계하여 이에 대한 모의실험을 통해 제안된 제어기의 성능을 검증하고자 한다.

AGV의 주행제어를 위한 알고리즘 개발방법으로는 크게 정적과 동적 방정식으로 접근할 수 있다. 전자는 AGV의 기구학적 관점에 근간으로 조향 및 속도를 제어하고자 하는 것이고, 후자는 AGV의 동역학적 방정식을 유도하고, 이를 근간으로 조향 및 속도제어뿐만 아니라 동역학적 특성을 함께 분석하고자 할 때 이용되고 있다. 본 논문에서는 AGV의 구동장치와 조향장치의 원활한 제어와 실제 시스템의 구현가능성을 검증하기 위하여 먼저, 구동모터의 특성과 기구학적인 관점에서 시스템을 모델링하고 제어기를 설계하여 모의실험을 구현하고자 한다. 이장에서는 후륜 구동방식의 자동차형 AGV의 기구학적 모델링과 속도 및 조향시스템에 대하여 기술하고자 한다.

2.1 AGV의 기구학 모델

우선, AGV가 후륜으로 구동되고 전륜으로 조향이 이루어진다고 할 때, 후륜 구동바퀴의 선속도와 전륜 조향바퀴의 각으로부터 AGV의 기구학을 구할 수 있다. 그림 2는 AGV 구동륜 전체 모델링을 나타낸다. 여기서 R은 후륜 구동바퀴의 중심점이고, F는 전륜 구동바퀴의 중심점이다[11].

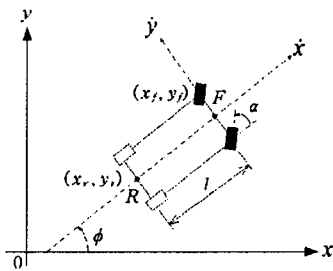


그림 2 AGV 기구학적 모델
Fig. 2 A kinematic model of AGV

직각좌표계에서 x 축과 AGV가 이루는 각을 ϕ 로 나타내고, 전방축 중심에서 AGV의 기구학 벡터를 정의하면 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$p = [x_f \ y_f \ \phi]^T \tag{1}$$

또한, 후륜 구동바퀴는 식 (2)와 같이 나타낼 수 있으며,

$$\begin{aligned} \dot{x}_r &= v \cos\phi \\ \dot{y}_r &= v \sin\phi \end{aligned} \tag{2}$$

여기서, v 는 AGV의 속도를 나타내며, x_r 및 y_r 는 후륜 축 중심좌표를 나타낸다. 이때, 후륜 구동바퀴 좌표에서 전륜 조향바퀴의 좌표를 표현하면 후륜과 전륜의 길이 l 을 고려하여 식 (3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} x_f &= x_r + l \cos\phi \\ y_f &= y_r + l \sin\phi \end{aligned} \tag{3}$$

전륜 조향바퀴의 선속도는 식 (3)에 의해 식 (4)와 같이 나타낼 수 있으며,

$$\begin{aligned} \dot{x}_f &= \dot{x}_r + l\dot{\phi}\sin\phi \\ \dot{y}_f &= \dot{y}_r + l\dot{\phi}\cos\phi \end{aligned} \tag{4}$$

식 (4)를 행렬식으로 나타내면 식 (5)와 같다.

$$[\sin\phi \ -\cos\phi \ l]\dot{p} = 0 \tag{5}$$

여기서, $\dot{p} = [\dot{x}_f \ \dot{y}_f \ \dot{\phi}]^T$ 는 직각좌표계에서의 속도벡터이다. 따라서 전륜 조향바퀴를 중심으로 한 AGV 모델에 대한 기구학적 운동 방정식은 식 (6)과 같이 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} \dot{x}_f &= v \cos(\phi + \alpha) \\ \dot{y}_f &= v \sin(\phi + \alpha) \\ \dot{\phi} &= \frac{v}{l} \sin\alpha \end{aligned} \tag{6}$$

여기서, α 는 AGV의 조향각을 나타내고, x_f 및 y_f 는 전륜 축 중심좌표를 나타낸다.

2.2 AGV의 구동 및 조향 시스템

AGV가 두 대의 dc 모터로 구동되므로 전륜 및 후륜에 사용된 각 모터의 상태방정식을 구해 보면, 먼저 구동을 위한 후륜 dc 모터 상태방정식은 다음 식 (7)과 같이 나타낼 수 있다[12].

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= Ax(t) + Bu(t) + C(b+w(t)) \\ x(t) &= \begin{bmatrix} \omega v \\ i_{a1} \end{bmatrix}, \quad u = e_{a1} \end{aligned}$$

$$A = \begin{bmatrix} -\frac{B_{m1}}{J_{m1}} & \frac{K_{cl}}{J_{m1}} \\ -\frac{K_{bl}}{L_{al}} & \frac{R_{al}}{L_{al}} \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{1}{L_{al}} \end{bmatrix}, C = \begin{bmatrix} -\frac{1}{J_{m1}} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (7)$$

여기서, 각 파라미터는 다음과 같다.

- b : 부하 토오크의 바이어스 성분=TL1[N·m]
- w(t): 평균(mean)이 0이고, 공분산(covariance)이 Q[N·m]인 백색 토오크 잡음
- e_{a1} : 입력전압[V]
- L_{a1} : 전기자 인덕턴스[H] K_{bl}: 역기전력 상수 [V/rad/sec]
- i_{a1} : 전기자 전류[A] K_{cl}: 토오크 상수[N·m/A]
- R_{a1} : 전기자 저항[Ω] ω_v: 회전자 각속도 [rad/sec]
- B_{m1}: 점성 마찰계수 [N·m/rad/sec]
- J_{m1}: 전동기의 회전자 관성 [N·m/rad/sec²]

또한, 조향을 위한 전륜 dc 모터 상태방정식은 조향에 필요한 각 α를 고려하면 다음 식 (8)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) + C(b+w(t))$$

$$x(t) = \begin{bmatrix} \theta \\ \omega_s \\ i_{a2} \end{bmatrix}, u = e_{a2}$$

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & -\frac{B_{m2}}{J_{m2}} & \frac{K_{c2}}{J_{m2}} \\ 0 & -\frac{K_{l2}}{L_{a2}} & \frac{R_{a2}}{L_{a2}} \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \frac{1}{L_{a2}} \end{bmatrix}, C = \begin{bmatrix} 0 \\ -\frac{1}{J_{m2}} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (8)$$

여기서, 각 파라미터는 다음과 같다.

- b : 부하 토오크의 바이어스 성분= T_{L2}[N·m]
- w(t): 평균(mean)이 0이고, 공분산(covariance)이 R[N·m]인 백색 토오크 잡음
- e_{a2} : 입력전압[V]
- L_{a2} : 전기자 인덕턴스[H] K_{l2}: 역기전력 상수 [V/rad/sec]
- i_{a2} : 전기자 전류[A] K_{c2}: 토오크 상수[N·m/A]
- R_{a2} : 전기자 저항[Ω] ω_s: 회전자 각속도 [rad/s]
- B_{m2}: 점성 마찰계수 [N·m/rad/sec]
- J_{m2}: 전동기의 회전자 관성 [N·m/rad/sec²]
- θ : 회전자의 각변위[rad](조향각 α)

이때, 구동 모터의 속도는 엔코더를 이용하여 측정할 수 있고, 조향각은 포텐시미터를 이용하여 측정할 수 있으므로 AGV가 운행시에 실시간으로 현재의 속도 및 조향각을 취득할 수 있다. 또한, 주어진 경로에 대한 차량의 위치정보는 CCD카메라로 취득한 영상정보로부터 얻어질 수 있다. 이렇게 얻어진 속도와 조향각은 각각의 제어기로 피드백되어 제어기를 구동하게 되고, 이로부터 얻어진 제어량인 입력전압이

모터로 인가되면 각 액추에이터를 구동시켜 AGV을 원하는 경로와 속도로 주행할 수 있도록 한다. 실제 차량에서 발생하는 부하변동 및 주위의 외란등은 모터에 인가되는 부하의 크기변화로 가정하였으며, 실제 차량에서 측정되는 센서에는 임의의 노이즈가 항상 포함되어 있으므로 측정잡음도 함께 고려하였다. 이상과 같이 기술된 내용을 바탕으로 AGV의 전체 주행제어 메카니즘은 다음의 그림 3과 같이 고려될 수 있다.

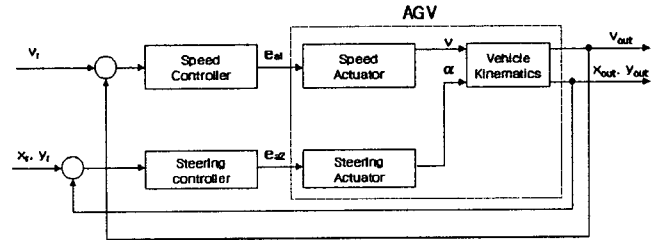


그림 3 AGV 조향 및 속도제어 블록다이어그램
Fig. 3 A block diagram for steering and speed control system of AGV

여기서, v_r, (x_r, y_r)는 각각 설정 속도 및 주행경로의 설정 좌표를 나타내고, e_{a1}, e_{a2}는 각 제어기에 입력되는 전압이며, v_{out}, α, (x_{out}, y_{out})는 출력속도, 조향각 및 현재 AGV의 위치좌표를 나타낸다.

3. 번역알고리즘을 이용한 제어기 설계

본 장에서는 지금까지 기술된 AGV의 주행시스템을 제어하기 위하여 번역 알고리즘을 이용한 적응 PID 제어에 관하여 기술하고자 한다. 먼저, 신경회로망 모델링에 대하여 기술하고, 신경회로망모델과 번역알고리즘을 이용한 오프라인 자동동조기 및 온라인 자기동조기에 대하여 기술하고자 한다.

3.1 신경회로망을 이용한 시스템 동정

2절에서 얻어진 주행제어시스템의 수학적 모델을 실제 AGV라 가정한다면 제어기에 필요한 파라미터를 최적 동조하는 것이 요구되며, 이를 위하여 설계된 파라미터를 실제 플랜트에 직접 적용하여 그 응답특성을 분석 및 파악함으로써 최적의 제어기를 설계할 수 있다. 그러나, 이러한 방법은 제어범위를 벗어난 예상치 않은 제어입력으로 인하여 플랜트에 치명적인 손상을 초래할 수 있다.

따라서, 본 논문에서는 신경회로망으로 AGV 시스템을 모델링하여 제어기 파라미터의 온라인 및 오프라인 설계가 용이하도록 하였다. 또한, 이렇게 얻어진 신경회로망 모델은 실시간 제어시에도 플랜트의 응답특성을 온라인으로 학습할 수 있는 구조로 설계하여 항상 시스템 모델링 오차를 최소가 되도록 하였다. 신경회로망 모델의 학습에 대한 블록선도는 그림 4와 같다[13].

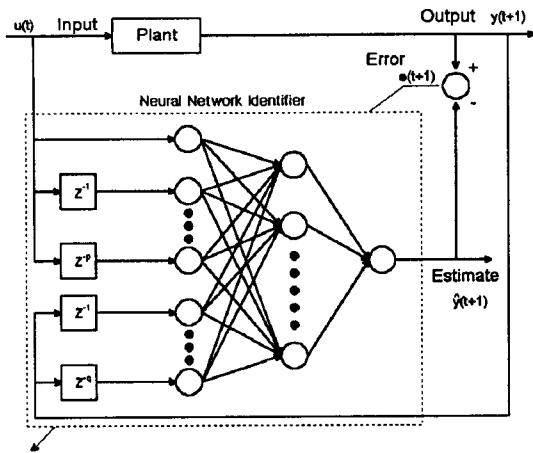


그림 4 신경회로망 모델링
Fig. 4 Neural network modeling

여기서, u 는 속도제어 및 조향제어 입력벡터로서 $u = \{e_{a1}, e_{a2}\}$ 이며, y 는 각 시스템의 출력벡터로서 속도, 조향각, 및 위치 출력 $y = \{v_{out}, \delta_{out}, x_{out}, y_{out}\}$ 을 나타내고 있다.

신경회로망 모델링 방법은 먼저 속도·조향제어기 및 AGV 기구학을 각각 모델링한 후 전체 시스템 모델을 결합하여 각각 모델링한 최종결과와 동일하도록 설계하였다. 그림 4에서 입력정보로 사용되는 제어입력 $u(t)$ 와 출력신호 $y(t)$ 의 차수 p 와 q 는 신경회로망의 입력패턴의 개수를 결정하게 된다. p 와 q 의 선정은 수학적 방정식으로 선정할 수 있지만, 실시간 제어의 경우 수학적 모델링이 표현하지 못한 동특성까지 고려하기 위해 여러 번의 실험과 시행착오를 거쳐 선정하였다. 본 논문에서는 신경회로망 동조를 위하여 사용된 입력신호로서 제어입력 $u(t)$, $u(t-1)$ 과 시스템 출력 $y(t)$, $y(t-1)$ 를 입력으로 하고, 출력은 각 시스템의 출력과 동일하게 설계하였다. 신경회로망 모델을 위하여 먼저 AGV 수학적 모델로부터 얻어진 적절한 제어기를 이용하여 AGV에 인가되는 입력을 신경회로망에 동일 입력으로 하고, 각종 센서로부터 얻을 수 있는 변위, 속도 및 조향각의 출력과 신경회로망의 출력과의 오차를 감소하는 방향으로 정해진 학습 알고리즘에 의해 학습을 시켰다.

이때, 신경회로망의 구조, 입·출력정보 및 학습패턴의 적절한 선정은 모델링 학습성능을 좌우하는 요인이 된다. 신경회로망 학습에 사용된 구조는 다층신경회로망을 이용하였고, 학습을 위한 입력신호는 단위입력을 AGV에 인가하였을 때의 얻어진 입출력 정보를 이용하여 학습을 행하였으며, 학습에 사용된 학습율, 모멘텀 계수 및 각 층에 대한 구성정보는 표 1과 같다. 또한, 학습시 뉴런의 반응정도를 결정하는 함수인 활성화 함수(activation function)로 식 (9)와 같은 항등함수(identity function)를 사용하였으며, 이때 각 시스템마다 사용된 slope값은 표 1에 나타내었다.

$$f(\text{net}) = \text{slope} * \text{net} \quad (9)$$

여기서, $e_{a1}(t)$ 및 $e_{a2}(t)$ 는 속도 및 조향 제어입력을 나타내고, $v(t)$, $\alpha(t)$ 는 AGV의 속도 및 조향각을 나타낸다.

표 1 각 신경회로망 모델 동정기의 설계 변수
Table 1 Design parameters of neural network identifier

	속도시스템	조향시스템	AGV 기구학
학습율	0.5	0.5	0.5
모멘텀계수	0.3	0.3	0.3
입력정보	$e_{a1}(t), e_{a1}(t-1), v(t), v(t-1)$	$e_{a2}(t), e_{a2}(t-1), \alpha(t), \alpha(t-1)$	$v(t), v(t-1), \alpha(t), \alpha(t-1), x(t), x(t-1), y(t), y(t-1)$
출력정보	$v(t)$	$\alpha(t)$	$x(t), y(t)$
항등함수 slope계수 (입력, 은닉, 출력)	(0.01, 0.01, 0.1)	(0.1, 0.1, 10)	(0.01, 0.01, 1)
층수 (입력, 은닉, 출력)	(4, 7, 1)	(4, 7, 1)	(8, 14, 2)

3.2 면역 알고리즘

이상과 같이 신경회로망 모델이 AGV의 각 제어부와 기구학 특성을 충분히 내포할 수 있도록 학습이 완료되면 신경회로망은 AGV의 모델로서 이용될 수 있으며, 이를 이용하여 면역알고리즘으로 오프라인 및 온라인 파라미터 동조를 구현하였다. 면역시스템의 항원·항체반응에 기초한 면역알고리즘은 외부에서 침입하는 여러 가지 항원을 인식할 수 있는 능력을 가지는 항체의 다양성(diversity)과 항원 항체의 반응의 정도를 나타내는 척도로서 다양성을 구현하기 위해 기반이 되는 친화성(affinity)이 주요 특징이라 할 수 있다. 일반적으로 생체의 면역체계는 1차 방어선과 2차 방어선으로 크게 구분할 수 있다. 1차 방어선은 표피(integument), 즉, 피부의 히스타민(histamine)과 같은 화학적 반응에 의한 방어체계를 말하며, 2차 방어선을 일반적으로 면역시스템이라 하며, 여러 가지 림프구(lymphocytes)에 의한 특이적 방어체계를 말한다. 이러한 2차 방어선인 면역시스템을 담당하는 기본 요소는 B-cell(B 림프구)과 T-cell(T 림프구)이라고 하는 두 가지 형태의 림프구가 있다. B-cell은 항체(antibody)를 분비하여 항체반응을 하는 것으로서 helper T-cell의 도움을 받아 클론선택(clonal selection)과정을 통하여 외부침입물질에 대응하여 B-cell을 생성하며, 2차 면역반응의 중요한 역할로서 미래에 동일한 항원이 침투시에 즉각 반응할 수 있는 기억세포의 역할을 하기도 한다[6,14,15].

이러한 면역 알고리즘은 비결정론적 탐색을 수행하는 알고리즘으로서 기존의 다른 알고리즘과 같이 하나의 가능해를 가지고 최적화 과정을 수행하는 것이 아니라, 동시에 여러 개의 가능해로서 최적화를 병렬로 진행하므로써 해의 수렴성이 개선될 수 있다. 또한, 다른 비결정론적 알고리즘과는 달리 최적해로의 수렴을 보장하기 위하여 기억 세포(memory cell)를 이용하고 있으며, 항원에 대한 기대치의 계산에 의하여 면역시스템의 자기 조절기능을 수행하여 내부 시스템을 항상 안정된 상태를 유지할 수 있다는 것이 특징이다. 이러한 면역알고리즘은 다음의 6단계를 통하여 구현된다[14].

단계 1) 항원의 인식

면역 시스템이 항원을 입력 정보로서 인식한다. 제어시스템

에서 항원이라 함은 평가함수 및 제한조건을 들 수 있다.

단계 2) 초기항체의 생성

사전에 기억된 세포들로부터 항체를 선택한다. 기억세포에는 우수한 항체들이 보존되어 있으며, 항원·항체반응에서 우수한 개체는 다시 기억세포로 분화되기도 한다. 본 논문에서 항체는 PID의 매개변수로서 K_p, K_i, K_d 를 의미한다.

단계 3) 친화도(affinity)의 계산

① 항원 a와 항체 b사이의 친화도를 계산한다.

$$aff_{a,b} = 1/(1 + H(2)) \tag{10}$$

② 항체간의 친화도를 계산한다.

$$aff_{b,b} = 1/(1 + H(2)) \tag{11}$$

여기서, $H(2)$ 는 항체 및 항원이 가지는 정보 엔트로피로서 이 값이 0이면 항체간 혹은 항원·항체간에 유전자가 완전히 일치하는 것을 의미한다. 본 논문에서 식 (10)의 항체와 항원의 친밀한 정도는 평가함수의 정도로서 나타내었다.

단계 4) 기억세포(memory cell)의 분화(differentiation)

식 (10)의 항원과의 친화도가 높은 항체를 기억세포로 추가한다. 또한, 기억공간이 제한되어 있으므로 식 (11)에 의거 새로이 추가되는 항체와 기억세포에 저장된 항체들간의 친화도를 계산하여 친화도가 가장 높은 항체를 제거한다.

단계 5) 항체생성의 촉진과 억제

항원·항체간의 친화도 및 항체의 농도에 근거한 식 (12)의 기대치를 계산한다.

$$expt_i = \frac{aff_{a,b}}{c_i} \tag{12}$$

여기서, $aff_{a,b}$ 는 항원·항체간의 친화도로서 평가함수들의 의미하며, c_i 는 항체의 농도식으로서 식 (13)과 같다.

$$c_i = \frac{N_{Same}}{N_{Total}} \tag{13}$$

여기서, N_{Same} 은 i 번째 항체와 동일한 친화도를 갖는 항체의 수이며, N_{Total} 은 항체의 총 수를 나타낸다.

식 (12)와 (13)으로부터 항원과 항체의 친화도가 높은 항체일수록 차세대에 남을 확률이 높고, 농도가 높은 항체일수록 차세대에 남을 확률이 낮다는 것을 알 수 있다. 따라서, 이러한 면역 시스템은 친화도가 높은 항체의 생성을 촉진함과 동시에 전체에서 차지하는 비율이 높은 항체의 생성을 억제하는 다양성의 조절기구의 기능도 갖는다는 것을 알 수 있다.

단계 6) 항체의 생성

단계 5)에서 소멸된 항체를 새로이 생성하는 것으로서, 본 논

문에서는 유전자의 복제 및 돌연변이 연산을 이용하여 새로운 항체를 생성한 후 교배과정을 거쳐 단계 3)으로 다시 돌아가며, 최적조건이 만족되면 알고리즘 수행을 끝내도록 한다.

3.3 면역알고리즘을 이용한 제어기 파라미터의 오프라인 동조

기본 제어기로 이용된 PID제어는 1940년대 Ziegler와 Nichols가 개발한 이래 대부분의 산업현장에서 많이 이용되고 있으며, 그 특징으로는 현재의 플랜트 오차에 비례하여 동작하는 비례동작, 과거의 오차들을 적분하여 정상상태 편차를 보상하는 적분동작과 미래의 동작을 예측하는 미분기능을 가지고 있다. 또한, 이러한 PID 제어기의 파라미터에 대한 영향이나 플랜트의 특성변화에 대한 응답이나 안정성을 이론적으로 해석하는 것이 가능하여 복잡한 제어이론에 비해 그 구조가 간단하고 구현하기 쉬워 더욱 많은 사람들이 연구하거나 새로운 제품을 내놓고 있는 실정이다[16]. 식 (14)는 PID 제어기에 대한 수식을 나타낸다.

$$u_{PID}(t) = K_p e(t) + K_i \int e(t) dt + K_d \frac{d}{dt} e(t) \tag{14}$$

PID 제어시스템을 구성하는데 있어 가장 중요한 것은 K_p, K_i, K_d 로 주어지는 PID 이득을 주어진 플랜트에 가장 알맞은 값으로 동조하는 것이다. PID 제어기의 동조는 1942년 Ziegler와 Nichols가 플랜트의 과도응답의 형태로부터 이득값을 결정하는 방법을 연구하였다. 이 방법은 실제 플랜트에 대해 몇 가지 간단한 실험을 통해 그 결과로부터 간단한 공식들을 만들었으며, 이 공식에 의해 이득값을 결정할 수 있다. 이 방법은 지금도 대부분의 제어시스템의 설계시 기본적으로 이용되고 있다. 그러나, 제어기 설계시 정확한 이득값을 동조하였다 할지라도 플랜트의 동특성이 변화하거나 비모델링이나 불확실성 요소로 인해 시스템이 변화하는 경우에는 이득값을 재 동조해야 하는 단점이 있다. 특히, AGV의 경우 수학적 모델링이 어렵고, 비선형성과 불확실성을 내포하고 있는 시스템이므로 PID 이득값의 동조는 매우 중요한 부분이 될 수 있다. 따라서, 이러한 고전적 PID 제어기 단점을 보완하기 위해 최근에는 적응제어기법, 자기동조방법, 전문가 시스템의 응용 그리고 퍼지 및 신경회로망과 같은 지능형 알고리즘 등을 이용한 PID 제어기의 동조법에 많은 연구가 이루어지고 있다. 본 연구에서도 지능형 알고리즘의 하나인 면역 알고리즘을 이용하여 PID의 이득을 동조하는 자기동조기법을 설계하고자 한다.

본 절에서는 3.2절의 면역 알고리즘을 이용한 PID제어기 파라미터의 오프라인 동조에 관하여 기술하고자 한다. 이렇게 동조된 파라미터를 온라인 자기동조기 파라미터로 활용하여 미세조정(fine tuning)을 하도록 하였다. 또한, 오프라인 동조 시에 플랜트를 직접 가동하여 동조하게 되면 자못 제어 범위를 벗어나는 급작스런 제어량이 시스템에 입력되었을 때 플랜트에 손상을 초래할 우려가 있다. 따라서, 3.1절에서 사전에 모델링된 신경회로망 모델을 이용하여 오프라인 제어기 파라미터 동조를 수행하도록 하였으며, 온라인 동조 시에도 신경회로망 동정기 출력을 이용하였다. 그림 5는 AGV의 신

경회로망 모델과 면역알고리즘을 이용한 오프라인 동조기를 나타낸다.

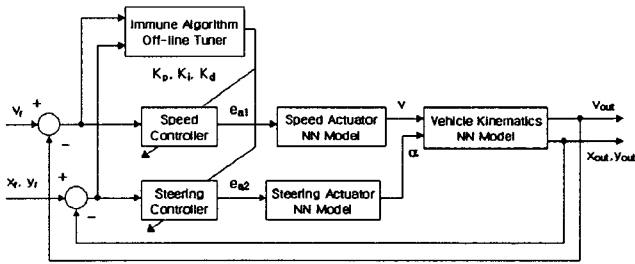


그림 5 신경회로망을 이용한 PID 파라미터의 오프라인 동조
Fig. 5 Off-line tuning scheme using neural network identifier

여기서, 입력은 AGV의 주행에 필요한 속도 지령치 v_r 과 주행경로의 설정치인 $x-y$ 좌표 x_r, y_r 이고, 시스템의 출력오차는 $e = \{v_r - v_{out}, x_r - x_{out}, y_r - y_{out}\}$, 제어입력은 $u = \{e_{a1}, e_{a2}\}$ 이며, 플랜트 출력벡터로서 $y = \{v_{out}, x_{out}, y_{out}\}$ 를 각각 나타내고 있다. 오프라인 동조시 사용된 면역알고리즘의 세대는 100세대로 하였고, 각 세대당 개체수는 40, 기억세포에 저장되는 개체의 수는 10으로 하였다. 아울러 새로운 개체의 생성 방법으로는 무작위 추출법 50%, 기존개체의 복제 50%를 수행한 후 유전자적 교배를 통하여 생성시켰으며, 0.25%의 돌연변이를 적용하였다. 이로부터 얻어진 각 제어기 파라미터는 표 2와 같다.

표 2 오프라인 동조된 PID 제어 파라미터
Table 2 PID control parameters using off-line tuning

	속도제어	조향제어
Kp	106.356	50.083
Ki	2.604	0.046
Kd	2.482	0.246

3.4 면역알고리즘을 이용한 적응 PID 제어기

이상과 같이 기술된 면역알고리즘과 신경회로망 모델을 이용하여 1차적으로 제어기 파라미터가 동조되었으나, 실제차량 모델을 신경회로망으로 동조 시에 시스템 동정오차가 발생하게 되고, 이를 이용하여 제어기를 설계하게 되면 그 파라미터에도 시스템 모델링 오차가 포함되게 되므로 최적의 값이라 할 수 없다. 물론 보다 정확한 모델링을 구하여 많은 시간동안 오프라인 자동동조기를 구동하면 보다 나은 값을 얻을 수 있지만, 이는 실용적이지 못할 뿐만 아니라 생산성을 저하시키는 요인이 될 수 있다. 실사 최적의 값을 얻었다 하더라도 실제 플랜트 구동시 발생하는 여러 가지 불확실성으로 인한 비선형적 요소가 작용할 때에도 최적의 설계가 되었다고 할 수 없다. 따라서 본 논문에서는 3.3절에서 1차 동조된 파라미터를 기본으로 하여 이를 실시간으로 동조할 수 있는 구조로서 면역알고리즘 적용 PID(immune algorithm adaptive PID; IAAPID) 제어기를 그림 6과 같이 구성하였다.

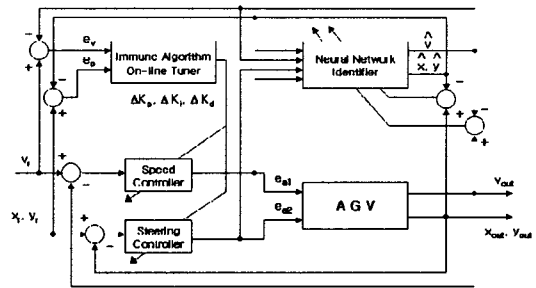


그림 6 면역알고리즘을 이용한 적응 PID제어기
Fig. 6 An adaptive PID controller using immune algorithm

IAAPID제어기의 구성은 그림 5, 6에서 보는 바와 같이 면역알고리즘에 의한 오프라인 자기동조기, 신경회로망 시스템 동정기 및 면역알고리즘에 의한 온라인 자기동조기로 구성된다. 온라인 파라미터 동조의 기본적인 개념은 매 샘플링 (sampling) 주기(0.01[sec])마다 최적 파라미터를 탐색하는 것이다. 즉, 실제 시스템이 구동되는 동안 시스템에 가장 적절한 제어기가 되도록 제어기를 면역알고리즘의 유전자적 교배와 클론적 선택과정을 통하여 적합시켜 나가는 것이다. 본 논문에서는 매 30 샘플링 주기마다 온라인 동조기를 구동하여 시스템의 특성변화에 따라 면역알고리즘으로 온라인 동조하여 제어파라미터의 보상신호로 입력하였다. 그러나, 면역알고리즘은 랜덤탐색기의 일종으로서 제어구조가 여기에만 의존하게 되면 자못 국소해에 빠질 우려가 있으므로 오프라인으로 자동동조된 PID값을 항상 기억하여 새롭게 생성된 개체와 비교하여 최적의 값을 사용하도록 그 구조를 설계하였다.

3.3절에서 표현된 일반적인 PID제어기의 식 (14)는 온라인 면역알고리즘 동조기에 의한 보상신호 Δu 를 고려하면 다음의 식 (15)와 같은 보상된 제어출력을 얻을 수 있다.

$$u_{IAAPID}(t) = u_{PID}(t) + \Delta u(t) = (K_p + \Delta K_p)e(t) + (K_i + \Delta K_i) \int e(t) dt + (K_d + \Delta K_d) \frac{de(t)}{dt} \quad (15)$$

여기서, AGV의 경우 조향 및 속도 두 가지 모드의 제어기가 필요하므로 다음의 식 (16), (17)과 같이 각각의 제어기에 필요한 평가함수를 설정하여야 한다.

$$f_{itv} = \frac{1}{a_{11}e_v^2(t) + a_{12}\hat{e}_v^2(t)} \quad (16)$$

$$f_{it_s} = \frac{1}{a_{21}e_s^2(t) + a_{22}\hat{e}_s^2(t)} \quad (17)$$

식 (16)은 속도제어기를 위한 평가함수로서 속도추정오차 e_v 는 설정 속도와 신경회로망 출력 속도의 오차 ($v_o - \hat{v}$)를 나타내고, 식 (17)은 조향제어를 위한 평가함수로서 위치추정 오차인 e_s 는 설정위치 (x_r, y_r)과 신경회로망 출력 (\hat{x}, \hat{y})의 편차를 나타낸다. 또한, $a_{11}, a_{12}, a_{21}, a_{22}$ 는 경험적으로 선택하였으며, 각각 10, 5, 10, 5로 하였다. 온라인 동조시 사용된 면역알고리즘의 세대당 개체수는 20, 기억세포에 저장되는

개체의 수는 5로 하였다. 아울러 새로운 개체의 생성 방법으로는 무작위 추출법 50%, 기존개체의 복제 50%를 수행한 후 유전자적 교배를 통하여 생성시켰으며, 0.25%의 돌연변이를 적용하였다.

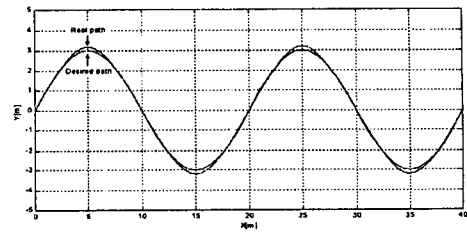
4. 컴퓨터 시뮬레이션

본 연구에서 구성된 면역알고리즘 적용 PID제어기의 성능을 검토하기 위하여 dc 모터로 구동되는 AGV에 적용제어기로 적용하였으며, 부하변동 및 외란을 고려하기 위해 dc 모터에 백색 잡음을 부가하여 모의 실험을 구현하였다. 그리고, 제안한 제어기의 성능을 평가하기 위하여 먼저, ZN(Ziegler Nichols)법을 이용하여 오프라인으로 잘 동조된 PID제어 및 신경회로망 PID제어와 비교 분석하였으며, GA를 이용한 적응제어기(genetic algorithm adaptive PID: GAAPID)도 함께 구현하여 평가하므로써 면역알고리즘의 우수성 및 실현 가능성을 검증하고자 하였다. GA 적용시 객관성을 가질 수 있도록 하기 위하여 최근 많이 이용되고 있는 elitist 기법을 적용하였고, 실제 산업현장에서의 실용적으로 응용하기 쉬운 실변수 표현법을 사용하였으며, 교배는 산술적 교배, 돌연변이 확률은 면역알고리즘에서 적용된 것과 동일한 값으로 설정하였다. 시뮬레이션에 적용된 AGV는 길이가 1.5[m], 차량 축간 거리가 1[m]이고, 바퀴의 반경은 0.1[m]로 하였으며, 주행시뮬레이션을 위하여 3[m/sec]의 속도로 진폭이 3[m]인 사인파 경로(sinusoidal trajectory)를 주행하도록 하였다. 시스템에 사용된 속도 및 조향시스템의 기본적인 설계 파라미터는 표 3과 같다.

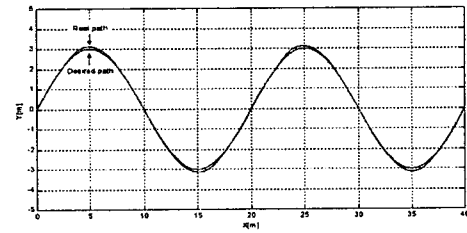
표 3 조향 및 속도제어 시스템 파라미터
Table 3 Parameters of the steering and speed control system

	속도구동 모터	조향 모터
R_a	1.3	3.2
L_a	0.0017	0.0015
K_C	0.0086875	0.17
K_b	0.04098	0.17
B_m	0.0002627	0.001
J_m	0.00016	0.00276
정격전압[V]	25	25
정격전력[w]	60	50

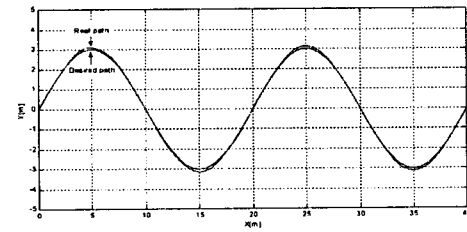
그림 7에서 그림 10은 AGV가 일정부하를 가질 때 각 제어기의 출력 특성을 나타낸 것으로서 속도 및 조향장치에 대한 부하를 각각 1.35[N·m], 1[N·m]로 하였다. 그림 7과 8은 주행경로를 따라 주행한 결과 및 주행 위치오차를 나타내고, 그림 9는 그때 주어진 조향각의 변위를 나타낸 것이다. 또한, 그림 10은 AGV의 속도를 3[m/sec]로 하였을 때 속도 추종성능을 나타낸 것이다.



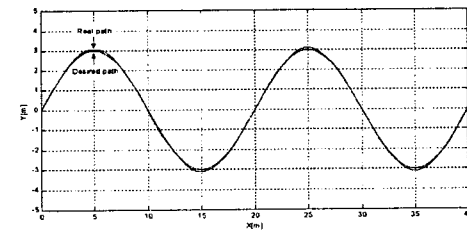
(a) PID control



(b) NNPID control



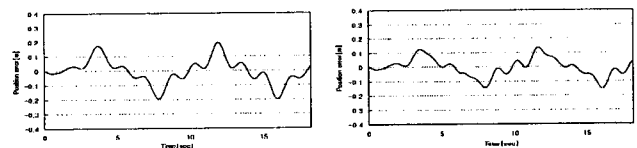
(c) GAAPID control



(d) IAAPID control

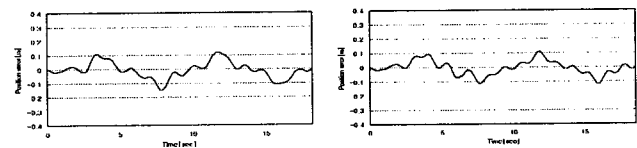
그림 7 경로 주행결과(일정부하)

Fig. 7 Results of path driving(constant load)



(a) PID control

(b) NNPID control



(c) GAAPID control

(d) IAAPID control

그림 8 주행 위치 오차(일정부하)

Fig. 8 Errors of driving position(constant load)

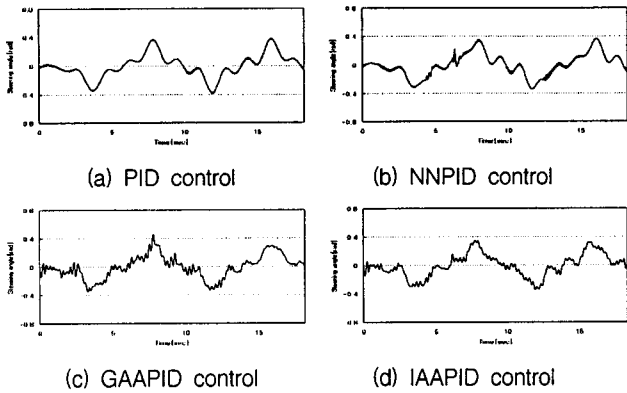


그림 9 조향각 변위(일정부하)
Fig. 9 Displacements of steering angle(constant load)

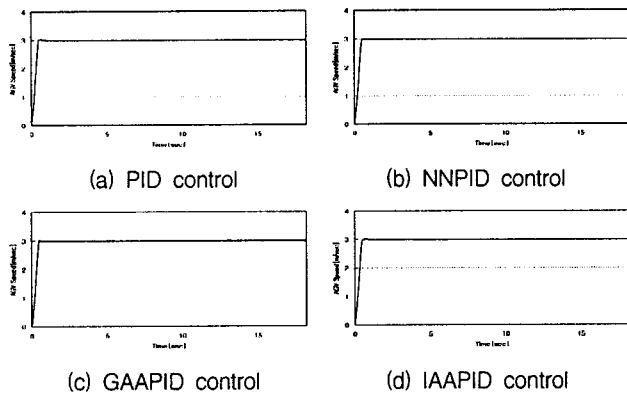


그림 10 주행속도(일정부하)
Fig. 10 Driving speed(constant load)

먼저, 부하변동이 없는 상태에서 시뮬레이션을 수행해 본 결과, 최대 변위오차의 경우, 잘 동조된 PID 제어기에 비하여 40%, NNPID 및 GAAPID 제어기에 비해서는 대략 20%정도 개선된 것을 알 수 있다. 또한, 주행시 평균적으로 발생된 변위오차의 경우에는 PID 제어기에 비하여 40%정도 개선됨을 알 수 있었으며, 조향각 변위의 경우 시간이 지날수록 더욱 효과적으로 입력됨을 볼 수 있다. 또한, 그림으로 나타내지는 않았지만 제어 입력의 경우에 제안한 제어기가 시간이 지날수록 보다 효율적으로 입력되는 것을 알 수 있었다. 부하변동이 없을 때에 대한 각 제어기의 시뮬레이션 결과를 요약하면 표 4와 같다.

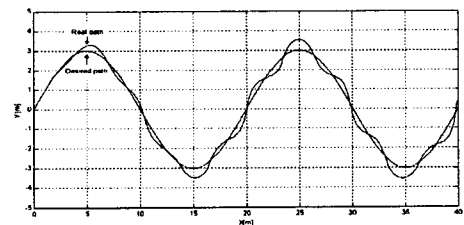
표 4 일정 부하시 AGV의 주행결과

Table 4 Driving simulation results of AGV with constant loads

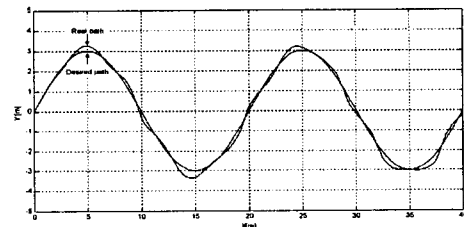
	PID	NNPID	GAAPID	IAAPID	
최대 변위오차 max[m]	0.201	0.154	0.152	0.120	
평균 변위오차 RMS[m]	0.084	0.065	0.059	0.051	
속도추정오차RMS[m/sec]	0.087	0.086	0.086	0.086	
평균제어 입력	속도[V]	24.88	23.54	23.54	23.60
	조향[V]	1.315	1.506	1.462	1.373

이상과 같이 부하의 변동이 없는 조건하에서 시뮬레이션을 수행해 본 결과, 대체적으로 잘 동조된 고정 PID 제어기와 거의 동등한 결과를 나타냄을 알 수 있다. 이러한 결과는 부하가 일정하고 외란이 인가되지 않은 상태에서는 시스템이 선형적 특성이 강하여 잘 동조된 고정 PID제어기 구조로도 충분히 제어가 가능할 수 있다는 것을 의미한다. 그러나, 실제 시스템의 경우 시스템 주위에 수많은 환경적 요인과 부하 변동 및 외란이 작용하고 있기 때문에 이러한 비선형적 요소에 충분히 대처할 수 있는 제어기 설계가 요구된다고 할 수 있다. 따라서, 본 논문에서는 다음과 같이 부하변동과 외란을 고려한 시뮬레이션을 수행하므로써 설계된 제어기의 성능을 보다 객관적으로 평가하고자 한다.

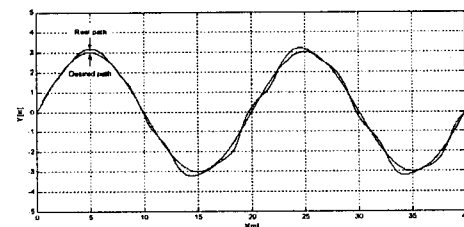
그림 11에서 그림 14는 부하변동 및 외란 인가에 대한 출력 특성비교를 나타낸 것으로서, 측정잡음은 속도 및 조향에 대하여 평균이 0이고 공분산이 각각 0.57[m/sec]와 0.005[rad]으로 하였고, 부하변동을 위한 공분산은 Q=0.05 및 R=0.001인 경우로 하였다. 적용된 측정잡음은 속도측정 센서의 분해능 1000[count/rev], 조향각 포텐시오미터의 저항값 허용오차 ±5~10[%], A/D변환에 의한 분해능인 10비트 등을 고려하여 실제 측정되는 값의 최대값(속도: 3[m/sec], 조향: 0.62[rad])에 대한 약 1~2[%]로서 속도는 최대값이 ±0.05[m/sec], 조향은 ±0.02[rad](약 1[deg])인 백색잡음으로 가정하였다. 그림 11과 12는 주행경로를 따라 주행한 결과 및 주행 위치오차를 나타내고, 그림 13은 그 때 주어진 조향각 변위를 나타낸 것이다. 또한, 그림 14는 AGV의 속도를 3[m/sec]로 하였을 때 속도 추종성능을 나타낸 것이다.



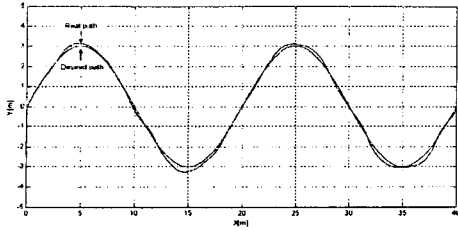
(a) PID control



(b) NNPID control



(c) GAAPID control



(d) IAAPID control

그림 11 경로 주행결과(외란인가)

Fig. 11 Results of path driving(with external disturbance)

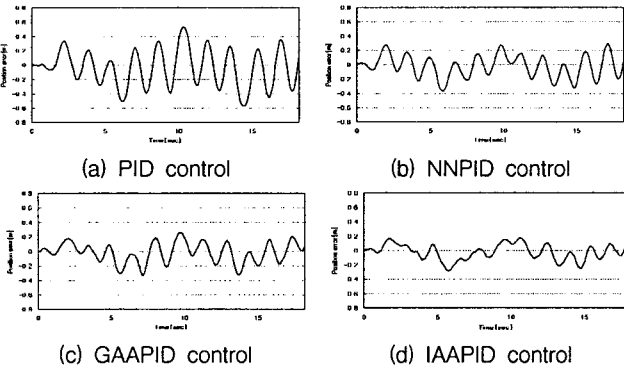


그림 12 주행 위치 오차(외란인가)

Fig. 12 Errors of driving position(with external disturbance)

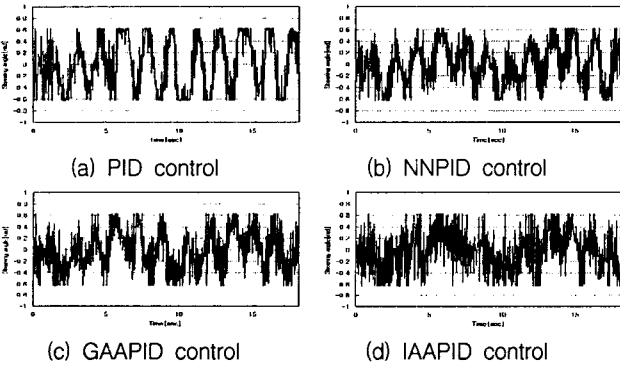


그림 13 조향각 변위(외란인가)

Fig. 13 Displacements of steering angle(with external disturbance)

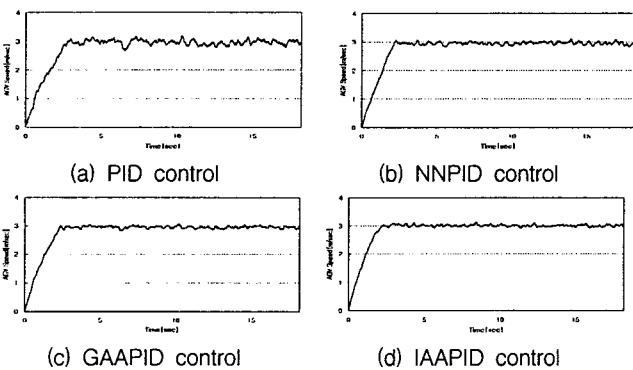


그림 14 주행속도(외란인가)

Fig. 14 Driving speed(with external disturbance)

시뮬레이션 결과로부터 알 수 있듯이 부하가 변동되고 외란이 부가된다고 가정한 시뮬레이션에서 제안한 제어기가 더욱 우수함을 알 수 있었다. 최대 변위오차는 51%, 평균 변위오차의 경우에는 55%이상 개선된 것을 알 수 있다. 그림으로 나타내지는 않았지만, 제어입력의 경우에도 속도의 경우에는 거의 비슷한 결과를 보였지만, 조향을 위한 제어입력의 경우 잘 동조된 PID 제어기에 비하여 다소 많은 제어입력이 들어가 있다. 이는 외란에 대하여 변화되는 환경에 보다 적극적으로 대처하기 위한 것으로 판단된다. 아울러, 제안한 제어기와 유사한 구조를 갖는 GAAPID제어기와 성능 비교면에서도 최대 변위오차가 15%, 평균 변위오차가 17%정도의 성능이 개선되어 나타나는 것을 알 수 있다. 이는 유전알고리즘이 해의 탐색을 위하여 돌연변이와 유전자적 교배에만 의존하는 반면 면역알고리즘은 유전알고리즘의 기본적인 기능을 가짐과 동시에 다음과 같은 특성면에서 우수하다고 할 수 있다. 첫째, 기억 세포를 이용한 최적해로의 수렴성을 보장하고, 둘째, 친화도에 의한 우수 개체의 생산을 촉진하므로써 자손의 우수성을 보장할 수 있으며, 셋째, 친화도 및 다양성을 적용하므로써 보다 폭넓은 해의 탐색이 가능하다.

또한, 제안한 제어기는 지능제어의 하나인 NNPID에 비해서도 약 25% 이상 성능이 개선된 것을 알 수 있다. 궤환 신경회로망 역전파 학습알고리즘의 수렴이 항상 보장되기 위해서는 각 뉴런이 모두 평형점에 수렴해야 한다. 그러나, 일반적으로 그러한 상태에 도달하기는 쉽지 않다. 따라서, 이러한 제약조건이 만족되지 못할 경우 주어진 공간영역내에서 한정된 탐색을 하게 되고, 부하 변동이나 외란이 인가되어 시스템 환경이 다소 변화될 경우 일부 구조적 조정을 해야하는 단점이 원인으로 생각된다. 이상과 같이 외란인가에 대한 제어기 주행 수행결과를 요약하면 다음 표 5와 같다.

표 5 AGV의 주행결과(외란인가)

Table 5 Driving simulation results of AGV with external disturbance

	PID	NNPID	GAAPID	IAAPID	
최대 변위오차 max[m]	0.573	0.371	0.332	0.281	
평균 변위오차 RMS[m]	0.256	0.155	0.139	0.115	
속도추정오차 RMS[m/sec]	0.169	0.160	0.159	0.102	
평균 제어 입력	속도[V]	24.43	24.43	24.24	23.83
	조향[V]	15.05	16.11	17.08	18.26

5. 결론

본 연구에서는 생체 면역반응체계에 근거한 면역알고리즘을 이용하여 적응제어기를 설계하였으며, dc 모터로 구동되는 AGV의 주행제어에 적용하였다. 제안된 제어기의 특징으로는 AGV의 기구학, 속도 및 조향제어기를 각각 신경회로망으로 모델링하여 PID제어기의 오프라인 자동동조기에 이용하므로써 시스템에 손상을 초래하지 않는 범위에서 제어기 파라미터를 동조할 수 있도록 하였다. 동시에 신경회로망 모델

을 면역알고리즘 온라인 파라미터 동조기로도 적용하므로써 모델링 오차를 실시간으로 보상하도록 하였으며, AGV 운행 시 발생할 수 있는 부하변동 및 외란을 모터의 부하변동으로 고려하여 시스템 변화에 대한 강인함을 가질 수 있도록 설계하였다. 아울러, 비결정론적 최적화 알고리즘인 면역알고리즘의 실시간 구현의 가능성도 함께 제시하였다.

또한, 잘 동조된 PID 제어기와 성능비교를 통하여 제안된 제어기의 우수성을 확인할 수 있었으며, 지능제어의 대표적인 예인 신경회로망 PID 제어기와도 비교하여 적응제어기로서의 가능성도 파악할 수 있었다. 특히, 시뮬레이션 수행결과 외란에 대하여 주행성능이 고정된 이득을 갖는 제어 구조보다 적응성이 뛰어난 것을 알 수 있었으며, NNPID 및 GAAPID제어기에 비해서도 보다 우수한 특성을 나타내는 것을 볼 수 있었다. 아울러, 제안한 알고리즘의 실용성과 안정성을 파악하기 위하여 제안한 제어기 구조의 안정성 해석 및 현재 제작하여 실험중인 모형 AGV를 이용한 실시간 제어시스템 구성 및 실험연구를 추가로 수행할 계획이다.

참 고 문 헌

- [1] E. H. M. Lim and J. K. Hedrick, "Lateral and Longitudinal Vehicle Control Coupling for Automated Vehicle Operation," Proc. of the American Control Conference, pp. 3676-3680, 1999.
- [2] H. F. Durrant-Whyte, "An Autonomous Guided Vehicle for Cargo Handling Applications," The International Journal of Robotics Research, Vol. 15, No. 5, pp. 407-440, 1996.
- [3] William L. Brogan, Modern Control Theory, Prentice Hall, pp. 72-79, 1991.
- [4] H. S. Hwang, "Automatic Design of Fuzzy Rule Base for Modelling and Control using Evolutionary Programming," IEE Proc. Control Theory Appl., Vol. 146, No. 1, pp. 9-16, 1999.
- [5] Y. Mitsukura, T. Yamamoto and M. Kaneda, "A Design of Self-Tuning PID Controllers using a Genetic Algorithm," Proceedings of the American Control Conference, pp. 1361-1365, 1999.
- [6] N. K. Jerne, "The Immune System," Scientific American, Vol. 229, No. 1, pp. 52-60, 1973.
- [7] A. Ishiguro, T. Konodo, Y. Watanabe, and Y. Uchikawa, "A Reinforcement Learning Method for Dynamic Behavior Arbitration of Autonomous Mobile Robots Base on the Immunological Information Processing Mechanism," Trans. of the Institute of Elec. Eng. of Japan C, Vol. 117-C, No. 1, pp. 42-49, 1990.
- [8] S. Endoh, N. Toma, and K. Yamada, "Immune Algorithm for n-TSP," Proceeding of the IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics, Vol. 4, pp. 3844-3849, 1998.
- [9] J. S. Chun, M. K. Kim, and H. K. Jung, "Shape Optimization of Electromagnetic Devices using Immune algorithm," IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 33, No. 2, pp. 1876-1879, 1997.
- [10] 한국해양수산개발원, 자동화 컨테이너터미널 개발사업 타당성 검토 최종보고서, 1998. 12.
- [11] 이성운, 정완균, 염영일, "자동차형 이동로봇의 주차를 위한 제어," 한국자동제어학회, pp. 502-505, 1998.
- [12] 이오걸, 퍼지 기법으로 구동되는 직류 서보 시스템의 고정도 제어, 동아대학교 박사학위논문, 1992.
- [13] S. Omatu, M. Khalid, and R. Yusof, Neuro-Control and Its Applications, Springer, 1996.
- [14] D. Dasgupta, Artificial Immune Systems and Their Applications, Springer, 1997.
- [15] I. Roitt, Essential Immunology, Blackwell Scientific Publications, 1980.
- [16] 김동화, 이은용, "PID 제어기 튜닝 기술에 대한 연구현황과 전망," 전기학회지, Vol. 44, No. 5, pp. 13-23, 1995.

저 자 소 개



이 영 진 (李榮珍)

1966년 6월 17일 생. 1992년 2월 동아대학교 전기공학과 졸업. 1994년 2월 동아대학교 대학원 전기공학과 졸업(공학석사). 1998년 동아대학교 대학원 전기공학과 박사 수료.

Tel : 051-200-6748

E-mail : i8545733@mail.donga.ac.kr



이 권 순 (李權純)

1955년 1월 18일 생. 1977년 2월 충남대학교 공업교육과 졸업. 1981년 2월 서울대학교 대학원 전기공학과 졸업(공학석사). 1990년 7월 Oregon State University 전기 및 컴퓨터공학과 졸업(Ph. D.). 1996년 8월 ~1997년 8월 Virginia Tech. 전기 및 컴퓨터 공학과 Visiting scholar. 1995년 12월 ~1996년 1월 일본 전기통신대학 기계제어공학과 객원연구원. 1998년 1월 ~1998년 12월 대한전기학회 편집위원. 1982년 3월 ~현재 동아대학교 공과대학 전기전자컴퓨터공학부 교수

Tel : 051-200-7739

E-mail : kslee@daunet.donga.ac.kr



이 장 명 (李章明)

1957년 11월 22일 생. 1980년 2월 서울대학교 전자공학과 졸업. 1982년 2월 서울대학교 전자공학과 대학원 졸업(공학석사). 1990년 12월 USC(남가주대학) 공학박사학위 취득(Computer Engineering 전공). 1981년 12월 ~1983년 3월 삼성반도체 통신 근무. 1983년 3월 ~1992년 2월 부산공업대학교 조교수. 1985년 8월 ~1990년 10월 Univ. of Southern California 연구조원. 현재 부산대학교 컴퓨터 및 정보통신 연구소 전자기술부장. 1992년 3월 ~현재 부산대학교 전자공학과 부교수

Tel : 051-510-2378

E-mail 주소 : jmlee@hyowon.cc.pusan.ac.kr