

論 文
2-2

면역알고리즘을 이용한 AGV의 적응제어에 관한 연구

이영진* · 최성욱* · 손주한* · 이진우* · 조현철** · 이권순***

A Study on Adaptive Control of AGV using Immune Algorithm

Y. J. Lee, S. W. Chio, J. H. Sohn, J. W. Lee, H. C. Cho, K. S. Lee

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

Abstract

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 initially, 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.

* 정희원, 동아대학교 전기공학과 대학원

** 동아대학교 RRC 인턴연구원

*** 동아대학교 전기전자컴퓨터공학부 교수

1. 서 론

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[1,2].

AGV는 다양한 운전조건이 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[3].

본 연구에서는 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 Jerne의 항체 규제가설이 정립되면서 면역네트워크를 이용한 로봇 행동제어를 비롯하여, TSP문제, 전자석의 최적설계와 같은 최적화문제에 이르기까지 다양한 분야에서 응용되고 있다.

본 논문에서는 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/s]정도이고, 정지를 위한 위치정밀도는 2.54[cm], 주행시 좌우의 위치 정밀도는 ± 20 [cm] 정도의 범위이다. 최근 국외의 AGV 제작사들은 최대 주행속도를 8[m/s] 정도로 높이고, 위치결정 정밀도도 1[cm] 이내로 하는 기술개발을 하고 있으며, 실현가능성이 높은 것으로 보고되고 있다. AGV의 구동을 위한 시스템으로는 AGV제작의 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.

AGV의 주행제어를 위한 알고리즘 개발방법으로는 크게 정적과 동적 방정식으로 접근할 수 있다. 본 논문에서는 AGV의 구동장치와 조향장치의 원활한 제어와 실제 시스템의 구현가능성을 검증하기 위하여 먼저, 구동모터의 특성과 기구학적인 관점

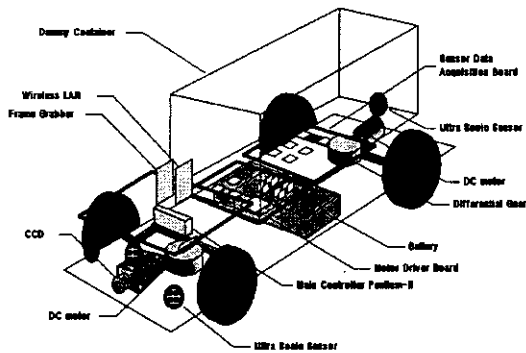


Fig. 1 AGV module arrangement and opened-up view

에서 시스템을 모델링하고 제어를 설계하여 모의 실험을 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.

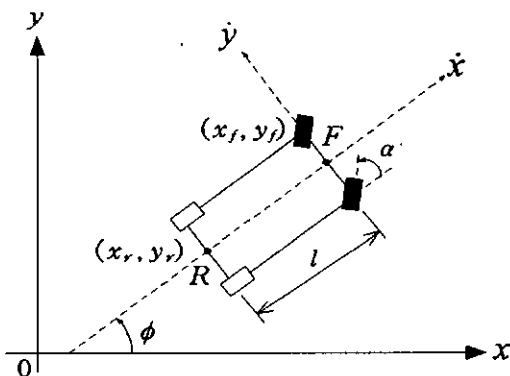


Fig. 2 A kinematic model of AGV

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

$$p = [x_f \ y_f \ \phi]^T \quad (1)$$

전륜 조향바퀴를 중심으로 한 AGV 모델에 대한 기구학적 운동 방정식은 식 (2)와 같이 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} \dot{x}_f &= v \cos(\phi + \alpha) & \dot{y}_f &= v \sin(\phi + \alpha) \\ \dot{\phi} &= \frac{v}{l} \sin \alpha \end{aligned} \quad (2)$$

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 (3)과 같이 나타낼 수 있다[]

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= Ax(t) + Bu(t) + C(b + w(t)) \\ x(t) &= \begin{bmatrix} \omega_v \\ i_{al} \end{bmatrix}, & u &= e_{al}, \\ A &= \begin{bmatrix} -\frac{B_{mi}}{J_{m1}} & \frac{K_{cl}}{J_{m1}} \\ -\frac{K_{bl}}{L_{al}} & \frac{R_{al}}{L_{al}} \end{bmatrix}, & B &= \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{1}{L_{al}} \end{bmatrix}, \\ C &= \begin{bmatrix} -\frac{1}{J_{m1}} \\ 0 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (3)$$

여기서, 각 파라미터는 다음과 같다.

- b : 부하 토오크의 바이어스 성분= $TLI[N \cdot m]$
- w(t) : 평균(mean)이 0이고, 공분산(covariance)이 $Q[N \cdot m]$ 인 백색 토오크 잡음
- e_{al} : 입력전압[V]

- L_{a1} : 전기자 인덕턴스[H]
- K_{b1} : 역기전력 상수 [V/rad/sec]
- i_{a1} : 전기자 전류[A]
- K_{c1} : 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]

- 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)

또한, 조향을 위한 전륜 dc 모터 상태방정식은 조향에 필요한 각 α 를 고려하면 다음 식 (4)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= Ax(t) + Bu(t) + C(b + w(t)) \\ x(t) &= \begin{bmatrix} \theta \\ \omega_s \\ i_{a2} \end{bmatrix}, \quad u = e_{a2}, \\ A &= \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & -\frac{B_{m2}}{J_{m2}} & \frac{K_{c2}}{J_{m2}} \\ 0 & -\frac{K_{b2}}{L_{a2}} & \frac{R_{a2}}{L_{a2}} \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \frac{1}{L_{a2}} \end{bmatrix}, \\ C &= \begin{bmatrix} 0 \\ -\frac{1}{J_{m2}} \\ 0 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (4)$$

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_{b2} : 역기전력 상수[V/rad/sec]
- i_{a2} : 전기자 전류[A]
- K_{c2} : 토오크 상수[N·m/A]
- R_{a2} : 전기자 저항[Ω]

3. 면역알고리즘을 이용한 제어기 설계

본 장에서는 지금까지 기술된 AGV의 주행시스템을 제어하기 위하여 면역 알고리즘을 이용한 적응 PID 제어에 관하여 기술하고자 한다. 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 항시 시스템 모델링 오차를 최소화 되도록 하였다.

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[4,5].

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 항시 안정된 상태를 유지할 수 있다는 것이 특징이다.

이상과 같이 기술된 면역알고리즘과 신경회로망 모델을 이용하여 1차적으로 제어기 파라미터가 동조되었으나, 실제차량 모델을 신경회로망으로 동조시에 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. 설사 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 1차 동조된 파라미터를 기본으로 하여 이를 실시간으로 동조할 수 있는 구조로서 면역알고리즘 적용 PID(immune algorithm adaptive PID; IAAPID) 제어를 그림 3과 같이 구성하였다.

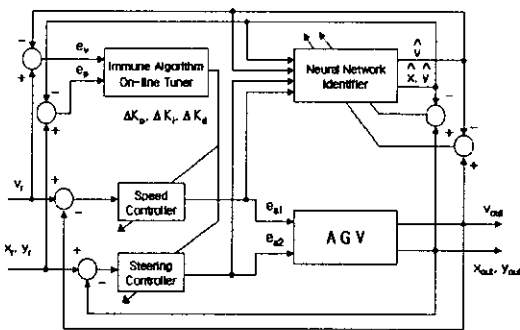


Fig. 3 An adaptive PID controller using immune algorithm

IAAPID제어의 구성은 면역알고리즘에 의한 오프라인 자기동조기, 신경회로망 시스템 동정기 및 면역알고리즘에 의한 온라인 자기동조기로 구성된다.

4. 컴퓨터 시뮬레이션

본 논문에서 구성한 면역알고리즘 적용 PID제어

기의 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 1과 같다.

Table 1. 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

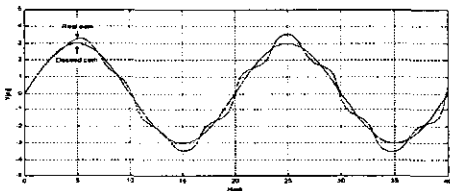
먼저, 부하변동이 없는 상태에서 시뮬레이션을 수행해 본 결과, 최대 변위오차의 경우, 잘 동조된

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.

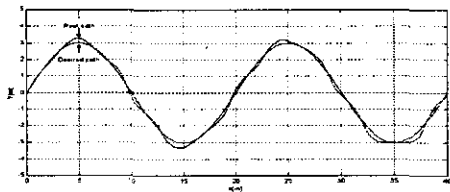
그러나, 실제 시스템의 경우 시스템 주위에 수많은 환경적 요인과 부하변동 및 외란이 작용하고 있기 때문에 이러한 비선형적 요소에 충분히 대처할 수 있는 제어기 설계가 요구된다고 할 수 있다. 따라서, 본 논문에서는 다음과 같이 부하변동과 외란

을 고려한 시뮬레이션을 수행함으로써 설계된 제어기의 성능을 보다 객관적으로 평가하고자 한다.

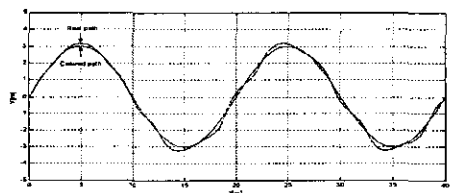
그림 4에서 그림 7는 부하변동 및 외란 인가에 대한 출력 특성비교를 나타낸 것으로서, 측정잡음은 속도 및 조향에 대하여 평균이 0이고 공분산이 각각 0.57[m/sec]와 0.005[rad]으로 하였고, 부하변동을 위한 공분산은 $Q=0.05$ 및 $R=0.001$ 인 경우로 하였다. 적용된 측정잡음은 속도측정 센서의 분해능 1000[count/rev], 조향각 포텐시오미터의 저항값 허용오차 $\pm 5\sim 10\%$, A/D변환에 의한 분해능인 10비트 등을 고려하여 실제 측정되는 값의 최대값



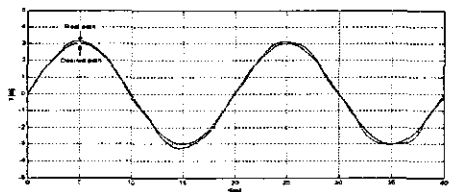
(a) PID control



(b) NNPID control

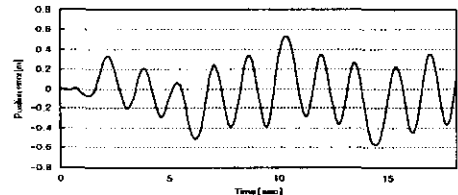


(c) GAAPID control

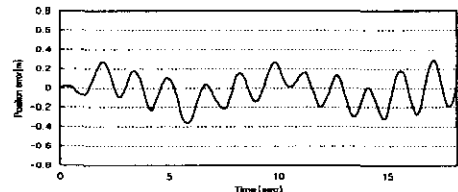


(d) IAAPID control

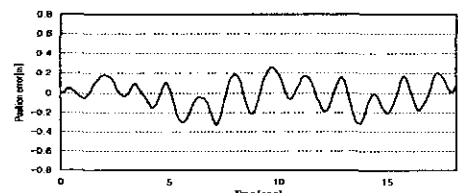
Fig. 4 Results of path driving (with external disturbance)



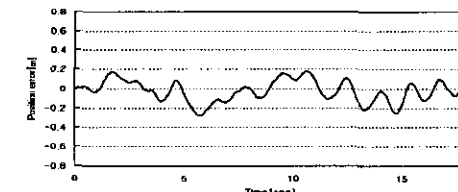
(a) PID control



(b) NNPID control



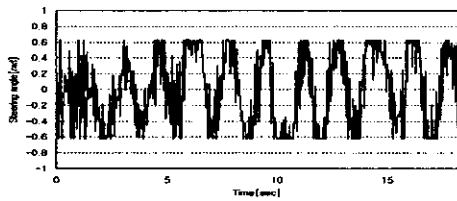
(c) GAAPID control



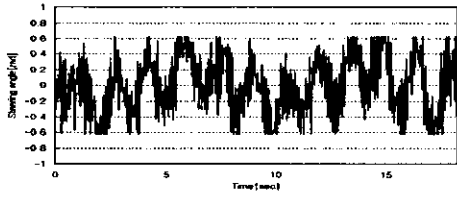
(d) IAAPID control

Fig. 5 Errors of driving position (with external disturbance)

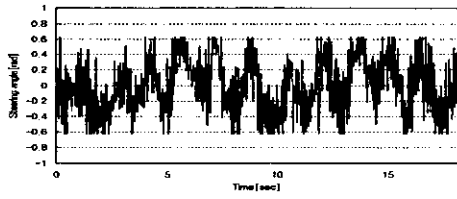
(속도: 3[m/sec], 조향: 0.62[rad])에 대한 약 1~2[%]로서 속도는 최대값이 ± 0.05 [m/sec], 조향은 ± 0.02 [rad](약 1[deg])인 백색잡음으로 가정하였다. 그림 4과 5는 주행경로를 따라 주행한 결과 및 주행 위치오차를 나타내고, 그림 6은 그 때 주어진 조향각 변위를 나타낸 것이다. 또한, 그림 7는 AGV의 속도를 3[m/sec]로 하였을 때 속도 추종성능을 나타낸 것이다.



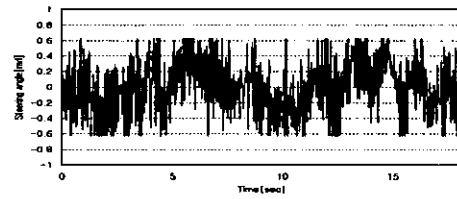
(a) PID control



(b) NNPID control

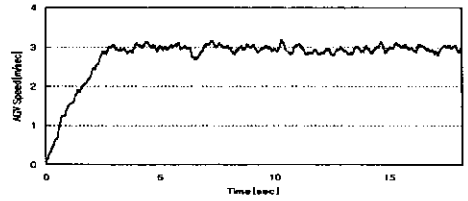


(c) GAAPID control

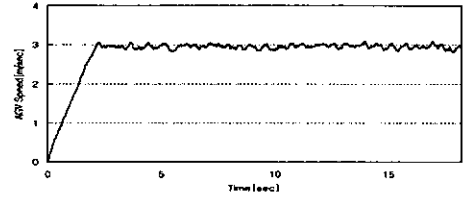


(d) IAAPID control

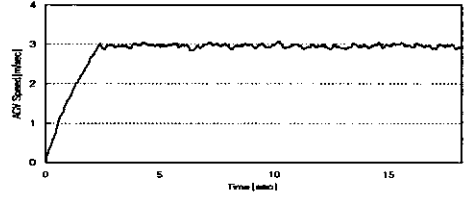
Fig. 6 Displacements of steering angle (with external disturbance)



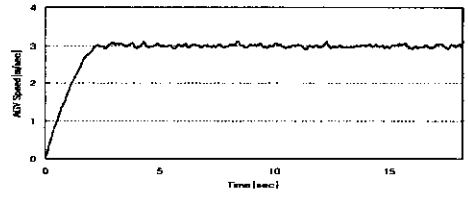
(a) PID control



(b) NNPID control



(c) GAAPID control



(d) IAAPID control

Fig. 7 Driving speed(with external disturbance)

시뮬레이션 결과로부터 알 수 있듯이 부하가 변동되고 외란이 추가된다고 가정한 시뮬레이션에서 제안한 제어가 더욱 우수함을 알 수 있었다. 최대 변위오차는 51%, 평균 변위오차의 경우에는 55%이상 개선된 것을 알 수 있다.

5. 결 론

본 연구에서는 생체 면역반응체계에 근거한 면역알고리즘을 이용하여 적응제어기를 설계하였으며, dc 모터로 구동되는 AGV의 주행제어에 적용하

였다. 제안된 제어기의 특징은 첫째, AGV의 기구학, 속도 및 조향제어기를 각각 신경회로망으로 모델링하여 PID제어기의 오프라인 자동동조기에 이용함으로써 시스템에 손상을 초래하지 않는 범위에서 제어기 파라미터를 동조할 수 있도록 하였다. 동시에 신경회로망 모델을 면역알고리즘 온라인 파라미터 동조기로도 적용함으로써 모델링 오차를 실시간으로 보상하도록 하였으며, AGV 운행시 발생될 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, 저능제어의 대표적인 예인 신경회로망 PID 제어기와도 비교하여 적응제어기로서의 가능성도 파악할 수 있었다. 특히, 시뮬레이션 수행결과 외란에 대하여 주행성능이 고정된 이득을 갖는 제어 구조보다 적응성이 뛰어난을 알 수 있었으며, NNPID 및 GAAPID제어기에 비해서도 보다 우수한 특성을 나타내는 것을 볼 수 있었다.

참고문헌

- [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] S. Omatu, M. Khalid, and R. Yusof, Neuro-Control and Its Applications, Springer, 1996.
- [4] N. K. Jerne, "The Immune System," Scientific American, Vol. 229, No. 1, pp. 52-60, 1973.
- [5] D. Dasgupta, Artificial Immune Systems and Their Applications, Springer, 1997.