세포성 면역 알고리즘을 이용한 AGV의 조향 제어기 설계에 관한 연구

Design of Steering Controller of AGV using Cell Mediated Immune Algorithm

이 영 진, 이 진 우, 이 권 순
(Y. J. Lee, J. W. Lee, and K. S. Lee)

Abstract : The PID controller has been widely applied to the most control systems because of its simple structure and easy designing. One of the important points to design the PID control system is to tune the approximate control parameters for the given target system. To find the PID parameters using Ziegler Nichols(ZN) method needs a lot of experience and experiments to ensure the optimal performance. In this paper, CMIA(Cell Mediated Immune Algorithm) controller is proposed to drive the autonomous guided vehicle (AGV) more effectively. The proposed controller is based on specific immune responses of the biological immune system which is the cell mediated immunity. To verify the performance of the proposed CMIA controller, some experiments for the control of steering and speed of that AGV are performed. The tracking error of the AGV is mainly investigated for this purpose.
As a result, the capability of realization and reliableness are proved by comparing the response characteristics of the proposed CMIA controllers with those of the conventional PID and NNPID(Neural Network PID) controller.

Keywords : CMIA(Cell Mediated Immune Algorithm), biological immune system, PID Control, neural network identifier, AGV (Autonomous Guided Vehicle), steering control

I. 서론

과거와 현재 그리고 미래 정보에 기반을 둔 PID 제어기는 구조가 비교적 간단하여 구현하기 쉽고 범용성을 갖추고 있어 산업현장에서 널리 이용되고 있다. 이러한 PID 제어 시스템을 설계하는데 있어 가장 중요한 것은 주어진 대상 시스템에 대해 가장 적절한 제어 파라미터를 조정하는 것이다. 종래의 PID 파라미터의 동조기법으로는 Ziegler-Nichols (ZN)법이 이용되고 있지만 최적의 성능을 보장하기 위해서는 많은 경험과 실험이 요구되고 있다.

본 논문에서는 이와 같은 PID 제어기 파라미터 설계의 어려움을 해결하기 위하여 면역 시스템을 도입함으로써 외부 환경에 강인하면서도 적응적으로 대응할 수 있는 새로운 제어 시스템을 개발하고자 한다. 면역 시스템을 공학분야에 응용하고 있는 분야로는 크게 체액성 면역 반응(Humoral Immune Response)과 세포성 면역반응(Cell-Mediated Immune Response)으로 나누어 연구가 되고 있다. 이중 체액성 면역반응은 최적화기법, 로봇군제어, 분산자율로봇제어 등 많은 분야에서 응용되고 있다[1]-[3]. 세포성 면역반응을 응용한 사례로는 세포의 반응 모델을 응용한 사례가 있지만 그리 많지 않은 실정이다[4]-[6].

따라서, 본 연구에서는 세포성 면역반응중 3가지 T cell (killer, helper, suppress)의 세포분자 동역학을 바탕으로 핵심 반응요소들만 고려하여 제어기를 설계하고자 하며, 특히 세포증폭작용을 효과적으로 이용하여 PID 구조를 갖는 제어기를 설계하고자 한다. 또한, 신경회로망 동정기법을 AGV 시스템 모델링에 응용하여 제안한 제어기 파라미터 설계를 보다 효과적으로 수행함으로써 설계된 제어기의 공학 제어기로서의 응용 가능성도 함께 검증 하고자 한다.

세포성 면역 반응은 T 세포(T-cell)의 자기 조절 과정을 통한 면역 기능의 촉진 · 억제 및 항원에 대한 직접적인 공격에 관한 반응이다. 즉, T 세포는 촉진 · 억제, 파괴의 기능을 하는 세 가지 세포로 구성되어 외부 침입물질에 대하여 빠르게 반응하고, 내부 면역체계를 보다 빠르게 안정화시키는 기능을 독립적으로 함께 수행할 수 있다는 특성면에서 면역 시스템의 또 하나의 피드백 메커니즘이라 할 수 있다[5]-[7].

즉, 이러한 면역 시스템의 조절과정을 수학적으로 모델링하여 공학 분야의 제어 시스템으로 구성하고자 하며, 설계된 제어 시스템 성능의 우수성과 실현 가능성을 평가하기 위하여 AGV의 주행 제어에 적용하고자 한다. 즉, AGV의 주요 목적인 생산성을 향상시키고, 안정성을 유지할 수 있도록 하기 위해 가급적 빠른 속도로 주행하여 물류 운반에 소요되는 시간을 줄이는 것이 요구된다[8][9]. 그러나, 차량이 고속으로 주행하게 되면 곡선 주행시 전복이나 탈선으로 인한 안정성 문제가 야기될 수 있으며, AGV의 조향 및 속도 제어기의 성능이 이를 좌우한다고 할 수 있다. 따라서, 각 제어기들은 부하 변동이나 주위의 환경 변화에도 적응성을 가질 수 있도록 설계되어야 한다. 즉, 이와 같은 비선형 시스템이 최적으로 운행되기 위해서는 기본적으로 넓은 동작범위에서도 안정적으로 동작할 수 있는 제어 구조가 요구되며, 이를 위하여 시스템의 정확한 동적 모델링도 함께 구현되어

접수일자 : 2000. 8. 29., 수정완료 : 2001. 4. 12.
이영진 : 항공기능대학 전기계측제어과(airlee@kopo.or.kr)
이진우 : 동아대 대학원 전기공학과(ikonote@orgio.net)
이권순 : 동아대 전기전자컴퓨터공학부(kslee@daunet.donga.ac.kr)

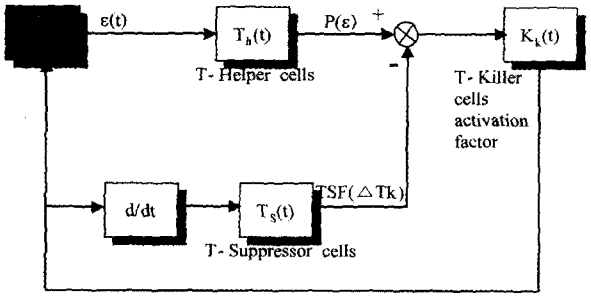


그림 3. CMI에 기반을 둔 T-cell 조정메카니즘.
Fig. 3. The T-cells regulation mechanism based on the CMI.

여기서, T_k는 항원 제거 세포로서 $\varepsilon(t)$의 변화량과 T_h 및 T_s의 조절량에 의존하며, K_k는 T_k의 성장요소를 나타낸다.

이러한, T 세포의 조정 메커니즘인 식 (3)~(5)로부터 그림 2의 면역 반응 메커니즘 구조는 그림 3과 같이 다시 나타낼 수 있다.

실제로 면역 반응 체계에서도 항원과 직접 작용하여 이를 소멸 또는 제거하는 역할을 하는 것은 T_k 세포 및 대식 세포와 같은 다른 몇몇 림프구들에 의하여 이루어지며, T_h 및 B 세포는 이를 도와주는 역할을 한다. 결과적으로 외부로부터 침입한 항원을 공격하는 T_k 세포의 양은 외부로부터 침투하는 항원 $\varepsilon(t)$에 의하여 결정되며, 식 (3)과 식 (4)에 의하여 조절된다고 할 수 있다.

따라서, 이는 생체 내부에서 능동적으로 조절되어 외부로부터 침입한 항원을 제어하여 생체 내를 안정한 상태로 유지시켜 나가는 역할을 한다고 할 수 있다. 또한, 식 (3)과 (4)의 세포 활성화 함수 및 억제 함수는 제어기의 성능을 결정하는 설계 파라미터로서 고려되어질 수 있으며, 식 (5)의 $T_k(t)$는 항원과 직접 싸워 이를 제거하는 역할을 하므로 공학분야에서 시스템을 제어하는 제어량 $U(t)$로 고려될 수 있다.

이때, ΔT_k는 제어기의 제어량 변화인 $\Delta u(t)$로 생각할 수 있고, $\varepsilon(t)$는 시스템 출력 오차인 $e(t)$로 나타낼 수 있으며, T_k의 성장 요소인 K_k는 제어기 스케일 요소(Controller Scale Factor)로 고려될 수 있다.

지금까지의 세포성 면역 반응과 PID 제어기 비례(P)항과의 유사성으로부터 세포성 면역을 이용한 제어기의 설계는 식 (6)과 같은 형태로 나타낼 수 있다.

$$U(t) = K_p\{P(e) - TSF(\Delta u)\}e(t) \tag{6}$$

여기서, $P(e)$는 제어량의 활성화 요소, $TSF(\Delta u)$는 억제 요소, K_p는 스케일 요소이다.

그러나, 실제로 산업 현장 및 많은 공학적 대상 물체는 비선형성과 외부의 주위환경에 대한 영향을 받고 있기 때문에 나머지 적분과 미분항을 고려하는 경우가 많다.

따라서, 면역 반응의 비례 제어 개념의 유사성으로부터 PID 구조를 갖는 CMIA 제어기를 설계할 수 있다. 즉, 일반적인 PID 제어기에 식 (5), (6)의 면역 반응에 근거한 제어 구조를 적용하면, 식 (7)과 같은 CMIA 제어량을 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} U_{CMIA}(t) = {} & K_1\{P_P(e) - TSF_P(\Delta u)\}e(t) \\ & + K_2\left\{P_I(\int e) - TSF_I(\Delta u)\right\}\int e(t) \\ & + K_3\{P_D(\Delta e) - TSF_D(\Delta u)\}\frac{de(t)}{dt} \end{aligned} \tag{7}$$

여기서, K_1, K_2, K_3는 제어 이득의 스케일 요소이고, 비례, 미분 및 적분의 각 요소에 대하여 $P(\cdot)$는 제어량의 활성화 요소, $TSF(\cdot)$는 억제 요소이며, 나머지 요소들은 식 (8)과 같다.

$$\begin{aligned} \int e(t) &= \int e(t-1) + 0.5T_s(e(t-1) + e(t)) \\ \Delta e(t) &= (e(t) - e(t-1))/Time_s, \\ \Delta u &= (u(t) - u(t-1))/Time_s, \\ Time_s &= sampling\ time. \end{aligned} \tag{8}$$

또한, 제어기가 안정적인 영역 내에서 동작하기 위해서는 다음의 조건들을 만족해야 하며, K_1, K_2, $K_3 > 0$ 및 $P(\cdot) \geq 0$이고, $TSF(\cdot) \geq 0$의 조건을 만족하기 위해 각 항에 대하여 $H_{\max}, S_{\max} > 0$, $H_{\min}, S_{\min} = 0$ 및 C_h, $C_s > 0$이 되어야 한다. 즉, 이러한 조건하에서 제어 시스템은 수렴성과 안정성이 보장될 수 있다.

IV. AGV 시스템 및 CMIA제어기 구현

1. AGV 시스템 하드웨어

AGV의 구성은 크게 제어부, 구동부, 통신부 및 센서부인 4개 부분으로 나눌 수 있다. 우선, 제어부는 다시 PC와 80C196으로 나누어 AGV 시스템을 제어하도록 구성하였다. PC는 펜티엄 586III로 구성하였으며, 영상 정보를 처리할 수 있는 메인 프로그램을 수행하도록 하였다. 또한, PC에서 취득된 영상으로부터 얻은 주행 변위 오차에 대한 정보는 RS232 통신을 통하여 80C196으로 전송되어 제어기 구동에 필요한 정보를 교환하도록 구성하였다. 80C196에서는 각 제어 알고리즘과 조향, 속도 등의 센서 데이터를 수행하여 각 모터의 구동 신호를 발생시키도록 하였다.

구동부는 12[V]로 구동되는 전륜 조향 모터와 후륜 주행 모터로 구성되어 있다. 각각의 모터는 L298 드라이버로 구동되도록 설계하였다.

통신부는 크게 AGV 내부에서 PC와 80C196간의 통신 프

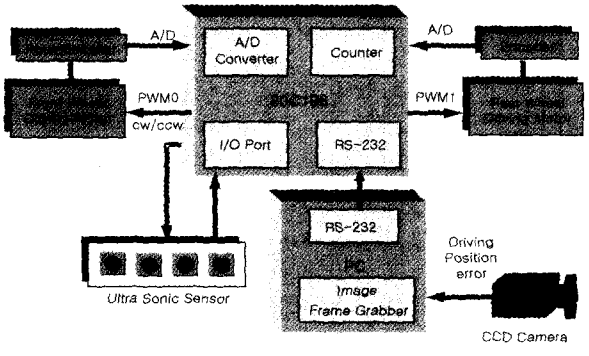


그림 4. AGV 시스템의 구조.
Fig. 4. The AGV system scheme.

표 1. AGV 시스템의 사양.
Table 1. Specifications of AGV system.

Contents		Specification	
AGV Body	Overall Length	1[m]	
	Overall Width	0.3[m]	
	Wheel Radius	0.05[m]	
	Weight	Dead weight	Payload
		30[kg]	25[kg]
Driving Parts	Steering	Gear rate ⇒ 1 : 35 (10([rpm]) Max. Steering Angle ⇒ 30±4[°] Rated Voltage ⇒ 20[V]	
	Speed	Gear rate ⇒ 1 : 16 Max. Speed ⇒ 0.5~0.7[m/s] (211[rpm]) Rated Voltage ⇒ 20 [V]	
Sensor Parts	Potentiometer	0~2[kΩ], ±5~10[%]	
	Ultrasonic Sensor	Polaroide 650 Series (송·수신 겸용)	

로토콜과 AGV와 외부간(다른 AGV 및 통제실)의 프로토콜로 나뉘어진다. 본 논문에서는 AGV 내부의 통신만을 이용하고 있으며, RS232 통신 방식을 채택하였다.

그림 4는 이상과 같은 구성을 갖는 AGV의 전체 시스템을 나타내며, 표 1은 AGV 시스템의 사양을 나타낸다.

2. 경로오차 생성 시스템

비젼 시스템(Vision System)은 함축된 영상정보에서 동시에 여러 가지 정보를 얻을 수 있는 이점이 있다[13][14]. 따라서 본 연구에는 설계 제작된 AGV의 주행경로 상의 위치 정보를 얻기 위하여 CCD 카메라를 이용하였다. 즉, 가이드 라인(Guideline)과 AGV와의 상대적 위치와 각도에 대한 오차를 얻기 위한 센서로 활용하였다.

CCD 카메라에서 획득된 신호는 영상 취득기(Frame Grabber)를 통해 디지털 신호로 변환되고, 이를 이용하여 가이드 라인을 인식하고, 현재 가이드 라인과 AGV간의 거리와 각도에 대한 오차를 얻을 수 있다. 이로부터 얻어진 신호는 시뮬레이터에 장착된 PC 기반 주 제어부에서 연산되어 RS232 통신으로 80C196으로 전송하여 모터 제어부의 명령 신호를 생성하도록 하였다.

우선, 가이드 라인과 AGV간의 거리와 각도에 대한 오차를 구하기 위해서는 입력 영상에서 가이드 라인의 검출이 필요하다. 실험에 사용된 바닥 면은 약간의 잡음 성분을 가지는 흑색 배경에 백색의 가이드 라인으로 구성하였다. 가이드 라인을 검출하기 위하여 입력되는 컬러 영상에서 배경으로 볼 수 있는 잡음 성분을 제거하고, 이를 설정된 경계치를 이용하여 이진화하면 배경과 라인 부분이 선명하게 구분된다. 획득된 이진 영상에서 AGV와의 거리와 놓여진 각도를 계산하기 위해 좌표를 설정해야 한다. 80×60 사이즈의 영상을 정의하여 중심으로부터 우측은 양, 좌측은 음의 부호로 설정하였다.

이진화된 영상은 라인의 중심선을 찾기 위해 아래에서 0~5화소(Pixels) 상에서 각각 좌우 가장자리로부터 중심까지 연결 성분을 만족하는 수평상의 두 점을 찾아 그 중심을 가이드 라인의 하단 중심으로 택하였다. 또한, 30~33화소 상에서 동일한 방법으로 연결성분을 만족하는 부분을 찾아 상단의 중심점으로 택하였다. 이 두 점을 연결하여 중심선을 만들면 현재의 가이드 라인의 상태를 읽을 수 있다.

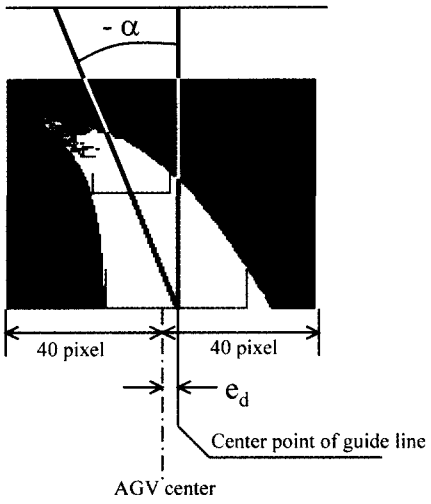


그림 5. AGV와 가이드라인 사이의 거리와 각도오차.
Fig. 5. The relative errors of distance and angle between the AGV and guideline.

추출된 가이드 라인의 중심선은 설정된 좌표 상에서 현재의 AGV 위치와 상대적인 가이드 라인과의 기울어진 각도를 측정하도록 하였다. 획득된 영상 정보는 초당 20 프레임(Frames)의 처리 속도로 윤곽선 검출 등의 처리과정을 통하여 AGV의 상태를 80C196에 전송시키도록 하였다. 그림 5는 영상정보에서 기준(Reference) 조향각 δ를 결정하기 위한 상대적 거리오차 e_d 및 각도오차 α를 나타낸다.

δ를 구하기 위하여 거리 오차를 피드백(Feed Back)하고, 예측 성분을 가지는 가이드 라인의 각도 오차를 피드 포워드(Feed Forward)하는 방식을 이용하였다. 설정 속도인 R_{speed}를 조절하여 AGV의 속도가 증가하면 거리 오차 보다 각도 오차가 차지하는 비율이 증가하고, 속도가 감소하면 상대적으로 거리 오차에 비중을 두어 계산하도록 하였다.

또한, 이득 K에 의해 피드 포워드와 피드백되는 부분의 전체 값을 스케일하여 δ를 구하도록 하였다. 이러한 과정을 통하여 기준 조향각 δ를 식 (9)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\delta = K\{ (\frac{e_d}{R_{speed}}) + (R_{speed} \cdot \alpha) \} \quad (9)$$

3. AGV의 신경회로망 동정기 구현

AGV에 대한 신경회로망 동정은 조향 시스템과 속도 시스템에 대해 각각의 동정기를 구현하였다. 조향 시스템에 대한 입력은 입력 전압 12[V]에 대하여 0-255 비율을 갖는 PWM 값으로 하였고, 출력은 포텐시오미터로부터 A/D변환된 0-255 출력을 이용하였다. 속도 시스템의 입력은 구동 시스템에 대한 입력 전압으로서 12[V]에 대하여 0-255 비율을 갖는 PWM 값을 입력신호로 하였으며, 출력은 AGV의 속도

표 2. 신경회로망 동정기 파라미터.
Table 2. Parameters of the neural network identifier.

Parameters \ Classification		Steering parts	Speed parts
Pattern No.		700	700
Node No.	Input	5	5
	Hidden	7	7
	Output	1	1
Learning ratio		0.9	0.5
Momentum factor		0.3	0.08
Input parameter		u(t),u(t-1),u(t-2), $\hat{y}(t-1)$, $\hat{y}(t-2)$	u(t),u(t-1),u(t-2), $\hat{y}(t-1)$, $\hat{y}(t-2)$
Slope	Hidden	0.0025	0.005
	Output	0.0025	0.005

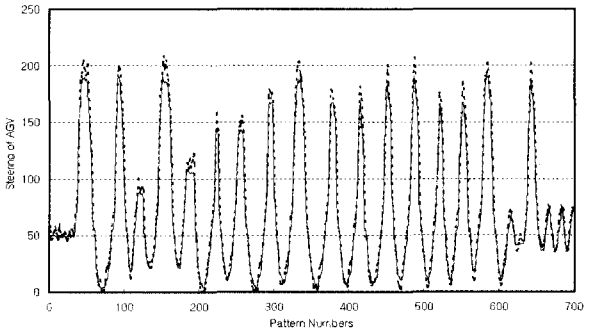


그림 6. 조향시스템의 신경회로망 동정결과.
Fig. 6. Results of the neural network identification for the steering system.

0.5[m/sec]에 대한 카운터값을 출력으로 하였다.

학습에 사용된 패턴 수는 700개로 하였다. 신경회로망 동정기에 사용된 구조는 각각 3층으로 구성된 다층신경회로망을 이용하였으며, 학습시 뉴런의 반응 정도를 결정하는 함수인 활성화 함수는 항등함수(identity function)를 사용하였다. 또한, 학습율과 모멘트 계수 및 기울기 등의 설계 파라미터는 표 2와 같다.

그림 6은 조향 시스템에 대한 신경회로망의 동정 결과를 나타낸다.

신경회로망 동정에 대한 전체적인 백분율 오차의 평균이 약 15[%]이지만, 실제값의 최대값에서 모델링 오차가 큰 것 외의 경우는 오차가 거의 발생되지 않음을 알 수 있다. 속도 시스템에 대한 모델링 파형은 그림 7과 같으며, 백분율 오차의 평균이 6.9[%]이며, 음과 양의 최대값 부근에서 학습에 필요한 데이터의 수가 상대적으로 작아 다소 오차가 많이 발생한 것으로 분석된다.

4. CMIA 제어기 파라미터 최적 설계

본 연구에서 제안한 CMIA 제어기는 설계시 고려되어야 하는 제어기 파라미터가 비선형 요소를 포함하고 있어 이에 대한 최적의 조정이 요구된다. 그림 8은 HIA(Humoral Immune Algorithm)를 이용한 CMIA 제어기 파라미터의 자동동조 구조를 나타낸다[1].

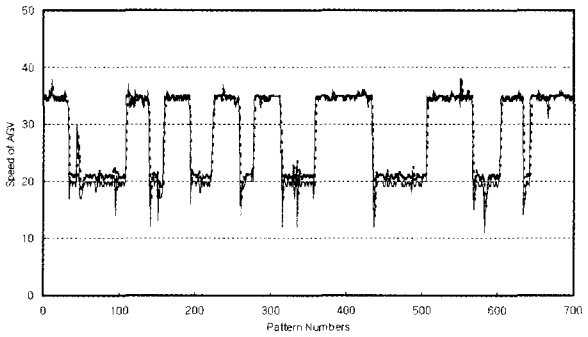


그림 7. 속도시스템에 대한 신경회로망 동정결과.
Fig. 7. Results of the neural network identification for the speed system.

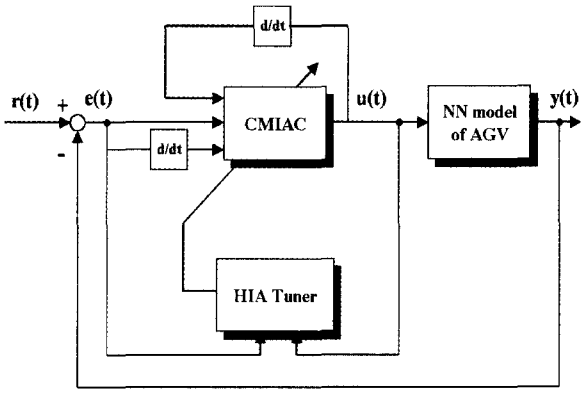


그림 8. HIA를 이용한 CMIA 제어기의 자동동조.
Fig. 8. The HIA tuned CMIA control system.

제어기 파라미터 자동 동조를 위하여 HIA의 세대는 100세대로 하였고, 각 세대 당 개체 수는 40, 기억세포에 저장되는 개체의 수는 10으로 하였다. 아울러 새로운 개체의 생성방법으로는 무작위 추출법 50[%], 기존개체의 복제 50[%]를 수행한 후 유전자적 교배를 통하여 생성시켰으며, 0.25[%]의 돌연변이 확률을 적용하였다.

CMIA 제어기 설계를 위하여 우선, 억제량과 자극량을 결정하는 요소들 중 비선형적 요소를 가급적 줄이기 위하여 g_s와 g_h는 모두 1로 두었으며, 최적 조정이 요구되는 CMIA 제어기 파라미터로는 K_1, K_2, K_3와 각 함수의 H_{max} 및 C_h와 $TSF(\Delta u)$함수의 S_{max} 및 C_s를 포함하여 steering 및 speed parts에 필요한 모두 14개의 파라미터를 동조하여 제어기를 자동동조 설계하였다.

5. CMIA 제어기 구현

그림 9는 CMIA 제어기 실현 알고리즘의 흐름도를 나타낸다. 제어 루프를 수행하기 전에 제어기 파라미터 등 각 변수에 대한 초기값들이 마이크로프로세서의 메모리에 저장되는 초기화 작업이 수행된다.

먼저, 타이머/카운터, D/A 변환기의 초기 상태 및 각 변수의 초기화를 수행한다. 타이머로부터 5[msec]마다 인터럽트 신호(Interrupter Signal)가 발생하며, 이때 인터럽트 처리 루틴(Routine)에서는 카운터로부터 속도 정보를 입력하고, 다음 제어 주기의 속도 검출을 위하여 카운터를 초기화한다.

또한, 입력된 속도 정보로부터 CMIA 제어기 자기동조

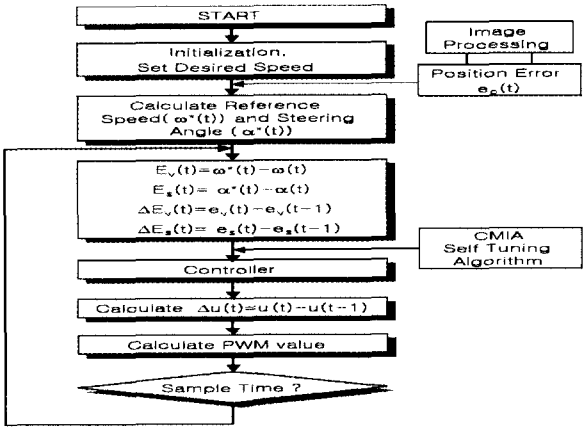


그림 9. CMIA 제어기의 플로차트.
Fig. 9. The flow chart of the CMIA controller.

(self tuning) 루틴부는 지령 속도와의 오차 $e(t)$ 및 오차 변화분 $\Delta e(t)$와 제어 입력 변화분 $\Delta u(t)$를 구하여 식 (3), (4)과 같이 제어기 파라미터를 결정한다. 이로부터 식 (7)에 의한 속도 제어기의 제어량($U_{CMIA}(t)$)이 결정되며, 후륜 DC 모터의 드라이버에 PWM 신호를 전달한다.

또한, 전방 조향 모터로부터 조향각을 D/A변환을 통하여 입력받아 조향 제어량을 결정하여 전륜 조향 DC 모터의 드라이버에 PWM 신호를 전달하고, cw 및 ccw 신호를 보내어 회전방향을 결정하도록 하였다.

이때, 기준 조향각 $\alpha^*(t)$을 결정하기 위해서는 주행 가이드라인에 대한 위치 정보가 필요하므로 전방에 설치되어 있는 CCD 카메라로부터 입력된 영상 정보를 PC에서 처리하여 RS232 통신으로 80C196에 전송하도록 하였다.

V. 실험 및 결과 고찰

AGV의 주행 실험을 위하여 사용된 경로는 사인파 경로를 실제 제작하였으며, 그림 10은 실제 주행 실험에 사용된 경로와 주행 장면을 나타내고 있다. 주행경로의 진폭은 1 [m]인 정현파 경로로서, 검정색 바탕에 폭이 약 1[cm]인 흰색 라인을 추종하도록 실험하였다.

그림 11에서 12는 약 25[kg]의 부하가 탑재된 상태에서 주행 속도를 0.5[m/sec]로 하였을 때의 PID, NNPID 및 CMIA 제어에 대한 주행 속도, 속도 제어입력, 조향각, 조향 제어입력 및 주행변위 오차를 각각 나타내었다.

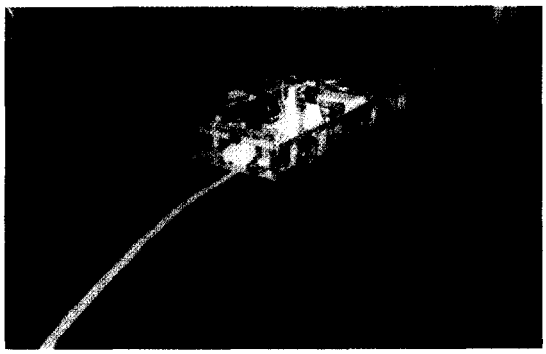
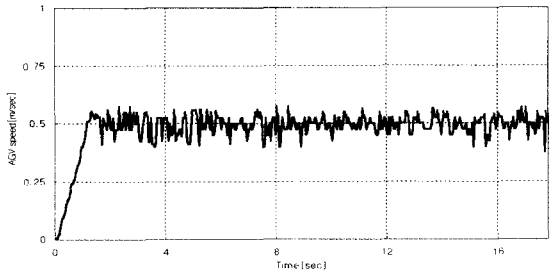
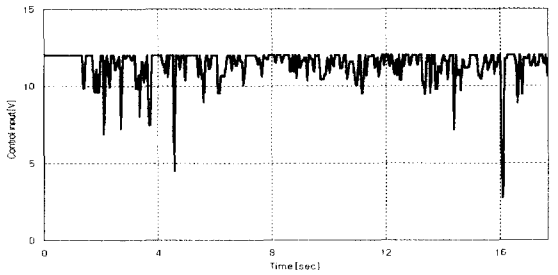


그림 10. AGV 주행실험 사진.
Fig. 10. The photograph of the AGV driving experiments.

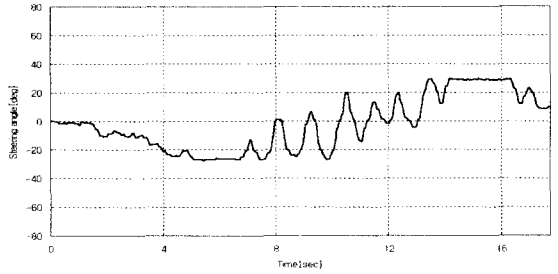
그림 11은 PID 제어시 주행 실험 결과를 나타낸다. 그림 11 (a), (b)는 주행 속도 및 속도 제어입력을 각각 나타내며, 속도 추종치인 0.5[m/sec]에 도달되는 정정 시간이 1.86[sec] 이였다. 속도가 정상 상태에 도달한 후에도 평균 전압이



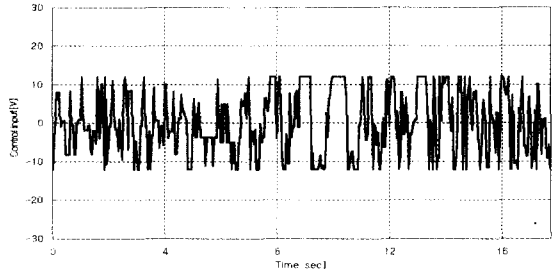
(a) Driving speed



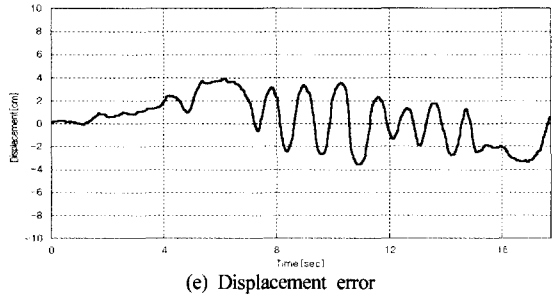
(b) Speed control input



(c) Steering angle



(d) Steering control input

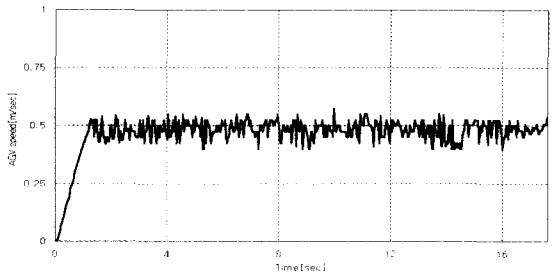


(e) Displacement error

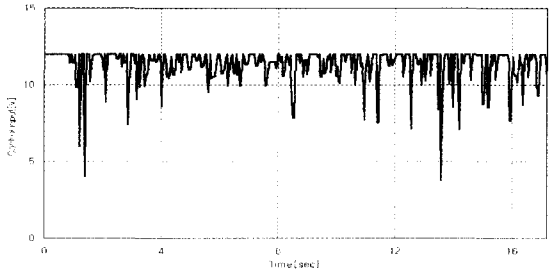
그림 11. PID 제어기의 실험결과.
Fig. 11. Experimental results of PID controller.

11.39[V]가 필요하였다. 측정 잡음으로 인하여 정상 상태 도달 후에도 주행 속도가 0.0397[m/sec]의 표준편차를 가지고 진동이 발생하였다. 그림 11 (c), (d), (e)는 조향각 변위, 조향 제어입력, 및 주행 변위 오차를 각각 나타내고 있다. 또한, 최대 변위 오차는 3.91[cm]가 발생하였으며, 평균 변위 오차가 2.10[cm] 발생함을 알 수 있었다.

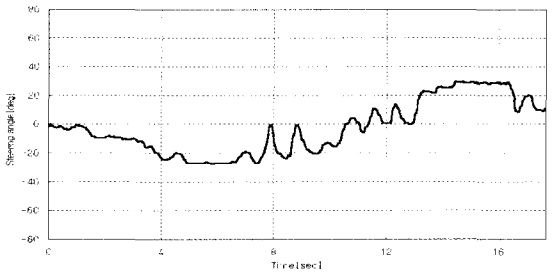
그림 12는 NNPID 제어시 주행 실험 결과를 나타낸다. 그림 12(a), (b)는 주행 속도 및 속도 제어입력을 각각 나타내며, 속도 추종치인 0.5[m/sec]에 도달하는 정정 시각이 1.81 [sec]이었다. 속도가 정상 상태에 도달한 후에도 평균 전압



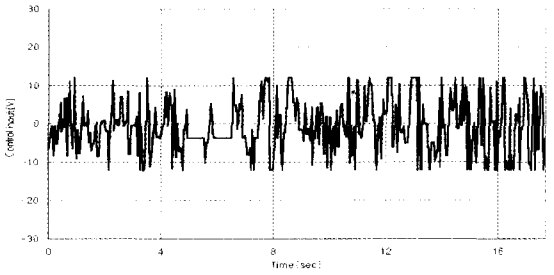
(a) Driving speed



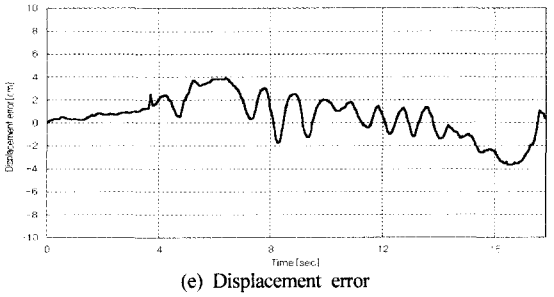
(b) Speed control input



(c) Steering angle

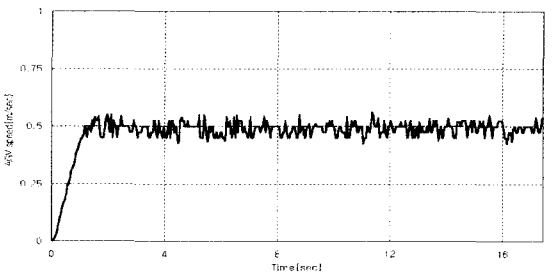


(d) Steering control input

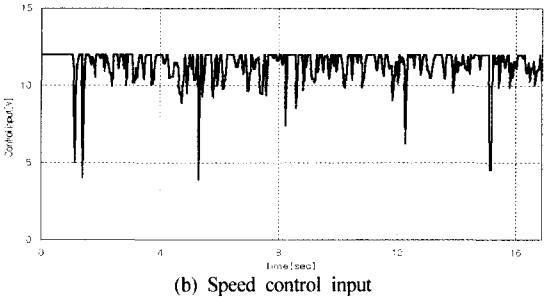


(e) Displacement error

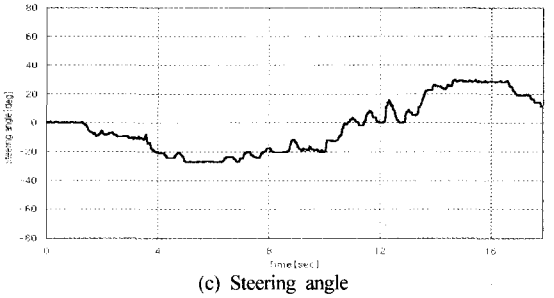
그림 12. NNPID 제어기의 실험결과.
Fig. 12. Experimental results of NNPID controller.



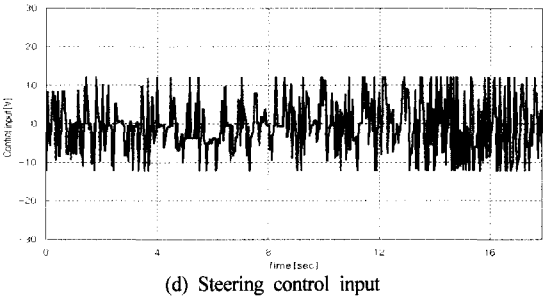
(a) Driving speed



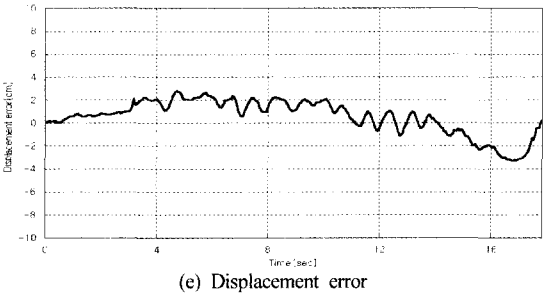
(b) Speed control input



(c) Steering angle



(d) Steering control input



(e) Displacement error

그림 13. CMIA 제어기의 실험결과.
Fig. 13. Experiment results of CMIA controller.

표 3. AGV의 주행실험결과.
Table 3. Driving experiment results of AGV.

Response Characteristics \ Controllers		PID	NNPID	CMIA
Speed control	Speed settling time[sec]	1.86	1.81	1.56
	Speed percent overshoot[%]	5.5	5.3	5.2
	Speed standard deviation[m/sec]	0.483 ±0.0397	0.494 ±0.0377	0.496 ±0.028
	Control input RMS [V]	11.39	11.32	11.37
Steering control	Displacement error max. [cm]	3.91	3.85	3.25
	Displacement error RMS [cm]	2.10	1.90	1.53
	Control input RMS [V]	8.21	7.02	6.87

이 11.32[V]가 필요하였다. 측정 잡음으로 인하여 정상 상태 도달 후에도 주행 속도가 0.0377[m/sec]의 표준편차를 가지고 진동이 발생하였다. 그림 12(c), (d), (e)는 조향각 변위, 조향 제어입력, 및 주행 변위 오차를 각각 나타내고 있다. 또한, 최대 변위 오차는 3.85[cm]가 발생하였으며, 평균 변위 오차가 1.90[cm] 발생함을 알 수 있었다.

그림 13은 CMIA 제어시 주행 실험 결과를 나타낸다. 그림 13(a), (b)는 주행 속도 및 속도 제어입력을 각각 나타내며, 속도 추종치인 0.5[m/sec]에 도달하는 정정 시각이 1.56[sec]이였다. 속도가 정상 상태에 도달한 후에도 평균 전압이 11.37[V]가 필요하였다. 측정 잡음으로 인하여 정상 상태 도달 후에도 주행 속도가 0.0280[m/sec]의 표준편차를 가지고 진동이 발생하였다. 그림 13(c), (d), (e)는 조향각 변위, 조향 제어입력, 및 주행 변위 오차를 각각 나타내고 있다. 또한, 최대 변위 오차는 3.25[cm]가 발생하였으며, 평균 변위 오차가 1.53[cm] 발생함을 알 수 있었다.

일정한 부하가 인가되는 상태에서 실험을 수행해 본 결과, 최대 변위 오차의 경우, 제안한 CMIA 제어가 PID 및 NNPID 제어에 비하여 각각 17[%], 16[%] 정도 우수한 것을 알 수 있었다. 또한, 주행시 평균적으로 발생된 변위 오차도, CMIA 제어가 PID 및 NNPID 제어에 비하여 각각 27[%], 20[%]가 개선되었다. 이상과 같이 부하 인가시에 대한 제어기 주행 실험 결과를 종합하면 다음 표 3과 같다.

V. 결론

생체의 면역 시스템은 외부 침입 물질인 항원에 대항하여 즉각적으로 반응하는 능력과 항시 생체 내부의 안정성을 유지하기 위한 자기 조절 기능을 수행하는 것이 특징이다. 본 논문에서는 이러한 면역 시스템의 특징을 수학적으로 모델링하여 다음의 관점에서 공학분야의 제어기로 설계하였다.

세포성 면역 반응에서 T 세포가 외부 침입 물질에 대하여 즉각적으로 반응하고, 내부 면역 체계를 보다 빠르게 안정화시키는 기능을 독립적으로 수행하는 자기 조절 기능을 세포-분자 반응식을 바탕으로 모델링하여 시스템 환경 변화에도 보다 적응적으로 대처할 수 있는 CMIA 제어기를 설계하였다.

일련의 실험 결과를 통하여 제안한 CMIA 제어 구조가 갖는 우수성과 특징을 요약하면 다음과 같다. 우선, AGV의 모델링시 신경회로망 동정기를 이용함으로써 과거와 미래의 입출력 정보를 이용한 예측기능을 활용하여 종래의 수학적 기법이 표현하기 어려웠던 시스템의 다양한 동특성을 보다 쉽게 학습할 수 있었다. 또한, 제안한 제어기 설계시 시스템 출력 오차, 오차의 변화분 및 제어량 변화분에 대한 세 가지 제어 활성화 요소를 적용함으로써 오차가 증가함에 따라 즉각적으로 반응하여 보다 안정된 응답 특성을 얻을 수 있었다.

아울러, CMIA 제어기를 설계함에 있어 가급적 제어기의 안정성을 유지하기 위하여 세포 성장 계수와 같은 비선형적 요소는 고려하지 않았지만, 향후 이러한 요소들도 고려하여 보다 면역 시스템에 가까운 제어기 설계가 필요할 것으로 생각된다.

참고문헌

[1] S. Endoh, N. Toma, and K. Yamada, "Immune algorithm for n-TSP," *Proc. of the IEEE Int. Conf. on Systems, Man, and Cybernetics*, vol. 4, pp. 3844-3849, 1998.

[2] A. Ishiguro, T. Kondo, Y. Watanabe, Y. Shirai, and Y. Uchikawa, "An evolutionary construction of immune network-based behavior arbitration mechanism for autonomous mobile robot," *Trans. of the Institute of Electrical Engineers of Japan C-A Publication of Electronics*, Information and Systems Society, vol. 117, no. 7, pp. 865-873, 1997.

[3] J. H. Jun, D. W. Lee, and K . B. Sim, "Realization of cooperative strategies and swarm behavior in distributed autonomous robotic systems using artificial immune system," SMC Proc., pp. 614-619, 1999.

[4] K. Takahashi and T. Tamada, "Application of an immune feedback mechanism to control systems," *Int. Journal of JSME, Series C*, vol. 41, no. 2, pp. 184-191, 1998.

[5] K. Takahashi and T. Tamada, "Application of an immune feedback mechanism to control systems," *Int. Journal of JSME, Series C*, vol. 41, no. 2, pp. 184-191, 1998.

[6] 이영진, 이권순, "면역반응 알고리즘을 이용한 구조물의 진동제어," 한국항만학회지, 제13권, 제2호, pp. 389-398, 1999.

[7] K. S. Lee, *Mathematical Modeling and the Control of Immune Processes with Application to Cancer*, Ph. D. Dissertation, Oregon State University, 1990.

[8] H. F. Durrant-Whyte, "An autonomous guided vehicle for cargo handling applications," *The Int. Journal of Robotics Research*, vol. 15, no. 5, pp. 407-440, 1996.

[9] 한국해양수산개발원, *자동화 컨테이너터미널 개발사업 타당성 검토 최종보고서*, 1998. 12.

[10] D. Dasgupta, *Artificial Immune Systems and Their Applications*, Springer, 1997.

[11] I. Roitt, Essential Immunology, Blackwell Scientific Publications, 1980.

[12] R. R. Mohler, K. S. Lee, A. L. Asachenkov, and G. I. Marchuk, "A systems approach to immunology and cancer," *IEEE Trans. on Systems, man, and Cybernetics*, vol. 24, no. 2, pp. 632-642, 1994.
[13] G. Cheng and A. Zelinsky, "Real-time visual behaviours for navigating a mobile robot," *Proc. of the IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems*, vol. 2, pp. 973-980, 1996.
[14] I. Masaki, *Vision-Based Vehicle Guidance*, Springer-Verlag, 1991.

이 영 진

1992년 2월 동아대 전기공학과 졸업. 1994년 2월 동아대 대학원 전기공학과 졸업(공학석사). 2000년 8월 동대학원 졸업(Ph. D). 2000년 9월~현재 항공기능대학 전기계측제어과 전임강사. 관심분야는 지능제어, 비행자세제어 및 AGV 시스템응용 제어.

이 진 우

1998년 경남대 전기공학과 졸업. 2000년 2월 동아대 대학원 전기공학과 졸업(공학석사). 2000년 3월~현재 동대학원 박사과정. 관심분야는 지능제어 및 영상처리.

이 권 순

1977년 충남대 공업교육과 졸업. 1981년 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.