

신경회로망 동정기법에 기초한 HIA 적응 PID 제어를 이용한 AGV의 주행제어에 관한 연구

이영진*, 서진호**, 이권순#

A Study on Driving Control of an Autonomous Guided Vehicle using Humoral Immune Algorithm Adaptive PID Controller based on Neural Network Identifier Technique

Young Jin Lee*, Jin Ho Suh** and Kwon Soon Lee#

ABSTRACT

In this paper, we propose an adaptive mechanism based on immune algorithm and neural network identifier technique. It is also applied for an autonomous guided vehicle (AGV) system. 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 almost adjusted randomly. To solve this problem, we use the neural network identifier (NNI) technique for modeling the plant and humoral immune algorithm (HIA) which performs the parameter tuning of the considered model, respectively. 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 an 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. Finally, the simulation and experimental result for the control of steering and speed of AGV system illustrate the validity of the proposed control scheme. These results for the proposed method also show that it has better performance than other conventional controller design methods.

Key Words: Humoral immune algorithm (HIA, 생체면역알고리즘), Adaptive control (적응제어), PID control, Neural network identifier (NNI, 신경회로망동정), Autonomous guided vehicle (AGV).

1. 서론

최근에 전세계적으로 항만 물류량이 증가하면서 한정된 항만 부지에서 더 많은 컨테이너를 효과적으로 처리하기 위한 항만자동화에 관한 많은

연구들이 진행되고 있다.¹ 이러한 연구 중에서, 항만에서 컨테이너를 무인으로 운반하는데 이용되는 AGV(autonomous guided vehicle) 시스템은 항만자동화의 핵심장비 중의 하나로서 이동로봇과 함께 산업현장에서도 폭 넓게 응용되고 있다.³⁻⁵ 특히, 무

접수일: 2004년 1월 16일; 게재승인일: 2004년 6월 11일

* 항공기동대학 전기계측공학과

** 동아대학교 전기전자컴퓨터공학부

교신저자: 동아대학교 전기전자컴퓨터공학부

E-mail kslee@daunet.donga.ac.kr Tel. (051) 200-7739

인으로 운행되는 AGV 시스템은 제한된 정보로서 바람이나 외란과 같은 주위의 환경변화에 능동적으로 대처하면서 주어진 경로와 속도로 정확히 추종함이 요구되어지므로 조향 및 속도제어가 AGV 시스템의 성능을 좌우한다고 할 수 있다.^{3,4}

이러한 AGV 시스템의 제어를 위한 가장 일반적인 방법은 제어 대상 시스템인 AGV 시스템의 모델해석을 통하여 요구하는 조건에 가장 적합한 제어를 설계하는 것이다. 그러나, 일반적으로 AGV 시스템은 비선형성(nonlinearity)이 강하여 정확한 모델을 구성하기 어렵고 또한 비홀로노믹(nonholonomic) 시스템으로서 구속조건이 만족되어짐을 가정해야만 한다. 더구나, 정확한 모델이나 파라미터를 알고 있다고 가정하더라도 옥외에서 운행될 경우 도로의 변화 또는 컨테이너와 같은 여러 가지 부하변동을 포함하는 각종 외부환경 변화요소를 고려해야 하므로 이러한 시스템을 제어하기란 쉽지 않다고 할 수 있다.

따라서, AGV 시스템과 운행환경에 비선형적 요소를 많이 내포하고 있는 경우에 대해서는, 기존의 문헌들에서 제안되어진 여러 가지 제어기 설계법으로는 적정하지 않고 비교적 넓은 동작 범위에서 안정적으로 동작할 수 있는 비선형 제어기 설계법이 적합하다고 할 수 있다. 이러한 제어기에는 자기 동조(self-tuning) 제어, 슬라이딩 모드 제어, 기준 모델 적용 예측제어, 강인제어 등이 있지만, 그 구조가 복잡하고 제한된 불확실성 내에서 적용하거나, 비선형성이 강하고 동작점의 범위가 넓게 변화하는 경우는 또 다른 제어방법을 제안해야 하는 문제점을 안고 있다. 따라서, 최근에는 제어기 자체의 최적 설계를 위하여 GA(genetic algorithm), SA(simulate annealing), ES(evolution strategy) 및 HIA(humoral immune algorithm)등과 같은 최적화 알고리즘을 부가한 결합구조의 연구 결과들이 많이 발표되고 있다.^{6,7}

이러한 연구들 중에서, HIA는 생체에서 항원에 대한 진화적 생체 방어 시스템을 모델링 한 것으로서 해의 탐색 능력이나 수렴 특성면에서 GA 보다 그 성능이 우수하다는 연구결과가 보고되고 있으므로 그 활용가치가 더욱 높다고 할 수 있다.⁸ 따라서, 본 연구에서도 복잡한 비선형 제어기 설계문제를 해결하기 위하여 비교적 간단한 구조의 PID 제어기에 최적화 알고리즘인 HIA를 도입하여 선형화에 따른 문제점과 비선형적 요소를 능동적

으로 대처할 수 있는 제어를 설계하고자 한다. 본 논문에서 제안되어진 방법은 신경회로망 동정기(neural network identifier, NNI)를 이용한 예측 및 모델 추종기법을 이용하여 제어기 파라미터를 온라인으로 미세 조정(fine tuning)하는 구조로 설계함으로써 종래의 동조기법에 비해 성능이 우수하면서도 주위 외란에 대해서도 강인성을 가지는 적응형 제어 구조를 제안하고자 한다. 더불어서, AGV 시스템의 설계를 통하여 조향 및 속도 제어 시스템을 표현하고, 제안되어진 시스템을 고려하여 주어진 경로 추종을 위한 CCD 카메라와 DC 모터로 구동되는 AGV 시뮬레이터 시스템을 실제 제작하여 설계된 실시간 구조 적용제어의 실현 가능성도 함께 검증하고자 하였다.

2. AGV 시스템의 모델링

본 논문에서, 실제 제작되어질 AGV 시스템의 구동 방식은 후륜 구동 방식의 자동차형 모델로서 조향은 전륜에서 이루어지며, 각각은 DC 모터로 구동되어진다. 본 연구에서, AGV 시스템의 구동 및 조향장치의 효과적인 제어와 실제 시스템의 구현 가능성을 검증하기 위하여 동역학적 특성을 함께 분석할 수 있는 동적 방정식으로 접근하여 구동모터의 특성과 기구학적인 관점에서 AGV 시스템을 모델링 하였다. 본 단원에서는 후륜 구동방식의 자동차형 AGV 시스템의 기구학적 모델링과 속도 및 조향 시스템에 대한 수학적 모델링 방법을 간략하게 기술하고자 한다.

2.1 AGV 시스템의 동적모델

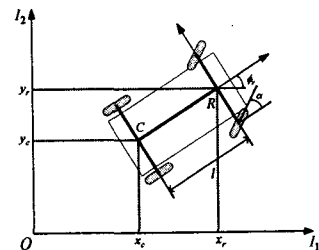


Fig. 1 Kinematics scheme of a 4-wheeled AGV

본 논문에서 고려되어진 4 륜 AGV 시스템의 구성모델은 Fig. 1 과 같이 나타내어지고, 고려되어

진 AGV 시스템의 동적 방정식은 후륜 구동 바퀴의 선속도와 전륜 조향 바퀴의 회전각으로부터 간단하게 구해질 수 있다.² 이때, 전륜 조향 바퀴의 중심좌표 R 에서 AGV 시스템의 기구학적 벡터를 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$\xi = (x_r \ y_r \ \phi_r)^T \quad (1)$$

단, x_r 와 y_r 는 기준점 R 의 좌표이고, 직교좌표에서 I_1 축과 이루는 각 ϕ_r 는 관성기저(inertia basis) $\{O, I_1, I_2\}$ 에 대한 기저 $\{X, Y\}$ 의 방향을 나타내고 있다.

먼저, 후륜 구동 바퀴의 속도 방향성분은 간단하게 다음과 같이 나타내어질 수 있다.

$$\dot{x}_c = v_c \cos \phi_r, \quad \dot{y}_c = v_c \sin \phi_r \quad (2)$$

단, v_c 는 고려되어진 AGV 시스템의 속도를 의미한다. 이때, 전륜 조향 바퀴의 좌표는 후륜 구동 바퀴 좌표와 전륜과 후륜 바퀴 사이의 길이 l 을 고려함으로써 다음과 같이 기술되어진다.

$$x_r = x_c + l \cos \phi_r, \quad y_r = y_c + l \sin \phi_r \quad (3)$$

따라서, 전륜 조향 바퀴의 선속도는 식(3)을 시간 미분함으로써 나타내어질 수 있다.

$$\dot{x}_r = \dot{x}_c - l \dot{\phi}_r \sin \phi_r \quad (4)$$

$$\dot{y}_r = \dot{y}_c + l \dot{\phi}_r \cos \phi_r \quad (5)$$

일반적으로 AGV 시스템은 비홀로노믹 시스템임이 잘 알려져 있으므로 기구학적 구속(kinematical constraint)을 의미하는 i) pure rolling condition, ii) non-slipping condition 을 만족한다는 가정 아래에서 후륜 구동바퀴에 대하여 다음 식을 유도할 수 있다.

$$\dot{x}_c \sin \phi_r - \dot{y}_c \cos \phi_r = 0 \quad (6)$$

또한 식(1)에서 표현되어진 전륜 조향 바퀴의 위치벡터 ξ 에 대하여, AGV 시스템의 전륜 바퀴에 대한 속도벡터는 식(6)의 구속조건을 이용함으로써 간단하게 행렬로서 나타낼 수 있다.

$$(\sin \phi_r \ -\cos \phi_r \ l) \dot{\xi} = 0 \quad (7)$$

따라서, 전륜 조향 바퀴를 중심으로 하는 AGV 시스템의 기구학적 동적 방정식(kinematic dynamic equation)은 다음과 같이 기술되어진다.

$$\dot{x}_r = v_r \cos(\phi_r + \alpha) \quad (8)$$

$$\dot{y}_r = v_r \sin(\phi_r + \alpha) \quad (9)$$

$$\dot{\phi}_r = \frac{v_r}{l} \sin \alpha \quad (10)$$

단, α 는 AGV 의 전륜 조향 바퀴의 조향각을 나타내고 v_r 는 전륜 조향 바퀴의 속도를 의미하며, 다음의 식에 의하여 계산되어진다.

$$\alpha = \sin^{-1} \left(\frac{l \dot{\phi}_r}{v_r} \right), \quad v_r = \pm \sqrt{\dot{x}_r^2 + \dot{y}_r^2} \quad (11)$$

더불어서, 식(6)에서 표현되어진 비홀로노믹 시스템의 구속조건을 고려하여 전륜 바퀴를 중심으로 한 AGV 시스템에서도 구속조건을 만족함을 가정함으로써 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\dot{x}_r \sin(\phi_r + \alpha) - \dot{y}_r \cos(\phi_r + \alpha) = 0 \quad (12)$$

2.2 조향 및 구동 시스템

AGV 시스템은 두 대의 DC 모터로서 구동되므로, 구동을 위한 후륜 DC 모터의 상태방정식은 다음과 같이 나타내어질 수 있다.

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) + C(b + \omega(t)) \quad (13)$$

$$x(t) = (\omega_v \ i_{a1})^T, \quad u = e_{a1} \quad (14)$$

단,

$$A = \begin{pmatrix} -\frac{B_{m1}}{J_{m1}} & -\frac{K_{e1}}{J_{m1}} \\ -\frac{K_{b1}}{L_{a1}} & -\frac{R_{a1}}{L_{a1}} \end{pmatrix}, \quad B = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 0 & L_{a1} \end{pmatrix}^T,$$

$$C = \begin{pmatrix} -\frac{1}{J_{m1}} & 0 \end{pmatrix}^T$$

또한, 조향을 위한 전륜 DC 모터의 상태방정식은 조향에 필요한 각 α 를 고려함으로써 다음과 같이 나타내어진다.

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) + C(b + \omega(t)) \quad (15)$$

$$x(t) = (\theta \quad \omega_s \quad i_{a2})^T, \quad u = e_{a2} \quad (16)$$

단,

$$A = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & -\frac{B_{m2}}{J_{m2}} & \frac{K_{c2}}{J_{m2}} \\ 0 & -\frac{K_{b2}}{L_{a2}} & \frac{R_{a2}}{L_{a2}} \end{pmatrix}, \quad B = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 1 \\ & & L_{a2} \end{pmatrix}^T,$$

$$C = \begin{pmatrix} 0 & -\frac{1}{J_{m2}} & 0 \end{pmatrix}^T$$

이러한 상태방정식들에서 정의되어진 각 파라미터들은 이전의 연구들에서 상세히 언급되어져 있고, 이러한 연구들에서 제안되어진 방법들을 바탕으로 AGV 시스템의 주행제어 메커니즘을 Fig. 2 와 같이 표현할 수 있다.^{9,13}

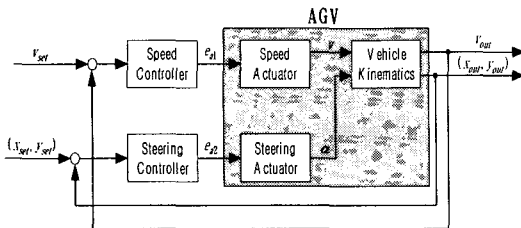


Fig. 2 The block diagram of the steering and speed control system

Fig. 2 에서, v_{ser} 와 (x_{ser}, y_{ser}) 는 각각 설정속도와 주행경로의 설정좌표를 의미하고, e_{a1} 과 e_{a2} 는 각각의 제어기들에 입력되는 전압을 나타내며, v_{out} , α , 그리고 (x_{out}, y_{out}) 는 출력속도, 조향각 그리고 AGV 시스템의 위치좌표를 나타낸다.

3. HIA 적응 PID 제어기 설계

일반적으로 PID 제어기는 비교적 구조가 간단하면서도 구현하기가 쉽다는 장점을 가지고 있으므로 현재 산업현장에서 널리 사용되고 있다. PID 제어에 필요한 제어기 파라미터들의 설계를 위하여 고전적 기법에서부터 지능제어에 이르기까지 많은 방법들이 고안되어 적용되고 있다. 하지만

고전적 기법을 이용한 제어기 설계법이 간단함에도 불구하고 정밀하거나 적응성을 요구하는 곳에는 다소 부족하고, 지능제어기법의 경우에서처럼 비교적 넓은 범위에서 동작하지만 불확실성이나 비선형성이 강한 경우에는 다른 대책을 강구해야만 한다.

따라서 본 단원에서는, 이러한 종래의 문제점을 해결하고자 지능형 최적화 알고리즘인 HIA와 신경회로망 동정기법을 이용하고자 한다. 즉, 해의 탐색능력과 수렴특성이 우수한 HIA를 이용함으로써 파라미터 탐색능력을 향상시킬 수 있고, 더불어서 신경회로망 동정기를 이용함으로써 시스템 모델링의 복잡성과 어려움을 함께 해결하고자 하였다. 본 연구에서 제안되어진 제어기의 설계 과정은 다음과 같이 간략하게 나타낼 수 있다.

- (1) 고려되어진 시스템의 모델을 구하고, 오프라인으로 제어기 파라미터의 근사해를 구한다.
- (2) 시스템의 신경회로망 동정기를 설계한다.
- (3) HIA 와 신경회로망 동정기를 결합하여 실시간으로 PID 제어기 파라미터를 미세 조정할 수 있는 적응형 PID 제어기를 설계한다

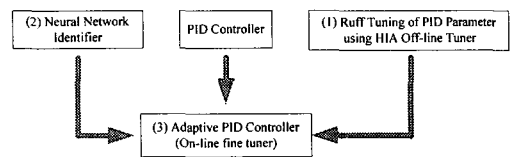


Fig. 3 Design procedure of adaptive PID controller

Fig. 3 은 이상의 설계과정을 도시화한 것이다. 이러한 설계과정을 AGV 에 적용하면 다음과 같다. 먼저, AGV 시스템에 대한 동적 모델이 구해지면 이를 바탕으로 PID 제어기의 초기 파라미터를 근사적으로 구한다. 이때 시스템을 직접 구동하기보다는 수학적 모델 등을 이용하는 것이 플랜트를 보호하는 차원에서 더 안전할 것이다. 그 다음으로, AGV 시스템의 신경회로망 모델을 구하고 앞서서 얻어진 근사값을 바탕으로 실제 AGV 시스템에 적용하여 실시간 동조할 수 있도록 한다. 이때, 실시간 동조구조의 경우, HIA 에서는 매 샘플링 시간마다 기존의 파라미터보다 성능이 나을 수 있도록 새롭게 탐색되어진 파라미터군이 생성된다

한편, 이를 검증해보는 과정이 필요한데, 이를 위하여 신경회로망 동정기를 가동함으로써 실시간 구조를 갖는 적응 PID 제어가 가능해진다. 아래의 단원들에서는 이러한 제어기 설계법에 대한 구체적인 방법들을 기술한다.

3.1 PID 제어기 파라미터의 근사해

AGV 시스템의 동적 모델이 구해지면 HIA를 이용하여 제어기의 파라미터를 오프라인으로 근사적으로 동조한다. 면역 시스템의 항원(antigen), 항체(antibody) 반응에 기초한 HIA는 외부에서 침입하는 여러 가지 항원을 인식할 수 있는 능력을 가진 항체의 다양성(diversity)과 항원, 항체의 반응 정도를 나타내는 척도로서 다양성을 구현하기 위한 기반이 되는 친화성(affinity)이 주요 특징이라 할 수 있다. 이러한 HIA 를 최적화 문제와 대응시켜 보면, 항원은 최적화 문제의 제약 조건인 목적함수, 항체는 최적화 문제의 해, 항원과 항체의 친화도는 탐색된 해에 대한 목적함수의 평가값으로 대응될 수 있다. 즉, 이러한 HIA 과정은 항원의 인식, 항체의 생성, 기억세포의 분화 및 친화도에 따른 항체의 축진과 억제 과정으로 설명될 수 있다.8,10 HIA 의 흐름은 Fig. 4 와 같이 나타낼 수 있다.

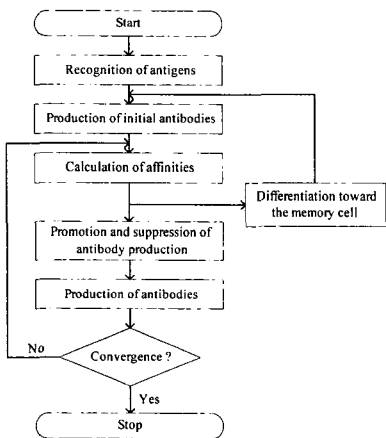


Fig. 4 Flowchart of humoral immune algorithm (HIA)

HIA에서 항원은 시스템에서 발생하는 오차함수나 평가함수로 대별될 수 있으므로 Fig. 4 의 항원의 인식(recognition of antigens)은 시스템의 출력에 대한 센서로부터 얻은 신호와 설정값과의 오차로 나타낼 수 있다. 항체는 제어기의 매개변수로

PID 제어기의 경우에 K_p , K_i , K_d 의 비례, 미분, 적분 이득을 의미하므로 항체의 생성과 기억세포로의 분화과정은 제어기 파라미터를 생성하고 이를 평가하여 시스템에 가장 적절한 값으로 동조하는 역할로 설명될 수 있다. 이때, 기억세포로의 분화시에는 항원과의 친화도가 높은 항체를 기억세포로 추가되는데 이는 오차를 보다 최소로 할 수 있는 제어기 파라미터가 저장됨을 의미한다. 하지만, 친화도가 높은 항체는 새로운 개체생성에서 다양성을 저하시키는 원인이 됨으로 새롭게 추가되는 항체와 기억세포에 이미 저장되어 있는 항체들간의 친화도를 계산하여 친화도가 가장 높은 항체는 제거하기도 한다. 본 논문에서는, 이상의 최적화 알고리즘을 이용하여 아래의 식 (17)와 같은 PID 제어기 설계에 필요한 비례-미분-적분 이득을 동조하였다.

$$u_{PID}(t) = K_p e(t) + K_i \int e(t) dt + K_d \frac{d}{dt} e(t) \quad (17)$$

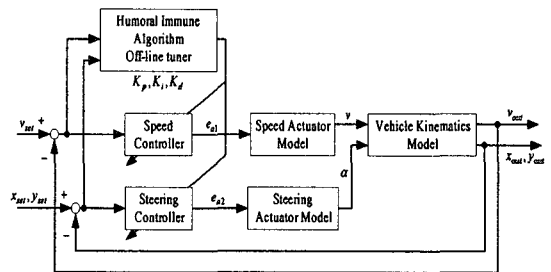


Fig. 5 An off-line tuning scheme using HIA

Fig. 5 는 주어진 시스템 모델과 HIA 를 이용하여 식 (17)에서 필요한 PID 이득을 동정하는 구조를 나타낸다. Fig. 5 에서, 제어기의 입력은 AGV 시스템의 주행에 필요한 속도 지령치 v_{set} 와 주행경로의 설정치인 xy 좌표의 x_{set} 와 y_{set} 이고, 플랜트의 출력 벡터가 $y = \{v_{out}, x_{out}, y_{out}\}$ 일 때 시스템의 출력오차는 $e = \{v_{set} - v_{out}, x_{set} - x_{out}, y_{set} - y_{out}\}$ 이며, 제어입력은 $u = \{e_{a1}, e_{a2}\}$ 이다.

따라서, 제어기 파라미터의 탐색과정은 HIA 를 이용하여 Fig. 6 에서 나타내어진 것처럼 PID 제어기의 파라미터를 하나의 개체로 구성하여 유전자적 연산과정과 의사 면역과정을 통하여 어느 정도 최적의 PID 파라미터를 결정할 수 있다. 이와 같은, 오프라인을 통한 제어기 파라미터의 근사적

탐색은 추후 실시간 적용시에도 처음부터 광범위한 탐색으로 인해 자칫 제어 범위를 벗어나는 문제점을 해결할 수 있고, 초기 탐색 시간을 줄여 효율성을 보다 증대시킬 수 있는 장점을 가지고 있다.

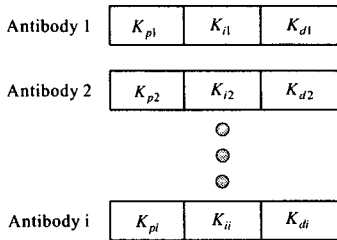


Fig. 6 The population structure of PID parameters

3.2 신경회로망을 이용한 HIA 적응 PID 제어기 설계

앞 단원에서 언급되어진 방법과 같이, HIA를 이용하여 일차적으로 제어기의 파라미터가 근사적으로 동조되었으나, 실제 시스템을 수학적으로 모델링 할 경우에는 시스템의 동정 오차가 발생하게 된다. 따라서, 이것을 이용하여 제어기를 설계하게 되면 그 파라미터에도 시스템의 모델링 오차가 포함되게 되므로 최적치(optimal value)라고 할 수 없을 것이다. 물론 보다 정확한 수학적 모델링을 구하여 많은 시간 동안 오프라인 자동 동조기를 구동하면 보다 나은 값을 얻을 수도 있지만, 여기에 소요되는 많은 시간은 산업현장에서 실용적이지 못할 뿐만 아니라 생산성을 저하시키는 요인이 될 수도 있다. 따라서, 비록 최적치를 얻었다 하더라도 실제 AGV 시스템의 구동시에 발생하는 여러 가지 불확실성으로 인한 요소가 작용할 때에도 최적의 설계가 되었다고는 할 수 없다. 그러므로, 본 논문에서는 오프라인 과정에서 근사적으로 얻어진 파라미터를 기본으로 하여 신경회로망 동정기를 이용하여 Fig. 7 과 같은 실시간 미세 동조 구조를 제안하였다.

신경회로망은 과거의 정보로부터 미래의 시스템 출력을 예측할 수 있는 특징을 가지고 있어 종래의 플랜트의 수학적 모델링으로서 표현하지 못했던 시스템의 다양한 동적 특성을 학습하고 표현할 수 있다. 신경회로망 동정기 모델은 Narendra 와 Parthasarathy 등에 의해 여러 가지 방식들이 제안되었다.^{11,12}

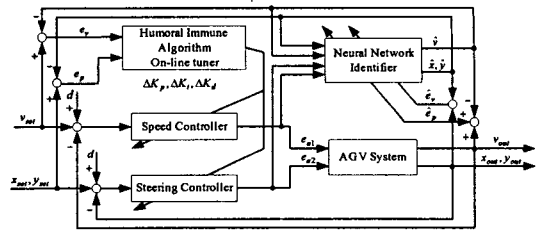


Fig. 7 Adaptive PID controller for AGV system

본 논문에서는, 아래에서 표현되어진 식 (18)과 같은 병렬 구조의 신경회로망 동정기를 이용하여 시스템으로부터 정보를 얻어 독립적으로 AGV 시스템을 예측할 수 있는 구조를 적용하였다. 이는 일단 신경회로망이 학습되면 독립적으로 AGV 시스템의 출력을 예측할 수 있으므로 실시간으로 파라미터 동정시 예측출력을 활용할 수 있다는 장점을 가지고 있다.

$$\hat{y}_p(k+1) = N^2[\hat{y}_p(k), \dots, \hat{y}_p(k-n+1)] + N^1[u(k), \dots, u(k-m+1)] \quad (18)$$

식 (18)은 정적 오차 역전파(static error back propagation) 알고리즘에 의하여 학습이 이루어지는 구조로서 N^2 와 N^1 은 AGV 시스템의 대상 시스템으로 고려될 수 있다. 제한한 제어기의 경우에도 신경회로망의 예측출력과 과거의 정보를 이용함으로써 HIA를 이용하여 제어기 파라미터를 실시간으로 동조할 수 있도록 하였다. 본 논문에서는 일정한 샘플링 주기가마다 PID 제어기 파라미터를 미세 조정할 수 있도록 구성하였고 적용한 PID 제어기의 경우 식 (17)에 Fig. 7 과 같은 온라인 HIA 동조기에 의한 보상신호 Δu 을 고려하면 식 (19)과 같이 보상된 제어 출력을 얻을 수 있다.

$$u_{IAA\ PID}(t) = u_{PID}(t) + \Delta u(t) \\ = (K_p + \Delta K_p)e(t) + (K_i + \Delta K_i) \int e(t) dt \\ + (K_d + \Delta K_d) \frac{d}{dt} e(t) \quad (19)$$

4. 모의실험

본 단원에서는, AGV 시스템의 실제 제작에 앞

서서 먼저 컴퓨터 모의실험을 통한 제어기의 성능을 검증하고자 한다.

4.1 모의실험 조건

본 논문에서 고려되어진 AGV 시스템은 실제로 항만에서 사용되는 UCT(unmanned container transporter)의 1/20 모델로서 부하운전이 대부분이고 항시 외란적 요소를 가지고 있음으로 모의실험을 수행함에 있어서, 축소 모델임을 감안하여 부하는 속도 및 조향 장치에 각각 $[N \cdot m]$, $0.7[N \cdot m]$ 로 고려하였고, 외란은 측정 잡음으로서 실제 제작될 AGV 시스템의 A/D 변환장치의 분해능(10bit)를 고려하여 1~2% 정도로 설정하였다. 주행 모의실험을 위한 경로(path)는 진폭이 $3[m]$ 인 정현파 궤적(sinusoidal trajectory)를 $1.5[m]$ 길이의 AGV 시스템이 $3[m/sec]$ 의 속도로 주행하는 것으로 설정하였다. 더불어서, 본 모의실험에 이용되어진 속도 및 조향 시스템의 기본적인 설계 파라미터들은 Table 1 과 같다.

Table 1 Parameters of the steering and speed control system

	Speed motor	Steering motor
R_a [Ω]	1.3	3.2
L_a [H]	0.0017	0.0015
K_c [N·m/A]	0.0086875	0.17
K_b [V/rad/sec]	0.04098	0.17
B_m [N·m/rad/sec]	0.0002627	0.001
J_m [N·m/rad/sec ²]	0.00016	0.00276
Rated voltage[V]	25	25
Rated power[w]	60	50

본 모의실험에서 사용된 설계 조건은 동조대상 파라미터의 크기와 수행속도 등을 감안하여 결정하였으며, 오프라인 동조시 사용된 HIA 의 진화는 100 세대로 하였고, 각 세대 당 개체 수는 40 개, 기억세포에 저장되는 개체의 수는 10 개로 하였다. 아울러 새로운 개체의 생성 방법으로는 무작위 추출법 50%, 기존개체의 복제 50%를 수행한 후 유전자적 교배를 통하여 생성시켰으며, 0.25%의 돌연변이 확률을 적용하였다. 앞서 나타내어진 Fig. 7 에서 알 수 있듯이, AGV 시스템의 경우 조향 및 속도 두 가지 모드의 제어기가 필요하므로

식 (20), (21)와 같이 각각의 제어기에 필요한 평가 함수를 설정하였다.

$$fitt_v = \frac{1}{a_{11}e_v^2(t) + a_{12}\dot{e}_v^2(t)} \quad (20)$$

$$fitt_s = \frac{1}{a_{21}e_p^2(t) + a_{22}\dot{e}_p^2(t)} \quad (21)$$

식 (20)은 속도 제어를 위한 평가함수로서, 속도 추정오차 e_v 는 설정 속도와 신경회로망 출력 속도의 오차 $v_{set} - \hat{v}$ 을 나타내고, 식 (21)은 조향 제어를 위한 평가함수로서, 위치 추정 오차인 e_p 는 설정위치 (x_{set}, y_{set}) 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, 5 로 하였다. HIA를 이용한 온라인 동조시도 오프라인과 성능비교를 위하여 동일한 설계조건을 적용하였다.

4.2 AGV 의 신경회로망 동정기 모델링

AGV 시스템의 신경회로망 동정은 속도 및 조향부를 각각 모델링하였다. 신경회로망 학습에 사용된 구조는 다층 신경회로망을 이용하였으며, 학습시 뉴런의 반응 정도를 결정하는 함수인 활성화 함수(activation function) f 는 다음의 식 (22)와 같은 항등함수를 사용하였다.

$$f(net) = slope \times net \quad (22)$$

또한 신경회로망 동정기에 사용된 각 노드(node) 및 파라미터는 Table 2 와 같다.

Table 2 Parameters of the neural network identifier

		Steering Parts	Speed Parts
Pattern Number		700	700
Node Number	Input	5	5
	Hidden	7	7
	Output	1	1
Learning Rate		0.81	0.53
Momentum Factor		0.7	0.2
Input Parameter		$u(t-k), (k=0,1,2)$ $\hat{y}(t-m), (m=1,2)$	
Slope	Hidden	0.0015	0.0012
	Output	0.0015	0.0012

먼저, 학습신호는 AGV 시스템의 입출력 데이터로

서 700 개를 이용하였다. 입력층은 5 층, 은닉층은 7 층으로 하였고 출력층은 $\dot{y}(t)$ 로서 1 층으로 구성하였다. Fig. 8 은 AGV 시스템의 조향 및 속도부에 대하여 신경회로망으로 학습한 후의 동정 상태를 나타낸 모의실험 결과이다. 조향부의 전체적인 백분율 오차의 평균이 약 5%이내로서 주어진 수학적 모델을 비교적 잘 동정하고 있음을 알 수 있다. 또한, 속도부에 대한 동정결과를 보면, 백분율 오차의 평균이 3%이내였으나 설정치 변화 부분에서는 다소 오차가 많이 발생함을 알 수 있는데, 이러한 결과는 설정치 변화 부분에 대한 데이터 수가 상대적으로 적어서 학습이 어려운 것으로 분석되어진다.

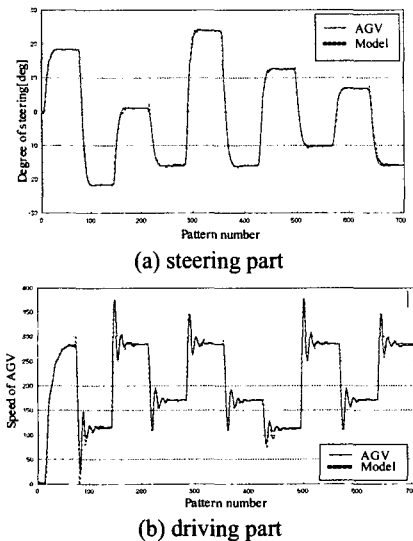


Fig. 8 The results of neural network identifier

4.3 모의실험의 성능 평가

본 연구에서 제안되어진 HIA를 이용한 적응 PID 제어기의 성능 및 우수성을 입증하기 위하여, 우리는 부하와 외란에 대한 컴퓨터 모의실험을 수행하였다. 또한, 제안된 제어기의 성능 평가를 위하여 종래의 PID 및 NNPID 제어기와 성능을 비교 분석하여 제안되어진 제어기의 유효성을 보이고 있으며, 이러한 결과는 Fig. 9 의 경로주행(path driving) 결과와 주행속도의 추종상태를 나타내는 Fig. 10 의 결과로서 알 수 있다.

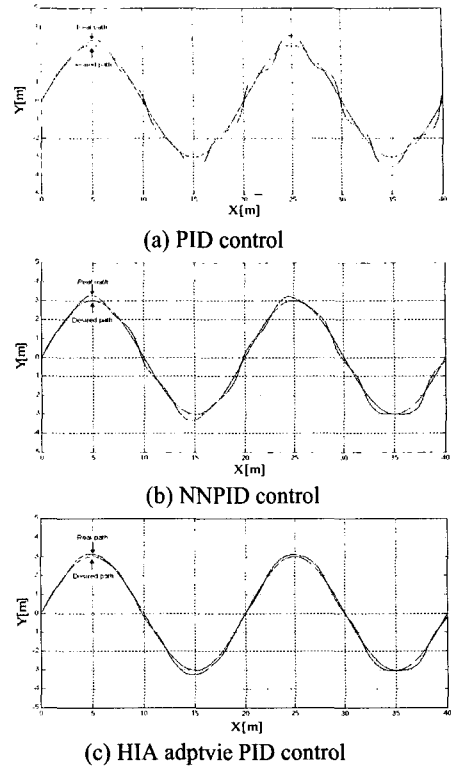


Fig. 9 The results of driving path (with loads and external disturbances)

위의 결과에서, 우리는 부하가 변동되고 외란이 추가된 가정하에서 본 논문에서 제안되어진 제어기가 우수함을 보여 주고 있다. 특히, 최대 변위 오차는 51%, 평균 변위오차의 경우에는 55%이상 개선된 것을 알 수 있다. 이와 같은 우수한 성능은 다음과 같은 결과들로 간단히 요약되어질 수 있다.

- (1) 기억 세포를 이용한 최적해로의 수렴성을 보장
- (2) 친화도에 의한 우수 개체의 생산을 촉진함으로써 자손의 우수성을 보장할 수 있음
- (3) 친화도 및 다양성을 적용함으로써 보다 폭 넓은 해의 탐색이 가능

또한, 제안되어진 제어기는 지능제어의 하나인 NNPID 에 비해서도 약 25% 이상 성능이 개선된 것을 알 수 있다. 제한 신경회로망 역전파 학습알고리즘의 수렴이 항시 보장되기 위해서는 각 뉴런이 모두 평형점에 수렴해야 한다.

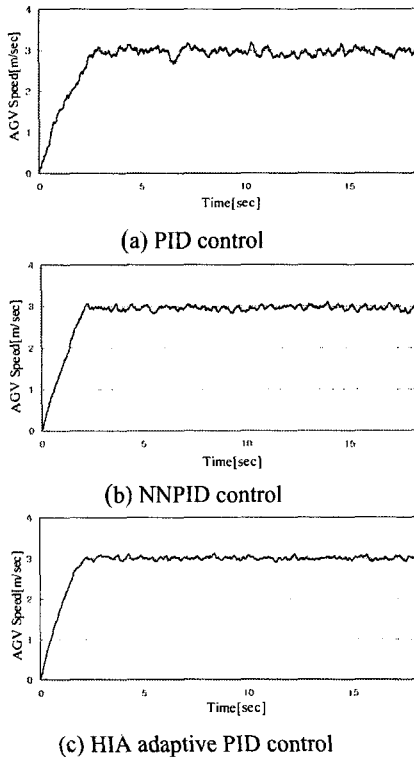


Fig. 10 Results of driving speed (with loads and external disturbances)

그러나, 일반적으로 그러한 상태에 도달하기는 쉽지 않다. 따라서, 이러한 제약조건이 만족되지 못할 경우 주어진 공간영역 내에서 한정된 탐색을 하게 되고, 부하 변동이나 외란이 인가되어 시스템 환경이 다소 변화될 경우 일부 구조적 조정을 해야 하는 단점이 원인이라고 생각되어진다. 이와 같이, 외란 인가에 대한 제어기 주행 수행결과를 요약하면 Table 3 과 같이 나타내어진다.

Table 3 The simulation results for driving AGV system with the external disturbances

	PID	NNPID	HIA PID	
Max displacement error[m]	0.573	0.371	0.281	
Ave. displacement error[m]	0.256	0.115	0.115	
Speed tracking error[m/sec]	0.169	0.160	0.102	
Ave. Control input	Velocity[V]	24.43	24.43	23.83
	Steering[V]	15.05	16.11	18.26

5. 실험

5.1 AGV 시스템 구성

본 논문에서 고려되어진 AGV 시스템은 항만에서 컨테이너 수송차량인 UCT의 시뮬레이터로 제작된 20:1의 축소 모델로 제작되었다. 제작되어진 AGV 시스템의 구동과 조향은 DC 모터로 제어되어지고 AGV 시스템에 탑재된 586 PentiumIII 컴퓨터와 80196 마이크로 컴퓨터로서 수행되어진다. 제작되어진 AGV 시스템의 각 구성은 Fig. 11 과 같다.

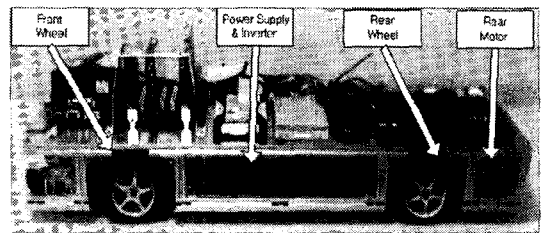


Fig. 11 The configuration of AGV System

제작된 AGV 시스템에서, 주행에 필요한 정보는 CCD 카메라를 이용하여 얻을 수 있으며 충돌 안전장치로서 초음파 센서를 전후방에 각각 부착하였다. 더구나, 조향과 주행에 사용된 모터는 각각의 드라이버로 구동되도록 설계하였고 조향과 주행속도 부분은 각각 포텐쇼미터와 엔코더로 측정되도록 하였다. 이와 같이 구성되어진 AGV 시스템의 사양은 Table 4 와 같이 나타낼 수 있다.

Table 4 The specification of AGV system

Contents		Specification	
AGV system	Overall length[m]	1	
	Overall width[m]	3	
	Overall weight[kg]	3	
	Wheel radius[m]	0.05	
	Weight[kg]	deadweight	30
payload			
Driving parts	Steering	Model: JC-35L-H/Gear Rated voltage: 20[V]	
	speed	Model: DCM-213-2A Rated voltage: 20[V]	
Battery		7[AH], 12[V]*3EA	

구성되어진 AGV 시스템은, 가이드라인과 AGV와의 상대적 위치와 각도에 대한 오차를 얻기 위

하여 CCD 카메라를 센서로 활용하였고 실험에 사용된 경로는 흑색 배경에 백색의 가이드 라인으로 구성하였다. 또한 가이드 라인을 검출하기 위하여 입력되는 컬러 영상에서 배경으로 볼 수 있는 잡음 성분을 제거하고, 설정된 경계치를 이용하여 이진화하면 배경과 라인 부분이 선명하게 구분된다. 추출된 가이드 라인의 중심선은 설정된 좌표상에서 현재의 AGV 위치와 상대적인 가이드 라인과의 기울어진 각도를 측정하도록 하였다. 획득되는 영상 정보는 처리과정을 거쳐 AGV의 상태를 읽기까지 평균 초당 20 프레임의 처리 속도로 수행하도록 한다.

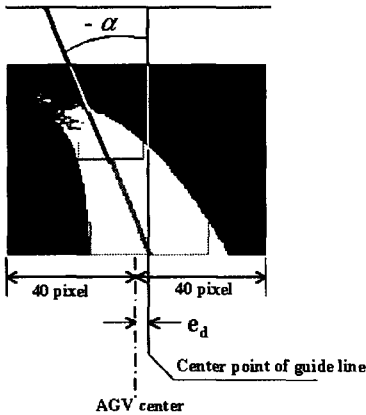


Fig. 12 The relative errors of distance and angle between AGV and guide line

Fig. 12 에서 나타낸 것처럼, 영상정보에서 참조 조향각 δ 을 결정하기 위한 상대적 거리오차 e_d 와 각도오차 α 을 구할 수 있다. 이때, 조향각 δ 는 식 (23)로서 계산되어질 수 있다.

$$\delta = K \left\{ \left(\frac{e_d}{R_{speed}} \right) + (R_{speed} \cdot \alpha) \right\} \quad (23)$$

여기에서 R_{speed} 을 조절하여 AGV 시스템의 속도가 증가하면 거리오차보다 각도오차가 차지하는 비율이 증가하고, 속도가 감소하면 상대적으로 거리오차에 비중을 두어 계산하도록 하였다. 더불어서, 계인 K 에 피드포워드(feed forward)와 피드백(feedback) 되는 부분의 전체 값을 스케일링하여 δ 를 구하도록 구성하였다.

5.2 AGV 의 신경회로망 동정기 구현

AGV 시스템에 대한 신경회로망 모델링은 조향과 속도 시스템에 대하여 각각 모델링을 구현하였다. 시스템 동정을 위하여 신경회로망에 입출력되는 신호를 살펴보면, 먼저, 조향 시스템에 대한 입력은 12V에 대하여 256 듀티비(duty ratio)를 갖는 PWM 값으로 하였고, 출력은 포텐쇼미터로부터 얻은 신호에 대하여 8 비트 분해능을 갖는 A/D 변환기를 적용하였다. 또한, 속도시스템의 경우에는 모터에 입력되는 PWM 값을 신경회로망 입력신호로 하였고, 신경회로망 동조를 위한 출력신호는 AGV의 속도 0.5[m/sec]에 대한 카운터 출력을 사용하였다. 학습에 사용된 패턴 수는 700 개로 하였다. 신경회로망 동정기에 사용된 층수는 각각 3 개로 하였으며, 학습율과 모멘트 계수 및 기울기 등의 설계 파라미터는 Table 5 와 같다.

Table 5 The parameters of neural network modeling

		Steering Parts	Speed Parts
Pattern Number		700	700
Node Number	Input	5	5
	Hidden	7	7
	Output	1	1
Learning Rate		0.9	0.5
Momentum Factor		0.3	-0.08
Input Parameter		$u(t-k), (k=0,1,2)$ $\dot{y}(t-m), (m=1,2)$	
Slope	Hidden	0.0025	0.005
	Output	0.0025	0.005

Fig. 13 은 조향 및 속도부에 대한 모델링 학습 파형을 나타낸 실험 결과이다. 동정결과 조향부의 백분율 오차의 평균이 약 15%이지만, 실제 값의 최대값에서는 모델링 오차가 크게 나타났으며, 그 외의 경우는 오차가 거의 없음을 알 수 있다. 또한, 속도부는 백분율 오차의 평균이 6.9%이며 음의 최대 값에서 오차가 다소 많이 발생한 것으로 분석된다.

5.3 실험 결과

제작되어진 AGV 시스템의 실제 주행경로는, 진폭은 1[m]인 정현파 경로로서 검정색 바탕에 폭이 약 1[cm]인 흰색 라인을 추종하도록 하였다. 또한 제작되어진 제어기의 구현은 AGV 에 탑재된 컴퓨터에 제어루틴을 내장하고 주행정보는

CCD 카메라로부터 입력 받도록 하였다.

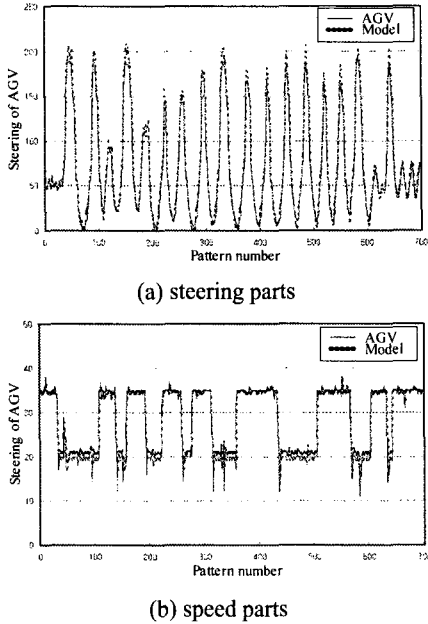


Fig. 13 Results of neural network modeling

속도와 조향 정보는 엔코더와 포텐쇼미터로부터 각각 발생된 신호를 마이크로프로세서에 입력하여 RS232 통신을 통하여 컴퓨터로 전달하도록 하였다.

제안되어진 제어기의 성능 평가를 위하여, 우리는 Fig. 14 와 Fig. 15 에서 보여지는 것처럼 고전 PID 및 NN을 이용한 PID 제어기와 비교하여 제안되어진 제어기의 성능을 비교 평가하였다. 제안한 HIA 적용 PID 제어기의 미세조정은 매 50[msec]마다 새로운 PID 파라미터 값을 자기 동조하도록 구성하였다. 또한, NNPID 제어기는 3 층으로 구성된 다층 신경회로망 구조를 적용하였으며, 조향부에 사용된 입력층, 은닉층, 그리고 출력층에 대한 각 층의 노드 수는 각각 3, 9, 3 으로 하였다. 이때, 신경회로망의 학습에 대한 학습율과 모멘텀 계수는 각각 0.9, 0.4 로 설정하였다. 속도부의 경우에도 입력층, 은닉층, 그리고 출력층에 대한 노드 수는 각각 3, 9, 3 으로 조향부와 동일하게 설정하였으며, 신경 회로망의 학습에 필요한 학습율과 모멘텀 계수는 각각 0.6, 0.4 로 설정하였다. 더불어서, 각 층에 대한 연결강도의 초기값은 모두 0.5로 하였으며,

은닉층과 출력층에 대한 활성화 함수는 모두 항등 함수를 적용하였다. Fig. 14 와 Fig. 15에서는 약 25[kg]의 부하가 탑재된 상태에서 주행 속도를 0.5[m/sec]로 하였을 때의 PID, NNPID, HIA 을 이용한 PID 제어에 대한 주행 변위 오차 및 주행 속도를 나타낸다.

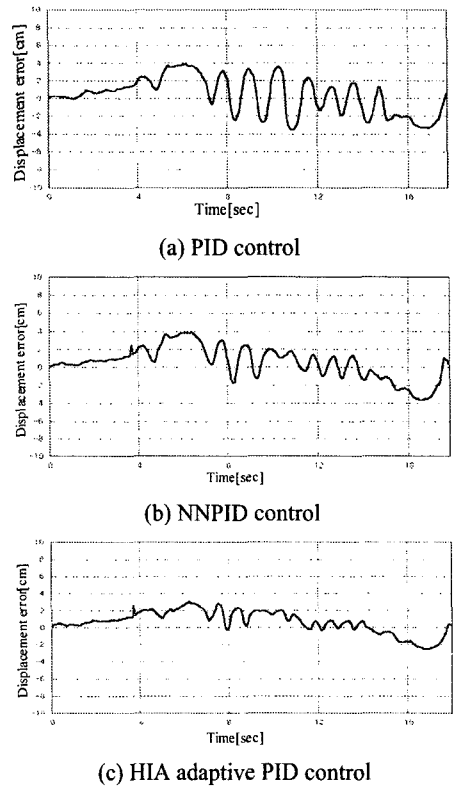


Fig. 14 The displacement error of AGV system

이러한 실험결과에서, 우리는 일정한 부하가 인가되는 상태에서 최대 변위 오차들을 비교해보면, 제안되어진 HIA 적용 PID 제어가 PID 및 NNPID 제어에 비하여 각각 23%, 22% 정도가 개선된 것으로 나타났다. 또한, 주행시 평균적으로 발생하는 변위 오차도, HIA 적용 PID 가 PID 및 NNPID 에 비하여 각각 29%, 21% 정도가 개선되어 적응형 구조를 갖는 HIA PID 제어가 보다 우수한 성능을 보임을 알 수 있었다.

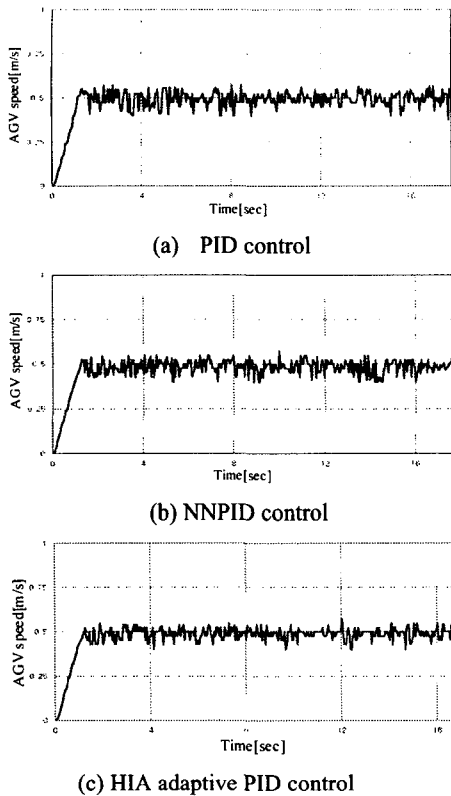


Fig. 15 Results of driving speed for AGV system

주행 속도의 경우에도, PID 제어가 약 5.5%의 오버슈트가 발생한 반면 제안되어진 HIA PID 제어는 약 2.5%로써, 약 60% 정도가 개선됨을 알 수 있었다. 이와 같이, 부하를 가한 경우에 대한 제어기 주행 실험 결과를 정리하면 Table 6 과 같이 요약되어질 수 있다

6. 결론

본 연구에서, 우리는 생체 면역반응체계에 근거한 HIA를 이용한 적응형 PID 제어기를 설계하였고, 실제 AGV 시스템을 통한 주행실험을 통하여 제안되어진 제어기의 유효성을 검증하였다. 제안된 제어기의 특징으로는, PID 제어기 파라미터를 오프라인으로 동조하여 실시간 동조시 불특정한 제어입력에 따른 문제를 사전에 방지하도록 하였고, 특히 실시간 동조시에는 신경회로망 동정기를 이용함으로써 시스템 모델링에 대한 편의성도

함께 제시하였다. 제안되어진 제어기의 성능 평가는 모의실험과 실제실험 결과로서 외란 및 부하 운전에 대한 강인성을 확인할 수 있었다.

이와 같이, 본 연구에서 제안되어진 적응형 PID 제어구조가 우수한 특성을 나타낼 수 있었던 것은 다음과 같은 요소에 의한 것으로 분석되어질 수 있다.

- (1) 지능형 알고리즘인 HIA를 이용함으로써 종래의 최적화 기법들에서 문제점으로 지적되었던 2진 표현에 의한 파라미터 표현에 대한 어려움과 세대간의 진화성으로 인한 탐색 범위가 상대적으로 좁아 국부 해에 도달하는 문제점을 극복함으로써 해결될 수 있다.
- (2) HIA가 가진 면역성 기능 중 기억 세포를 적용함으로써 시스템 변화에 따라서 새로운 탐색을 할 필요 없이 기억된 세포군(파라미터)을 이용함으로써 기존의 알고리즘보다 탐색을 보다 빠르게 수행할 수 있다.

후기

본 연구는 한국과학기술부(MOST)의 국가지정 연구실사업(NRL)의 지원에 의한 것입니다.

참고문헌

1. Korea Maritime Institute, The Propriety Investigation of Automated Container Terminals -final report-, 1998.
2. Durrant-Whyte, H., "An Autonomous Guided Vehicle for Cargo Handling Applications," The International Journal of Robotics Research, Vol. 15, No. 5, pp. 407-440, 1996.
3. Kodagoda, K., Wijesoma, W., Teoh, E., "Fuzzy Speed and Steering Control of an AGV," IEEE Trans. on Control System Technology, Vol. 10, No. 1, pp. 112-120, 2002.
4. Park, Y. W., Kim, D. H., Kimbrough, S., "An Inverse LQG/LTR Problem Applied to the Vehicle Steering System," Proc. of the 11th KACC, pp. 324-327, 1996
5. Lim, E. and Hedrick, J., "Lateral and Longitudinal Vehicle Control Coupling for Automated Vehicle Operation," Proc. of the American Control

- Conference, pp. 3676-3680, 1999.
6. Hwang, H. S., "Automatic Design of Fuzzy Rule Base for Modeling and Control using Evolutionary Programming," Proc. of Control Theory Applications, Vol. 146, No. 1, pp. 9-16, 1999.
 7. Moore, M., Musacchio, J., Passino, K., "Genetic Adaptive Control for an Inverted Wedge," Proc. of American Control Conference, pp. 400-404, 1999.
 8. Chun, J. S., Kim, M. K., Jung, H. K., "Shape Optimization of Electromagnetic Devices using Immune algorithm," IEEE Trans. on Magnetics, Vol. 33, No. 2, pp. 1876-1879, 1997.
 9. Lee, Y. J., Lee, K. S., Lee, J. M., Lee, M. H., "Adaptive Control of Nonlinear System using Immune Response Algorithm," Proc. of Asian Control Conference, pp. 1789-1793, 2000.
 10. Endoh, S., Toma, N., Yamada, K., "Immune Algorithm for n-TSP," Proc. of ICSMC, Vol. 4, pp. 3844-3849, 1998.
 11. Page, G., Gomm, J., Williams, D., Application of Neural Networks to Modeling and Control, Chapman & Hall, 1993.
 12. Lin, C. T. and Lee, G., Neural Fuzzy Systems, Prentice Hall, 1996.
 13. Lee, Y. J., Lee, K. S., Lee, J. M., "An AGV Driving Control using Immune Algorithm Adaptive Controller," Trans. on KIEE, Vol. 49D, No. 4, pp. 201-212, 2000.
 14. Lee, Y. J., Kim, S. K., Suh, J. H., Lee, K. S., "Driving Control of Autonomous Vehicle with Vision System using Cell Mediated Immune Algorithm Controller," Proc. of International Symposium on Artificial Life and Robotics, pp. 429-432, 2004.