

論 文

## 면역 알고리즘을 이용한 AGV의 2자유도 PID조향 제어기 설계에 관한 연구

이창훈\* · 이진우\*\* · 이영진\*\*\* · 이권순\*\*\*\*

A Design of Two Degree of Freedom PID Controller for AGV  
using Immune Algorithm

*Chang-Hoon Lee · Jin-Woo Lee · Yung-Jin Lee · Kwon-Soon Lee*

**Key Words** : Immune System, AGV(Automated Guided Vehicle), PID Controller, Steering Control

### Abstract

Immune system is an evolutionary biological system to protect innumerable foreign materials such as virus, germ cell, and et cetera. Immune algorithm is the modeling of this system's response that has adaptation and reliableness when disturbance occur. In this paper, immune algorithm controller was proposed to control four wheels steering(4ws) Automated Guided vehicle(AGV) in container yard. And then the simulation result was analysed and compared with the results of NN-PID controller.

### 1. 서 론

최근 항만 자동화 및 자동화 장비에 대한 필요성이 높아지고 있으며, 그 중 AGV의 자동화와 이의 조향 제어기에 관한 연구가 많이 이루어지고 있다. 해외의 선진 항만에서 운영되는 AGV(Automated Guided Vehicle)의 경우 2WS(Two wheels steering) 혹은, 4WS(Four wheels steering)의 조향 시

스템을 가지며, 일반적으로 유압식에 의해 조향된다. 그러나 4WS 조향 시스템은 2WS 조향 시스템에 비해 회전반경을 작게 할 수 있으며 동시에 선회 안정성을 크게 향상시킬 수 있는 잇점등이 있으므로 본 논문에서는 AGV의 조향시스템을 4WS의 조향 시스템을 가정하였다. 또한, 제어기의 자동 동조를 위하여 면역시스템을 이용하였다.

면역시스템은 생체내에 투입되는 항원(Antigen)

\* 동아대학교대학원 전기공학과 석사과정  
\*\* 동아대학교대학원 전기공학과 박사과정  
\*\*\* 항공기능대학교 전기계측제어과 전임교수  
\*\*\*\* 동아대학교 전기전자컴퓨터공학부 교수

혹은 박테리아(Bacteria) 및 병원균세포(Germ cell)와 같은 외부 침투 물질을 인식하여 이를 방어함과 동시에 생체내부의 안정된 상태를 스스로 조절해 나가는 진화적 생체방어 시스템으로 알려져 있으며, 유전자 교배 및 번식등을 통한 진화적 학습, 기억 및 인식등의 능력을 함께 갖추고 있어 이를 활용한 공학적 응용사례가 점차 많아지고 있다.

따라서 본 논문에서 AGV가 갖는 여러 가지 파라미터변동을 고려한 최적의 제어를 설계하고자 하며, 조향 제어기 설계를 위하여 2자유도 PID (Two Degree of Freedom PID : TDOF PID)제어기와 제어기 파라미터를 면역알고리즘을 이용하여 실시간으로 동조하는 적응 제어기를 설계하고자 한다.

### 2. AGV의 동적 모델링

기구학적 차량의 운동은 요우(Yaw) 각속도, 측면 미끄러짐각, 차체의 상하운동인 롤(roll), 피칭(pitching), 차체의 질량등을 고려하여 고차원적 자유도를 갖는 모델로 표현될 수 있다. 그러나 차량운동에 가장 큰 영향을 미치는 요레잇과 항만 AGV의 특성상 차량의 무게에 의한 미끄러짐을 고려하면, 2자유도 모델이 일반적이라 할 수 있다.[5] 조향방식은 4WS 방식과 2WS방식이 있으나, 4WS시스템으로 가정하여 AGV차량을 모델링 하였다. 4WS방식은 차량의 회전반경을 줄여주는 역상(Reverse Phase) 조향과 같은방향으로 조향하여 측면 미끄러짐각을 줄일 수 있는 동상(Same Phase)조향이 있다.

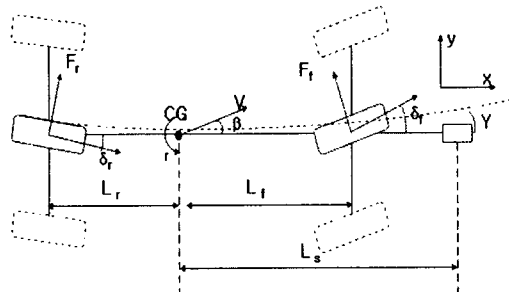


그림 1. 4WS AGV의 동적모델

$$\ddot{\beta} = -\frac{(C_r + C_f)\beta}{M V} - \gamma + \frac{(C_r L_r + C_f L_f)\gamma}{M V^2} + \frac{C_f}{M V} \delta_f + \frac{1}{M V} F_w \dots (1)$$

$$\ddot{\gamma} = \frac{(C_r L_r - C_f L_f)\beta}{J} - \frac{(C_r L_r^2 + C_f L_f^2)\gamma}{J V} + \frac{C_f L_f}{J} \delta_f + \frac{L_w}{J} F_w \dots (2)$$

$$\begin{aligned} \delta_f &= u_f \\ \delta_r &= u_r \end{aligned} \dots (3)$$

그림 1은 4WS 조향모델을 나타내었고, 차량의 무게중심(Center of Gravity : CG)이 도로의 지면에 가깝고 CG에 작용하는 힘이 롤링과 피칭을 일으키지 않는다고 가정하면, 두 개의 전방휠(Front Wheel)을 하나로 묶고, 두 개의 후방휠(Rear Wheel)을 하나로 묶은 형태의 단일 트랙의 간단한 모델로 나타낼 수 있다. [4],[5],[6]

AGV의 조향센서는 차량의 앞쪽에 부착된 것으로 가정하고 차량의 중심과의 거리는 \$L\_s\$, 전방휠과 후방휠로부터 CG까지의 거리는 각각 \$L\_f\$, \$L\_r\$이다. 동적 모델링은 \$y\$축에 대한 힘의 평형관계와 \$z\$축 방향에 대한 모멘트 관계로부터 측면 미끄러짐각(\$\beta\$)과 요우 각속도(\$\dot{\gamma}\$)의 선형화된 동적 운동 방정식을 식 (1), (2)와 같이 얻을 수 있다. 여기서 \$C\_i\$는 각 타이어의 마찰계수이다. 차량의 조향을 조정하는 액추에이터는 구속조건을 갖는 전방휠의 각도의 미분치로 결정한다.

그리고 차량의 앞부분의 센서로 측정한 가이드라인과의 거리\$Y\$는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\dot{y} = V \sin(\beta + \Delta\psi) + L_s \dot{\gamma} = V(\beta + \Delta\psi) + L_s \dot{\gamma} \dots (2)$$

도로의 회전반경의 역수를 \$\rho\_{ref}\$라하고 좌회전일 경우는 양의 값으로, 우회전일 경우는 음의 값으로 각각 정의의 한다. 또한, \$\Delta\psi\$는 차축의 중심선과 회전반경 \$1/\rho\_{ref}\$와의 각으로서 \$\Delta\psi\$의 변화율은 다음과 같다.

$$\Delta \psi = \psi - \psi_{ref} = \gamma - V\rho_{ref} \dots\dots\dots (5)$$

위의 식들로부터 차량의 도로를 직선으로 가정하면, 조향제어를 위한 동적모델은 식 (6)의 상태방정식으로 나타낼 수 있다.

$$\begin{bmatrix} \dot{\beta} \\ \dot{\gamma} \\ \dot{\Delta \psi} \\ \dot{y} \\ \dot{\delta}_f \\ \dot{\delta}_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & 0 & 0 & b_{11} \\ a_{21} & a_{22} & 0 & 0 & b_{21} \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ V & L_s & V & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \beta \\ \gamma \\ \Delta \psi \\ y \\ \delta_f \\ \delta_r \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & d_{11} \\ 0 & 0 & 0 & d_{21} \\ 0 & 0 & -V & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_f \\ u_r \\ \rho_{ref} \\ F_w \end{bmatrix} \dots\dots\dots (6)$$

$$a_{11} = \frac{-2(C_r + C_f)}{MV}, \quad a_{12} = -V + \frac{(C_r L_r - C_f L_f)}{MV^2},$$

$$a_{21} = -\frac{2(C_r L_r - C_f L_f)}{J V}, \quad a_{22} = -\frac{2(C_r L_r^2 + C_f L_f^2)}{J V}$$

$$b_{11} = \frac{2C_f}{M}, \quad b_{12} = \frac{2C_r}{M},$$

$$b_{21} = \frac{2C_f L_f}{J}, \quad b_{22} = -\frac{2C_r L_r}{J},$$

$$d_{11} = \frac{1}{M V}, \quad d_{21} = \frac{L_w}{J}$$

식 (6)의 파라미터는 표 1과 같다.

본 논문에서는 후륜 조향각은 측면 미끄러짐각을 줄이기 위하여 전륜 조향각에 비하여 약간의 위상 지연을 두는 위상지연식 4WS 로직을 사용하였으며, 식 (7)과 같이 나타난다.

$$\delta_r = K(V)\delta_f(t - \tau_D) \dots\dots\dots (7)$$

여기서, K(V)는 전,후륜 조향각의 비로서 그 값이 양이면 동상조향이 되고, 음이면 역상조향이 된다. 차속 V에 따라 결정되는 4WS 로직 K(V)는 식 (8)과 같이 정의 된다.

$$K(V) = -\frac{-L_r + \frac{ML_f}{C_r L} V^2}{L_f + \frac{ML_r}{C_f L} V^2} \dots\dots\dots (8)$$

표 1. 차량 시스템의 파라미터

파라미터	내 용
$\delta_r$	전방 휠의 조향각 [rad]
$L_f(L_r)$	전방(후방) axle 과 CG 까지 거리 [m]
$\bar{V}$	CG에서의 속도벡터 [m/s]
$\beta$	차량 중심선과 속도벡터간의 미끄러짐각 [rad]
$F_f(F_r)$	전방(후방) 타이어에 의한 측면 힘 [N/m]
$y$	측면 변위 [m]
$F_w$	측면 외란(바람) [kN]
$L_w$	CG와 $F_w$ 간의 거리 [m]
$L_s$	조향 센서로부터 CG까지 거리 [m]
$\Delta \psi$	안내선의 접선으로부터 차량의 중심선까지거리 [m]
$r$	요우 각속도 $\dot{\Delta \psi} = r$ [rad/s]
$C_f(C_r)$	전방(후방)축의 코너링 강성 [N/rad]
$\rho_{ref}$	참조 조향각 [rad]
$M$	차량의 무게 [kg]
$\bar{M}$	차량의 실제 무게 [kg]
$J$	관성 모멘트 [kg·m <sup>2</sup> ]

여기서, K(V)는 전,후륜 조향각의 비로서 그 값이 양이면 동상조향이 되고, 음이면 역상조향이 된다. 차속 V에 따라 결정되는 4WS 로직 K(V)는 식 (8)과 같이 정의 된다.

### 3. 면역 시스템

생체의 면역 시스템은 크게 1차 방어와 2차 방어로 구분할 수 있다. 1차 방어는 피부의 표피(Integuments)로서 외부의 침입 물질을 차단할 수 있다. 그러나, 이러한 1차 방어가 무너지게 되면 생체는 새로운 제 2의 방어선을 구축하여 보호기능을 수행하게 되는데, 2차 방어는 다시 비특이적 방어(Non-specific Defense)와 특이적 방어(Specific Defense)로 나눌 수 있다. 비특이적 방어는 직접적이고 즉각적이며, 화학물질과 특정한 백혈구(Leukocyte)들이 사용되는데 이러한 방어물질들은 항상 대기 상태에 있어 즉시 대응할 수 있는 특징을 가지고 있다. 한

편, 특이적 방어를 좀 더 복잡하고 방어물질들이 준비되는데 일정한 시간이 필요하며, 이러한 방어체계를 일반적으로 면역 반응(Immune Response)이라 한다. 이러한 면역시스템을 담당하는 기본요소는 B-cell(B림프구)과 T-cell(T림프구)이라고 하는 두 가지 형태의 림프구가 있다. B-cell은 항체를 분비하여 항체반응을 하는 것으로서 helper T-cell의 도움을 받아 클론선택 과정을 통하여 외부 침입물질에 대응하여 B-cell을 생성하며, 미래에 동일한 항원이 침투시 즉각 반응할 수 있는 기억세포의 역할을 하기도 한다. [1,2]

이러한, 면역시스템의 항원 항체반응에 기초한 면역 알고리즘은 외부에서 침입하는 여러 가지 항원을 인식할 수 있는 능력을 가지는 항체의 다양성과 항원 항체의 반응의 정도를 나타내는 척도로서 다양성을 구현하기 위한 기반이 되는 친화성이 주요 특징이다. 또한 면역알고리즘은 비결정론적 탐색을 수행하는 알고리즘으로서 기존의 다른 알고리즘과는 달리 동시에 여러개의 가능해로서 최적화를 병렬로 진행하므로써 해의 수렴성이 개선될 수 있다. 수렴성을 보장하기 위한 또다른 특징으로 기억세포(memory cell)를 이용하며, 항원에 대한 기대치의 계산에 의하여 면역시스템의 자기조절기능을 수행하므로써 내부 시스템을 항상 안정된 상태를 유지할 수 있다는 장점이 있다. [3]

4. 면역 알고리즘을 이용한 제어기설계

본 논문에서 구성한 제어기는 그림 2에서 보는 바와같이 2자유도 PID controller를 주제어기로 하며, 이를 온라인으로 동조하는 Immune algorithm on-line tuner, 그리고 신경회로망을 이용한 시스템 동정기와 Plant로 구성된다.

본 논문에서의 면역시스템은 항원의 인식, 초기 항체의 생성, 친화도의 계산, 기억세포로의 분화과정, 항체생성의 촉진과 억제 그리고 항체의 생성과정으로 설명될 수 있다.

항원의 인식은 항원을 입력정보로서 인식함을 뜻

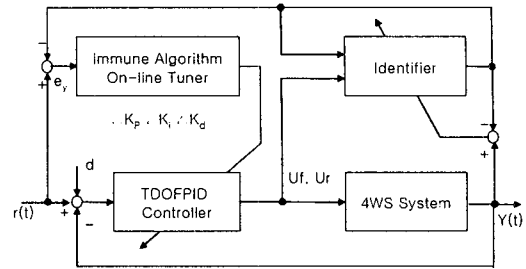


그림 2. 제어기의 블럭도

하며 제어기에서 항원이라 함은 평가함수 및 제한 조건을 들 수 있다.

초기항체의 생성과정은 사전에 기억된 세포들로부터 항체를 선택하는 과정이다. 기억세포에는 우수한 항체들이 보존되어 있으며, 항원 항체반응에서 우수한 개체는 다시 기억 세포로 분화되기도 한다. 본 논문에서 항체는 2자유도 PID 파라메터인  $K_p, K_i, K_d, \alpha, \beta$ 를 의미한다.

항원과 항체 또는 항체와 항체사이의 친화도를 계산한다. 여기서 항원 a와 항체 b사이의 친화도  $aff_{a,b}$ 는

$$aff_{a,b} = 1/(1 + H(2)) \dots\dots\dots (9)$$

그리고 항체간의 친화도  $aff_{b,b}$ 는 식(10)과 같다.

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

$H(2)$ 는 항체 및 항원이 가지는 정보 엔트로피로서 이 값이 0이면 항체간 혹은 항원 항체간에 유전자 완전히 일치하는 것을 의미한다. 본 논문에서 식 (9)의 친화도는 평가함수의 정도로서 나타내진다.

식 (9)에 의해 기억세포로의 분화과정에서 높은 친화도의 항체를 기억세포에 추가하며, 기억공간의 제약으로 식 (10)에 의해 새로 추가되는 항체와 기억세포의 항체들간의 친화도를 계산하여 높은 친화도의 항체를 제거하게 된다.

항체생성의 촉진과 억제과정에서 항원 · 항체간의 친화도 및 항체의 농도에 근거한 식 (11)의 기대치

를 계산한다.

$$expt_i = \frac{aff_{a,b}}{c_i} \dots\dots\dots (11)$$

여기서,  $C_i$ 는 항체의 농도식으로 식 (12)와 같다.

$$c_i = \frac{N_{Same}}{N_{Total}} \dots\dots\dots (12)$$

$N_{Same}$ 은 I번째 항체와 동일한 친화도를 갖는 항체의 수이며,  $N_{Total}$ 은 항체의 총 수를 나타낸다. 식 (11)과 식 (12)로부터 항원과 항체의 친화도가 높은 항체일수록 차세대에 남은 확률이 높고, 농도가 높은 항체일수록 차세대에 남은 확률이 낮다는 것을 알 수 있다.

마지막 단계인 항체의 생성단계는 항체를 새로이 생성하는 것으로서, 본 논문에서는 유전자 복제 및 돌연변이 연상을 이용하여 새로운 항체를 생성한 후 교배과정을 거쳐 다시 세 번째 단계인 친화도의 계산과정으로 되돌아 가게 되며, 최적의 조건이 만족되어 지면 알고리즘 수행을 끝내도록 한다.

그림 2에서 면역알고리즘으로 주제어기인 2자유도 PID제어기를 온라인 동조기(Tuner)로 동조하기 위해서는 4WS system에 대한 여러 가지 많은 정보를 바탕으로 설계되어야 한다. 따라서 이러한 문제를 해결하기 위해서는 오프라인으로 제어기의 파라미터를 사전에 어느정도 동조한 후 온라인 동조기로서 가동하였다. 또한 온라인 파라미터 동조의 개념은 매 샘플링 주기마다 최적의 파라미터를 탐색하는 것이나, 본 논문에서는 매 6샘플링 주기마다 온라인 동조기를 구동하여 시스템의 특성변화에 따라서 면역 알고리즘에서 온라인으로 동조된 제어변화량으로서 기존의 고정된 제어 파라미터의 보상된 신호로 입력되도록 하였다.

### 5. 시뮬레이션 결과 및 고찰

본 논문에서는 4륜 조향 AGV를 제어하기 위해 면역알고리즘을 온라인 동조기를 이용하여 2자유도

PID제어기를 구성하고, Neural Network tuned PID제어기와 요레이트( $r$ )과, 센서와 가이드라인간의 측면변위(Lateral displacement)에 대해 성능을 비교하였다. 이때 AGV의 운동은 가이드 라인의 오른쪽에서 1m 벗어난 지점에서 구동을 시작하여 9초 뒤 약 0.1초간 센서의 입력이 없거나 가이드라인의 부재의 경우를 거쳐 약 15초간 시뮬레이션 하였다. 표 2는 시뮬레이션에 사용한 4WS AGV의 사양을 나타낸다.

차량의 중량은 16000[kg]으로 놓았으며, 마찰계수는 맑은날로 가정하여 1로 두었다. 또한 전·후방 조향각 가속도는 실모델에 근사하게  $\pm 0.4[\text{rad}]$ 으로 두고, 차량의 안전을 고려하여 전·후방 조향각은  $\pm 0.5[\text{rad}]$ 으로 제한하였다. 그림 3은 센서로부터의 측면변위를 나타낸 것으로 면역알고리즘 동조와 신경회로망의 경우 Settling time은 거의 유사한 특성을 보이나, 최대치에서는 최초 면역알고리즘은 2.64[sec]에서 1.02[m], 신경회로망의 경우 2.66[sec]에서 1.04[m]로 높으며, 특히 외란이 인가된 경우 그 최대치는 각각 1.032[m]와 1.037[m]로 나타났다.

또한 차량의 운동에 가장 많은 영향을 미치는 요레이트는 4.7~5.1[sec]에 걸쳐 0.004[rad] 가량 감소

표 2. AGV의 파라미터 값

파라미터	파라미터 값
$V$	10 [m/s]
$L_f$	3.67 [m]
$L_r$	1.93 [m]
$L_s$	6.12 [m]
$L_w$	0.565 [m]
$C_f$	198000 [N/rad]
$C_r$	470000 [N/rad]
$M$	16000~32000[kg]
$\mu$	1
$J$	$i^2 \times M$ [kg · m <sup>2</sup> ]
$i^2$	10.85 [m <sup>2</sup> ] ( $i$ =관성 반경)

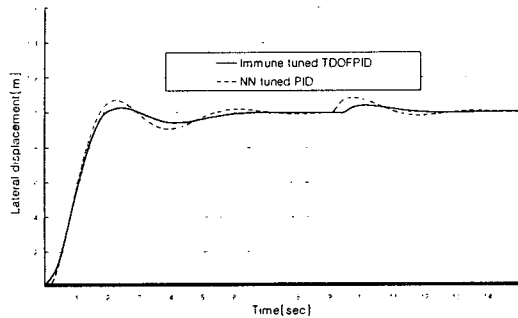


그림 3. 측면 변위(lateral displacement)

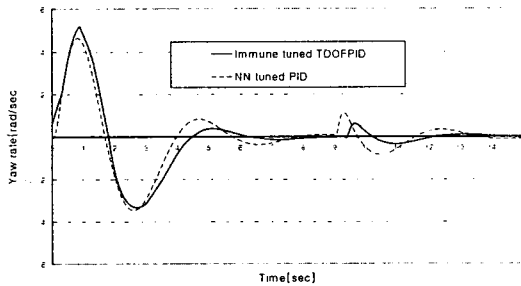


그림 4. 요우 값(Yaw rate)

하였고, 외란이 인가된 직후에는 면역알고리즘의 경우 신경회로망의 경우보다 약 0.05[rad]가량 감소함을 알 수 있었다.

## 6. 결 론

본 논문에서는 4WS AGV의 조향제어기를 2자유도 PID제어기와 면역알고리즘을 이용하여 설계하였다. 제어기의 파라미터는 온라인으로 제어되며, 이를 위하여 사전에 동정과정을 수행하였다. 또한 차량의 운동에 큰 영향을 미치는 요레이트와 센서에 의한 측면 변위를 각각 시뮬레이션 하였다. 또한

NN PID 제어기와의 조향성능을 평가하였다.

제안한 제어기가 측면변위의 오버슈트 부분에서 약 45[%]정도로 개선되었으며, 요레이트에 대하여서도 현저한 감소를 보임을 알 수 있다.

## 참 고 문 헌

- 1) Y. J. Lee, D. H. Song, S. U. Choi, J. W. Lee and K. S. Lee, " An Implementation of HIA(Humoral Immune Algorithm) PID Controller using Neural Network Identifier", Proc. of SICE2001, Fri. July 27. Intelligent Control. 312A-4.
- 2) 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.
- 3) 이영진, 이권순, "면역반응 알고리즘을 이용한 구조물의 진동제어," 한국항만학회지, 제13권, 제2호, pp. 389-398, 1999.
- 4) Ronald, K. Jurgen, "Active Control of Drive Motion of Four Wheel Steering Car with Neural Network", Electronic Steering and Suspension System, pp. 79 - 92, 1999.
- 5) 손주한, 최성욱, 이진우, 이영진, 이권순, " 신경회로망 2자유도 PID 제어기를 이용한 4륜 차량의 조향제어", 제어자동화 시스템공학회 부산경남울산지부 학술대회, pp. 27-32. 2000.
- 6) H. S. J. Byoun, M. K. Park and I. H. Suh, "조향기구가 없는 4륜 전기 구동 차량의 지능형 조향제어 시스템의 설계", 전자공학회 논문지, 제34권 4호, pp.395- 406. 1997.