

경로 추적을 위한 구륜 이동 로봇의 인공 면역 알고리즘을 이용한 퍼지 제어기

A Fuzzy Controller Using Artificial Immune Algorithm for Trajectory Tracking of WMR

김 상 원*, 박 종 국
(Sangwon Kim and Chongkug Park)

Abstract : This paper deals with a fuzzy controller using IA(Immune Algorithm) for Trajectory Tracking of 2-DOF WMR(Wheeled Mobile Robot). The global inputs to the WMR are reference position and reference velocity, which are time variables. The global output of WMR is a current position. The tracking controller makes position error to be converged 0. In order to reduce position error, a compensation velocities on the track of trajectory is necessary. Therefore, a FIAC(Fuzzy-IA controller) is proposed to give velocity compensation in this system. Input variables of fuzzy part are position errors in every sampling time. The output values of fuzzy part are compensation velocities. IA are implemented to adjust the scaling factor of fuzzy part. The computer simulation is performed to get the result of trajectory tracking and to prove efficiency of proposed controller.

Keywords : wheeled mobile robot, trajectory tracking, fuzzy controller, immune algorithm

I. 서론

현대사회의 산업화와 인간의 생활 속에서 편리함을 추구하기 위해 로봇의 필요성이 일찍이 요구되었다. 산업용 로봇 머니플레이터는, 무인 반송 로봇, 인간 친화 로봇, 무인 탐사 로봇 등이 다양한 분야에서 여러 가지 목적으로 이용되어지고 있다. 특히, 로봇 머니플레이터는 공장 자동화에서 있어서 중요한 역할을 하고 있다. 로봇 머니플레이터는 작업 공간 내에 고정되어 있어, 필연적으로 동작의 제한을 가지고 있다. 이것을 극복하기 위해서 구륜 이동 로봇(WMR: Wheeled Mobile Robot)이 소개되어졌다[1-6].

그러나 WMR의 non-holonomic 제한 때문에 제어를 설계하는 것이 쉽지 않다[4-6]. 이런 어려운 점을 극복하고 좀더 정확한 위치와 속도 제어를 획득하기 위해서, 여러 가지 방법들이 소개되어지고 있다[4-7].

최근에는 인간의 뇌를 모델링한 신경회로망, 전문가의 지식이나 경험을 이용한 퍼지, 자연계의 진화의 속성을 이용한 GA(Genetic Algorithm) 등과 같은 제어 알고리즘을 많이 이용되고 있다. 그러나 새롭게 변화하는 외부 환경이나 시스템의 변화에 대한 재학습, 수렴 속도, 재진화 및 최적화 과정이 추가되어야 하는 어려움이 있다[7-9].

본 연구에서는 이러한 단점을 극복하고자 인공 면역 알고리즘의 특징인 활발적 인식, 학습과 기억 능력, 그리고 면역 네트워크의 조절 이론을 공학적인 관점에서 적용하여, 외부 환경에 강인하면서도 적응적으로 최적화 할 수 있는 새로운 제어기를 설계하고자 한다.

제어기는 주어진 궤적이나 주위의 환경 변화에도 적응성

을 가질 수 있도록 설계되어야 한다. WMR 같은 비선형 시스템이 최적으로 운행되기 위해서는 정확한 모델링도 함께 구현되어야 한다.

그러나 기존의 수학적 모델링 기법은 그 과정이 복잡하여 실제 시스템의 비선형적 특성을 잘 표현하기 어렵고, 시스템 모델링에 필요한 매개변수를 시스템으로부터 직접 측정하기 어려운 경우에는 매개변수 추종을 위한 별도의 추종기법이 추가되어야 한다. WMR 같이 여러 가지의 궤적이 주어지는 경우에는 최적의 제어기 설계가 어렵다. 따라서 설계시 이를 보완할 수 있는 방안이 검토되어야 한다[7].

최적화 기법의 적용으로는 제어기 매개변수의 최적화 및 미지의 비선형 시스템 매개변수의 최적화 등 여러 분야에서 적용되고 있으며, 이는 진화 알고리즘의 연산자에 면역 시스템이 갖는 개체 생산의 촉진과 억제 메커니즘에 적용하는 복잡한 일련의 작업을 수행한다.

또한 면역 알고리즘은 면역적 기억이 나타나는 기억세포를 가지고 있다. 면역적 기억은 진화 알고리즘에서는 없는 면역 알고리즘만이 가지는 장점으로, 만약 제어 시스템의 매개변수가 변동이 일어날 경우, 진화 알고리즘에서는 처음부터 다시 학습하여야 하는 어려움이 있으나, 면역 알고리즘에서는 항체 생산의 촉진용으로 사용하는 기억세포에 의하여 빠르게 변화된 시스템에 적응할 수 있는 메커니즘을 가지고 있다[10-17].

본 논문에서는 비선형 구조를 갖는 WMR의 여러 가지 경로를 추적할 수 있도록 기존의 복잡한 수학적 모델링 과정을 거치지 않고 퍼지 제어기를 설계하고, 퍼지 제어기를 최적화시키기 위해서 복잡성이 덜하며, 시스템 매개변수의 변동에 대하여 기억세포 메커니즘을 적용하는 인공 면역 알고리즘 이용한 퍼지 제어기를 제안하고자 한다.

제안된 제어기의 성능을 검증하기 위해 WMR 구성하고

* 책임저자(Corresponding Author)

논문접수 : 2006. 2. 27., 채택확정 : 2006. 4. 28.

김상원, 박종국 : 경희대학교 전자공학과

(netcom@khu.ac.kr/ckpark@khu.ac.kr)

계적 추적하는 컴퓨터 모의실험 하였다. 여러 개의 기준 궤적을 수행시켜서 위치, 각, 속도를 각각 고찰하고, 일반적으로 적용된 퍼지 제어기와의 성능 및 특성을 비교함으로써 제안된 제어기의 유용성을 입증하고자 한다.

II. 구륵 이동 로봇의 구성

1. 구륵 이동 로봇의 구조 및 좌표할당

본 논문에서 제안된 구륵 이동 로봇은 4구륵 2자유도 구륵 이동 로봇으로써, 구동기에 의해 구동되는 2개의 전륵 구동구륵과 안정성을 위해 뒤에 설치된 2개의 보조구륵으로 이루어진다. 각각의 구동 구륵은 2개의 자유도를 갖으며 첫 번째 자유도는 구륵의 회전에 대한 방향이고 두 번째 자유도는 바닥과 구륵 사이의 접촉점에 대한 회전이다. 즉, 구륵 이동 로봇의 직진성분과 회전 성분을 뜻한다. 그림 1은 구륵 이동 로봇의 평면도이며 그림 2는 측면도이다.

좌표 할당은 Sheth-Uicker 표기법을 이용하였다[18]. B는 본체의 질량중심에 할당된 본체 좌표계이며, F는 이동면의 바닥 좌표계이다. C는 구륵과 주행면 사이의 접촉점에 할당된 접촉 좌표계이고, S는 조향 축에 할당된 조향 좌표계이다. H는 조향 좌표계의 z축과 동일한 방향을 갖지만 본체에 할당된 좌표계이며, A는 구륵과 본체의 접촉점에 할당된 구륵 축 좌표계이다. 구륵 이동 로봇의 방향전환은 두 개의 독립적인 구동 구륵의 속도 차에 의해 이루어진다. 구륵 이동 로봇의 좌표계 원점은 기하학적인 구륵 이동 로봇의 무게중심에 위치한다.

2. 구륵 이동 로봇의 기구학

기구학은 구륵 이동 로봇의 본체 속도와 구륵 속도 사이의 속도 관계를 나타낸다. 구륵 이동 로봇을 구성하는 구성요소 사이의 상대적 위치와 방향을 나타내고 구성요소 사이의 동작 관계를 분석하기 위해서 Sheth-Uicker 표기법을 이용하여 각 구성 요소에 좌표계를 할당한다[18]. 구륵 이동 로봇의 Non-holonomic 제약을 고려하여 속도 및 가속도를 위치와 독립적으로 표기하기 위해 순간일치 좌표계를 도입한다[5,6]. 4×4 동차 변환행렬을 이용하여 구성요소 사이의 상대적 위치와 방향을 표현한다. 또한 좌표 변환행렬의 대수적 연산과 미분을 유도하여 구륵 이동 로봇의 기구학 방정식과 자코비안 행렬을 유도하여 구륵의 각속도를 본체 속도로 변환한다. 유도된 기구학은 순간일치 좌표계 형태로 표현되므로, 기준 좌표계에 대한 본체 좌표계의 변환행렬을 이용하여 기구학 방정식을 기준 좌표계에 대한 형태로 변환한다. 구륵 속도의 성분을 구동 성분과 비 구동 성분으로 구분하여 역 기구학을 유도한다. 또한 구륵 속도의 성분을 감지 성분과 비감지 성분으로 구분하여 전향 기구학을 유도한다. 전향 기구학은 구륵에 부착된 엔코더에 의해 감지된 구륵 속도로부터 본체의 선속도 및 회전속도를 산출한다. 역 기구학은 구륵 이동 로봇이 기준 궤적을 추적하기 위해 요구되는 구륵 속도를 계산한다. 기준 궤적이 본체 속도 및 회전 속도로 주어졌을 경우, 역 기구학을 이용하여 기준 궤적을 추적하기 위해 필요한 양 구륵 속도를 산출한다.

기구학은 구륵 이동 로봇의 본체와 구동구륵의 동작관계

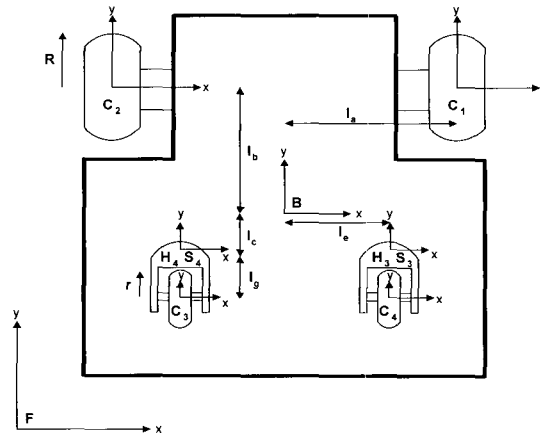


그림 1. 구륵 이동 로봇의 상면도.

Fig. 1. The top plan of WMR.

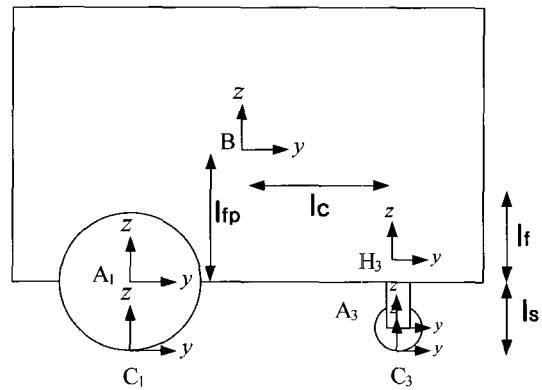


그림 2. 구륵 이동 로봇의 측면도.

Fig. 2. The side plan of WMR.

를 나타낸다. 전향기구학은 엔코더에 의해 측정된 구동구륵의 속도(${}^{A_1}\omega_{W_{1x}}$, ${}^{A_2}\omega_{W_{2x}}$)로부터 구륵 이동 로봇 본체의 속도(${}^Bv_{B_x}$, ${}^Bv_{B_y}$, ${}^B\omega_{B_z}$)를 구한다. 역기구학은 구륵 이동 로봇이 주어진 기준궤적을 추적하기 위한 구동구륵의 속도를 구한다.

구륵 이동 로봇의 역기구학 해를 구하면 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} {}^{A_1}\omega_{W_{1x}} \\ {}^{A_2}\omega_{W_{2x}} \end{bmatrix} = \frac{1}{R(l_b^2+1)} \begin{bmatrix} -l_a l_b & -(l_b^2+1) & -l_a \\ l_a l_b & -(l_b^2+1) & l_a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} {}^Bv_{B_x} \\ {}^Bv_{B_y} \\ {}^B\omega_{B_z} \end{bmatrix} \quad (1)$$

구륵 이동 로봇의 전향기구학 해를 구하면 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} {}^Bv_{B_x} \\ {}^Bv_{B_y} \\ {}^B\omega_{B_z} \end{bmatrix} = \frac{R}{2l_a} \begin{bmatrix} -l_b & l_b \\ -l_a & -l_a \\ -1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} {}^{A_1}\omega_{W_{1x}} \\ {}^{A_2}\omega_{W_{2x}} \end{bmatrix} \quad (2)$$

여기서

${}^{A_i}\omega_{W_i}$: 구동구륵의 속도($i=1, 2$)

\bar{v}_B : 본체좌표계에 대한 본체의 속도 ($i=x, y$)

$\bar{\omega}_B$: z축에 대한 본체의 회전속도

R : 구동 구륜의 반경

l_a : 본체의 폭/2

l_b : 본체의 길이/2

III. 제어기 설계

1. 면역 시스템

면역 시스템은 생체의 방어 및 유지를 수행하는 자율분산 시스템으로, 시스템의 요소들은 뇌의 명령을 따르는 것이 아니라 각 요소가 자율적으로 환경에 대응한다.

생체는 외부로부터 생체 내에 침입한 박테리아, 바이러스, 병원균을 막기 위한 면역 체계를 가지고 있다. 이 체계는 림프구가 생체 내에서 침입한 항원(antigen)을 인식하고 그 항원에 대항하는 항체(antibody) 생성 세포만을 증식한 후, 침입한 항원에 대응하는 항체를 빠르게 만들어 낸다. 그리고 사라지는 항체는 모두 없어지는 것이 아니라, 기억 세포가 되어 면역적 기억 세포로 분화한다. 이러한 이론에 바탕으로 면역 알고리즘이 제안되고 있다. 그리고 면역 시스템은 생체 내로 침입한 항원을 인식하고 과거에 배제한 항원에 대해서는 기억세포에서 직접 항체를 만들며, 새로운 항원에 대해서는 세포 유전자의 재구성에 의해 항원에 대응하는 항체생산세포를 만들고 이것을 증식하여 항원에 대응하는 항체를 만든다. 이러한 특성으로 인하여 동일한 항원에 대한 2차 반응은 1차 반응에 비하여 훨씬 빠르고 역동적으로 진행된다[10-17].

2. 면역 알고리즘의 구현

면역 알고리즘은 인체 면역계에서의 다양한 항체 생성 능력을 설명하는 소매틱 이론(somatic theory)과 면역계의 자기 조절 능력을 설명하는 네트워크 가설(network hypothesis)을 기초로 하는 최적화 알고리즘이다.

면역 알고리즘이 다른 일반적인 최적화 알고리즘에 비교하여 다음과 같은 특징을 가진다. 첫째, 면역 알고리즘은 하나의 가능해를 가지고 최적화 과정을 수행하는 것이 아니라, 동시에 여러 개의 가능해로써 최적화를 진행해 나간다. 둘째, 해의 값 자체를 그대로 사용하는 것이 아니라, 코드화된 수의 배열을 사용한다. 셋째, 최적화의 목적 함수 값을 사용하며 그 외에 다른 정보를 요구하지 않는다. 이러한 특징은 일반적인 비결정론적 알고리즘인 진화 알고리즘과도 유사하지만, 면역 알고리즘만이 가지는 가장 큰 특징은 최적해로의 수렴을 보장하기 위하여 기억 세포군(memory cell)을 가지고 최적화 과정을 수행하며, 이러한 기억 세포군은 다른 항원에 대처할 수 있는 요소로서 사용할 수 있는 특징을 나타낸다.

면역 알고리즘은 6단계로 나타낼 수 있다.

단계 1: 항원의 인식

면역 시스템이 목적함수와 제한조건 등을 항원으로 정의한다. 즉 최적화 문제를 정의한다.

단계 2: 초기 항체군 생성

최초의 과정에서 항체를 임의적으로 발생시켜 이들 중에 우수한 항체들을 기억세포에 저장한다.

단계 3: 친화도(affinity) 계산

항원과 항체의 친화도를 계산한다. 친화도의 계산은 항원과 항체간의 친화도로서 최적화 문제로 목적함수와 해와의 관계를 나타낸다. 이것은 진화 알고리즘의 적합도(fitness)를 의미한다.

면역 알고리즘의 최적화를 위한 항원과 항체 v 사이의 친화도 계산은 최적화 하고자 하는 함수 opt_v 가 최소일 때, 가장 큰 값인 1을 가지도록 정의하였다.

$$aff_v = \frac{1}{1 + opt_v} \tag{3}$$

여기서, aff_v 는 친화도 값이고, opt_v 는 최적화 시키고자 하는 함수이다.

opt_v 는 (4)과 같이 정의한다.

$$opt_v = \sum_{t=0}^N |x_e(t)| + \sum_{t=0}^N |y_e(t)| + \sum_{t=0}^N |\theta_e(t)| \tag{4}$$

여기서, x_e, y_e, θ_e 는 샘플링 t 단계에서의 위치오차를 나타내며, N 은 총 샘플링 횟수이다.

단계 4: 기억 세포로의 분화

단계 3에서 구한 항원과의 친화도가 높은 항체를 기억 세포에 추가한다. 기억 세포의 수에는 제한이 있으므로 추가하는 세포에 현재 보존중인 기억 세포 중에서 항체간의 친화도가 가장 높은 항체를 소멸시키고 새로이 분화된 친화도가 높은 항체를 추가한다.

단계 5: 항체 생성의 증식과 억제

항체 i 의 기대치를 계산하고, 기대치가 낮은 항체를 소멸시킨다.

$$e_i = \frac{ax_i}{c_i} \tag{5}$$

여기서, e_i 는 항체 i 의 기대치이고, c_i 는 항체의 밀도로서 (6)과 같이 정의한다.

$$c_i = \frac{\text{sum of antibodies with same affinity as } ax_i}{\text{sum of antibodies}} \tag{6}$$

항원과 항체의 친화도가 높은 항체일수록 차세대에 남을 확률이 높고, 밀도가 높은 항체일수록 차세대에 남을 확률이 낮다는 것을 알 수 있다. 따라서 항체는 항원에 대해서 더 높은 친화도를 가진 항체를 증식하고 과도한 밀도를 가진 항체의 증식을 억제하므로써 탐색방향의 다양성을 유지한다.

단계 6: 항체 생산

단계 5에서 제거된 항체를 대신할 새로운 항체를 생산한다. 이 단계에서는 임의적으로 선택되어진 항체에 돌연변이와 교배를 통해서 새로운 항체가 생산된다.

이 단계를 끝내고 단계 3부터 다시 최적화 루틴을 수행한다.

3. 면역 알고리즘을 이용한 퍼지 제어기

구륜 이동 로봇의 경로 추적을 위해서 본 논문에서 제안하는 제어기의 블록선도는 그림 3과 같다.

퍼지의 입력 변수들은 위치 오차에 의해 결정되어진다. 위치 오차는 매 샘플링 시간마다 기준 위치와 현재 위치 사이의 차이로부터 발생한다. 퍼지의 출력 값은 위치 오차를 0로 수렴하기 위한 보상 속도 $q = (v(t), w(t))$ 이다. 퍼지의 소속 함수는 삼각형이며 정규화 되어 있다. 퍼지 논리 제어기는 2개의 퍼지 규칙을 사용한다. 하나는 본체 속도를 위한 것이며, 다른 하나는 각속도를 위한 규칙이다. 퍼지 라벨은 삼각형 소속 함수를 사용한 7개항으로 구성되었다.

여기서 x_e, y_e 는 x축과 y축 방향의 오차이고, PB: Positive Big, PM: Positive Medium, PS: Positive Small, ZO:

표 1. 보상 입력 v 을 위한 퍼지 규칙.

Table 1. Fuzzy rule for compensation input v .

$x_e \backslash y_e$	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	NB	NM	NM	NS	NS	NS	NS
NM	NM	NS	NS	NS	NS	ZO	NS
NS	NS	NS	NS	NS	ZO	NS	NS
ZO	NS	ZO	ZO	ZO	ZO	ZO	PS
PS	PS	PS	ZO	PS	PS	PS	PM
PM	PS	ZO	PS	PS	PS	PM	PM
PB	PS	PS	PS	PS	PM	PM	PB

표 2. 보상 입력 w 을 위한 퍼지 규칙.

Table 2. Fuzzy rule for compensation input w .

$x_e \backslash y_e$	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	NB	NB	NB	NM	NM	NS	NS
NM	NM	NM	NM	NS	NS	NS	ZO
NS	NS	NS	NS	NS	NS	ZO	ZO
ZO	ZO	ZO	ZO	ZO	ZO	ZO	ZO
PS	ZO	PS	PS	PS	PS	PM	PB
PM	ZO	PM	PM	PM	PM	PM	PB
PB	PB	PB	PB	PB	PB	PB	PB

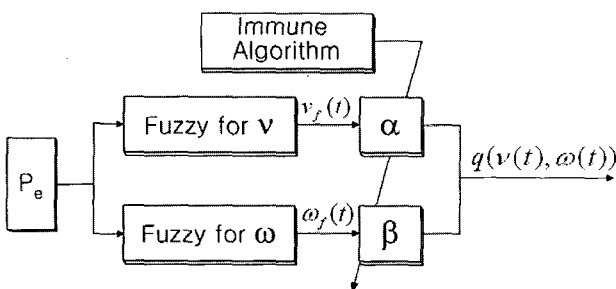


그림 3. Fuzzy-IA 제어기의 블록도.
Fig. 3. Block diagram of fuzzy-IA controller.

Zero, NS: Negative Small, NM: Negative Medium, NB: Negative Big 이다.

퍼지의 출력값을 최적화하기 위해서 면역 알고리즘을 사용하여 자동적으로 스케일링 계수를 조정하도록 하였다. FIAC에 대한 방정식은 (7), (8)과 같다.

$$v(t) = v_f(t) \times \alpha \tag{7}$$

$$w(t) = w_f(t) \times \beta \tag{8}$$

여기서, $v_f(t), w_f(t)$ 는 속도, 각속도에 대한 퍼지 출력이고, α, β 는 스케일링 계수이다.

IV. 모의실험

본 논문에서는 구륜 이동 로봇의 경로 추적을 위해서 인공 면역 알고리즘을 이용한 퍼지 제어기를 설계하였다.

제안된 제어기의 유효성을 검증하기 위하여 컴퓨터 모의 실험을 하였다. 모의실험은 3가지의 각각 다른 궤적을 주어 주행하도록 하여, 경로, 속도, 각 궤적 추이에 대하여 살펴 보았다. 제안된 제어기와 일반적인 퍼지 제어기(FLC)를 비교하였다. 동일한 퍼지 규칙을 사용하며, FLC의 모든 출력 스케일링 계수를 1.0로 고정하고, 제안한 제어기는 면역 알고리즘의 6단계에 따라 수행하여 이 계수값을 자동적으로 최적화 값으로 결정하도록 하였다.

모의실험에 사용된 구륜 이동 로봇의 매개변수와 블록도는 다음과 같다.

표 3. 구륜 이동 로봇의 제원 및 매개 변수.

Table 3. The parameters of WMR.

기호	수치값	단위	내용
l_a	0.22	m	본체 폭/2
l_b	0.2667	m	본체 길이/2
l_c	0.22	m	보조구륜의 y변위
l_d	0.11	m	구동구륜의 z변위
l_e	0.12	m	보조구륜의 x변위
l_f	0.15	m	보조구륜의 z변위
R	0.05	m	구동구륜의 반경
r	0.025	m	보조구륜의 반경

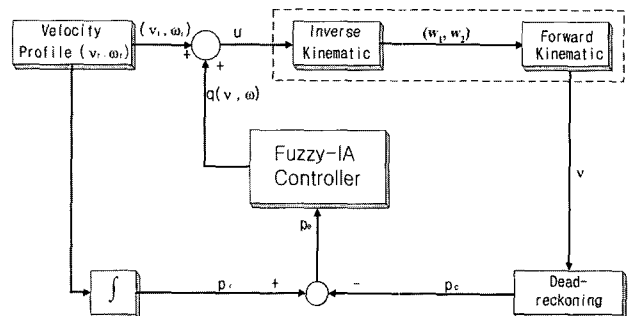


그림 4. 구륜 이동 로봇의 블록도.
Fig. 4. Block diagram of WMR.

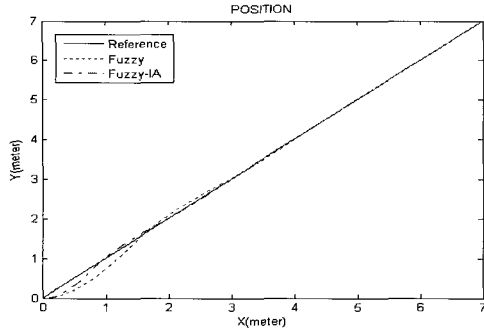


그림 5. 구륜 이동 로봇의 경로 추적(경우 1).
Fig. 5. Trajectory tracking of WMR (case 1).

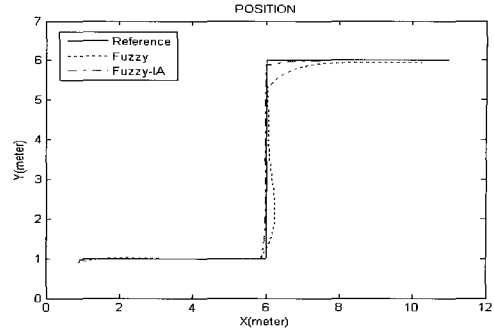


그림 9. 구륜 이동 로봇의 경로 추적(경우 2).
Fig. 9. Trajectory tracking of WMR (case 2).

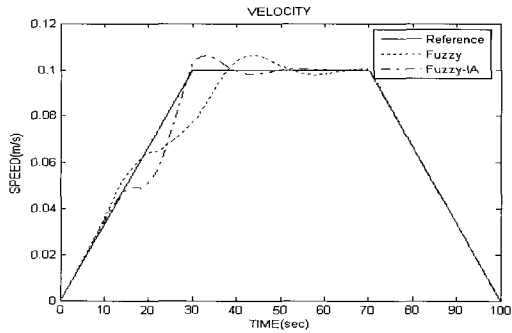


그림 6. X축 방향의 속도 궤적(경우 1).
Fig. 6. Velocity trajectory for X axis (case 1).

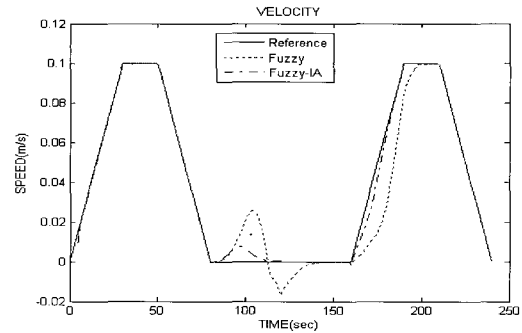


그림 10. X축 방향의 속도 궤적(경우 2).
Fig. 10. Velocity trajectory for X axis (case 2).

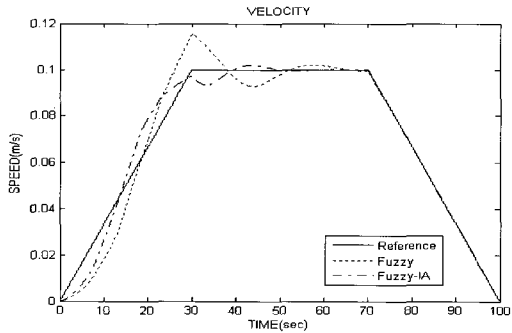


그림 7. Y축 방향의 속도 궤적(경우 1).
Fig. 7. Velocity trajectory for Y axis (case 1).

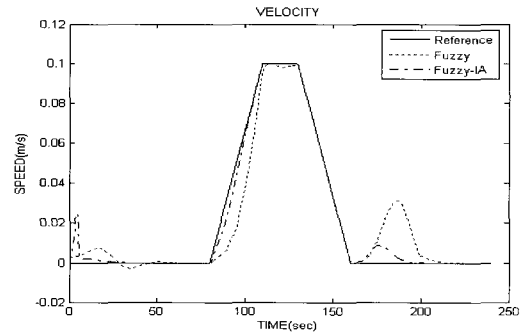


그림 11. Y축 방향의 속도 궤적(경우 2).
Fig. 11. Velocity trajectory for Y axis (case 2).

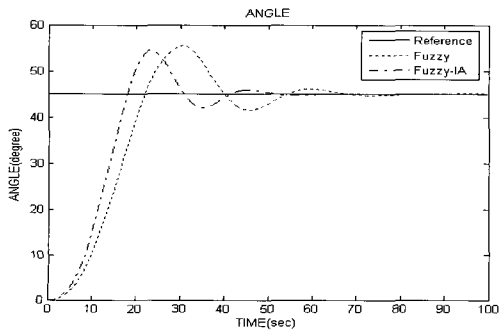


그림 8. 구륜 이동 로봇의 각 궤적(경우 1).
Fig. 8. Angle trajectory of WMR (case 1).

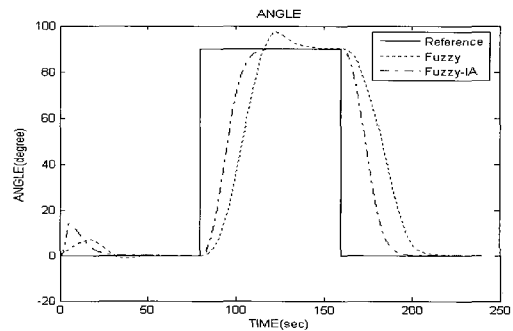


그림 12. 구륜 이동 로봇의 각 궤적(경우 2).
Fig. 12. Angle trajectory of WMR (case 2).

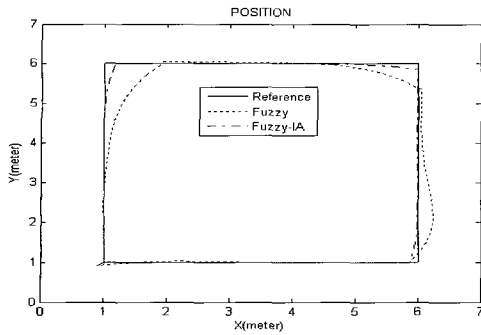


그림 13. 구륜 이동 로봇의 경로 추적(경우 3).
Fig. 13. Velocity trajectory for X axis (case 3).

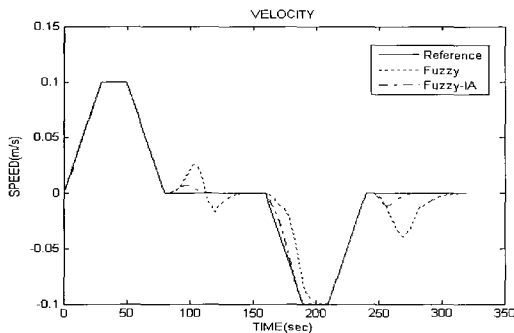


그림 14. X축 방향의 속도 궤적(경우 3).
Fig. 14. Velocity trajectory for X axis (case 3).

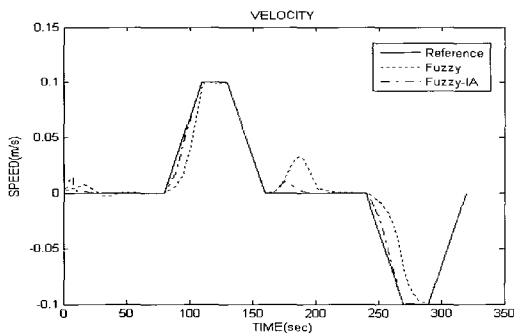


그림 15. Y축 방향의 속도 궤적(경우 3).
Fig. 15. Velocity trajectory for Y axis (case 3).

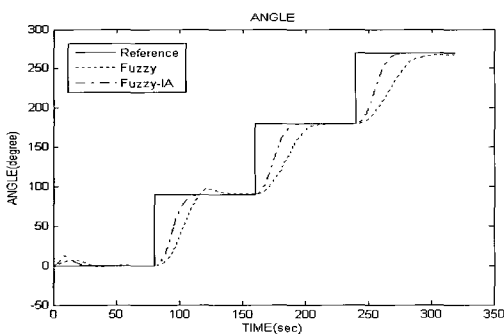


그림 16. 구륜 이동 로봇의 각 궤적(경우 3).
Fig. 16. Angle trajectory of WMR (case 3).

V. 결론

퍼지는 일반적으로 전문가의 경험이나 지식 정의로 설계되어진다. 그것은 소속 함수, 퍼지 규칙 등에 의해서 실현할 수 있다. 그러나 동일한 조건하에서 모든 경우에 최적화되지는 않는다. 일반적인 퍼지 제어기의 이 문제를 해결하기 위해서 경우에 따라 수동적으로 시행착오를 통해서 매개변수를 조절하거나 변경되어야 한다. 이런 점을 개선하기 위해서는 퍼지 시스템은 면역 알고리즘과 조합하여 개선할 수 있다. 면역 알고리즘은 국부적인 최적해가 많이 존재하는 다변수 최적화 문제를 쉽게 해결할 수 있으며, 기억 학습 기구와 다양성이 있는 항체를 유지함으로 인하여 고속으로 해를 구할 수 있었다. 이 논문에서 제안된 제어기는 소속 함수나 퍼지 규칙을 조절하거나 변경하지 않고 퍼지의 출력 스케일링 계수 값을 면역 알고리즘이 조절함으로써 전체 출력이 최적화 되도록 설계하였다. 제안된 면역 알고리즘을 이용한 퍼지 제어기는 구륜 이동 로봇의 3가지 기준 궤적을 주어 추적하도록 하였다. 제안된 제어기와 일반적인 FLC의 모의실험 결과를 통하여 제안된 제어기의 유용성을 확인하였다.

참고문헌

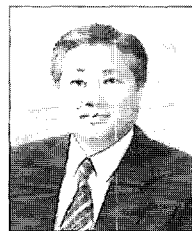
- [1] G. Campion, G. Bastin, and B. D'Andrea-Novet, "Structural properties and classification of kinematic and dynamic models of wheeled mobile robots," *IEEE trans. on Robotics and Auto.* vol. 12, pp. 47-62, 1996.
- [2] P. F. Muir and C. P. Neuman, "Kinematic modeling for feedback control of an omnidirectional wheeled mobile robot," *IEEE Inter. Conf. on Robotics and Auto.*, pp. 1772-1778, 1987.
- [3] B. Thuilot, B. D'Andrea-Novet, and A. Micaelli, "Modeling and feedback control of mobile robots equipped with several steering wheels," *IEEE trans. on Robotics and Auto.*, vol. 12, pp. 375-390, 1996.
- [4] Y. Kanayama, Y. Kimuro, F. Miyazai, and T. Noguchi, "A stable tracking control method for an autonomous mobile robot," *IEEE Inter. Conf. on Robotics and Auto.*, pp. 384-389, 1990.
- [5] I. Kolmanovsky and N. H. McClamroch, "Developments in Non-holonomic control problems," *IEEE Control Systems Magazine*, vol. 15, pp.20-36, 1995.
- [6] C. Samson and K. Ait-Abderrahim, "Feedback control of a Non-holonomics wheeled cart in cartesian space," *IEEE Inter. Conf. on Robotics and Auto.*, pp. 1136-1141, 1991.
- [7] S. H. Kim, C. K. Park, and F. Harashima, "A self-organized fuzzy controller for wheeled mobile robot using an evolutionary algorithm," *IEEE Trans. on Industrial Electronics*, vol. 48, pp. 467-474, 2001.
- [8] M. Russo, "Genetic fuzzy learning," *IEEE Trans. on Evolutionary Computation*, vol. 4, no. 3, pp.259-273, 2000.

- [9] W. Gao, "Fast immunized evolutionary programming," *CEC2004. Congress on Evolutionary Computation*, vol. 1, pp. 666-670, 2004.
- [10] J.-S. Chun, M.-K. Kim, H.-K. Jung, and S.-K. Hong, "Shape optimization of electromagnetic devices using immune algorithm," *IEEE Trans. on Magnetics*, vol. 33, no. 2, pp. 1876-1879, 1997.
- [11] K. Mori, M. Tsukiyama, and T. Fukuda, "Adaptive scheduling system inspired by immune system," *IEEE Inter. Conf. on Systems, Man, and Cybernetics*, vol. 4, pp. 3833- 3837, 1998.
- [12] J.-S. Chun, J.-P. Lim, H.-K. Jung, and J.-S. Yoon, "Optimal design of synchronous motor with parameter correction using immune algorithm," *IEEE Trans. on Energy Conversion*, vol. 14, no. 3, pp. 610-615, 1999.
- [13] M. Kawafuku, M. Sasaki, and K. Takahashi, "Adaptive learning method of neural network controller using an immune feedback law," *IEEE/ASME Inter. Conf. on Advanced Intelligent Mechatronics*, pp. 641-646, 1999.
- [14] D. H. Kim, W. P. Hong, and J. I. Park, "Auto-tuning of reference model based PID controller using immune algorithm," *Proceedings of the 2002 Congress on Evolutionary Computation*, vol. 1, pp.483-488, 2002.
- [15] L. Jiao and L. Wang, "A novel genetic algorithm based on immunity," *IEEE Trans. on Systems, Man and Cybernetics*, vol. 30, no. 5, pp.552-561, 2000.
- [16] T. Gong and Z. Cai, "Mobile immune-robot model," *IEEE Inter. Conf. on Robotics, Intelligent Systems and Signal Processing*, vol. 2, pp. 1091-1096, 2003.
- [17] 박진현, 최영규, "면역알고리즘의 기억세포를 이용한 제어기 파라미터의 최적화," *대한전기학회논문지 시스템 및 제어부문*, 제51권 제8호, pp. 344-351, 2002.
- [18] P. N. Sheth and J. J. Uicker, "A generalized symbolic notation for mechanisms," *Journal of Engineering for Industry, Series B*, vol. 93, no. 70-Mech-19, pp.102-112, 1971.



김 상 원

1996년 경희대 전자공학과 졸업. 1998년 동 대학원 석사. 1999년~현재 경희대학교 전자공학과 박사과정. 관심분야는 로보틱스, 인공지능 알고리즘, Embedded System, Ubiquitous.



박 중 국

1971년 서울대 물리학과 졸업. 1975년 연세 대학원 석사. 1979년 동 대학원 박사. 1980년~현재 경희대학교 전자공학과 교수. 관심분야는 로보틱스, Camera Control System, 인공지능 알고리즘, Hybrid Brake System.