

論文2000-37CI-5-3

유전 및 면역 알고리즘을 이용한 2자유도 구륜 이동 로봇에 대한 PD-Fuzzy 제어기 설계

(A PD-Fuzzy Controller Design of 2 D.O.F. Wheeled Mobile Robot Using Genetic and Immune Algorithm)

金聖會*, 金棋烈*, 林虎*, 朴鍾國*

(Sunghoe Kim, Kiyeoul Kim, Ho Lim, and ChongKug Park)

요 약

구륜 이동 로봇(Wheeled Mobile Robot)은 제어기 설계에 있어 Nonholonomic Constraints 등에 의해 많은 어려움을 지닌다. 본 논문에서는 구륜 이동 로봇의 제어를 위해 PD와 퍼지 시스템이 결합된 제어기가 설계되며, 유전알고리즘에 기초되어 최적 퍼지시스템이 형성된다. 시스템의 최적화 과정은 독립적으로 수행되는 여러 단계들로 이루어지며, 각 단계마다 다른 형식의 알고리즘이 적용되며 효율적 탐색을 위해 Niche 알고리즘 및 면역 알고리즘이 결합되어 적용된다. 각 출력용어집합은 최적의 원소들을 얻기 위해 수행되는 탐색에 의해 그 구성이 변화되며, 변화된 출력용어집합의 구성 원소와 관계된 규칙기반이 동시에 조절된다. 출력용어집합의 추가된 원소들 및 조절된 규칙에 대한 적합성이 평가되고 제어 성능의 향상에 기여하지 못한 부분들은 제거된다. 출력변수의 용어집합 및 규칙에 대한 반복적 조절 과정이 완료된 후, 입력 소속함수들에 대한 조정이 제약조건을 가지고 수행되며, 진화연산에 의한 출력소속함수들에 대한 조정이 수행된다.

Abstract

It is not so easy to control the wheeled mobile robot because of some causes like non-holonomic constraints. To overcome these problems, a controller that PD system is combined with fuzzy

process is composed of several steps that have each separate algorithm and niche search algorithm and immune algorithm is applied partly. Output term set is changed by search that is performed to get optimal elements and then the rule base is also reformed. The fitness for the altered system is estimated and the surplus elements are removed. After the adjustment of output term set and rule base is finished, input and output membership functions is tuned.

I. 서 론

현재 많은 산업 현장에서 구륜 이동 로봇은 기존의 로봇이 지녔던 작업공간의 한정성을 탈피하기 위해 사용되고 있다. 이러한 작업의 수행에 있어 정확한 제어

의 추적이 요구되어 왔으며, 이를 해결하기 위해 많은 연구들이 수행되어졌다^[1-3]. 본 논문에서는 구륜 이동 로봇의 위치 및 방향 그리고 속도의 제어를 위한 PD-퍼지 제어기가 설계된다. 일반적으로 퍼지 제어기는 전문가의 지식과 경험에 근거하여 설계된다. 그러나 전문가의 지식과 경험을 항상 얻는 것은 어렵기 때문에 이러한 문제들을 해결하기 위하여 퍼지와 신경망 또는 퍼지와 유전알고리즘이 결합되어 사용된다^[4-7]. Gregory V TAN과 Xiheng Hu는 퍼지 제어기의 시스템적인(systematic) 설계를 위하여 유전 알고리즘을 이용하였

* 正會員, 慶熙大學校 電子工學科

接受日字:1999年12月17日, 수정완료일:2000年7月29日

(systematic) 설계를 위하여 유전 알고리즘을 이용하였으며, J. L. Castro는 퍼지 제어기에서 규칙수의 적절한 상한(proper upper bound)을 얻기 위한 방법을 제시하였다^[8-9]. J.Qiu과 Michael Walters는 이동 로봇의 퍼지제어기에 대하여 유전자알고리즘을 이용 소속함수를 학습시켰으며, Chin_chih Hsu.는 퍼지제어규칙의 최적화를 위하여 다연산자유전알고리즘[multi-operator genetic algorithm]을 사용하였다^[10, 11]. 그러나 이러한 알고리즘들은 규칙기반 및 소속함수 두 가지 모두를 최적화 시키지는 못하였다. C. T. Lin과 D. Nauck등에 의해 퍼지 신경망에 근거한 규칙기반 및 소속함수의 조절 알고리즘들이 제시되었으나 Lin의 알고리즘은 잉여노드의 생성이라는 문제점을 지녔으며 그리고 Nauck의 알고리즘은 일반적 방법에 의한 디퍼지화 및 새로운 퍼지소속함수와 규칙의 추가 및 삭제가 이루어 질 수 없는 문제점들을 지녔다^[12-13]. 본 연구에서는 구륜 이동 로봇의 위치 및 방향 그리고 속도의 제어를 위하여 기존에 널리 사용되어지는 PD시스템에 규칙기반 및 소속함수의 조절이 수행되는 퍼지시스템이 결합된 제어기가 설계된다. 설계된 퍼지 제어시스템은 유사정도에 근거한 새로운 소속함수의 추가 및 유전알고리즘을 이용한 경쟁적 학습에 의해 추가된 소속함수의 평가 및 제거, 그리고 각 입, 출력 변수들에 대한 독립적인 최적화 및 규칙기반의 조절이 수행된다. 또한 유전알고리즘의 효율적 탐색을 위해 독립적인 여러 개 체군들에 의해 헤가 탐색되는 niche 탐색 알고리즘 및 인간의 번역체계에 기초한 번역네트워크 알고리즘이 결합되어 적용된다^[14-15]. 제안된 제어기의 효율성을 입증하기 위하여 4바퀴 2자유도 구륜 이동 로봇에 대하여 모의실험이 수행되어졌고 결과들이 제시되었다.

II. 구륜 이동 로봇의 일반적인 제어기 모델 및 규칙기반과 출력용어집합의 재구성

구륜 이동 로봇의 일반적인 폐환 제어기가 그림 1에서 보여진다. K는 이득행렬, M-1는 바퀴 역동작행렬,

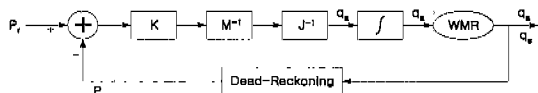


그림 1. 구륜 이동 로봇의 일반적인 폐환 제어기
Fig. 1. General feedback controller of WMR.

J-1 바퀴역자코비안 행렬을 나타내며 q_s 는 각 바퀴의 속도센서로부터 구해지는속도이다^[10].

본 연구에서 설계되는 제어기는 기존의 PD 시스템과 퍼지 시스템이 결합되어 구성된다. 일반적인 퍼지보상기는 수치적 입력 값들을 언어적 퍼지 값으로 변환시키는 퍼지화(fuzzification), 수행되는 일련의 제어과정을 언어적 제어규칙으로 나타내 규칙기반(rule base), 언어적 제어값들을 이용하여 퍼지출력을 발생시키는 추론부(inference engine), 그리고 언어적 추론값을 수치적 제어입력값으로 바꾸는 비퍼지화(Defuzzification)로 구성된다. 퍼지집합 F는 소속함수 $\mu_F(u)$ 에 의하여 $F = \{(u, \mu_F(u) \mid u \in U)\}$ 와 같이 나타내어진다. 퍼지제어기의 언어변수 x는 용어집합 $L^x = \{l_1^x, l_2^x, l_3^x, \dots, l_n^x\}$ 와 소속함수 $\mu^x = \{\mu_1^x, \mu_2^x, \mu_3^x, \dots, \mu_n^x\}$ 에 의해 특성화된다. 상태 벡터 X가 소속함수와 용어집합에 의하여 $X = \{(x_i, U_i, \{l_1^x, l_2^x, l_3^x, \dots, l_n^x\}, \{\mu_1^x, \mu_2^x, \mu_3^x, \dots, \mu_n^x\}) \mid i = 1, \dots, m\}$ 같이 정의된다.

각 입,출력 소속함수는 식 (1)과 같이 나타내진다

$$\mu_i^x = \begin{cases} 1 + \frac{x - a_i}{a_i - b_i} & : b_i \leq x < a_i \\ 1 + \frac{a_i - x}{c_i - a_i} & : a_i \leq x \leq c_i \\ 0 & : otherwise \end{cases} \quad (1)$$

본 연구에서 설계된 제어기가 그림 2에서 보여진다.

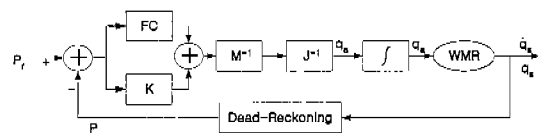


그림 2. PD-Fuzzy 제어기
Fig. 2. PD-Fuzzy controller.

먼저 퍼지시스템(FC)의 최적 출력용어집합을 얻기 위하여 출력용어집합의 원소들이 유전알고리즘에 의해 갱신된다. 그림 3에서와 같이 출력소속함수들의 피라미터들이 염색체에 코딩된다.

chromosome : $[a_1 \mid b_1 \mid c_1 \mid a_2 \mid b_2 \mid c_2 \mid \dots \dots \dots]$

그림 3. 염색체에 대한 소속함수 파라미터들의 할당
Fig. 3. Chromosome coding for fuzzy membership function.

유전알고리즘을 수행하기 위해 개체군 Pini이 그림 3에서 보여지는 형태의 염색체들로 생성된다. 각 소속함수의 중심값과 좌,우폭은 제한된 범위에서 랜덤하게 선택되며 염색체는 실수값으로 초기화된다. 진화에 있어서 보다 효율적 탐색을 위하여 niche 알고리즘과 면역 알고리즘이 적용된다. 개체군 Pini는 여러 개의 부 개체군 Ps_j(i=1,...,z)이 모여 구성된 전체 개체군이 된다. 각 부개체군은 각각의 교배, 돌연변이, 재생산의 과정을 수행한다. 과정이 수행된 후 각 개체군으로부터 최고의 적합도를 갖는 염색체가 각각 선택되며, 각 선택된 염색체에 대하여 적합도(fs_j) 및 적합도의 변화량(Δfs_j = fs_j(n-1)-fs_j(n-1))이 계산된다. 각 부 개체군의 크기를 조절하기 위해 다음의 면역네트워크 방정식이 도입된다.

$$\frac{da_i}{dt} = \left(\sum_{j=1}^z m_{ji} a_j - \sum_{k=1}^z m_{ik} a_k + m_i - k_i \right) a_i \quad (2)$$

$$m_{ki} = vT_{ki}^1 + wT_{ki}^2$$

$$T_{ki}^1 = f_{s_{-i}} - f_{s_{-i}}, (T_{ki}^1 = 0 \text{ if } T_{ki}^1 < 0)$$

$$T_{ki}^2 = \Delta f_{s_{-i}} - \Delta f_{s_{-i}}, (T_{ki}^2 = 0 \text{ if } T_{ki}^2 < 0)$$

$$m_{ji} = vT_{ji}^1 + wT_{ji}^2$$

$$T_{ji}^1 = f_{s_i} - f_{s_i}, (T_{ji}^1 = 0 \text{ if } T_{ji}^1 < 0)$$

$$T_{ji}^2 = \Delta f_{s_i} - \Delta f_{s_i}, (T_{ji}^2 = 0 \text{ if } T_{ji}^2 < 0)$$

식 (2)에서 a_i는 전체 개체군 Pini에서 각 부개체군 Ps_j가 차지하는 비율이며 v, w 는 비례계수이다. 그리고 m_i와 k_i는 적합성 및 자연 감소율을 나타내며 m_{ji}가 적합성을 내포하고 있으므로 m_i=0으로 설정된다. 식(2)에 의해 다음 세대에서의 각 부 개체군의 크기가 결정되며, 각 개체군의 최적염색체 중에서 가장 낮은 적합도를 갖는 부 개체군은 가장 높은 적합도를 갖는 부 개체군과 교배되어 새로 구성되어 진화된다. 설정된 세대에 도달 후 가장 높은 적합도를 갖는 염색체 C(ai_{final}, bi_{final}, ci_{final})가 전체 개체군으로부터 선택되고, ai_{final}, bi_{final}, ci_{final}은 탐색되는 각 소속함수의 좌, 우폭 및 중심값을 나타내며 i의 크기는 각 변수의 소속함수의 개수가 된다. 그림 3의 염색체에서 탐색되는 소속함수의 중심 값(ci_{final}) 및 좌,우폭 (ai_{final}, bi_{final})은 식 (1)에 의해 표현된 소속함수의 중심 위치(ai) 및 왼쪽 중단위치(bi) 그리고 오른쪽 중단 위치(ci)에를 적용하여 bi_{final}=ci-ai, ai_{final}=ai-bi, ci_{final}=ai 와 같이 나타내 질 수 있다. 선택된 최적 염색체로부터 새로운 개체군 Pfirst이 생성된다. Pfirst은

염색체C(ai_{final}, bi_{final}, ci_{final})의 요소들 ai_{final}, bi_{final}, ci_{final}에 대하여 각각의 변이 Δai, Δbi, Δci 만큼의 값이 추가되어 생성된 염색체 C'(ai_{start}, bi_{start}, ci_{start})들로 구성되며, 이 때 변이를 갖지 않는 염색체를 포함한다. 염색체 C(ai_{final}, bi_{final}, ci_{final})로부터 염색체C'(ai_{start}, bi_{start}, ci_{start})에 대한 소속함수의 생성관계가 그림 4에서 보여진다.

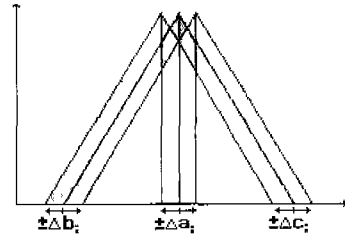


그림 4. 개체군 형성을 위한 염색체의 변이
Fig. 4. Variation of chromosome to generate the new population.

새로운 개체군의 구성이 완료된 후 다시 유전 알고리즘이 수행된다. 유전 알고리즘이 수행되는 동안 교배 점이 염색체에서 단일 지점이 아닌 여러 지점들에서 설정되며 교환되는 인자들의 길이가 1이상의 가변적 길이로 설정되어 교환되는 MPMX (Multi-Partial-Mapped Crossover)이 사용된다. 교배율은 적합도의 변화율을 이용하여 가변적으로 변화된다. 교환되는 인자들의 길이 및 교재지점은 랜덤하게 설정되며, 설정세대에 이룬 후 가장 높은 적합도를 갖는 염색체 C'(ai_{final}, bi_{final}, ci_{final})가 얻어진다. 두 염색체 C'(ai_{final}, bi_{final}, ci_{final})와 C(ai_{final}, bi_{final}, ci_{final})로부터 식 (3)에 의해 퍼지소속함수들 사이의 유사정도(similarity mesure) S(Q,W)가 계산된다.

$$S(Q, W) = \frac{R(Q, W)}{R'(Q, W)} \quad (3)$$

Q,W : fuzzy set

R(Q,W) : cardinality of intersecion of fuzzy sets Q, W

R'(Q,W) : cardinality of union of fuzzy sets Q, W

계산된 유사정도에 근거하여 규칙의 조절이 수행된다. C'(ai_{final}, bi_{final}, ci_{final})에 속한 각각의 소속함수들이 C(ai_{final}, bi_{final}, ci_{final})에 속한 모든 소속함

수들과 하나씩 비교되고 유사정도가 계산되어 $C'(ai_final, bi_final, ci_final)$ 에 속한 모든 각각의 소속함수들은 $C(ai_final, bi_final, ci_final)$ 에 속한 소속함수들의 개수 만큼의 유사정도값들을 가지게 된다.

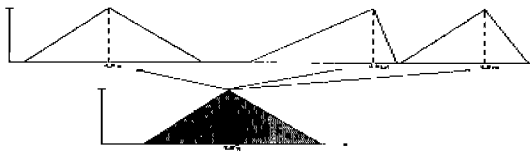


그림 5. 출력용어집합의 원소증가를 위한 유사정도 계산

Fig. 5. Computation of similarity measure to increase the element of output term set.

$C'(ai_final, bi_final, ci_final)$ 에 속한 모든 개개의 소속함수들이 갖은 유사정도 값들 중 각 소속함수별로 최대값을 선택한다. 그리고 선택된 각각의 최대 유사정도 값들에 대하여 설정된 임계치와의 비교가 수행되며, 임계치 이하인 유사정도 값을 지닌 $C'(ai_final, bi_final, ci_final)$ 의 소속함수들이 $C(ai_final, bi_final, ci_final)$ 과 결합되어 새로운 출력용어집합 $CI(ai_new, bi_new, ci_new)$ 이 생성된다.

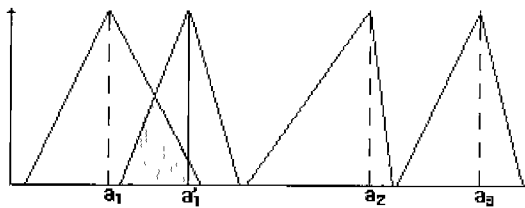


그림 6. 원소가 증가된 출력용어집합

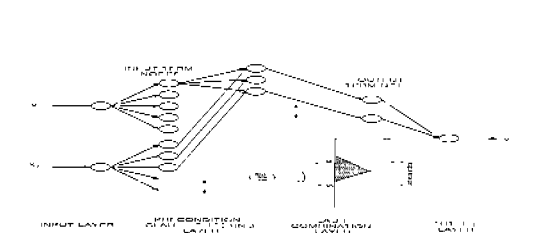


그림 7. 증가된 원소들에 대한 규칙기반의 조절

새로 생성된 출력용어집합 $CI(ai_new, bi_new, ci_new)$ 의 소속함수들 중 $C'(ai_final, bi_final, ci_final)$ 로부터 $C(ai_final, bi_final, ci_final)$ 에 결합되어진 소속

함수에 입력되어지는 값은 $C(ai_final, bi_final, ci_final)$ 의 소속함수들중 결합된 소속함수를 분기시킨 소속함수에 대한 입력 값 중에서 일정 값 이상을 갖는 값들을 갖는다.

출력용어집합 및 규칙의 조절을 위한 과정이 그림 8에 나타내진다.

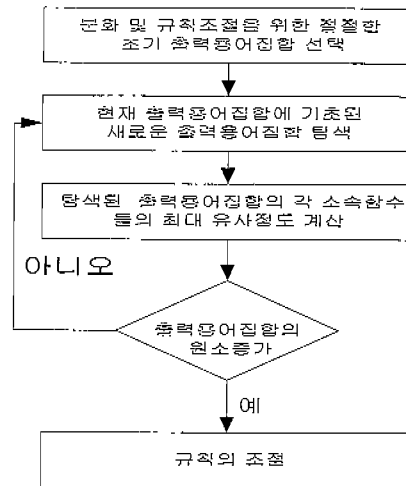


그림 8. 출력용어집합 및 규칙기반의 조절

Fig. 8. Adjustment of output term set and rule base.

III. 최적화 및 시스템 복원

재구성된 퍼지 시스템에 대한 최적성 평가가 수행된다. 검색체 $CI(ai_new, bi_new, ci_new)$ 가 유사정도에 근거하여 원소들이 증가된 출력용어집합에 대한 검색체로서 얻어졌다. 검색체 $CI(ai_new_start, bi_new_start, ci_new_start)$ 가 $C(ai_final, bi_final, ci_final)$ 로부터 $C'(ai_start, bi_start, ci_start)$ 을 생성하는 방법과 유사한 방법에 의해 $CI(ai_new, bi_new, ci_new)$ 로부터 생성된다. 새로운 개체군 $Pnew_second$ 이 생성되어진 $CI(ai_new_start, bi_new_start, ci_new_start)$ 들로 초기화된다. 재구성된 퍼지시스템의 최적성에 대한 평가는 원소가 증가되지 않은 출력용어집합 및 규칙기반을 갖는 퍼지 시스템에 대한 비교로 수행된다. 이를 수행하기 위하여 검색체 $C2(ai_start, bi_start, ci_start)$ 가 검색체 $C'(ai_final, bi_final, ci_final)$ 로부터 앞서와 같은 방법에 의해 생성되고 개체군 $Psecond$ 이 검색체 $C2(ai_start, bi_start, ci_start)$ 들에 의해 초기화된다. 개체군

Pnew_second와 Psecond에 대한 초기화가 수행된 후 유전알고리즘이 각 개체군에 대하여 독립적으로 수행된다. 각 개체군에 대하여 유전알고리즘이 수행될 때 Pnew_second에 대해서는 조절된 규칙이 적용되며, Psecond에 대해서는 조절되지 않은 규칙이 적용된다. 두 개체군이 최종세대에 도달한 후 개체군Psecond와 Pnew_second으로부터 최고의 적합도를 갖는 염색체 C2(ai_final, bi_final, ci_final)와 C1_new(ai_final, bi_final, ci_final)이 선택된다. 그리고 C2(ai_final, bi_final, ci_final)와 C1_new(ai_final, bi_final, ci_final)에 대한 적합도 fc2 와 fc_new이 비교된다. 만약 fc2 > fc_new 이면 염색체 C2(ai_final, bi_final, ci_final)로부터 새로운 개체군Pthird이 생성되고 퍼지시스템에 조절되지 않은 규칙이 적용되어 수행되며, 만약 그 반대일 경우 C1_new(ai_final, bi_final, ci_final)부터 새로운 개체군 Pthird가 생성되고 조절된 규칙이 퍼지시스템에 적용되어 수행된다. 이와 같은 과정의 반복적 수행에 의하여 출력용어집합 및 규칙기반에 대한 최적 해들의 탐색이 수행된다.

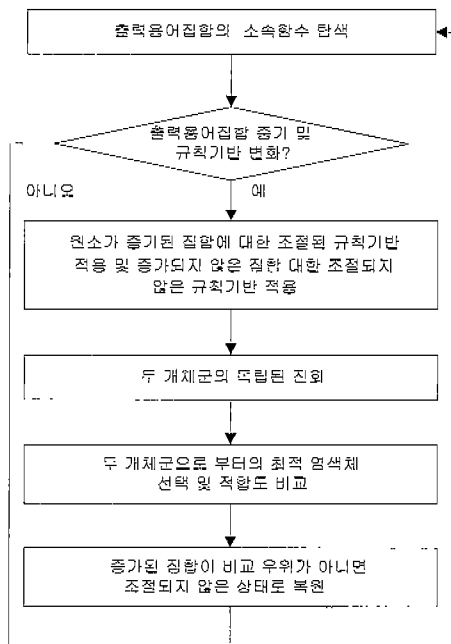


그림 9. 최적화 및 시스템 복원
Fig. 9. Optimization algorithm

IV. 제약조건에 의한 퍼지시스템의 불안정성 감소와 최적 출력 소속함수에 대한 미세 탐색

출력용어집합 및 규칙기반에 대한 최적 해의 탐색에서 수행된 방법과 유사한 방법에 의해 입력소속함수들에 대한 최적 해의 탐색이 수행된다. 먼저 현재 설정되어있는 각 입력소속함수들의 중심 및 좌, 우 쪽의 값들로 이루어진 염색체로부터 앞서 수행되어진 개체군 초기화 방법과 같은 방법에 의해 새로운 염색체들이 생성된다. 그리고 생성된 염색체들로 개체군 Pinput이 초기화된다. 유전알고리즘이 Pinput에 대하여 수행되며 수행되는 동안 입력 언어변수에 대하여 입력의 전 범위에서 소속값이 0이상이 되도록 제약조건이 부과된다. 만약 해를 찾는 과정에서 임의의 소속함수에 대하여 이와 같은 제약조건을 만족시키는 해를 찾지 못한다면 그 소속함수에 한하여 제약조건을 해제시켜 수행한다. 이와 같은 제약조건은 시스템의 불안정성을 줄이기 위하여 설정된다. 만약 어떤 특정 입력에 대하여 시스템의 출력 값이 발생되지 않는다면 제어불능의 상태가 시스템에서 발생할 수 있으며 이는 시스템의 안정성을 떨어뜨릴 수 있다. 물론 이와 같은 제약조건의 설정은 시스템에 대하여 보다 효율적인 제어기 설계에 어려움을 발생시킬 수도 있으나 보다 안정적인 시스템의 구축을 위해 필요 된다. 입력소속함수들의 최적 해에 대한 탐색이 완료된 후 출력소속함수들에 대한 미세탐색이 수행된다. 앞에서 수행된 출력소속함수들에 대한 최적 해의 탐색은 출력용어집합의 원소들의 증가와 그에 수반되는 규칙기반의 조절이 주목적이었으며, 미세탐색은 출력소속함수들의 세밀한 조정을 수행한다. 미세조정을 수행하기 위해 개체군 Poutput이 식 (4)에 의해 생성된 염색체들에 의하여 초기화된다. 식 (4)에서 ϕ_t 는 앞서 수행된 알고리즘에 의해 얻어진 최종 출력소속함수들의 파라미터들로 구성된 염색체이다.

$$\phi_{t+1} = \phi_t + N(0, \sigma) \quad (4)$$

식 (4)에서 $N(0, \sigma)$ 는 평균이 0이며 표준편차 σ 를 갖는 랜덤 가우시안 수(Gaussian number)를 나타내며 진화되면서 편차가 축소된다. Poutput로부터 가장 높은 적합도를 갖는 염색체 Zoutput가 Poutput로부터 선택되며, 식 (3)에 의해 Zoutput로부터 Poutput1이 생성된다. 다시 Poutput1로부터 최고의 적합도를 갖는 염색체 Zoutput1가 선택되고 이와 같은 과정의 반복으로 출력소속함수의 미세탐색이 수행된다. 앞에서 같이 다음세대 개체군 형성을 위해 식 (4)가 적용 될 때 최적 염색

체의 원소들 가운데 선택된 일부만이 새 염색체의 생성에 적용된다.

V. 모의실험 및 고찰

연구되어진 알고리즘의 유효성을 입증하기 위하여 전륜구동 2 자유도 이동로봇에 대하여 모의 실험이 수행되었다. 설정된 좌표 계가 그림 10에서 보이며, 그림에서 보여지는 바와 같이 로봇의 구조적 특성에 의해 로봇의 중심점과 구동의 중심점은 일치하지 않는다.

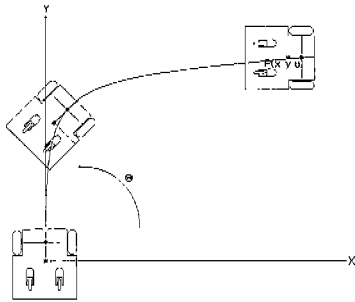


그림 10. WMR의 위치와 방향에 대한 좌표계 설정
Fig. 10. Coordinate assignment for WMR's position and orientation.

그림에서 $P=[x,y,\theta]$ 는 로봇의 기준 좌표계 X, Y 대한 각 실제위치 및 회전각을 나타낸다^{[15][16]}. 설계된 시스템의 전체 블록선도가 그림 11에서 보여진다.

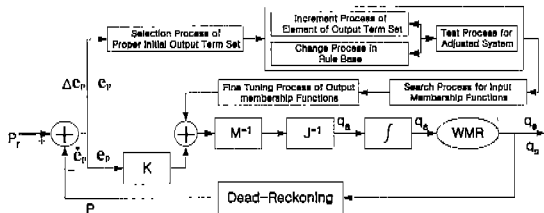


그림 11. 제어기의 전체 블록선도
Fig. 11. Block diagram of the controller.

그림 11에서 보여지는 바와 같이 PD시스템에 대한 입력으로 오차(e_p)와 오차변화율($e_{\dot{p}}$)이 사용되었으며, 퍼지시스템에 대한 입력으로 오차($e_p=Pr(x_r, y_r, \theta_r)-P(x, y, \theta)$)와 오차변화량($\Delta e_p(n) = e_p(n) - e_p(n-1)$)이 사용된다. 퍼지 보상기의 각 입, 출력 변수에 대한 초기 용어집합의 원소의 갯수는 5이며, 각 소속함수들은 독립적으로 제한된 범위에서 랜덤하게 초기화된다. 적용

된 염색체의 길이(length of chromosome)는 입력소속 함수들에 대해 90이며, 출력소속함수들에 대해서는 초기에 45로 설정되었고 출력용어집합의 원소가 증가함에 따라 가변적으로 증가된다. 염색체는 실수값으로 표현되며 개체군의 크기는 90이며 교배율(crossover probability)과 돌연변이율(mutuation probability)은 가변적으로 적용되었다. 진화연산에서 사용되는 적합도 함수(fitness function) $f(t)$ 가 식 (5)에서 제시되며 점증적 수렴성을 높이기 위하여 $b(t)$ 와 $d(t)$ 는 초기치의 1.2배로 끝나는 단조증가 함수로 구성하였다.

$$f(t) = \frac{1}{E(t)} \tag{5}$$

$$E(t) = \sum_{l=0}^{t-1} ((a + e_p(l))b(t) + (c + e_v(t))d(t))$$

a, c : constant weighting factor
 $b(t), d(t)$: time-varying weighting factor
 $e_v(t)$: velocity error

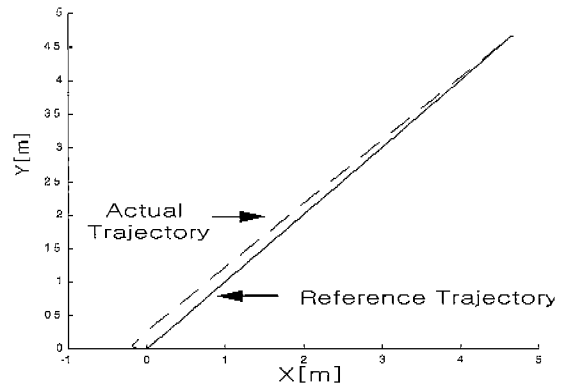


그림 12. 대각선기준궤적에 대한 로봇의 실제궤적
Fig. 12. Real trajectory of robot along diagonal reference trajectory.

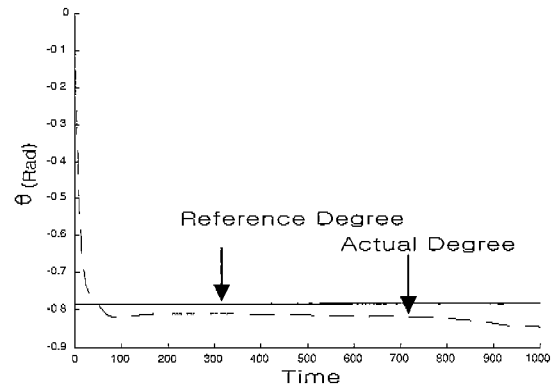


그림 13. 대각선 기준궤적에 대한 로봇의 방향각
Fig. 13. Orientation angle of robot along diagonal reference trajectory.

구름 이동 로봇에 대한 모의실험 결과가 대각선 기준 궤적에 대해 실험 그림 12부터 그림 15까지 보여진다. 기준 궤적의 전체 거리는 6.6 [m]이며, 최대속도는 X, Y에 대해 각각 0.465 m/sec다. 전체 주행시간은 13초이며, 가속 및 감속 시간은 각각 2초이다. 기준 궤적의 시작점과 종점은 각각 $P_r=[0, 0, -45^\circ]$ 과 $P_r=[4.67, 4.67, -45^\circ]$ 이며 로봇의 시작점은 $P=[0, 0, 0^\circ]$ 이다.

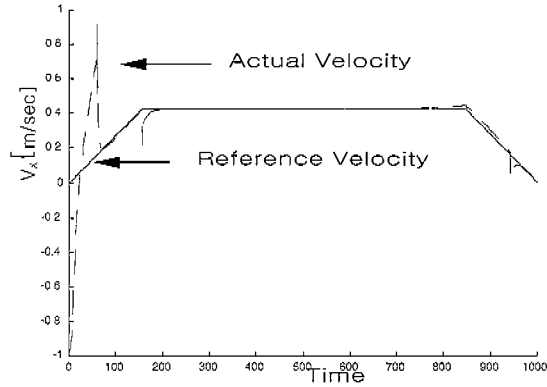


그림 14. 대각선 기준 궤적에 대한 로봇의 X방향 속도
Fig. 14. Robot velocity of X-axis along diagonal reference trajectory.

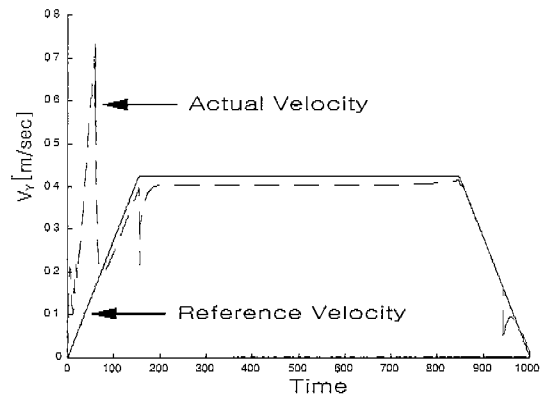


그림 15. 대각선 기준 궤적에 대한 로봇의 Y 방향 속도
Fig. 15. Robot velocity of Y-axis along diagonal reference trajectory.

대각선 기준 궤적에 대한 실험 결과들은 실제 궤적이 기준 궤적에 적절히 수렴되어짐을 보여준다. 또한 속도에 있어서 초기에 다소 불안정성이 발생되지만 방향과 위치가 수렴되어짐에 따라 속도가 수렴된다. X 방향에 대한 초기 음의 속도는 초기에 설정된 방향 각 오차에 따른 로봇의 회전 때문에 자연적으로 발생되며, 로봇

의 회전의 중심점과 설정된 좌표계의 중심점간의 차이에 비례된다.

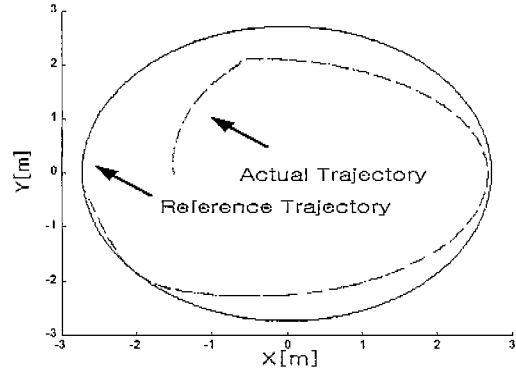


그림 16. 원형 기준 궤적에 대한 로봇의 실제 궤적
Fig. 16. Real trajectory of WMR for round shape reference trajectory.

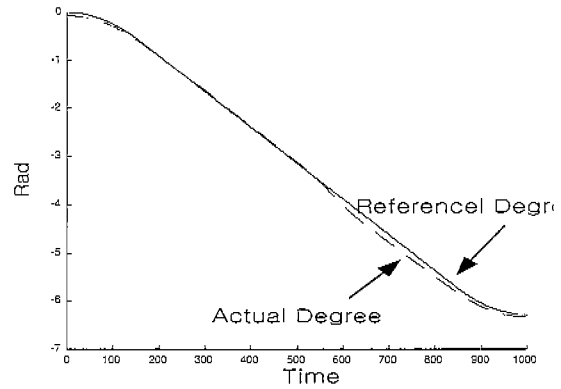


그림 17. 원형 기준 궤적에 대한 로봇의 회전각
Fig. 17. Rotation angle of robot for round shape reference trajectory.

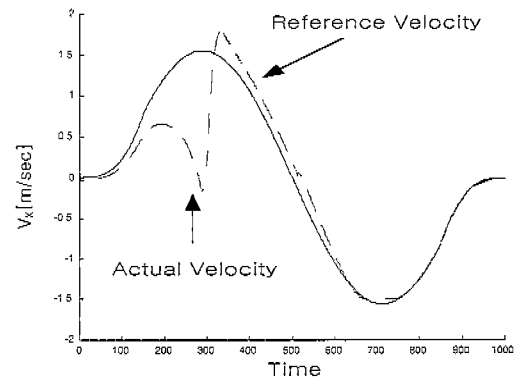


그림 18. 원형 기준 궤적에 대한 로봇의 X 방향 속도
Fig. 18. X-velocity of robot for round shape reference trajectory.

원형기준궤적에 대한 실험결과가 그림 16부터 그림 19에서 보여진다. 기준궤적의 반지름은 2.725 [m]이며, 그 최대 회전속도는 0.57 rad/sec이다. 전체 주행시간은 13초이며, 가속 및 감속 시간은 각각 2초이다. 기준궤적의 시작점과 종점은 각각 $Pr=[-2.725, 0, 0]$ 과 $Pr=[-2.725, 0, -360]$ 이다. 로봇의 시작점은 $P=[-1.5, 0, 0]$ 이다.

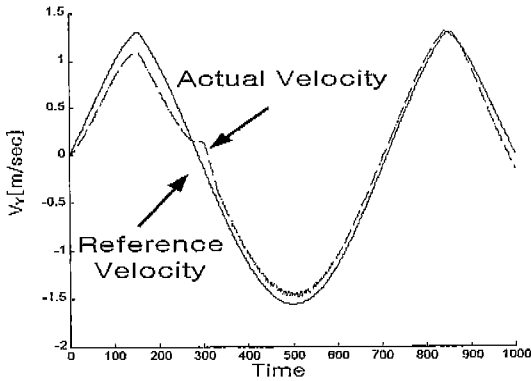


그림 19. 원형기준궤적에 대한 로봇의 Y 방향 속도
Fig. 19. Y-velocity of robot for round shape reference trajectory.

원형궤적에 대한 실험 결과들은 대각선에 대하여 수행된 실험 결과와 유사한 결과를 보여준다. 초기에 설정된 위치와 방향에 의해 궤적 및 X 방향의 속도가 안정되지 않은 모습을 보여주나, 시간이 흐름에 따라 속도가 안정화되며 수렴된다. Y 방향 속도성분은 초기에 일치된 위치와 방향에 의해 안정된 수렴을 보여준다.

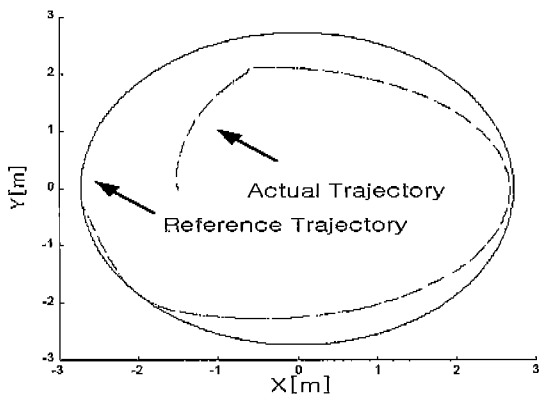


그림 20. 원형기준궤적에 대한 로봇의 실제궤적
Fig. 20. Real trajectory of WMR for round shape reference trajectory with general PD-Fuzzy controller using genetic algorithm.

소속함수의 증가를 갖지 않는 유전 알고리즘을 이용한 Fuzzy-PD 제어기에 의한 모의실험 결과가 원형기준궤적과 대각선기준궤적에 대해 그림 20과 그림 21에서 보여진다.

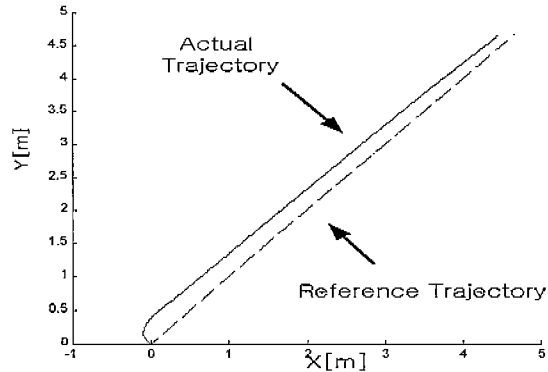


그림 21. 대각선기준궤적에 대한 로봇의 실제궤적
Fig. 21. Real trajectory of robot along diagonal reference trajectory with general PD controller using genetic algorithm.

수행된 실험에서 원형궤적과 직선궤적 모두에 대하여 제안된 알고리즘에 의한 모의실험 결과와 비교하여 소속함수의 증가를 갖지 않는 유전 알고리즘을 이용한 Fuzzy-PD 제어기 및 일반적인 PD 제어기가 안정적 수렴이 낮게 나타남을 보여주고 있다.

VI. 결론

본 논문에서는 PD 시스템과 퍼지시스템이 결합된 2 자유도 구륜 이동 로봇의 제어기가 설계되었으며, 유전 알고리즘에 기초한 퍼지 시스템의 최적화 알고리즘이 제안되었다. 제안된 알고리즘에서는 유전알고리즘을 기존의 퍼지 신경망 모델과 결합시켜 유사정도에 근거한 새로운 소속함수의 추가를 수행하였으며 경쟁적 비교 우위에 의한 방법을 통해 퍼지 시스템의 최적화를 수행하였다. 이와 같은 방법에 의해 기존의 잉여노드의 문제 및 특정 디퍼지화 방법 요구 그리고 초기 설정된 소속함수집합에 대한 새로운 소속함수의 추가 불가능 등의 문제에 종속되지 않고 퍼지시스템을 최적화 시킬 수 있었다. 또한 해의 효율적인 탐색을 위해 면역알고리즘을 이용한 새로운 niche 알고리즘을 제안하였다. 제안된 알고리즘의 유효성 검증을 위해 구륜 이동 로봇에 대한 모의실험이 수행되었고, 그 실험결과들로부터

터 제안된 알고리즘의 타당성이 입증되었다. 그러나 제안된 알고리즘에 의한 시스템의 최적화의 수행에서 변수들의 수가 너무 많고 그 복잡성이 커서 시스템의 효율적 조절이 어려워 진체 시스템의 안정적인 최적화가 적절하게 이루어지지 않는다. 이를 해결하기 위해 제안된 알고리즘에 대한 전체적인 간략화에 대한 연구가 수행 되어야 하며, 간략화 된 알고리즘에 기초한 이동 로봇의 실시간 처리를 위한 연구가 향후 연구과제로서 남겨진다.

참 고 문 헌

- [1] C. samson and K. Ait-Abderrahim, "Feedback control of nonholonomic wheeled cart in cartesian space", Proc. 1991 int. Conf. Robot Auto., pp. 1136-1141, Apr. 1991.
- [2] Y. Zhao, "Theoretical and Experimental Studies of Mobile Robot Navigation", Ph.D. thesis, the University of Michigan, 1991.
- [3] J. Barraquand and J. C. Latomber, "On nonholonomic mobile robots and optimal maneuvering", 4th Int. Conf. Intelligence Conf., Albany, NY., 1989.
- [4] George J. Klir and Bo Yuan, Fuzzy Sets and Fuzzy Logic Theory and Applications Prentice-Hall, 1995.
- [5] D. Driankov and H. Hellendoorn and M. Reinfrank, An Introduction To Fuzzy Control, Springer, New York, 1996.
- [6] Madan M. Gupta and Naresh K. Sinha, Intelligent Control Systems, IEEE Press, 1996.
- [7] J-S. R. JANG and T.-C. SUN, Neuro-Fuzzy and Softcomputing, Prentice Hall, 1997.
- [8] Gregory V. TAN and Xiheng HU, "On Design Fuzzy Controller using Genetic Algorithm", in Proc., 5th IEEE Int. Conf. Fuzzy System, pp. 905 - 911, 1996.
- [9] J. L. Castro, "How many rules are necessary to get a good fuzzy controller for control problem?", in Proc., 6th IEEE Int. Conf. Fuzzy System, pp. 749 - 754, 1997.
- [10] J. Qiu, Michael Walters. "Learning of Membership Function of Fuzzy Behaviours for a Mobile Robot Control System", in Proc., the 1997 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robot and Systems, pp. 772-777, 1997.
- [11] Chin-chih Hsu, Shin-ichi Yamada, Hideji Fujikawa, Koichiro Shida, "A Multi-Operator Self-Tuning Genetic Algorithm for Fuzzy Control Rule optimization", in Proc., 5th IEEE Int. Conf. Fussy System, pp. 842-847, 1996.
- [12] Lin. C. T., "Neural Fuzzy Control Systems with Structure and Parameter Learning", Fuzzy Set Syst. vol 70, pp.183-212, 1995.
- [13] Nauck, D. and R. Kruse., "A fuzzy neural network learning fuzzy control rules and membership functions by error back propagation." Proc. IEEE Int. Conf. Neural Networks, vol 2, pp. 1022- 1027, 1993.
- [14] Joao Pedro Pedroso, "Niche Application in Vehicle Routing". Proceedings of the IEEE international Conference on Evolutionary Computation, pp. 177-182, 1998.
- [14] A. Ishiguro, Y. Watanabe and Y. Uchikawa: Dynamic Behavior Arbitration of Autonomous Mobile Robots Using Immune Networks, Proc. of ICEC'95, vol. 2, pp. 722-727, 1995.
- [15] Yong Oug Chung and Chong-Kug Park, "Position, Orientation, and Velocity Feedback Control Algorithm for Differential Mobile Robot" Jurnal of The Korea Institute of electromatics and Electronics, vol 34s, pp.657-690, 1997.
- [16] Sung-Hoe Kim, Chong-Kug Park, Fumio Harashima, "Adaptive Fuzzy Controller Design for Trajectory Tracking of a 2 D.O.F. Wheeled Mobile Robot Using Genetic Algorithm", in Proc., IEEE/RSJ Int. Conf. Intelligent Robots And Systems, vol. 3, pp. 1584-1589, 1998.

저 자 소 개



金聖會(正會員)

1993년: 경희대학교 전자공학과 졸업(공학사). 1995년: 경희대학교 전자공학과 대학원졸업(공학석사). 1995년 ~ 현재 : 경희대학교 전자공학과 박사과정. 관심분야: 최적제어, 퍼지-신경망, 진화이론, 면역이

론 등

金棋烈(正會員) 電子工學會 論文誌 S編 參照

林虎(正會員) 電子工學會 論文誌 S編 參照

朴鍾國(正會員) 電子工學會 論文誌 S編 參照