

## 구륜 이동 로봇의 경로 추적을 위한 Fuzzy-Genetic Controller 설계

### Design Fuzzy-Genetic Controller for Path Tracking in Wheeled-Mobile Robot

°김상원\*, 김성희\*, 박세승\*\*, 박종국\*

\*경희대학교 전자공학과(Tel: +82-331-280-2523; Fax: +82-331-281-9600; E-mail: kswfuzzy@hanmail.net)

\*\*조선대학교 전자공학과(Tel: +82-62-230-7184)

**Abstracts** In this paper, the fuzzy-genetic controller for path-tracking of WMRs is proposed. Fuzzy controller is implemented to adaptive adjust the crossover rate and mutation rate, and genetic algorithm is implemented to adaptive adjust the control gain during the optimization. The computer simulation shows that the proposed fuzzy-genetic controller is effective.

**Keywords** Fuzzy controller, Genetic Algorithm, Crossover rate, Mutation rate

#### 1. 서론

현재 산업현장에서 사용되고 있는 매니플레이터는 작업 반경의 제약으로 인해 작업수행에 한계를 가지고 있다. 이러한 단점을 극복하기 위하여 주행기능을 갖춘 구륜이동로봇에 대한 연구가 이루어지고 있다. 구륜이동로봇에 대한 연구방향은 수학적 모델링, 동작 및 경로설계, 위치추정에 대해 이루어지고 있다. 그러나 이러한 방법은 수학적 모델링이 어렵고, 환경에 대한 적응력이 떨어진다. 본 논문의 모의실험에서 사용된 control rule은 유효한 이득값을 찾는 것이 어렵고, 많은 시행착오가 필요하며 목적위치(designed position)가 변경될 경우 다시 이득값을 찾아야 하는 어려움이 있다. 따라서 본 논문에서 이러한 단점을 개선하기 위해 퍼지 논리와 유전 알고리즘을 사용하여 control rule에 사용되는 이득값을 계속 조정하므로써 목적제적에 대한 정확한 경로추적을 하도록 하였다.

#### 2. 구륜이동로봇의 구조 및 오차

##### 2.1 구륜이동로봇의 구조

본 논문에서 연구되어진 4륜 구륜이동로봇의 좌표할당은 그림 1과 같다. 2개의 전륜은 구동구륜이고, 2개의 후륜은 구륜이동로봇의 안정을 위한 보조구륜이다. 구륜이동로봇의 방향전환은 두 개의 독립적인 구동구륜의 속도차에 의해 이루어진다.

구륜이동로봇의 위치는  $X=(x, y, \theta)$ 로 표현된다. 여기서  $(x, y)$ 는 제어점(controlled-point)의 직각좌표이며,  $\theta$ 는 기준좌표계의 x축에 대한 구륜이동로봇의 x축의 방향각을 나타낸다.

구륜이동로봇은 평지에서 이동하며, 구륜의 변형과 미끄러짐이 발생하지 않는 것으로 가정한다.

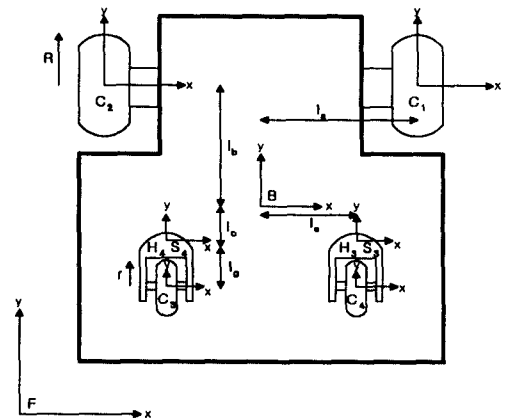


그림 1 구륜이동로봇의 좌표 할당

Fig. 1 The coordinate assignment for wheeled-mobile robot

##### 2.2 오차에 대한 정의(Error Posture)

기준제적에 대한 위치오차  $P_e=(x_e, y_e, \theta_e)^T$ 는 다음과 같이 정의된다.(그림 2)

$$P_e = \begin{bmatrix} x_e \\ y_e \\ \theta_e \end{bmatrix} = T_e(P_r - P_c) = \begin{bmatrix} \cos \theta_c & \sin \theta_c & 0 \\ -\sin \theta_c & \cos \theta_c & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_r - x_c \\ y_r - y_c \\ \theta_r - \theta_c \end{bmatrix} \quad (1)$$

여기서  $T_e$ 는 기준좌표계에 대한 위치오차의 변환 행렬이다. 경로추적 제어기의 목적은 위에서 정의한 오차가 0으로 수렴하게 하기 위한 것이다.

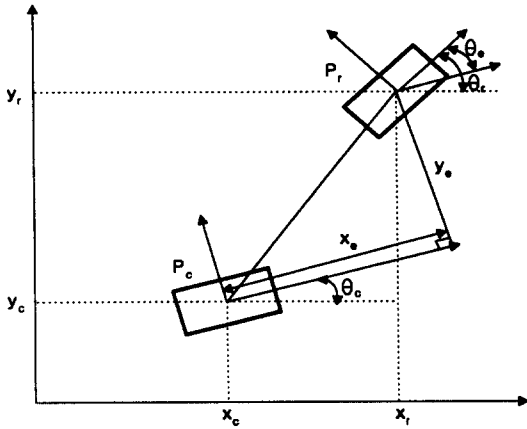


그림 2 위치 오차  
Fig. 2 Position error

### 3. 제어기 구성

#### 3.1 퍼지 제어기(Fuzzy Controller)

퍼지 제어기의 입력변수는 매 샘플링 시점마다 기준 위치와 현재 위치의 오차(Pe)와 오차변화량( $\Delta Pe$ )으로부터 결정되고 "IF-THEN 형식"의 언어적인 규칙으로 표현된다. 퍼지 규칙(fuzzy rule)에서 추론된 최종적인 결론값은 비퍼지화(defuzzifier)과정을 통해 교배률(crossover rate:Cr)과 돌연변이율(mutation rate:Mr)을 결정하여 유전 알고리즘의 입력값으로 사용한다.

본 모의실험은 계산이 용이하고 데이터 메모리의 크기를 줄일 수 있는 이산적인 삼각형의 멤버십 함수(membership function)를 사용하였다. 여기에서 사용한 언어적 값에 대응되는 각각의 이산 멤버십 함수는 표 1과 같다.

표 1 언어적 변수에 대한 이산 멤버십.

TABLE 1 Discrete Membership for Linguistic Variable.

| Level $\mu$ | NB  | NS  | ZO  | PS  | PB  |
|-------------|-----|-----|-----|-----|-----|
| -2          | 1.0 | 0.5 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| -1          | 0.5 | 1.0 | 0.5 | 0.0 | 0.0 |
| 0           | 0.0 | 0.5 | 1.0 | 0.5 | 0.0 |
| 1           | 0.0 | 0.0 | 0.5 | 1.0 | 0.5 |
| 2           | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.5 | 1.0 |

여기서 NB : Negative Big, NS : Negative Small, ZO : Zero, PS : Positive Small, PB : Positive Big,  $\mu$  : 멤버십 함수

퍼지 제어기의 입력값의 양자화는 5단계(-2,-1,0,1,2)로 하고 시행착오를 거쳐 교배률과 돌연변이율에 대한 각각 25개의 제어 규칙을 구성하였다. 추론과 비퍼지화를 통해 산출된 값이 교배률(Cr)의 경우  $0.4 \leq Cr \leq 1.2$  사이에 있으며, 돌연변이율(Mr)의 경우  $0.002 \leq Mr \leq 0.015$  사이에 있다.

이것은 오차와 오차율이 증가하면 유전 알고리즘에서의 교배와 돌연변이가 일어날 확률이 증가되어 전체 최소화점(global minimum)을 찾게하고, 그 반대인 오차와 오차율이 감소하면 교배와 돌연변이가 일어날 확률이 감소되므로써 최적해를 빠르게

찾게 한다.

#### 3.2 유전 알고리즘(Genetic Algorithm : GA)의 적용

유전 알고리즘은 진화 메커니즘인 적자생존 원리를 모방하여 최적화를 목적으로 만들어진 알고리즘이다. 집단에 기초한 이 알고리즘은 확률적 최적화 기법으로 최적화 문제의 형태를 알지 못하는 상태에서 해를 구해나가는 것으로 기존의 고전적인 최적화 방법과 비교할 때, 복잡한 문제의 해결에 우수한 성능을 기대할 수 있다. 모의 진화형의 탐색 알고리즘의 성격을 갖고 있는 유전 알고리즘들은 다음과 같은 연산자들로 특징화 될 수 있다.

$$GA = \{ S, C, M, FF \}$$

여기서, S, C, M, FF는 선택(selection) 연산자, 교배(crossover) 연산자, 돌연변이(mutation) 연산자 종류와 최적화 평가 함수(fitness function) 형태에 해당된다.

유전 알고리즘에서 선택, 교배와 돌연변이 연산자들은 평가 함수 FF에 대한 해집단의 평균 적합도(fitness)를 점진적으로 증가시키는 기능을 수행하며, 해집단의 갯수는 전역 최대치를 찾는 데 결정적인 역할을 한다.

본 논문에서의 유전 알고리즘은 연속 공간상에서 연속 연산자를 사용한다. 선택 연산자로 표준 roulette wheel 연산자를 사용하고, 교배 연산자는 퍼지 제어기에서 교배률을 입력 받아 교배 순서를 고려하지 않는 단순 교배 방식, 돌연변이기는 퍼지 제어기에서 돌연변이율을 입력 받아 미세 조정 및 잃어버린 유전형질을 복구하기 위한 연산자로 사용한다.

본 모의실험에서는 퍼지 제어기에서 교배률과 돌연변이율을 받아 control rule에서의 이득값을 찾는데 사용될 매개변수들 다음과 같이 정의한다.

$$P = [K_{11}, K_{21}, \dots, K_{1j}, K_{2j}, \dots, K_{1n}, K_{2n}]^T \in E_p \quad (2)$$

여기서,  $j \in \{1, 2, \dots, n\}$ ,  $E_p = [P_{\min}, P_{\max}]$ 는 실수 매개변수 벡터들의 사전에 설정된 공간이다. 매개 변수 벡터 P로부터 다음과 같은 평가 함수 FF를 최대화하는 최적화 문제를 고려 할 수 있다.

$$\text{MAX } FF(P) \quad (3)$$

$$P \in E_p$$

여기서, FF는 해벡터 P의 적합도를 계산하는 평가 함수로서 다음과 같다.

$$FF(P) = \frac{1}{((e-P)^2 + 1)} + \frac{1}{((\Delta e - P)^2 + 1)} \quad (4)$$

여기서, e,  $\Delta e$ 는 실제 궤적과 기준 궤적의 오차와 오차변화량이다.

실제 궤적과 기준 궤적의 사이의 오차를 0으로 수렴시키는 매개변수 벡터 P를 찾는 유전 알고리즘은 다음과 같이 요약될 수 있다.

##### [단계 1] 초기 매개변수 구성

초기 시간  $t=0$ 에서 일정한 범위 내에서 임의로 선정된 부모 매개변수 벡터들의 집단  $P_0^1, P_0^2, \dots, P_0^i, \dots, P_0^N$ 을 구성한다.

##### [단계 2] 선택(Selection)

임의의 시간 t에서 각 부모 벡터  $P_k^1, P_k^2, \dots, P_k^i, \dots, P_k^N$ 들이 주어졌을 때 다음과 같은 확률에 의해 매개변수 벡터  $P_k^1, P_k^2, \dots, P_k^i, \dots, P_k^N$ 를 선택한다.

$$P_i = \frac{FF(P'_i)}{\sum_{j=1}^N FF(P'_j)} \quad (5)$$

여기서,  $P_i$ 는 선택 확률,  $i=1,2,\dots,N$

[단계 3] 교배(Crossover)

$P'_k, P'_k, \dots, P'_k, \dots, P'_k$ 로부터 같은 임의로 두 개의 벡터를 선택하고, 퍼지제어기에서 입력된 교배율과 roulette wheel method를 사용하여 생존할 확률에 따라 비교해서 교배를 수행하여 한 개의 매개 변수  $P'_k$  벡터를 생성한다. 여기서 교배의 수행 여부는 flip function으로 결정한다. 즉, tossing a biased coin. 이것은 선택된 부모세대사이의 빠른 정보 교환으로 속도를 향상시킬 수 있다.

[단계 4] 돌연변이(Mutation)

매개 변수 벡터  $P'_k$ 로부터 다음과 같은 비정형 돌연변이 연산자에 의해 다음 세대를  $P'_{k+1}$ 를 생성한다. 돌연변이는 연산은 flip function과 돌연변이 확률(mutation probability rate)로 결정된다. 그리고 돌연변이는 자동적으로 퍼지 제어기를 기초로 두고 최적화 과정에서 수행된다. 이것은 돌연변이 확률에 따라 유전자의 값을 임의로 랜덤하게 바꾸는 과정이다. 이 돌연변이 연산은 지역 최소화(local minimum)가 전체 최소화(global minimum)로 잘못 간주될 가능성을 없애주는데 크게 도움을 주며, 돌연변이 연산은 조기 수렴 방지가 그 주목적이 된다.

[단계 5] 평가 함수  $FF(P_{k+1})$ 에 의해 적합도를 계산한다.

$FF(P_{k+1})$ 가 수렴할 때까지 위 [단계 2]~[단계 5]를 반복 실행한다.

#### 4. 위치추적

구륜이동로봇의 위치는 dead-reckoning 알고리즘을 이용하여 추정한다. dead-reckoning 알고리즘은 실시간에 구륜이동로봇의 위치를 결정하기 위한 것으로 각각의 샘플링 구간에서 위치의 증분을 전단계에서의 위치에 더함으로써 이루어진다. 시간  $t=(n-1)T$ 에서  $t=nT$ 까지의 샘플링 구간에서 구륜이동로봇의 이동거리와 방향각의 증분은 각각  $\Delta D_k$ 와  $\Delta \theta_k$ 이라 할 경우, 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\Delta D_k = \frac{R\Delta\omega_{1k} + R\Delta\omega_{2k}}{2} T \quad (6)$$

$$\Delta \theta_k = \frac{r\Delta\omega_{1k} - r\Delta\omega_{2k}}{2l_b} T \quad (7)$$

이를 이용하여 시간  $t=nT$ 에서 구륜이동로봇의 위치를 구하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} x[k+1] &= x[k] + \Delta D[k] \cos(\theta[k] + \Delta\theta[k]/2) \\ y[k+1] &= y[k] + \Delta D[k] \sin(\theta[k] + \Delta\theta[k]/2) \\ \theta[k+1] &= \theta[k] + \Delta\theta[k] \end{aligned} \quad (8)$$

#### 5. 제어기의 설계

구륜이동로봇이 기준궤적을 이탈없이 경로오차를 최소화하며 신속히 추적하는 것이 제어기의 목적이다. 제어시스템의 블록 선도는 그림 3과 같다. 여기에서 사용된 control rule 다음과 같다.

$$q = \begin{bmatrix} v(p_e, q_r) \\ \omega(p_e, q_r) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_r \cos \theta_e + k_1 x_e \\ \omega_r + v_r (k_2 y_e + k_3 \cos \theta_e) \end{bmatrix} \quad (9)$$

여기서  $k_1, k_2, k_3$ 는 이득 값이며  $k_1 = k_1 + \Delta k_1$ ,  $k_2 = k_2 + \Delta k_2$ ,  $k_3 = 2\sqrt{k_2}$ 이다.

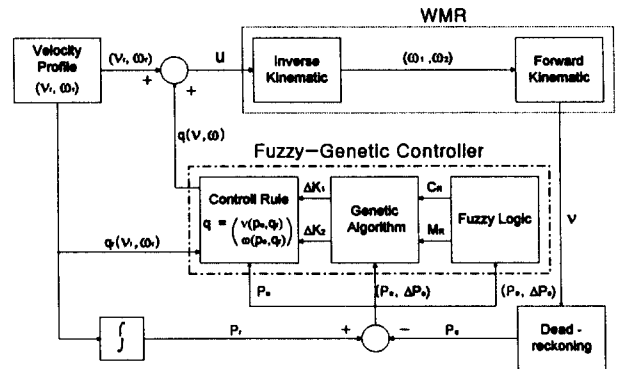


그림 3 제어기의 블록선도

Fig. 3 The block diagram of controller

#### 6. 모의 실험 및 고찰

제어 알고리즘의 효율성과 경로추적의 정확성을 증명하기 위하여 모의 실험을 수행한다. 구륜이동로봇의 초기 위치는 각각 두 곳에서 실행하고, 구륜이동로봇이 추적해야할 기준궤적은 시작점(0, 0, 45°)에서 사선으로 일정하게 x, y축으로 증가하여 종점(10, 10, 45°)으로 가는 것이다. 모의 실험에 이용된 구륜이동로봇의 자원과 사용된 매개변수는 표 2과 같다.

표 2. 구륜이동로봇의 자원 및 매개변수

Table 2. Resource and parameters of WMRs

| 기호    | 수치값   | 단위 | 내용        |
|-------|-------|----|-----------|
| $l_a$ | 0.225 | m  | 본체 폭/2    |
| $l_b$ | 0.25  | m  | 본체 길이/2   |
| $l_c$ | 0.225 | m  | 보조구륜의 y변위 |
| $l_d$ | 0.115 | m  | 구동구륜의 z변위 |
| $l_e$ | 0.125 | m  | 보조구륜의 x변위 |
| $l_f$ | 0.15  | m  | 보조구륜의 z변위 |
| R     | 0.05  | m  | 구동구륜의 반경  |
| r     | 0.025 | m  | 보조구륜의 반경  |

모의실험에서 첫번째 경우는 초기 위치가 (0.5,0,0°)에서부터 출발하여 기준궤적을 추적하고, 두번째 경우는 처음 위치가 (0,-0.5,0°)이다. 이 두 경우를 볼 때 초기 위치가 어디에 있는지 상관없이 기준궤적을 훌륭히 추적함을 볼 수 있다.

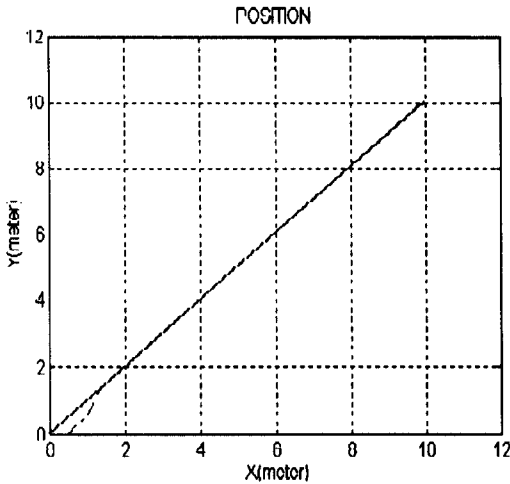


그림 4 1경우의 경로 추적  
Fig. 4 The path-tracking for first case

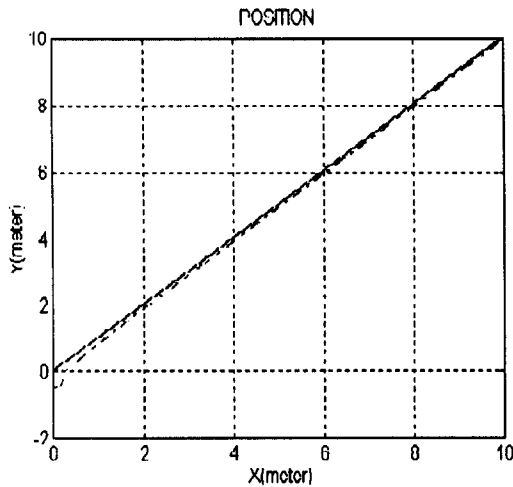


그림 5 2경우의 경로 추적  
Fig. 5 The path-tracking for second case

### 7. 결론

본 논문에서는 4륜 2자유도 구륜이동로봇의 경로추적을 위한 퍼지-유전 제어기를 설계하였다. control rule에 사용된 이득값을 유전 알고리즘으로 이득값을 조정하므로써 경로 추적에서의 오차를 감소시킬 수 있다. 통상 유전 알고리즘에서는 지역 최소점으로서의 수렴 방지를 위하여 돌연변이의 확률을 높이고 그에 따라 전체적인 수렴 속도가 떨어지는 문제점을 갖고 있는데 반하여, 본 논문에서는 퍼지 제어기를 사용하여 위치 오차에 따라서 교배률과 돌연변이율을 조정함으로써 우량개체들을 종속시키고, 환경에 따라 신속하게 수렴시키는 제어기를 설계하였다. 이 논문에서 제시된 퍼지-유전 알고리즘 제어기를 이용한 모의실험을 통해 제어기의 유용성을 제시한다.

- [1] B.G.Hu, G.K.I. Mann and R.G.Gosine, "Theoretic and Genetic Design of a Three-Rule Fuzzy PI Controller", *FUZZ-IEEE*, pp.489-496, 1997.
- [2] Y.Kanayama, Y.Kimuro, F.Miyazai, T.Noguchi, "A Stable Tracking Control Method for an Autonomous Mobile Robot", *IEEE Trans. Robotics and Auto.*, pp.384-389, 1990.
- [3] G.J.Klir and B.Yuan, *Fuzzy Sets and Fuzzy Logic Theory and Application*, Prentice Hall, USA, 1995.
- [4] Z.Michalewicz, *Genetic Algorithms + Data Structures = Evolution Programs*, Springer-Verlag, USA, 1995.
- [5] C.Samson and K.Ait-Abderrahim, "Feedback Control of a Nonholonomic Wheeled Cart in Cartesian Space", *ICRA*, pp.1136-1141, 1991.
- [6] P.Y.Wang, G.S.Wang, Y.H.Song and A.T.John, "Fuzzy Logic Controlled Genetic Algorithms", *FUZZ-IEEE*, pp.972-979, 1996.
- [7] S.T.Welstead, *Neural Network and Fuzzy Logic Application in C/C++*, Wiley Professional Computing, USA, 1994.
- [8] Y.F.Zheng, *Recent Trends in Mobile Robots*, World Scientific, USA, 1993.
- [9] 강대회, 허경무, "유전 알고리즘을 이용한 이동 로봇의 경로 선택에 관한 연구", *대한전기학회 논문지*, 46권, pp.791-799, 1997.
- [10] 최영길, 김성현, 심귀보, 전홍태, "유전 알고리즘과 퍼지 논리 시스템을 이용한 비선형 시스템의 피드백 선형화 제어", *대한전자공학회 논문지*, 34권, pp.320-328, 1997.