

Flexible Manipulator를 위한 유전 알고리즘을 이용한 퍼지 제어기 설계

Design of Fuzzy Logic Controller Using Genetic Algorithms for the Flexible Manipulator

°허남* , 이기성**

*홍익대학교 대학원 전기제어공학과(Tel:+82-2-320-1493;Fax:+82-2-320-1110;E-mail:vaps@unitel.co.kr)

**홍익대학교 전자전기공학부(Tel:+82-2-320-1670;Fax:+82-2-320-1110;E-mail:kslee@wow.hongik.ac.kr)

Abstracts A position control algorithm for a flexible manipulator is studied. The proposed algorithm is based on a fuzzy theory with a Steady State Genetic Algorithm(SSGA). The conventional fuzzy methods need expert's knowledges or human experiences. The SSGA, which is one of the optimization algorithms, tunes automatically the input-output membership parameters and fuzzy rules. The computer simulation is presented to illustrate the approaches. Finally we applied a fuzzy theory with a SSGA to a position control of a flexible manipulator.

Keywords Flexible Manipulator, Fuzzy Theory, SSGA, Tuning

1. 서 론

현재 무인 운반차나 스스로 작업 위치를 찾아갈 수 있는 자율 주행 운반체의 경우 안내로봇, 혹은 단순한 운반 수단으로만 사용되나, 극한 조건에서 인간의 일을 대신하기 위해서 자율 주행 운반체에 Manipulator를 장착한다. 그러나 무겁고 장착이 어렵고, 운반효율도 낮은 기존의 Manipulator에 비해 Flexible Manipulator는 가볍고 싸고, 운행속도가 빠른 장점이 있으나, 운동방정식이 복잡해서 제어하기가 까다롭다는 단점이 있다.

Flexible Manipulator는 비선형적인 특성을 가지고 있어서 일정 이득의 PID제어기로는 잘 제어하기 어렵고, 이득조정의 적용 제어는 시스템이 고차의 차수이고, 매개변수의 수가 증가시 계산이 복잡하고 많은 계산시간이 요구된다. 그리고, 신경망을 이용한 제어방식은 학습시간의 길다는 점과 국부수렴의 단점을 가진다[1][2].

퍼지 제어기의 경우 운동방정식을 정확히 모른다고 하더라도 작업을 능동적으로 수행할 수 있고, 환경 변화에 능동적으로 대처할 수 있는 장점이 있다[3][4]. 반면, 퍼지제어는 퍼지추론시 멤버쉽 함수의 형태, 퍼지규칙에 의해 제약을 받고, 이것을 인간의 지식 등에 의존해서 결정, 동조해야 하는 단점을 지니고 있다. 이것을 보완하고자 유전 알고리즘을 이용하여 멤버쉽 함수,

퍼지규칙의 개수와 최적치를 자동으로 조정하고자 한다. 또, 본 논문에서는 Flexible Manipulator제어기를 제안된 이론으로 설계하고, 기존의 제어 방식과 성능을 비교한다.

2. Flexible Manipulator의 운동모델

Flexible Manipulator의 위치를 나타내기 위하여 지역좌표계(x-y)와 전역좌표계(X-Y)를 정의해야 한다(그림1). y(x, t)는 시간 t, 거리 x(지역좌표계)일 때 유연한 매니플레이터와 유연하지 않은 매니플레이터의 변위이고, θ 는 유연하지 않은 매니플레이터와의 회전각도이다. Flexible Manipulator의 운동 방정식은 Euler-Bernoulli방정식으로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$EI \frac{\partial^4 y(x, t)}{\partial t^4} + \rho \frac{\partial^2 y(x, t)}{\partial x^2} = 0 \quad (1)$$

E: Modulus of Density

I: Moment of Inertia

ρ : Density of Material in kg/m

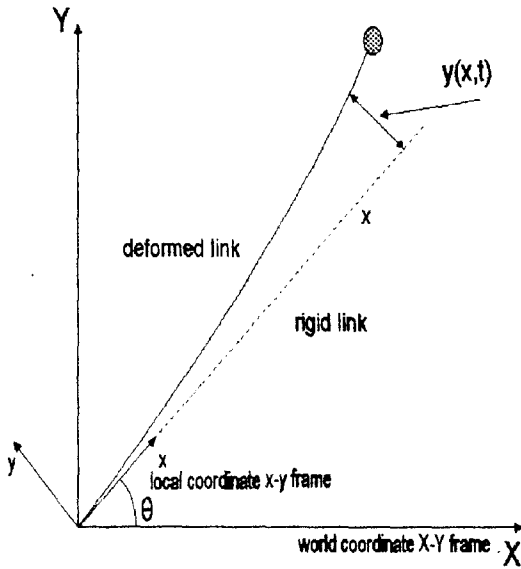


그림 1 Flexible Manipulator의 구조

$y(x, t)$ 는 시간 t 와 변위 x 에 의존하는 값으로 변수분리법에 의해 변위에 의존하는 $\Phi_i(x)$ 와 시간에 의존하는 $\zeta_i(t)$ 로 나타내서 해를 구할 수 있다.

또, 과거의 연구사례에서 유한한 수의 항을 이용해 Flexible Manipulator의 동작을 표현할 수 있음을 보여주었다. 본 논문은 4개의 기저 함수를 이용해 Flexible Manipulator의 횡단변위를 표현하고, 좌표중심에서 횡단변위는 무시할 정도로 영향이 미약하므로 생략하였다. 따라서, 지역좌표계의 횡단변위는 식 (2)와 같다[5].

$$y(x, t) = \sum_{i=1}^4 \Phi_i(x) \zeta_i(t) \quad (2)$$

여기서 $\Phi_i(x)$, $i=1, 2, 3, 4$ 는 다음식으로 나타나는 경계조건으로 구할 수 있다[5].

$$EI \frac{\partial^4 y(x, t)}{\partial x^4} = 0 \quad (3)$$

따라서

$$\Phi_1(x) = 1 - \frac{3}{L^2} x^2 - \frac{2}{L^3} x^3$$

$$\Phi_2(x) = x - \frac{2}{L} x^2 + \frac{1}{L^2} x^3$$

$$\Phi_3(x) = \frac{3}{L^2} x^2 - \frac{2}{L^3} x^3$$

$$\Phi_4(x) = -\frac{1}{L} x^2 + \frac{1}{L^2} x^3 \quad (4)$$

그림 1에서 Flexible Manipulator의 전역 좌표계에서의 위치를 알 수 있다.

$$P_x = x \cos \theta - y(x, t) \sin \theta$$

$$P_y = y \sin \theta + y(x, t) \cos \theta \quad (5)$$

Flexible Manipulator의 동역학 방정식은 위치에너지와 운동에너지에 의한 Lagrange 방정식에 의해 구할 수 있다. Lagrange 식은 아래식(6)과 같다.

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{q}_i} \right) - \frac{\partial T}{\partial q_i} = \tau_i \quad (6)$$

T: 위치에너지-운동에너지

q_i : i 번째 독립 변수,

τ_i : 외부 Torque

무부하시 Flexible Manipulator의 동역학 방정식은 식(7)과 같다.

$$\begin{bmatrix} \frac{1}{3} \rho L^3 + \zeta' M \zeta & H \\ H & M \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{\theta} \\ \ddot{\zeta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \tau - 2 \dot{\theta} \zeta' M \dot{\zeta} \\ \dot{\theta}^2 M \zeta - K \zeta \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$\text{여기서, } M = \rho \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{13L}{35} & -\frac{11L^2}{210} \\ 0 & -\frac{11L^2}{210} & \frac{L^3}{105} \end{bmatrix}, \quad H = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \frac{7L^2}{20} \\ -\frac{L^3}{20} \end{bmatrix}$$

$$K = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{12EI}{L^3} & -\frac{6EI}{L^2} \\ 0 & -\frac{6EI}{L^2} & \frac{4EI}{L} \end{bmatrix}, \quad \zeta = [\zeta_1 \ \zeta_2 \ \zeta_3 \ \zeta_4]'$$

3. Flexible Manipulator의 제어기 설계

3.1 퍼지제어기

Flexible Manipulator의 위치제어를 수행하기 위해 유전 알고리즘에 의해 자동 동조되는 퍼지제어기(ACFLC: Automatic Constructed Fuzzy Logic Control)를 사용하였다. 제어기의 구조는 그림2와 같다. 제어기 입력은 에러, 에러변화량이고, 출력은 진동을 최소화하며 기준 궤적을 추적하게 하는 토크값이다. 또한, 이 토크값은 Flexible Manipulator의 운동 방정식에 인가되며, 끝점 위치가 Feedback되어 제어를 수행한다.

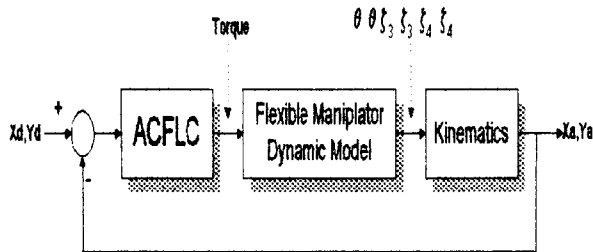


그림 2 퍼지제어기의 구조

3.2 Steady State Genetic Algorithm

SSGA의 알고리즘은 아래와 같다.

- step 1. Initialize(Population).
- step 2. Evaluate(Population).
// 두 부모개체의 선택.
- step 3. Uniform Crossover.
// 2개의 자손을 생성.
- step 4. Mutation.
// step3의 2개의 자손에 Mutation수행.
- step 5. Population내의 최저 적합도
가지는 두 개체 삭제.
- step 6. 생성된 새로운 개체를
Population에 추가.
- step 7. 종료조건이 만족할 때까지
step2-7을 반복한다.

SSGA의 장점은 좋은 부모개체가 자손을 생성한 후 좋은 개

체라면 계속해서 살아남기에 개체군내에 좋은 개체만이 살아남는다[6]. 또한 일반 Simple Genetic Algorithm(SGA)에 비해 최적해를 찾아가는 속도가 빠르다.

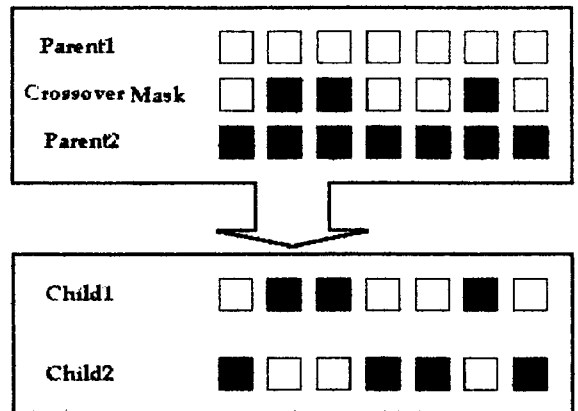


그림 3 Uniform Crossover

알고리즘에서 Uniform Crossover는 그림 3과 같은 작용을 하는 유전연산자이다.

4. SSGA에 의한 멤버십 함수와 퍼지룰의 동조

일반적으로 퍼지 추론 시스템에서 힘든 점은 멤버십 함수와 제어규칙을 구성하는 것이다. 이것을 기존 방법에서는 인간의 경험이나 시행착오로 동조해야하는 단점이 있다. 본 논문에서는 이것을 SSGA에 의해 자동 동조하고자 한다. 일반적인 퍼지모델 규칙은 아래식(9)와 같다.

$$i\text{규칙: if } x \text{ is } A_{i1} \text{ and } y \text{ is } B_{i1} \text{ then } z \text{ is } C_{i1} \quad (9)$$

그리고, 유전알고리즘에 의해 멤버십 함수와 퍼지규칙을 아래와 같이 정의한다.

표 1 개체(individual)의 표현

L1	C1	R1	...	L2	C2	R2	...	L3	C3	R3	...	r1	...
----	----	----	-----	----	----	----	-----	----	----	----	-----	----	-----

여기서, L1은 x의 멤버십함수의 왼쪽 넓이, C1은 x의 멤버십함수의 중심 위치, R1은 x의 멤버십함수의 오른쪽 넓이, L2는 y의 멤버십함수의 왼쪽 넓이, C2는 y의 멤버십함수의 중심 위치, R2는 y의 멤버십함수의 오른쪽 넓이, L3은 z의 멤버십함수의 왼쪽 넓이, C3은 z의 멤버십함수의 중심 위치, R3는 z의 멤버십함수의 오른쪽 넓이, r1은 규칙1의 후건부를 뜻한다. 만약 입력

변수가 n개이고, 퍼지 라벨의 개수가 m개이면, 문자열길이는 총 $9n + n^m$ 이다. 또, 여기서 사용한 적합도 함수는 식(10)과 같다.

$$\text{적합도함수} = 1 / \left(1 + \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |\text{error}_i| \right) \quad (10)$$

N: 샘플링한 data의 개수

error: 기준궤적-실제궤적

5. 시뮬레이션 결과 및 검토

제안한 제어기로 Flexible Manipulator의 시뮬레이션을 한 후 퍼지제어기와 신경망을 이용한 자동구축 퍼지제어기와 성능을 비교하였다. 시뮬레이션에서 반지름이 2m인 원모양의 경로를 속도가 1m/s인 경우에는 원궤적을 1바퀴 회전시켰고, 3m/s인 경우에는 기준 궤적을 2바퀴 도는 기준 궤적을 사용했다. 그리고, 처음의 표 2와 같은 49개의 제어규칙이 SSGA에 의해 표3과 같이 25개의 규칙으로 최적화되었다. 시뮬레이션 결과는 표4, 표5와 에러를 나타낸 그림4와 같다.

표 2 초기 제어규칙

e/ ce	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	NB	NB	NB	NB	NB	NB	NB
NM	ZO	NS	NS	NM	NM	NM	ZO
NS	ZO	ZO	NM	NS	NM	ZO	ZO
ZO	ZO	ZO	NS	ZO	PS	ZO	ZO
PS	ZO	ZO	PM	PS	PM	ZO	ZO
PM	ZO	PS	PM	PM	PM	PM	ZO
PB	PB	PB	PB	PB	PB	PB	PB

표 3 최적화된 제어규칙

e/ ce	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	NB	NB	NB	NB	NB	NB	NB
NM	-	-	-	NM	NM	-	-
NS	-	-	NM	NS	-	-	-
ZO	-	-	NS	ZO	PS	-	-
PS	-	-	-	PS	PM	-	-
PM	-	-	PM	PM	-	-	-
PB	PB	PB	PB	PB	PB	PB	PB

표 3 끝점속도는 1m/s, 끝점부하는 0.8kg

제어 방식	평균 오차(m)
퍼지제어(단, SSGA가 없음)	2.272722
신경망을 이용한 퍼지제어	0.304005
퍼지제어와 SSGA에 의한 제어	0.207298

표 4 끝점속도는 3m/s, 끝점부하는 0.3kg

제어 방식	평균 오차(m)
퍼지제어(단, SSGA가 없음)	2.304490
신경망을 이용한 퍼지제어	0.691110
퍼지제어와 SSGA에 의한 제어	0.211673

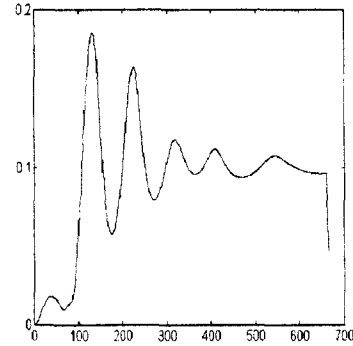


그림 4 속도 3m/s, 부하 3kg시 추종에러

6. 결론

본 논문에서는 비선형 시스템 제어에 많이 쓰이는 퍼지 제어 시스템을 사용할 때, 멤버쉽함수와 제어규칙의 개수와 최적치를 유전알고리즘으로 최적화하였다. 이러한 요소들을 기존의 퍼지 시스템에서 인간의 경험 등으로 결정하는 것을 유전알고리즘으로 자동 동조하였고, 시뮬레이션을 통해 Flexible Manipulator에 적용하였다. 그리고 타제어방식과 비교하여 제안된 제어기의 유용성과 제어성능의 우수성을 보였다.

참고 문헌

- [1] Jack. M. Zurada, *Introduction to Artificial Neural Networks*, West Publishing Company, 1992.
- [2] Kall Johan Åstrom and Bjorn Wittenmank, *Adaptive Control*, Addison Wesley, 1992.
- [3] G. V. S. Raju and Jun Zhou, "Adaptive hierarchical fuzzy controller", *IEEE S. M. C.*, Vol. 23, No. 4, July 1994.
- [4] B. M. Chung and J. H. Oh, "Auto-tuning Method of Membership Function in a Fuzzy Learning Controller", *Journal of Intelligent and Fuzzy System*, Vol. 1, 1994.
- [5] 이승준, "Flexible Manipulator제어를 위한 자동 구축 퍼지 제어기 설계", 홍익대학교 석사학위 논문, 1995.
- [6] Philip D. Wasserman, *Advanced Methods in Neural Computing*, Van Nostrand Reinhold, 1993.