

자율 이동 로봇의 경로계획과 주행

A Study on Path Planning and Navigation of Autonomous Mobile Robot

곽상필*, +최병재**, 류석환**

Sangfeel Kwack*, Byung-Jae Choi**, Seog-Hwan Yoo**

*: (주)아진엑스텍

** : 대구대학교 전자공학부

*: AJINEXTEK Ltd.

** : School of Electronic Engineering, Daegu University

E-mail : bjchoi@daegu.ac.kr

요 약

지능형 로봇이 성장 동력 산업으로 선정되면서 국가적인 관심이 지능형 로봇산업에 모이고 있다. 지능형 로봇의 분야에서 있어 자율 이동 로봇에 관한 연구는 중요한 이슈가 되고 있다. 주어진 환경에서 환경을 인식하고, 얻어진 정보에 따라 효율적인 주행을 하기위해 환경지도를 구성한다. 구성된 환경지도를 기반으로 목표지점을 향한 광역경로 계산을 수행하고, 얻어진 경로를 따라 이동함으로써 목표점에 이르게 된다. 본 논문에서는 퍼지 환경 지도를 제안하고, 퍼지 환경지도로부터 최단시간 광역 경로를 계산하는 알고리즘을 소개하며, 주행 제어를 위한 퍼지 제어를 제안한다.

Key words : Path planning, navigation, Autonomous robot, Fuzzy logic control, Fuzzy environment map

1. 서 론

지능형 로봇은 우리 일상에서 우리와 함께 생활하며, 우리 주위에서 우리를 돕기 위한 서비스로봇의 형태로 다가 오고 있다. 또한 지능형 로봇이 최근 성장동력 산업으로 선정되면서 그에 따른 관심도 높아지고 있는 실정이다.

지능형 로봇은 산업 로봇과 달리 한 곳에 고정되어 주어진 작업만 수행하는 형태의 로봇이 아니다. 사용목적의 대상이 사람이므로 사람의 행동방식과 유사한 행동방식을 가져야 한다. 그러한 행동방식 중 가장 바탕이 되는 것이 바로 자율 이동성이다. 자율이동이란 넓은 활동 범위를 가지며, 레일이나 인식표의 도움 없이 위치 이동을 자율적으로 수행하는 기능을 말한다. 이에 대한 연구가 활발히 진행 중이다[1][2]. 자율이동로봇의 변천사를 살펴보면, 정확한 로봇 모델의 구현에서 정확한 센서에 의한 외부 인식에 대한 강조로 이어졌으며, 이후 이 두 가지 구성에 대한 하이브리드의 형태로 발전되었다. 하지만 현재에는 최근 지능제어의 발달로 부정확한 로봇 모델과 부정확한 센서에 의한 로봇이라도 어느 정도의 성능만 주어진다면, 확률에 의해 로봇의 적절한 제어가 이루어지도록 하는 연구가 진행되고 있다[1].

자율 주행이 가능한 이동로봇을 구현하기 위해서는 로봇의 운동 특성에 대한 해석과 운동 방정식의 설계가 필요하다.

다. 이를 바탕으로 로봇이 스스로의 목적을 수행하기 위하여 공간에 대한 정보를 수집하고, 로봇 자신의 위치에 대한 추정 정보가 가능해야 하며, 목적지까지의 광역 주행 경로 계획과 주행 중 주변 환경 변화에 대한 반응을 수행하도록 하는 국부 주행 경로 계획이 필요하게 된다[1][2][3].

본 논문에서는 격자 기반 환경지도와 토폴로지컬 환경지도의 단점을 개선하는 퍼지 논리 환경 지도를 제안하고, 이를 통한 광역 경로 계획과 국부 경로 계획을 수행한다.

광역 경로 계획의 대표적인 길 찾기 휴리스틱 알고리즘인 A*를 퍼지 논리 환경지도에 맞게 변형하여 사용하며, 국부 경로 계획은 퍼지 논리 환경 지도의 고정 장애물 퍼지 거리 정보를 이용한 퍼지 논리 국부경로 제어를 제안한다.

2. 로봇 시스템의 경로 궤적 모델

이륜 차동 구동 방식은 두 개의 구동륜을 두고 두 바퀴의 합성 속도로 주행하며 양 바퀴의 속도 차를 통해서 조향 각을 얻어 낸다. 본 연구에서는 퍼지 논리 시스템을 통해서 주행 속도와 조향 각을 얻어 내고, 이들로부터 각 구동륜의 속도를 얻는다.

[그림 1]은 2륜 차동 구동 자율 이동 로봇의 이동 궤적을 묘사하고 있다. 그림으로부터 다음의 식(1)~(2)가 얻어진다.

$$\Delta l_R : R + L/2 = \Delta l_L : R - L/2 \quad (1)$$

$$(\Delta l_L + \Delta l_R)L/2 = (\Delta l_R - \Delta l_L)R \quad (2)$$

여기서 L 은 로봇의 폭, R 은 로봇이 이동한 궤적의 중심축과의 거리, θ 는 로봇이 이동한 이동 각, V_L 은 왼쪽 바퀴

접수일자 : 2005년 10월 21일

완료일자 : 2006년 1월 5일

이 논문은 대구대학교 학술연구비의 일부지원에 의한 논문임

+ : 교신저자

의 이동 속도, V_R 은 오른쪽 바퀴의 이동 속도, V 는 로봇 중심의 이동 속도이다. 그리고 l_L 은 왼쪽 바퀴가 이동한 거리이며, l_R 은 오른쪽 바퀴가 이동한 거리, l 은 로봇의 중심의 이동 거리이다.

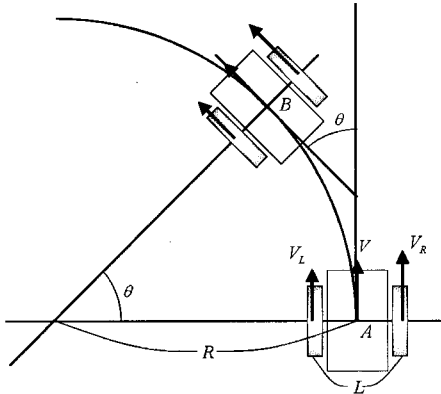


그림 1. 2륜 차동 구동 자율 이동 로봇의 이동 궤적

임의의 시간 Δt 동안에 변화한 각각의 변화량은 $\Delta\theta$, $\Delta l_L (= V_L \Delta t)$, $\Delta l_R (= V_R \Delta t)$, $\Delta l (= V \Delta t)$ 로 나타낸다.

임의의 시간 Δt 동안에 양 바퀴의 이동 거리를 통해서 로봇이 이동한 궤적의 중심축과의 거리 R 은 식(3)과 같이 얻어진다.

$$R = \frac{\Delta l_R + \Delta l_L}{\Delta l_R - \Delta l_L} L/2 \tag{3}$$

$\Delta\theta$ 와 Δl 은 식(4) 및 식(5)와 같이 구해진다.

$$\Delta\theta = \frac{\Delta l_R - \Delta l_L}{L} \tag{4}$$

$$\Delta l = \frac{\Delta l_R + \Delta l_L}{2} \tag{5}$$

[그림 2]는 한 점에서 임의의 시간 Δt 동안 이동한 상대 좌표 $(\Delta x, \Delta y)$ 를 절대 좌표 (x, y) 로 변환하는 과정을 묘사하고 있다.

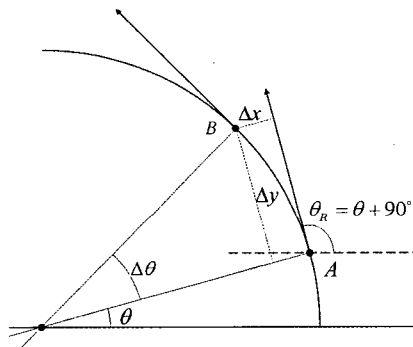


그림 2. 점 A에서 점 B로 이동한 상대좌표 $(\Delta x, \Delta y)$ 를 절대 좌표 (x, y) 로 변환

임의의 한 점에서 Δt 동안 이동한 상대 좌표 $(\Delta x, \Delta y)$ 는 각 $\Delta\theta$ 와 로봇이 이동한 궤적 중심축과의 거리 R 을 통해서 식(6)으로 구해진다. [3][4]

$$\begin{cases} \Delta x = R - R \cdot \cos \Delta\theta \\ \Delta y = R \cdot \sin \Delta\theta \end{cases} \tag{6}$$

로봇이 이동한 상대 좌표 $(\Delta x, \Delta y)$ 를 로봇의 절대 좌표로 변환하기 위하여 로봇이 현재 바라보는 방향 θ_R 과 로봇 기구학을 이용한다. 좌표계 A로부터 좌표계 B로의 rotation과 translation을 통해서 절대 좌표 (x, y) 를 식(7)과 같이 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} {}^A P &= {}^A R \cdot {}^B P \\ &= \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta & 0 \\ \sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \\ 0 \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} x \\ y \\ 0 \end{bmatrix} \end{aligned} \tag{7}$$

3. 퍼지 환경지도

퍼지 환경 지도는 토폴로지컬 환경 지도와 격자 기반 환경 지도의 장점을 가지며, 토폴로지컬 환경 지도처럼 간결한 공간 표현과 격자 기반 환경 지도와 같이 환경의 기하학적 정보를 모두 담고 있는 환경 지도의 형태이다. 퍼지 환경 지도는 토폴로지컬 환경 지도에서의 특징 점과 같은 노드를 가진다. 각 노드는 격자 기반 환경 지도상 모서리 특징 점 또는 곡면 특징 점들을 포함하고 있으며 각 특징 점들은 장애물에 대한 방향을 표시하며 장애물과의 거리를 표현하는 퍼지 멤버십을 갖는다. 또한 각 특징 점들은 서로 링크되어 있으며, 각 링크는 특징 점들 간의 거리 정보를 가지고 있다.

[그림 3]은 퍼지 환경 지도의 구성 예를 보여주고 있다.

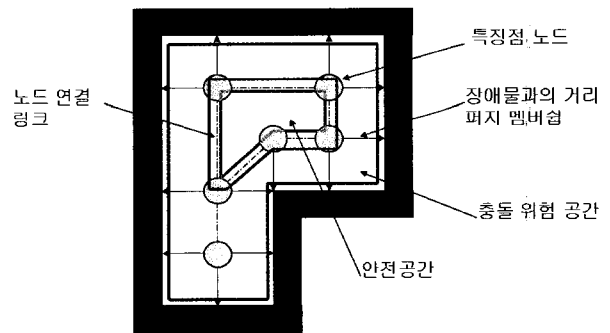


그림 3. 퍼지 환경 지도 구성의 예

[그림 3]에서 환경 지도 중간에 원형으로 표시 되는 부분이 특징 점 노드이다. 이 특징 점 노드는 장애물로부터 일정 거리만큼 떨어져 있고, 그 떨어져 있는 방향과 거리 정보를 포함하고 있다.

각 노드는 노드 연결 링크를 통해서 서로 연결 되어있다. 각 연결 링크는 광역 경로 계획을 수립할 때 경로 계산에 사용된다.

광역 경로 계산에서는 목표 방향에 대한 각도를 가중치로 갖는 평가함수를 사용하여 결과비용이 최소인 노드들에 대한 리스트를 광역 경로로 사용한다. 이를 그림으로 나타내면 [그림 4]와 같다.

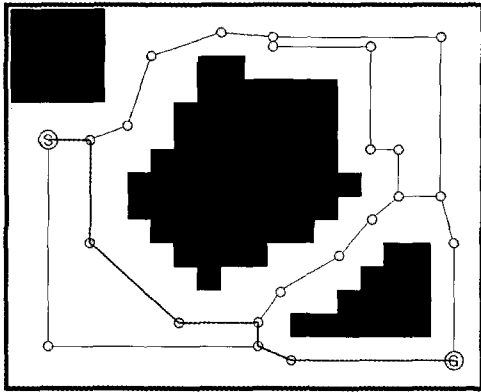


그림 4. 각도우선 경로를 가지는 환경 지도의 예

목적지까지의 경로를 계산할 때, 사용되는 비용 계산식은 현재 노드에 대한 인덱스 i , 현재 노드에서 종착지를 바라본 각 θ_C , 현재 노드에서 다음 노드를 바라본 각 θ_N 을 통해 식(8)로 나타낸다.

$$abs(\theta_C(i) - \theta_N(i)) = f(i) \quad (8)$$

국부 경로계획의 목적은 주어진 광역 경로를 따라 이동하면서 주변의 고정 장애물과 이동 장애물을 회피하고 종착점으로 로봇을 주행시키는 실시간 제어이다.

본 논문에서 사용하는 로봇모델은 가속 및 감속 능력을 가지고 있으며, 양 바퀴의 차동구동에 의한 조향을 한다. 이를 위하여 퍼지 논리 시스템을 제안한다.

4. 시뮬레이션

퍼지 논리 시스템의 입력은 로봇의 초음파 센서로 얻어지는 장애물과의 거리, 현재의 이동 속도, 이동 방향과 목표 방향이 이루는 각도의 차이, 그리고 퍼지 환경 지도상의 장애물이다. 그리고 출력 변수는 조향 각과 주행 속도이다.

다중 초음파 센서 시스템으로부터 로봇과 장애물과의 거리는 식(9)와 같이 정의한다.

$$\left\{ \begin{array}{l} FF(n) = \min(sensor(4), sensor(5)) \\ FL(n) = \min(sensor(2), sensor(3)) \\ FR(n) = \min(sensor(6), sensor(7)) \\ LT(n) = \min(sensor(0), sensor(1)) \\ RT(n) = \min(sensor(8), sensor(9)) \\ BK(n) = \min(sensor(10), sensor(11)) \end{array} \right. \quad (9)$$

그리고 실제로 퍼지 논리 시스템의 입력 변수로 사용되는 장애물과의 최단 거리 $D_O(n)$ 과 장애물에 대한 최단 거리방향 $\theta_O(n)$ 은 식(10)으로 정의한다.

$$\left\{ \begin{array}{l} D_O(n) = \min(FF(n), FL(n), FR(n)) \\ \theta_O(n) = FL(n) - FR(n) \end{array} \right. \quad (10)$$

$\theta_C(n)$ 는 현 위치에서 목표 위치로의 방향이며, $\theta_R(n)$ 는 로봇이 현재 향하고 있는 방향을 나타낸다. 따라서 $\theta_E(n)$ 는 로봇이 진행해야할 방향에 대한 오차로 식(11)로 표현할 수 있다.

$$\theta_E(n) = \theta_C(n) - \theta_R(n) \quad (11)$$

[그림 5]는 퍼지 논리 시스템의 입력 변수에 사용된 여러 가지 멤버십 함수를 보여주고 있다. 여기서 D_D 는 다음 노드에 대한 거리 정보를 나타내고, $Zone(n)$ 은 퍼지 환경지도상에서 주변 장애물의 위치 정보를 나타낸다.

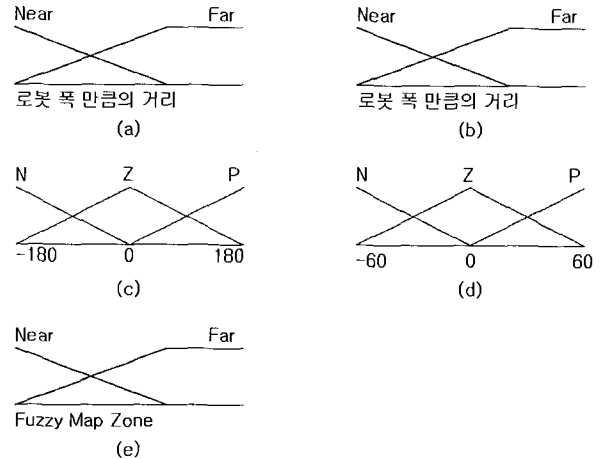


그림 5. 퍼지 논리 시스템에 사용된 멤버십 함수

- (a) μ_{D_D} : 목표점과의 거리 멤버십
- (b) μ_{D_o} : 장애물과의 거리 멤버십
- (c) μ_{θ_E} : 목표점과의 방향 멤버십
- (d) μ_{θ_o} : 장애물 방향 멤버십
- (e) $\mu_{Zone(n)}$: $Zone(n)$ 멤버십

[표 1]은 [그림 5]에서 사용된 각종 멤버십 함수의 의미를 정리하였다.

표 1. 퍼지 입력 변수에 사용된 변수의 의미

Near	Near
Far	Far
N	Negative
Z	Zero
P	Positive

퍼지 논리 시스템의 출력 변수는 로봇의 현재 방향을 나타내는 $HA(n)$ 과 로봇의 진행 속도를 나타내는 $SP(n)$ 이다. 이 때 $HA(n)$ 과 $SP(n)$ 을 위한 제어 규칙표는 각각 [표 2]와 [표 3]과 같다.

표 2. $SP(n)$ 을 위한 제어 규칙 표

$Zone(n)$		Near		Far	
		Near	Far	Near	Far
D_D	D_O	Near	Far	Near	Far
	Near	SS	SS	SS	MS
	Far	SS	MS	MS	FS

표 3. HA(n)을 위한 제어 규칙 표

			θ_E	
D_o	θ_o	N	Z	P
Far		SL	Z	SR
	N	LL	SL	SL
Near	Z	SL	SR	SR
	P	SR	SR	LR

[표 2] 및 [표 3]에 사용된 언어 변수의 의미를 정리하면 [표 4]와 같다.

표 4. 퍼지 출력 변수에 사용된 변수의 의미

$SP(n)$: Speed	
SS	Slow Speed
MS	Middle Speed
FS	Fast Speed
$HA(n)$: Handling Angle	
LR	Large Right Turn
SR	Small Right Turn
Z	Fix
SL	Small Left Turn
LL	Large Left Turn

[그림 6]은 퍼지 논리 시스템의 출력 변수에 사용된 멤버십 함수를 보여주고 있다.

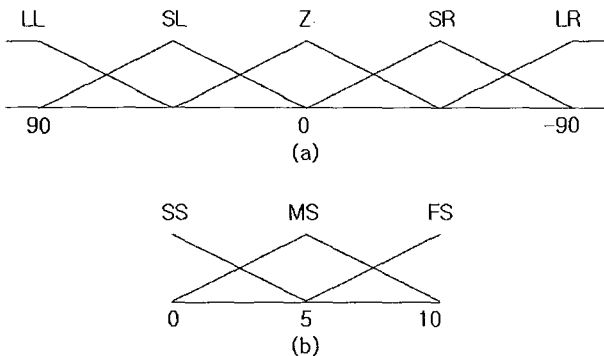
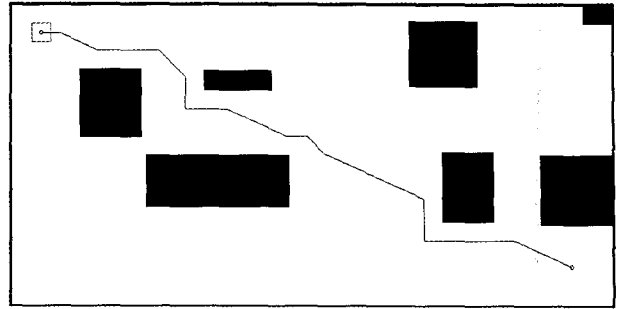


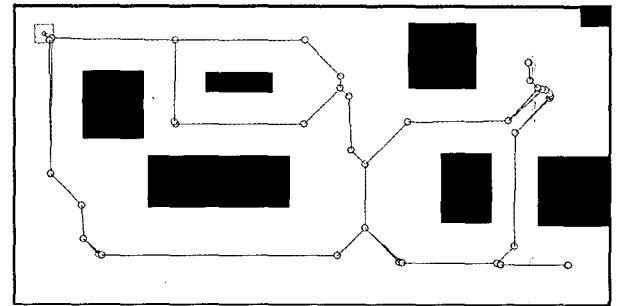
그림 6. 퍼지 출력 변수의 멤버십 함수

- (a) $\mu_{HA(n)}$: HA(n)의 멤버십
- (b) $\mu_{SP(n)}$: SP(n)의 멤버십

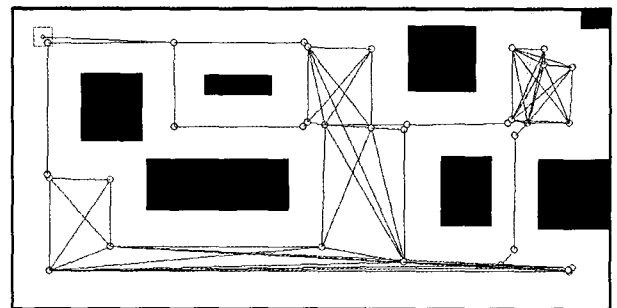
[그림 7]는 격자 기반 환경 지도와 토폴로지컬 환경 지도, 퍼지 환경 지도의 광역 경로 계획에 대한 시뮬레이션 결과를 보여주고 있다. 격자 기반 환경 지도의 경우 거리 우선 경로 계산을 하였으며, 토폴로지컬 환경 지도 및 퍼지 환경 지도의 경우 방향 우선 경로 계산을 하였다.



(a) 격자 기반 환경 지도의 광역 경로



(b) 토폴로지컬 환경 지도의 광역 경로



(c) 퍼지 환경 지도의 광역 경로

그림 7. 환경 지도의 광역 경로 시뮬레이션 결과

[표 5]는 각 환경 지도에서 사용된 중간 기착지점의 수를 나타내었다.

표 5. 광역경로 계산에 사용된 각 환경 지도의 중간 기착지점의 수

	격자기반 환경지도	토폴로지컬 환경지도	퍼지 환경지도
환경지도 Node 수	800x400	36	32
경로 Node 수	792	11	6

[그림 8]은 각 환경 지도에서의 주행 결과를 나타낸다.

5. 결 론

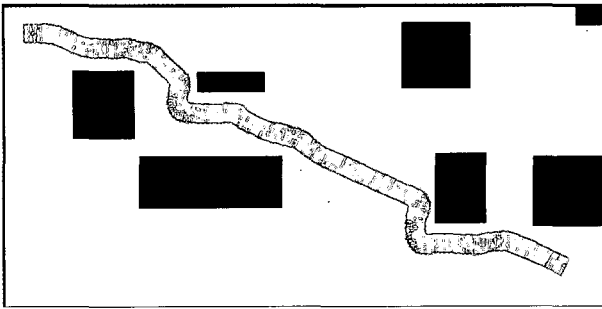
본 논문에서는 먼저 이륜 차동 구동 자율 이동 로봇의 궤적 모델, 광역 경로 계획, 그리고 국부 경로 계획에 대하여 살펴보았다. 그리고 여러 가지 환경 지도에 대한 소개와 함께 퍼지 환경 지도와 성능을 비교하였다. 또한 퍼지 논리 시스템에 의한 국부 경로 계획을 시뮬레이션을 통하여 비교하였다.

각 환경 지도의 광역 경로에 따른 주행 시뮬레이션 결과를 보면, 퍼지 환경 지도가 다른 일반적인 환경 지도보다 높은 속도를 내기에 적합함을 확인 할 수 있었다.

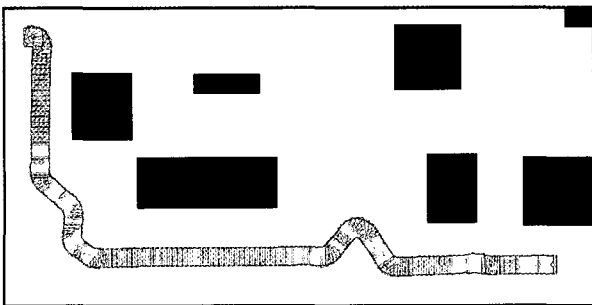
추후 연구과제로는 제한한 환경 지도와 퍼지 논리 국부 경로 제어기를 실제 로봇 시스템 적용하여 그 유용성을 검증하는 것이다.

참 고 문 헌

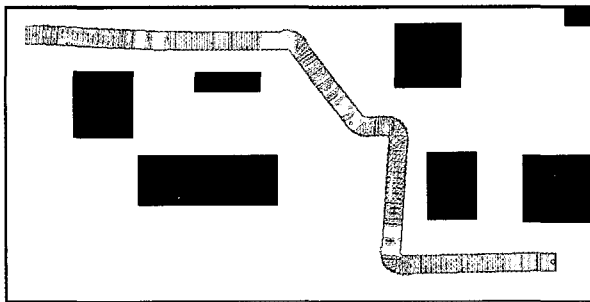
- [1] Sebastian Thrun, "Probabilistic Algorithms in Robotics". AI Magazine, vol.21, no.4, pp. 93-109, 2000
- [2] "The International Federation of Robotics", World Robotics 2001, United Nations, 2001
- [3] 김종환 외 8명, "Robot Soccer Engineering", KAIST Press, 2002
- [4] 도용태, 김태호, 류석환, "초음파 거리 센서의 계측오차 감소를 위한 연구", 전자공학학회논문집 제34권, 1997
- [5] Jun-Pyo. Hong, "A Study on the Path Planning and Localization Method for the Autonomous Navigation of Synchro Drive Mobile Robots.", 인하대학교 박사학위논문, Aug, 2003
- [6] 김성중, "초음파 센서를 이용한 이동로봇의 환경인식과 주행에 관한 연구", 전북대학교 석사학위논문, Feb, 2003
- [7] J. Borenstein and Y. Koren, "Real-time Obstacle Avoidance for Fast Mobile Robots", IEEE Trans. on System, Man and Cybernetics, Vol.19, No.5, pp. 1179-1187, Sep. 1989.
- [8] J. Borenstein and Y. Koren, "The Vector Field Histogram-Fast Obstacle Avoidance for Mobile Robot", IEEE Journal of robotics and automation, vol.7, no.3 June, pp 278-288, 1991
- [9] Mark Deloura 외 공저 / 류광 역 "GAME PROGRAMMING GEMS", 정보문화사 2001, ISBN89-7627-776-7



(a) 격자 기반 환경 지도에서의 주행



(b) 토폴로지컬 환경 지도에서의 주행



(c) 퍼지 환경 지도에서의 주행

그림 8. 각 환경 지도에서의 주행 시뮬레이션 결과

[표 6]은 주행 시뮬레이션 결과 각 환경 지도에 대한 구동륜의 평균 속도와 주행 시간을 비교하였다.

표 6. 각 환경지도에 따른 구동륜 평균 속도 및 주행시간 비교

	격자기반 환경지도	토폴로지컬 환경지도	퍼지 환경지도
왼쪽 구동륜 [mm/ms]	4.148	7.086	7.647
오른쪽 구동륜 [mm/ms]	4.141	6.995	7.650
주행시간 [ms]	4980	4650	4310

퍼지 환경 지도가 다른 환경 지도에 비하여 회전구간을 최소화 하는 장점을 가지고 있어 주행속도 면에서 우수한 성능을 보임을 알 수 있다.

저 자 소 개



곽상필(Sangfeel Kwack)

2003.02 : 대구대학교

정보통신공학부

제어계측공학 학사

2005.08 : 대구대학교

대학원

정보통신학과

제어계측공학 석사

2006.02 현재 (주)아진엑스텍 연구원 재직

Homepage : icons.daegu.ac.kr

E-mail : kfeels@ajinextek.com

최병재(Byung-Jae Choi)

한국퍼지및지능시스템학회 논문지 제14권 제3호 p.323 참조

류석환(Seog-Hwan Yoo)

한국퍼지및지능시스템학회 논문지 제14권 제3호 p.323 참조