

개선된 거리변환 알고리즘을 이용한

이동 로봇의 경로 계획 및 추적

박진현* · 박기형** · 최영규***

*진주산업대학교, **한국전력공사, ***부산대학교

Path Planning and Tracking for Mobile Robots Using

An Improved Distance Transform Algorithm

Jin-Hyun Park* · Gi-Hyung Park** · Young-Kiu Choi***

*Jinju National Univ. **KEPC, ***Pusan National Univ.

E-mail : uabut@jinju.ac.kr, ykichoi@pusan.ac.kr

요 약

본 연구는 개선된 거리변환 알고리즘을 사용하여 로봇이 이동해야 할 경로를 생성하고, 퍼지 시스템을 사용하여 경로추적 행위기와 장애물 회피 행위기를 구현해서 로봇이 그 경로를 안전하고 효율적으로 추적하는 것을 목적으로 하였다. 개선된 거리변환 알고리즘을 이용하여 로봇의 유연한 주행을 가능하게 했으며, 또한 주행거리와 주행시간도 단축되는 것을 확인할 수 있었다. 경로생성 후 경로를 추적할 때는 퍼지 시스템을 이용한 경로추적 행위기와 장애물 회피 행위기를 선택적으로 사용해서 경로추적 중에 예상치 못한 장애물이 발견되었을 경우에도 장애물을 회피한 후에 계속해서 경로를 추적하는 것을 확인함으로써 경로생성 후의 외부환경변화에도 강인함을 볼 수 있었다.

ABSTRACT

In this paper, path planning and tracking problems are mentioned to guarantee efficient and safe navigation of autonomous mobile robots. We focus on the path planning and also deal with the path tracking and obstacle avoidance. We improved the conventional distance transform (DT) algorithm for the path planning. Using the improved DT algorithm, we obtain paths with shorter distances compared to the conventional DT algorithm. In the stage of the path tracking, we employ the fuzzy logic controller to conduct the path tracking behavior and obstacle avoidance behavior. Through computer simulation studies, we show the effectiveness of the proposed navigational algorithm for autonomous mobile robots.

keywords

path planning, path tracking, distance transform algorithm, mobile robots

1. 서 론

현대 사회에서 로봇은 다양한 분야에서 그 필요성이 대두되고 있으며, 실제로 산업용 로봇, 무인 탐사 로봇, 서비스 로봇, 휴먼 로봇 등이 여러 분야에서 이용되고 있다. 과거의 로봇은 단순, 반복적인 작업을 수행하였던 것에 반해, 최근에는 인공지능 알고리즘이 발달하고 있으며 인공지능 알고리즘이 구현되도록 하여 주는 기계, 전자 기술의 발달로 스스로 판단하고 행동하는 지능형 로봇에 대한 연구가 활발히 이루어지고 있다. 지능형 로봇은 주로 지도생성(map generation), 위치파악(localization), 장애물 회피(obstacle avoidance) 알고리즘 그리고 지도로부터 적절한 경로를 생성해 내는 경로계획(path planning) 등이 주된 연구 분야이다[1-2].

위의 연구 분야 중 경로계획에 관한 연구는 영역 전체를 검색하여 경로를 생성하는 전역경로계획(global path planning)과 근처 장애물의 변화에 따라 수시로 변화하는 지역경로계획(local path planning)이 있다.

본 논문은 자율이동로봇(autonomous mobile robot: AMR)이 주행해야 할 경로를 전역경로계획인 기존의 거리변환 알고리즘(distance transform algorithm: DT) [1, 2]을 개선하여 계획하고, 주행 중의 불확실성에 대처하기 위하여 퍼지 시스템을 이용해서 그 경로를 추적하도록 하였다. 경로계획에서는 기존의 거리변환 알고리즘이 수평, 수직, 일정한 기울기만을 가지는 직선으로 경로를 생성하는 단점을 보완하기 위하여 개선된 거리변환 알고리즘을 제안하였다. 제안된 알고리즘은 기존의 방식에 비하여 경로 거리를 단축함을 알 수

있다. 또한, 경로의 모서리 부분에서 로봇이 방향 전환을 위해 일시 정지해야 하는 단점을 보완하기 위해서 모서리 부분을 원호로 만들어 로봇이 유연한 주행을 할 수 있도록 하였다. 그리고 경로 추적에서는 퍼지 경로추적 행위를 사용해서 로봇이 경로를 추적하도록 하였다. 또한 작업 공간의 환경 지도에 없던 물체가 경로 상에 출현 시 로봇이 안전한 주행을 할 수 있도록 퍼지 장애물 회피 행위를 두어서 장애물을 회피한 뒤 다시 경로를 추적할 수 있도록 구성하였다. 그리고 다양한 환경에서 모의실험을 수행함으로써 제안된 알고리즘의 성능을 검증하였다.

II. 자율이동로봇 시스템

이번 장에서는 자율이동로봇의 기구학과 환경 모델에 대해서 설명하고자한다. 본 연구에서 이용한 로봇은 차륜형 구동방식으로 설계되었으므로 현재 로봇의 좌표를 알기 위해 기구학을 이용하였다. 그리고 로봇이 주행해야 하는 작업공간의 환경지도를, 격자형 환경모델을 사용해서 2차원 격자 지도로 변환한다.

2.1 자율이동로봇의 기구학

자율이동로봇의 구동부는 차륜형(differential wheeled type) 구동방식으로 설계되었다. 좌측바퀴와 우측바퀴의 +각속도를 각각 ω_l, ω_r 이라고 하면 non-slipping조건에 의해 좌측 바퀴와 우측 바퀴의 선속도 v_l, v_r 은 식(1)과 같다.

$$v_l = r\omega_l, v_r = r\omega_r \quad (1)$$

단, r 은 바퀴의 반지름

그림 1은 자율이동로봇의 기구학 해석을 위해 2차원 평면상에 구성된 좌표계를 나타내었다.

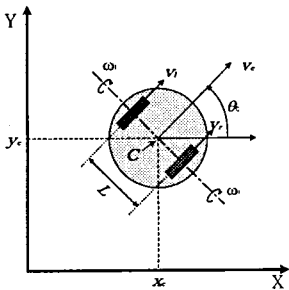


그림 1 자율이동로봇의 좌표계

그림 1에 나타난 바와 같이 로봇의 선속도 v_c 및 각속도 ω_c 는 식(2), (3)에 의해 구해진다.

$$v_c = \frac{v_r + v_l}{2} = r \frac{\omega_r + \omega_l}{2} \quad (2)$$

$$\omega_c = \frac{v_r - v_l}{L} = r \frac{\omega_r - \omega_l}{L} \quad (3)$$

단, L 은 양 바퀴 사이의 거리이다.

그림 1과 같이 설정된 전역 좌표계에서 자율이동로봇의 상태는 로봇의 위치와 방향각으로 구성된 자세(posture) 벡터 $P = [x_c \ y_c \ \theta_c]^T$ 로 나타낸다. 따라서, 자율이동로봇의 기구학식은 $[\dot{x}_c \ \dot{y}_c \ \dot{\theta}_c]^T$ 와 $[v_c \ \omega_c]^T$ 에 의하여 식(5)와 같다.

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_c \\ \dot{y}_c \\ \dot{\theta}_c \end{bmatrix} = \begin{pmatrix} \cos\theta_c & 0 \\ \sin\theta_c & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{bmatrix} v_c \\ \omega_c \end{bmatrix} \quad (5)$$

여기서, (x_c, y_c) 는 설정된 전역 좌표계를 기준으로 현재 로봇의 위치에 대응하는 X축과 Y축의 좌표값이며, θ_c 는 X축을 기준으로 한 로봇의 방향각을 나타낸다[8, 9].

설정된 좌표계에 대한 기구학 방정식으로부터 로봇의 자세를 식(6)~(11)과 같이 구할 수 있다.

1) $\omega_c = 0$ 일 경우

$$x_c^{k+1} = x_c^k + v_c t_s \cos(\theta_c^k) \quad (6)$$

$$y_c^{k+1} = y_c^k + v_c t_s \sin(\theta_c^k) \quad (7)$$

$$\theta_c^{k+1} = \theta_c^k \quad (8)$$

2) $\omega_c \neq 0$ 일 경우

$$x_c^{k+1} = x_c^k + \frac{v_c}{\omega_c} [\sin(\theta_c^{k+1}) - \sin(\theta_c^k)] \quad (9)$$

$$y_c^{k+1} = y_c^k - \frac{v_c}{\omega_c} [\cos(\theta_c^{k+1}) - \cos(\theta_c^k)] \quad (10)$$

$$\theta_c^{k+1} = \theta_c^k + \omega_c t_s \quad (11)$$

단, t_s 는 샘플링 시간

본 연구에서는 로봇의 주행 위치를 추정하기 위하여 모터와 직결된 엔코더로부터 신호를 받아 식(6)~(11)을 이용하여 로봇의 위치를 계산하는 dead-reckoning 방법을 사용하였다.

2.2 환경모델

로봇 시스템에서 사용하는 환경 모델은 로봇의 센서 시스템, 연산처리 능력 등의 하드웨어 성능에 따라 결정된다. 일반적으로 많이 사용되는 환경 모델은 격자형 환경 모델과 모델 기반 환경 모델 등이 있다[1]. 본 논문에서는 이러한 두가지 환경모델 중 격자형 환경모델을 사용하였다. 실험을 위한 단위격자의 크기는 10[cm]×10[cm]로 정의하였고, 작업 공간의 환경지도를 이에 대응하는 격자지도로 변환하여 사용하였다.

III. 경로계획

전역경로계획은 로봇이 주행해야할 환경에 대한 정보를 미리 알고 영역 전체를 검색하여 경로를 생성하는 방식이다. 본 연구에서는 로봇이 주행할 환경의 종류 및 장애물의 형태와 크기에 상관없이 전역경로계획을 가능하게 해주는 거리변환 알고리즘[1, 2]의 개선을 통하여 목적지까지의 경로를 생성하였다. 그리고 개선된 거리변환 알고리즘을 사용해서 기존의 거리변환 알고리즘을 사용했을 때보다 경로거리를 단축하고자 한다.

3.1 개선된 거리변환 알고리즘

거리변환 알고리즘은 작업공간의 환경지도를 격자지도(grid map)로 변환하여 로봇이 이동해야 할 경로를 찾는 알고리즘이다. 그러나 거리변환 알고리즘을 사용하면 수직, 수평, 일정한 기울기를 가지는 직선만으로 경로가 생성되므로 효율적인 경로라 할 수 없다. 또한 8-neighbor의 검색 순서를 정하기가 힘든 단점도 가지고 있다. 본 논문에서는 이러한 단점을 보완한 개선된 거리변환 알고리즘을 제안하였다. 그림 2는 개선된 거리변환 알고리즘의 흐름도를 나타낸다. 이 방법은 기존의 8-neighbor의 격자값 갱신 및 검색 순서를 4-neighbor(상, 하, 좌, 우)로 바꾸으로써 검색 순서와 시간을 단순화하였으며, 또한 경로 재생성 부분을 추가함으로써 기존의 거리변환 알고리즘을 사용했을 경우보다 경로거리를 단축하였다. 경로 재생성 과정은 경로를 이루는 직선의 생성, 불필요한 경로 직선의 삭제 및 수정, 그리고 원호경로 생성의 새 단계를 거치게 된다.

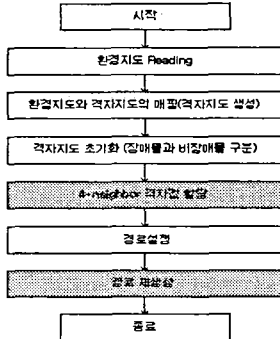


그림 2 개선된 거리변환 알고리즘의 흐름도

3.1.1 경로를 이루는 직선의 생성

경로를 이루는 직선의 생성은 아래의 과정을 통해서 이루어진다.

- Step 1 : 출발점에서부터 차례대로 n개의 경로 직선 L_1, L_2, \dots, L_n 과 m개의 경로격자 C_1, C_2, \dots, C_m 을 설정.
- Step 2 : $i=k=1$ 로 설정. C_1 의 중심점을 L_1 의 시작점으로 두고, C_2 의 중심점을 L_1 의 종점으로 설정.
- Step 3 : $i=i+1$ 설정.
IF C_i 의 중심점 = C_{goal} 의 중심점
Goto Step 5.
ELSE IF L_k 의 시작점과 C_i 의 중심점을 잇는 직선상에 장애물이 있으면 Goto Step 4.
ELSE Goto Step 3.
- Step 4 : i 갱신 (그림 4, 5 참조)
 L_k 의 종점을 L_{k+1} 의 시작점과 C_i 의 중심점으로 둔다.
 $k=k+1$
Goto Step 3.
- Step 5 : END

그림 3은 장애물 격자의 4-neighbor 중 3개가

장애물 격자일 때는 벽면으로 인식하여 장애물 격자가 아닌 나머지 한 개의 격자의 중심점을 k 번째 경로직선의 중심점임과 동시에 k+1번째 경로직선의 시작점으로 하여 그림에서처럼 i를 갱신시키고 한 개의 경로직선을 완성시킨다.

마찬가지로 4-neighbor 중 2개가 장애물 격자일 때는 모서리로 인식하고, 그림 4에서처럼 장애물과 대각선방향에 있는 격자의 중심점을 k번째 경로직선의 중심점이자 k+1번째 경로직선의 시작점으로 하고 i를 갱신시킨다.

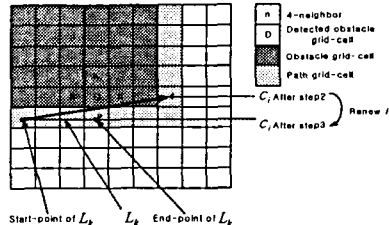


그림 3 벽면 형태 장애물의 경우

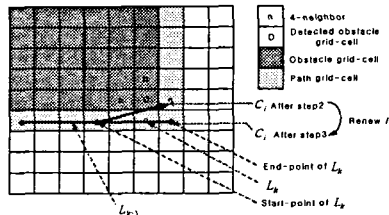


그림 4 모서리 형태 장애물의 경우

3.2.2 불필요한 경로직선의 삭제 및 수정

앞에서처럼 경로직선을 생성한 후, 그림 5의 경우처럼 불필요한 경로직선이 있을 경우 다음의 과정을 거쳐 새로운 경로를 생성한다.

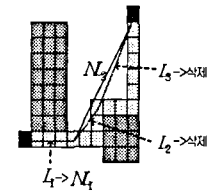


그림 5 불필요한 경로 직선 삭제 및 수정

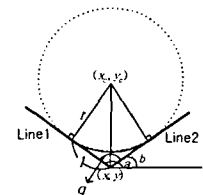


그림 6 원호보간경로

- Step 1 : 새로운 경로직선 NL_1, NL_2, \dots, NL_n 을 생성한다. $\rightarrow L_1, L_2, \dots, L_n$ 로부터 복사, $i=k=1$.
- Step 2 : $i=i+1$.
IF i 가 경로직선의 수 n 과 같으면
Goto Step 4.
ELSE IF NL_k 의 시작점과 L_k 의 종점을 잇는 직선상에 장애물이 있으면 Goto Step 2.
ELSE Goto Step 3.
- Step 3 : L_i 의 종점을 NL_k 의 종점으로 둔다.
 $k=k+1$
Goto Step 2.
- Step 4 : k개의 새로운 경로직선 NL_1, L_2, \dots, NL_k 생성한다.

End

3.2.3 원호보간 경로생성

그림 6에서 볼 수 있듯이 두 개의 직선 경로의 연결부분은 로봇의 방향전환점으로 로봇은 정지 후 회전하고, 다시 이동하므로 주행시간이 길어지며 유연한 운동을 할 수 없다. 따라서 본 논문에서는 방향전환점부근에서 원호보간을 이용하여 유연한 방향전환과 주행시간도 단축하였다. 그리고 주행거리에 있어서도 직선 경로에 비하여 짧은 경로를 얻을 수 있었다.

원호의 중심점과 반지름을 구하는 식은 다음과 같다. 두 개의 경로직선이 이루는 각을 식(12)와 같이 구할 수 있다. 회전각속도에 의한 로봇이 원호의 바깥쪽으로 나가지 않는 범위 내에서의 최대 회전각속도(α_{max})를 선정하여 원호의 최소 반지름을 식(13)과 같이 구할 수 있다. 식 (14)~(16)에 의해 원호의 중심점을 구할 수 있으며, 직선 1과 직선 2는 유연한 곡선으로 연결되게 된다.

$$\theta = \alpha - \beta \tag{12}$$

$$r_{min} = \frac{v^2}{\alpha_{max}} \tag{13}$$

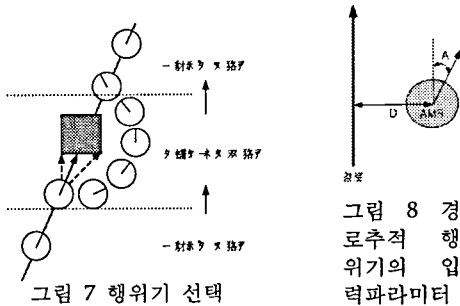
$$l = r \frac{r}{\tan(\theta/2)}, \quad r \geq r_{min} \tag{14}$$

$$x_c = x + \sqrt{(r^2 + l^2)} \times \cos(\alpha - \theta/2) \tag{15}$$

$$y_c = y + \sqrt{(r^2 + l^2)} \times \sin(\alpha - \theta/2) \tag{16}$$

III. 경로추적 및 장애물 회피

앞에서 생성된 경로를 로봇이 정밀하게 추적하기 위하여 퍼지를 이용한 경로추적 행위를 설계하였다. 또한, 경로생성 시 고려되지 않았던 미지의 장애물에 대해서도 퍼지를 이용한 장애물 회피 행위를 설계하여 외부환경변화에 강인한 경로추적 제어를 구성하였다. 이렇게 설계된 두 행위는 스위칭 방식에 의하여 그림 7에서처럼 초음파 센서에 의해서 경로 상에 장애물이 발견되었을 시에는 장애물 회피 행위를 선택해서 장애물을 회피한 뒤, 로봇이 경로 상에 다시 진입했을 경우에는 경로추적 행위를 선택해서 계속하여 경로를 추적해 나가도록 하였다.



4.1 경로추적 행위기

앞에서 생성된 경로를 따라 로봇이 이동하기 위해 퍼지 시스템을 사용하여 경로 추적 행위기

를 구현하였다. 퍼지 입력 파라미터는 그림 8과 같이 로봇과 경로 사이의 거리(D)와 로봇과 경로가 이루는 각(A)을 사용하였고, 각각의 소속함수는 삼각형 함수를 사용하였다. 각도에 대한 소속함수는 경로직선을 기준으로 선정하였다.

퍼지 출력은 로봇의 선속도와 각속도로 하였으며, 표 1, 2 는 각각 로봇의 선속도와 각속도에 대한 퍼지 규칙을 나타낸다.

표 1 선속도에 대한 퍼지 규칙

distance	angle						
	NB	NM	NS	ZZ	PS	PM	PB
NB	S	S	S	F	F	F	S
NM	S	S	S	M	F	M	S
NS	S	M	F	VF	F	M	S
ZZ	S	S	F	VF	F	M	S
PS	S	M	F	VF	F	M	S
PM	S	M	F	M	F	M	S
PB	S	VF	F	F	F	S	S

표 2 각속도에 대한 퍼지 규칙

distance	angle						
	NB	NM	NS	ZZ	PS	PM	PB
NB	RM	RM	RM	RM	ZZ	ZZ	LB
NM	RB	RM	RM	RS	ZZ	LS	LM
NS	RB	RM	RS	ZZ	LS	LM	LB
ZZ	PB	RS	RS	ZZ	LS	LS	LB
PS	RB	RM	RS	ZZ	LS	LM	LB
PM	RM	RS	ZZ	LS	LM	LM	LB
PB	RB	ZZ	ZZ	LM	LM	LM	LB

4.1 장애물 회피 행위기

로봇이 경로를 따라 주행할 때에 예상치 못한 장애물이 발견되면, 장애물의 벽면을 따라서 이동하도록 장애물 회피 행위를 퍼지 시스템으로 구성하였다. 장애물 회피 행위기의 입력 파라미터는 그림 9와 같이 로봇과 장애물 벽면 사이의 거리(D)와 각도(A)이며, 출력은 로봇의 선속도와 각속도로 하였다.

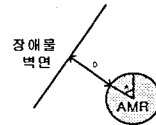


그림 9 장애물 회피 행위기의 입력 파라미터

표 3, 4는 오른쪽 우회 시의 퍼지 규칙을 나타내었다. 만약, 로봇이 왼쪽으로 우회할 경우의 퍼지 규칙은 오른쪽으로 우회할 경우와 반대방향이 되고, 속도에 대한 퍼지 출력은 우회 방향에 관계가 없으므로 오른쪽 우회할 경우와 동일하다.

표 3 각속도에 대한 퍼지규칙(오른쪽 우회시)

distance	angle				
	LVB	LB	LM	LS	ZZ
VN	ZZ	RS	RB	RB	RB
N	LS	ZZ	RB	RB	RB
M	LM	LS	RM	RM	RB
F	LB	LS	RS	RM	RM
VF	LB	LM	RS	RM	RM

표 4 선속도에 대한 퍼지규칙 (오른쪽 우회시)

distance	angle				
	LVB	LB	LM	LS	ZZ
VN	F	S	S	S	S
N	F	F	M	S	S
M	F	F	M	M	S
F	M	F	F	M	M
VF	S	M	F	M	M

III. 모의 실험

모의실험에서 작업공간의 크기는 1500[cm]×1500[cm]이고 단위격자의 크기는 10[cm]×10[cm]

로 하였다. 그리고 모의실험에 이용된 자율이동로봇의 설정치는 표 5과 같다.

표 5 모의실험 시 자율이동로봇에 대한 설정치

로봇 직경	50[cm]
바퀴 반지름	7[cm]
양 바퀴 사이의 거리	40[cm]
센서 측정 거리	300[cm]
샘플링 주기	0.1[sec]

본 연구에서는 기존의 거리변환 알고리즘과 개선된 거리변환 알고리즘을 비교하여 개선된 알고리즘이 경로거리를 단축시킴과 동시에 유연한 경로를 생성함을 보여주하고자 한다.

그림 10의 (a), (b)는 각각 기존의 거리변환 알고리즘과 개선된 거리변환 알고리즘을 사용하여 경로를 생성하는 예를 보여주고 있다. 개선된 방법은 경로재생성 과정을 통해서 경로를 이루는 직선의 기울기에 제한이 없기 때문에 좀 더 짧은 거리의 경로를 생성하고 있다.

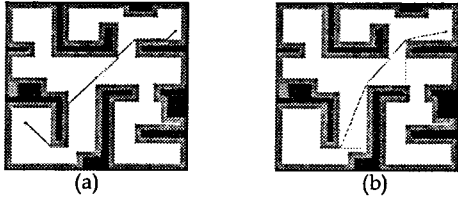


그림 10 경로생성

- (a) 기존의 거리변환 알고리즘의 경우 : 1956[cm]
- (b) 개선된 거리변환 알고리즘의 경우 : 1882[cm]

그림 11는 2가지 다른 땀에 대한 원호보간 경로가 있는 경우와 없는 경우의 경로 추적 결과를 보여주고 있다. 그림 11 (a), (b)는 원호보간의 경로가 없는 경우와 있는 경우의 경로추적 결과를 보여준다. 원호보간의 경우, 직선경로 생성에 비하여 경로거리가 짧아지고, 모서리 부분에서 로봇이 속도를 거의 줄이지 않고 주행하므로 주행시간의 단축과 유연한 주행특성을 보였다.



- (a) 경로거리: 2126 [cm] (b) 경로거리: 2052[cm]
 - 주행시간: 48[sec] 주행시간: 43[sec]
- 그림 11 경로추적 : (a) 원호보간 경로가 없는 경우 (b) 원호보간 경로가 있는 경우

그림 12는 경로추적 중 경로 상에 예상치 못했던 장애물이 발견되었을 경우, 장애물 회피 행위를 사용하여 장애물을 회피한 뒤 다시 경로를 추적하는 것을 보여주고 있다.

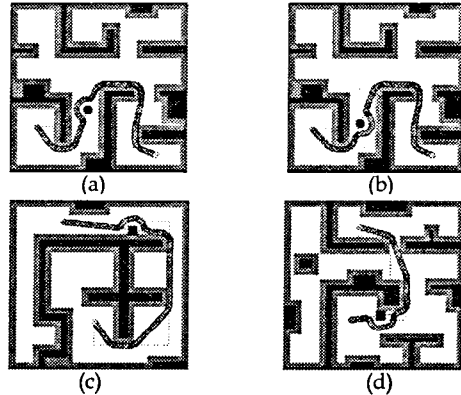


그림 12 장애물 회피와 경로추적

V. 결 론

본 연구는 개선된 거리변환 알고리즘을 사용하여 로봇이 이동해야 할 경로를 생성하고, 퍼지 시스템을 사용하여 경로추적 행위와 장애물 회피 행위를 구현해서 로봇이 그 경로를 안전하고 효율적으로 추적하는 것을 목적으로 하였다. 개선된 거리변환 알고리즘에서는 기존의 거리변환 알고리즘의 취약점인 일정한 기울기만을 가지는 직선경로를 경로재생성 과정을 거쳐 기울기의 제한을 없애으로써 경로거리를 단축시킬 수 있었다. 또한 실제 로봇이 경로를 추적할 경우에 두 개의 경로직선이 만나는 모서리 부분에서 유연한 주행을 위하여 경로의 방향전환점에서 원호보간 경로를 생성함으로써 로봇의 유연한 주행을 가능하게 했으며, 또한 주행거리와 주행시간도 단축되는 것을 확인할 수 있었다.

또한, 경로생성 후 경로를 추적할 때는 퍼지 시스템을 이용한 경로추적 행위와 장애물 회피 행위를 선택적으로 사용해서 경로추적 중에 예상치 못한 장애물이 발견되었을 경우에도 장애물을 회피한 후에 계속해서 경로를 추적하는 것을 확인함으로써 경로생성 후의 외부환경변화에도 강인함을 볼 수 있었다.

참고문헌

- [1] Joon Seop Oh, Jin Bae Park and Yoon Ho Choi, "Complete coverage navigation of clean robot based on triangular cell map," *Proc. of the IEEE International Symposium on Industrial Electronics*, vol. 3, pp. 12-16, June 2001.
- [2] Lim Chee Wang and Lim Ser Yong, "Hybrid of global path planning and local navigation implemented on a mobile robot in indoor environment," *Proc. of the IEEE International Symposium on Intelligent Control*, pp. 821-826, 2002.