

자유 주행로봇을 위한 국부 경로계획 알고리즘

차 영 열*, 권 대 갑**

A Local Path Planning Algorithm for Free-Ranging Mobil Robot

Y. Y. Cha*, D. G. Gweon**

ABSTRACT

A new local path planning algorithm for free-ranging mobile robots is proposed. Considering that a laser range finder has the excellent resolution with respect to angular and distance measurements, a simple local path planning algorithm is achieved by a directional weighting method for obtaining a heading direction of mobile robot. The directional weighting method decides the heading direction of the mobile robot by estimating the attractive resultant force which is obtained by directional weighting function times range data, and testing whether the collision-free path and the open pathway conditions are satisfied. Also, the effectiveness of the established local path planning algorithm is estimated by computer simulation in complex environment.

Key Words : Local Path Planning (국부경로계획), Directional Weighting Method (방향성 가중치 방법), Laser Range Finder (레이저 거리계), Navigation (항법), Robot Vision (로봇 비전), Mobile Robot (이동 로봇).

기호설명

α : 상수
 d_i : i번째 거리 데이터
 $I(u, v)$: 2차원 영상함수
 N : $\Delta\theta$ 마다 샘플링되는 불연속적인 거리 데이터의 갯수
 $R(x, y)$: 레이저 거리계로 얻어지는 물체까지의 거리 데이터
 R_i : i번째의 Attractive resultant force
 R_1, R_3 : 반경 1m와 3m인 원
 γ : 가중치 함수의 원점에서부터 거리
 $V_{max}(u)$: u번째 열에서 최대 밝기(intensity)를 갖는 화소

의 행번호

W_s : 이동로봇의 장애물 회피를 위한 안전여유(safety margin)
 W_1 : 이동로봇의 전진(heading) 방향과 반경 1m의 탐색(searching) 영역 이내에 존재하는 장애물과의 최소거리
 W_3 : 통로폭 : 이동로봇의 전진방향을 기준으로 반경 3m의 탐색영역 이내에 존재하는 장애물 사이의 최소폭
 w_i : i번째 가중치 값
 θ : 이동로봇의 현재위치에서 목표점(goal) 방향을 중심으로 -90° 를 기준해서 반시계 방향으로 측정된 각

* 한국과학기술원

** 한국과학기술원 정밀공학과

- θ_1 : 이동로봇의 현재위치에서 목표점 방향을 중심으로 -90° 를 기준해서 반시계 방향으로 $(i-1) \times \Delta\theta$ 만큼 회전한 각도
- $\Delta\theta$: 연속적인 거리 정보로부터 불연속적인 거리 데이터를 얻기 위한 샘플링(sampling) 각도
- $\Phi(x, y)$: 방향성 가중치 함수

1. 서 론

이동로봇의 항법을 위한 경로계획(path planning)은 자율 주행로봇의 실현에 있어서 피할 수 없는 문제 중 하나이다. 경로계획은 이동로봇이 목표점에 도착하기 위해서 그 사이의 경로를 여러개의 기본 운동형태(basic motion)로 나누는 것이다. 이러한 경로계획은 전역 경로계획(global path planning)과 국부 경로계획(local path planning)으로 나뉘어 진다. 전자는 전체 환경의 내부모델을 필요로 하고, 목표점까지의 개략적인 경로를 결정한다. 후자는 이미 결정된 개략적인 경로를 기준으로 국부 환경 인식에 의한 이동로봇의 거동을 재 지정 해주는 역할을 한다.

이동로봇의 경로계획에는 형상 공간 방법(configuration space method), 포텐셜 방법(potential approach) 그리고 퍼지이론(fuzzy logic)이나 신경 회로망(neural network) 등의 인공지능을 이용한 알고리즘이 사용되었다. 형상공간 방법의 경우, Lozano-Perez[1]는 visibility 그래프에 의한 다각형들로 이루어진 환경에서 로봇을 한점으로 간주한 경로계획 문제를 처음으로 다루었다. 그러나 이러한 visibility 그래프는 로봇의 주위환경 뿐만아니라 로봇의 크기에도 영향을 받는다. 이러한 단점을 해결하기 위하여 Noborio[2]는 환경을 장애물과 비장애물 영역의 quadtree로 모델링하는 효과적인 방법을 제안하였다. 그러나 이러한 quadtree는 주위환경의 근사적인 표현일 뿐만 아니라 설정된 좌표계에 의존한다. 결국, 이러한 형상공간 방법은 계산시간을 많이 요구하고 복잡한 환경이나 미지의 장애물이 경로상에 존재하는 경우와 같은 수시로 변화하는 환경에는 부적합하다.

포텐셜 방법의 경우, Brooks[3]와 Adams[4]는 반력(repulsive force)을 감지된 장애물과 상사(identify) 시키고, 여기에 목표점 쪽으로 인력(tractive force)을 첨가하여 그들의 합력벡터(resulting vector)의 방향으로 이동로

봇의 경로를 생성을 하였다. Borenstein과 Koren[5]은 환경을 사각형(square)으로 분할하고 각 사각형을 장애물 확률(obstacle probability)로 결합하였다. 그리고 이 장애물 확률에 기초하여, 인공적인 힘(artificial force)을 계산하였다. 그러나 이러한 인공적인 힘의 방향과 크기는 많은 양의 계산을 요구하는 식을 풀어서 결정되어야 하는 단점이 있다. 결국 이러한 포텐셜 방법들은 수학적 모델로 표현하기 힘든 복잡한 환경하에서 이동로봇의 진행방향과 속도를 결정하는데 영향을 끼치는 힘들의 계수를 계산하는데 어려운 단점이 있다.

이와같은 어려움을 극복하기 위하여 퍼지이론과 신경회로망을 이용한 방법들이 제안되었다. Ishikawa[6]는 건물 내에서 움직이는 이동로봇의 항법을 위하여 효율적인 주행에 관한 지식을 구축한 퍼지이론을 사용하였다. 그러나 이 방법은 주어진 환경에 적합한 지식 베이스(rule base)를 전문가의 지식에만 의존하여 구축해야 하는 단점이 있다. 이러한 퍼지규칙을 구축하는 어려움을 극복하기 위하여 신경회로망이 Nagata[7]와 Kozakiewicz[8]에 의해 사용되었다. 그러나 이 방법은 작업환경 내에 존재하는 모든 상황들이 신경회로망을 학습(tuning)시키는 데 고려되어야 한다는 어려움이 있다.

다른 한편으로, 이동로봇의 자율주행에 주로 사용되는 초음파 센서와 비전 센서는 주위 환경을 정확히 기술하는데 불가능하거나 데이터 처리가 실시간으로 이루어지지 않는 단점이 있다. 또한 기존의 국부 경로계획 알고리즘은 계산시간, 복잡한 작업환경, 지식 베이스 구축 그리고 학습 등에서 문제점을 가지고 있다. 본 연구에서는 미지환경에서 로봇의 자율주행을 위한 센서로서 능동 비전 시스템(active vision system)의 하나인 레이저 거리계가 각도와 거리측정에 대한 우수한 분해능을 가지고 있는 것을 고려하여, 정교하고 간결한 국부 경로계획 알고리즘을 제안한다. 이는 형상공간 방법과 포텐셜 방법에 기초한 방향성 가중치 방법으로 레이저 거리계(laser range finder)의 거리 데이터와 통로 유무에 대한 정보를 입력으로 사용한다. 이 방향성 가중치 방법은 방향성 가중치 함수와 거리 데이터의 곱인 attractive resultant force 계산과 간단한 collision-free path와 open pathway 시험에 의해서 이동로봇의 전진방향을 결정한다. 이 결과로 얻어진 이동로봇의 전진방향은 주위의 장애물과 충돌하지 않으면서 가장 짧은 경로로 목표점에 접근할 수 있도록 해 준다. 또한 이

동로봇의 실시간 항법을 위해 제안된 방향성 가중치 방법을 이용한 국부 경로계획 알고리즘의 타당성이 여러 가지 상황의 복잡한 환경하에서 모의 실험(computer simulation)을 통하여 보여진다.

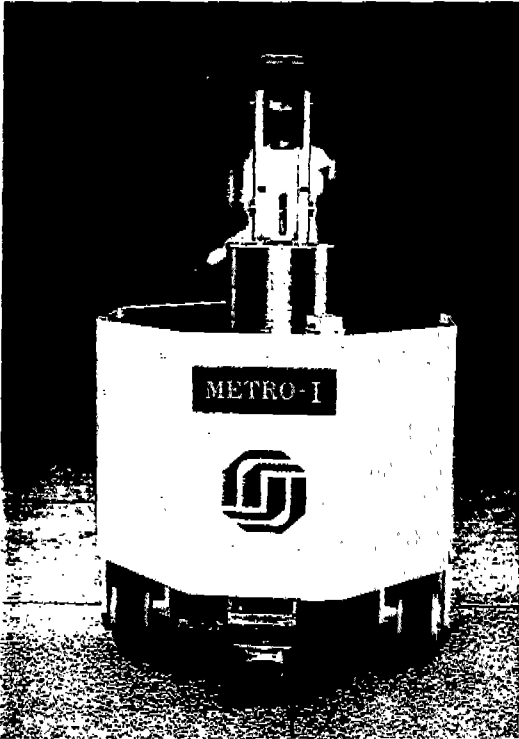


Fig. 1 Photograph of mobile robot "METRO-I" and laser range finder

2. 레이저 거리계

2.1 레이저 거리계의 구조

Fig.1은 자율 주행로봇 "METRO-I"과 그 상부에 고정된 레이저 거리계의 외관을 보여주고 있다. 이 주행로봇의 운동은 3개의 DC 서보모터에 의해서 이루어지는데 그들 중에서 2개 모터는 좌우 2개의 바퀴를 독립적으로 구동하고 나머지 1개 모터는 그 바퀴들을 동시에 조향시킨다. Fig.2는 이 레이저 거리계의 구조를 보여준다. 전체 구조는 상부 실린더와 하부 실린더로 구성되는데, 상부 실린더에는 CCD 카메라, 제3 반사경 회전기구 그리고 실린더 형태의 렌즈 세트가 장착되고, 하부 실린더에는 상부 실린더 회

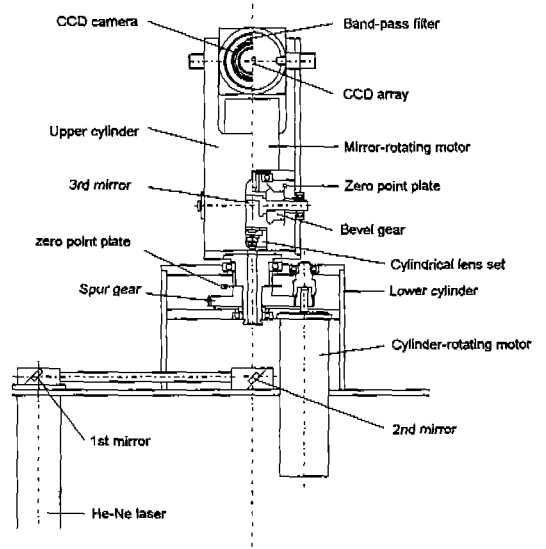


Fig. 2 Structure of laser range finder

전 기구가 장착되어 있다. 제1, 제2 반사경은 He-Ne 레이저 광원으로부터 나오는 빔을 직각으로 구부린다. 그 레이저 빔은 실린더 형태의 렌즈 세트에 의해서 슬릿 빔으로 바뀌고, 이 슬릿 빔은 제3 반사경 회전용 모터와 베벨기어에 의해서 회전되는 제3 반사경에 의해서 앞방향으로 구부러진다.

다른 한편으로, 물체(object ; obstacle)의 면에서 반사된 레이저 빔은 광학 노이즈를 제거하기 위하여 CCD 카메라 앞에 부착된 광학 밴드-패스 필터(optical band-pass filter)를 통하여 CCD 소자에 의해서 검출된다. 여기서 발사되는 슬릿 레이저 빔은 상부 실린더 회전용 모터와 제3 반사경 회전용 모터에 의해서 좌우로 회전되고, 상하로도 움직여질 수 있다. 이들 각 모터의 원점 위치를 지정해 주기 위하여 원점 판(zero-point plate)이 제3 반사경 회전용 모터와 상부 실린더 회전용 모터 각각에 연결된 베벨기어와 스피어기어에 고정되어 있다.

2.2 3차원 위치 계산

이 절에서는 CCD 카메라에 의해서 얻어진 영상으로부터 거리 데이터(range data : 3차원 위치)를 계산하기 위한 식을 유도한다. 여기서 이미징(imaging)을 위한 렌즈 시스템은 핀-홀 모델(pin-hole model)로 가정된다. Fig.3은 물체에 의해서 반사된 레이저 슬릿으로부터 3차원 위치

를 계산하기 위한 좌표계를 보여주고 있다. 이 시스템에는 3개의 좌표계가 있는데, 로봇 좌표계 [X, Y, Z], 센서 좌표계 [X', Y', Z'] 그리고 카메라 좌표계 [U, V, W]가 그것이다. 로봇 좌표계 [X, Y, Z]는 이동로봇의 바닥 중심에 고정되고, 작업영역에서 로봇과 함께 움직인다. 이 좌표계의 X축은 이동 로봇의 전진방향이고, Z축은 작업 면(working plane)의 수직 방향과 일치한다.

센서 좌표계 [X', Y', Z']의 원점은 로봇 좌표계의 원점과 일치하고, Z' 축은 로봇 좌표계의 Z축과 일치한다. 그리고 X'Y'면은 로봇 좌표계의 XY면에 상대적으로 회전하고, 그 상대적인 회전각은 θ_R 이다. 그리고 점 A는 제3 반사경의 중심점이다. 슬릿 레이저 빔은 점 A로부터 나오고, 레이저 면(laser plane)은 슬릿 레이저 면을 포함하고 X'Y'면과 함께 회전한다. 제3 반사경의 높이(점 O에서 점 A까지의 거리)는 l_A 이다. 빔 각도 θ_B 는 로봇 작업면과 레이저면 사이의 각도이다. 카메라 좌표계 [U, V, W]의 W 축은 CCD 카메라가 향하는 방향(view direction)과 일치한다. CCD 카메라의 렌즈중심은 점 B에 위치하고, CCD 소자는 렌즈의 초점면(UV면), 즉 영상 면(image plane)에 위치한다.

카메라의 경사각도 θ_V 는 W축과 로봇 작업면 사이의 각도이다. 카메라 렌즈의 초점과 제3 반사경의 중심은 모두 Z축 위에 위치한다고 가정되고, 렌즈 초점위치 B는 제3 반사경의 중심으로부터 l_B 만큼 떨어져 있다. 그리고 l_F 는 렌즈의 초점거리이다. 초점면(focal plane)은 영상이 맺히는 면으로 물체에서 반사된 슬릿 레이저 빔이 여기에 모인다. 영상에서 U축의 값은 반사된 슬릿 레이저 빔의 Y' 축의 값을 나타내고, V축 값은 로봇 중심으로부터 빔까지의 거리 정보를 준다.

그림에서와 같이 $\theta_R=0$ 이라 가정하면, 영상면 [U, V] 위의 점 C로부터 센서 좌표계 [X', Y', Z'] 위의 점 C'로 변환하는 식이 다음과 같이 얻어진다.

$$X' = \frac{l_B}{\tan \theta_V - \frac{V}{l_F} - \tan \theta_B} \quad (1)$$

$$Y' = -X' \frac{U}{l_F \cos \theta_V} \quad (2)$$

$$Z' = l_A (1 - X' \frac{\tan \theta_B}{l_A}) \quad (3)$$

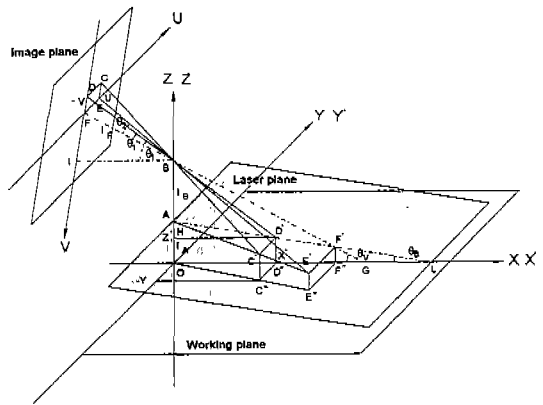


Fig. 3 Definition of Coordinate systems

$\theta_R=0$ 로 가정했으므로, 센서 좌표계 [X', Y', Z']에서 3차원 위치 데이터는 로봇 좌표계 [X, Y, Z]에서의 위치 데이터와 일치한다. 즉 $X=X'$, $Y=Y'$ 그리고 $Z=Z'$ 이다. 만약 $\theta_R \neq 0$ 인 경우에 센서 좌표계 [X', Y', Z']의 3차원 위치 데이터는 로봇 좌표계 [X, Y, Z]의 위치 데이터로 변환되어야 한다. 왜냐하면 이동로봇의 자율주행에는 로봇 좌표계를 기준으로 물체의 3차원 위치 데이터가 필요하기 때문이다. 이는 다음과 같은 간단한 변환 행렬로부터 얻어진다.

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta_R & -\sin \theta_R & 0 \\ \sin \theta_R & \cos \theta_R & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X' \\ Y' \\ Z' \end{bmatrix} \quad (4)$$

2. 3 영상처리

CCD 카메라에 잡혀진 물체표면에서 반사된 레이저 빔의 영상으로부터 거리 데이터(range data)를 얻을 수 있다. 그 영상처리는 다음과 같은 다섯 단계로 이루어진다.

- 1) 물체면에서 반사된 빔으로부터 영상을 받는다.
- 2) 각 화소의 밝기강도(gray-level intensity) $I(u, v)$ 를 읽는다.
- 3) 각 열(column)에서 최대 밝기강도를 가지는 화소(pixel)들을 찾는다. 즉

$$V_{\max}(u) = \max_v I(u, v) \quad (5)$$

4) 인근 화소와의 상대적인 거리시험 (distance test)에 의하여 노이즈를 제거한다. 즉,

$$\text{IF } |V_{\max}(u) - V_{\max}(u-1)| < \varepsilon_1 \text{ or} \\ |V_{\max}(u) - V_{\max}(u+1)| < \varepsilon_1 \text{ (여기서, } \varepsilon_1 \text{은 주어진 값),}$$

THEN $V_{\max}(u)$ survives,
ELSE $V_{\max}(u)$ is removed.

5) 남아 있는 화소들에 대해서 삼각법(triangulation method)을 적용하여 거리 데이터 $R(x, y)$ 를 계산한다. (식 (1), (2) 그리고 (3) 이용).

2. 4 실험

제안된 레이저 거리계에서는 He-Ne 레이저 (10mW power, 632.8nm wavelength)가 광원으로 사용되고, 4개의 실린더 형상을 가진 렌즈가 슬릿 빔(slit beam)을 형성하기 위하여 사용된다. 영상 센서로는 흑/백 CCD 카메라가 사용되는데, 유효 CCD 배열의 크기는 6.4 mm(H) × 4.8 mm(V), 유효 화소수는 570(H) × 485(V)이고 초점거리 $f_F=12\text{mm}$ 이다. 또한 광학 밴드-패스 필터(632.8nm wavelength)가 광학 노이즈를 제거하는데 사용된다. 영상 처리 유닛(unit)은 512(H) × 480(V) × 7bit 그레이-레벨(gray level)의 입력 해상도를 가지는 프레임 그래버(frame grabber)와 486CPU 카드(card)로 구성되어 있다. 주사기구(scanning mechanism)는 2개의 DC 서보모터, 1개의 인터페이스 보드(interface board), 2개의 업-다운 보드(up-down board) 그리고 모터구동을 위한 286 CPU 카드로 구성된다.

Fig. 4(a)는 이 실험에서 사용된 물체를 보여주고 있다. 물체의 표면에서 반사된 레이저 빔은 CCD 카메라에 의해서 검출되고, 이렇게 얻어진 영상으로부터 거리 데이터를 계산하기 위하여 다음과 같은 처리가 행해진다. 먼저, 영상의 각 열에서 최대 밝기를 가지는 화소를 찾는데, 그 결과가 Fig. 4(b)에서 보여진다. 이 과정에서는, 물체에서 반사된 레이저 빔 뿐만 아니라 노이즈도 동시에 나타나게 된다. Fig. 4(c)는 인근 화소와의 상대적인 거리시험에 의한 노이즈 제거 결과를 보여준다. Fig. 4(d)는 이러한 노이즈 제거 과정에서 살아남은 화소에 대하여, 삼각법으로 계산된 물체의 거리정보를 보여주고 있다. (식(1), (2) 그리고 (3) 이용). 256열의 한 프레임을 처리하는데 1sec 이내의 시간이 소요되었다.

3. 국부 경로계획

3. 1 레이저 탐색과 거리데이터

여기서는 앞에서 거론한 레이저 거리계가 각도와 거리 측정에서 우수한 분해능을 가지고 있는 것을 고려하여, 레이저 거리계로부터 얻을 수 있는 거리 데이터와 장애물 유무에 대한 정보를 입력으로 사용하는, 정교하면서 간결한 방향성 가중치 방법에 의한 국부 경로계획 알고리즘을 다룬다. 제안된 레이저 거리계의 최대 시야각(maximum view angle)은 약 60° 인데. 이는 레이저 슬릿 발생장치의 하드웨어적인 제한과 광각 CCD 카메라 채용에 따른 분해능의 감소에 기인한다. 따라서 레이저 탐색은 목표점 방향을 중심으로 $\pm 90^\circ$, 즉 180° 영역을 탐색하기 위해서는 3번의 주사(scanning)가 필요하다. 그리고 각 주사 영역의 거리정보는 삼각법에 의해서 얻을 수 있다. Fig. 5는 레이저 거리계의 탐색 예를 보여준다. 레이저 거리계의 탐색영역은 이동로봇의 현재위치 O를 원점으로 하는 반경 $R_3(=3m)$ 인 원에서 목표점 방향을 중심으로 $\pm 90^\circ$ 인 반원의 내부로 제한된다. 그림에서 탐색영역 내에 3개의 장애물(obstacle) A, B 그리고 C가 놓여져 있고, 각 장애물의 꼭지점은 아래 첨자로 표시되어 있다(예로서, 장애물 A의 경우 각 꼭지점은 A_1, A_2, A_3, A_4 로 이루어져 있다). 특히 작업영역의 바닥면에서 반사되는 레이저 슬릿 중에서 점 S_3 는 장애물 C의 한면인 $\overline{C_1C_4}$ 위의 한점 C'와 일치한다. 거리정보를 얻을 수 있는, 즉 레이저 슬릿이 반사되는, 면은 장애물의 겹면 ($\overline{A_1A_2}, \overline{B_2B'}, \overline{C_1C_2}, \overline{C_1C'}$)과 작업영역의 바닥면 ($\overline{S_1S_2}, \overline{S_3S_4}, \overline{S_5S_6}$)이 된다. 이들 면 사이에 레이저 슬릿의 불연속 구간 ($\overline{A_1S_5}, \overline{A_2B'}, \overline{B_2S_4}, \overline{C_2S_2}$)이 존재한다. 이 불연속 구간들은 장애물과 또 다른 장애물, 또는 장애물과 바닥면 사이에 이동로봇이 통과 가능한 통로가 있을 수 있음을 암시한다. 따라서 이동로봇이 통과할 수 있는 구간은 레이저 슬릿이 바닥면 위에서 반사되는 영역과 불연속 구간으로 제한된다. 특히 불연속 구간은 이동로봇의 진행에 따른 레이저 거리계의 탐색위치 변화에 따라 통과 가능 또는 불가능한 통로로 확인된다.

따라서 레이저 거리계의 탐색영역은 이동로봇이 접근할 수 있는 자유영역(collison-free area)과 충돌이 야기될 가능성이 있는 비 확정영역(undefined area)으로 나눌 수

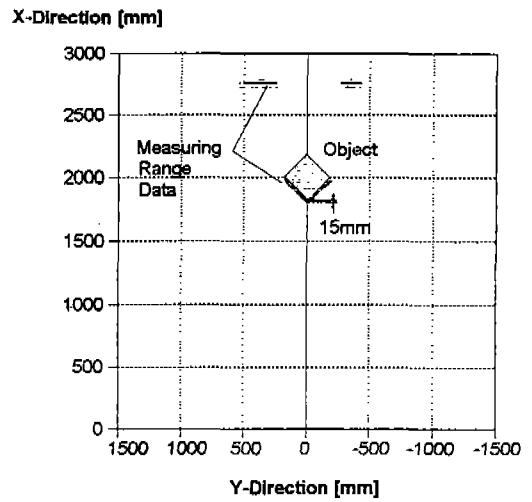
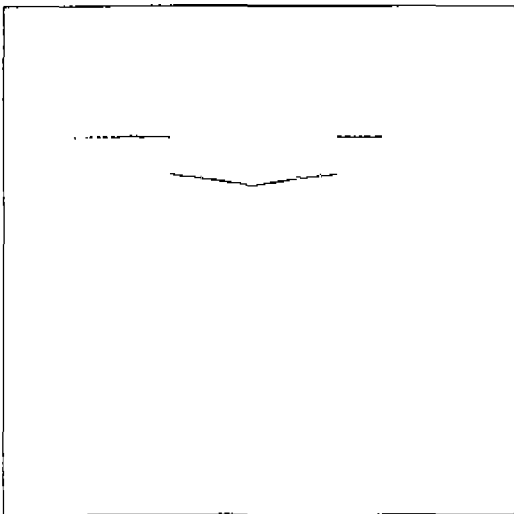
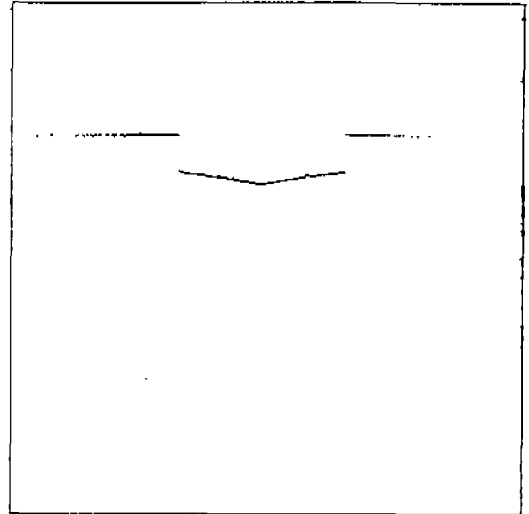
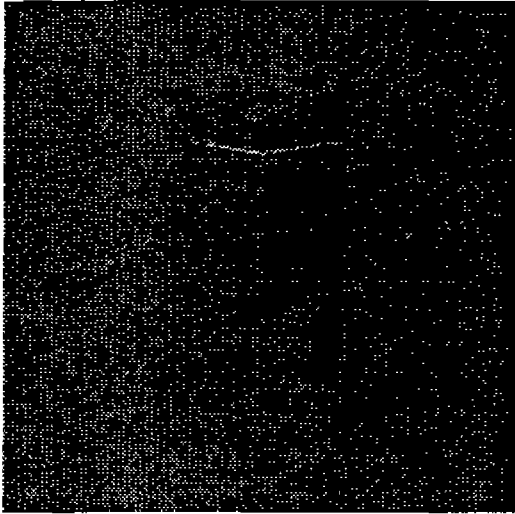


Fig. 4 (a) Object used in experiment, (b) Result of finding the pixels with maximum intensity in each column, (c) Image after removing noises, and (d) Range map and measuring error

있는데, 이들 영역사이의 경계는 물체에서 반사되는 레이저 슬릿면 구간과 불연속 구간이 된다. 또한 비 확정영역은, 현재 이동로봇의 위치에서는 구분할 수 없지만, 장애물에 의해서 점유된 영역과 이들 장애물에 의해서 가려진 그림자 영역(shadow area)으로 나눌 수 있다.

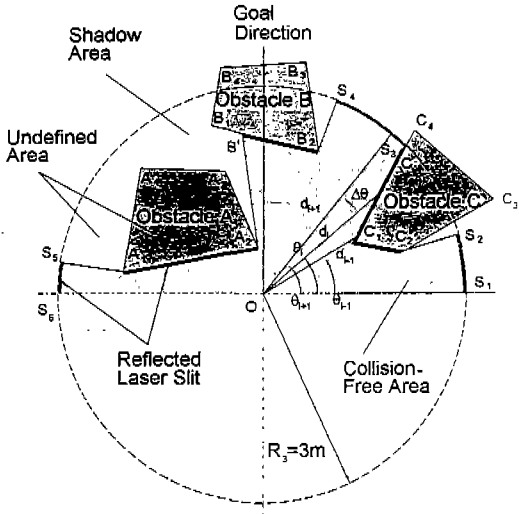


Fig. 5 Searching area of laser range finder

이와 같이 얻어진 장애물의 연속적인 거리 데이터와 통로의 유무에 대한 정보는 다음 절에서 거론할 방향성 가중치 방법에 의한 곡부 경로계획에서 사용된다. 특히 물체에서 반사된 레이저 슬릿에 의한 연속적인 거리 데이터는 샘플링 각도 $\Delta\theta$ 마다 추출한 $N=(180^\circ/\Delta\theta^\circ + 1)$ 개의 불연속 거리 데이터로 샘플링된다. 따라서 이동로봇의 현재 위치에서 goal 방향을 중심으로 -90° 를 기준해서 반시계 방향으로 매 샘플링 각도 $\Delta\theta$ 만큼 불연속적으로 회전한 각도를 θ_i 라 하면,

$$\theta_i = (i-1)\Delta\theta \quad (i=1, 2, \dots, N) \quad (6)$$

과 같이 나타낼 수 있다. 임의의 θ_i 에서의 샘플링된 거리 데이터 d_i 는 이동로봇의 현재 위치에서 θ_i 방향으로 그은 직선이 반사된 레이저 슬릿과 만나는 점까지의 거리가 된다. 그림에서 보면, 점 O에서 θ_i 방향으로 그은 직선이 장애물 C 위의 한면 C_1C_4 와 만나는 점까지의 거리가 d_i 이다. 또한 샘플링 각도 $\Delta\theta$ 가 작을수록 샘플링되는 거리 데이터의 갯수가 많아지고, $\Delta\theta$ 가 커질수록 거리 데이터의 수는 적어진다. 여기서 샘플링되는 거리 데이터의 갯수

가 많아 질수록 초기에 레이저 거리계로부터 얻어지는 연속적인 거리정보에 가까워져서 주위환경을 더 자세히 기술할 수 있으나, 반면에 데이터 처리를 위한 계산량이 많아지는 단점이 있다. 따라서 적당한 샘플링 각도 $\Delta\theta$ 의 선택이 필요하다.

3. 2 방향성 가중치 방법

이동로봇이 자율적으로 주행하기 위하여 스스로 전진방향과 속도 (또는 샘플링 시간동안 가야 할 이동거리)를 결정해야 한다. 특히 이동로봇의 전진방향은 이미 얻어진 거리 데이터와 통로의 유무에 대한 정보를 이용하여 주위의 장애물과 충돌하지 않으면서 가장 짧은 경로로 목표점에 접근할 수 있는 방향을 선택해야 한다. 이때 2개의 문제가 제기되는데, 그 첫번째는 목표점으로 가장 빠르게 접근할 수 있도록 최단 경로가 되는 전진방향을 선택하는 것이고, 두번째는 선택된 방향으로 이동로봇이 주행할 때 주위의 장애물과 충돌하지 않는지를 collision-free path 시험을 통하여 보장해 주어야 한다. 이 절과 다음 절에서는 첫번째 사항을 다루고, 3.4절에서는 두번째 사항을 다룬다.

먼저 이동로봇의 현재위치에서 레이저 거리계를 이용하여 얻을 수 있는 국부적인 거리 데이터를 가지고, 목표점으로 가장 빠르게 접근할 수 있는 방향을 선택하는 방법으로 방향성 가중치 방법(directional weighting method)을 제안한다. 이동로봇의 현재 위치에서 목표점으로 가장 빠르게 접근하는 전진방향은 현재위치와 목표점을 직선으로 연결한 방향이 될 것이다. 그러나 이 직선상에 장애물이 존재하는 경우 부득이 이를 피해서 가야 하는데, 되도록이면 목표점 방향과의 각도 차가 작은 방향으로 진행하는 것이 더 경제적이다. 따라서 목표점 방향에서 멀어질수록 가중치가 적어지는 방향성 가중치 함수 $\Phi(x, y)$ 를 도입하여 앞에서 얻은 샘플링된 거리 데이터와 그 방향의 가중치 값을 곱한 결과에서 큰값을 가지는 방향일수록 목표점에 빨리 도착할 수 있는 가능성이 큰 방향이 된다. 즉 임의의 각도 θ_i 에서의 거리데이터 d_i 와 그 방향의 가중치 w_i 의 곱을 attractive resultant force R_i 라 하면

$$R_i = w_i d_i \quad (i=1, 2, \dots, N) \quad (7)$$

가 된다. Fig. 6(a)는 레이저 거리계로부터 얻어지는 거리 데이터의 한 예를 보여주고 있다. 여기서 레이저 탐색영역은 로봇의 현재위치를 원점으로 하는 반경 $R_3 (=3m)$ 인 원에서 목표점 방향을 중심으로 $\pm 90^\circ$ 로 제한된다. 특히 목

표점 방향은 센서좌표계의 +X' 방향과 일치한다. Fig. 6 (b)는 archimedes의 spiral 함수 (3.3절 참조)에서 얻을 수 있는 방향성 가중치함수의 한 예를 보여준다. 그림에서 보면, 목표점 방향을 중심으로 여기서 멀어질 수록 가중치 값이 작아지는 좌우 대칭형 함수임을 알 수 있다. Fig. 6(c)는 식(7)에 의해 계산된 attractive resultant force의 결과를 보여준다 여기서 attractive resultant force는 레이저 거리계로부터 얻어지는 샘플링된 거리 데이터와 곱해지는 방향성 가중치 함수의 영향에 의해서 목표점 방향에 가까울수록 과장되어 나타나고, 멀어질수록 축소되어 나타남을 알 수 있다. 다른 한편으로, 샘플링 각도 $\Delta\theta$ 의 크기에 따라 불연속 거리 데이터의 갯수 N이 변화하고 따라서 attractive resultant force도 N개를 얻을 수 있다. 이 N개의 attractive resultant force를 가장 큰 것부터 순서대로 나열할 수 있고, 그 순서가 이동로봇이 최단거리로 목표점에 도착할 가능성이 있는 전진방향의 순서가 된다. 그러나 이러한 전진방향으로의 이동로봇의 진행이 장애물과의 충돌회피를 완전히 보장해 주지는 못하므로 이들 방향에 대한 경로의 충돌에 대한 안전성은 다시 시험되어야 하는데, 이는 3.4절에서 다룬다.

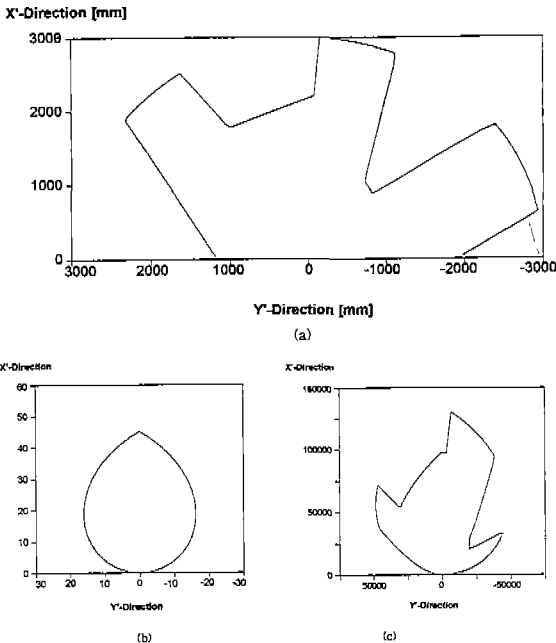


Fig. 6 (1) Range data, (b) Directional weighting function, and (c) Calculated attractive resultant force.

3.3 방향성 가중치 함수

앞에서 거론한 attractive resultant force를 얻는데 사용하는 방향성 가중치 함수는 여러가지가 있을 수 있다. 이들 가중치 함수의 공통적인 특징은 목표점 방향으로 가장 큰 값을 갖고, 여기서 멀어질수록 가중치 값이 작아지며, 목표점 방향을 중심으로 좌우대칭 형상을 갖는 것이다. 이러한 가중치 함수는 레이저 거리계의 탐색범위(목표점 방향을 기준으로 $\pm 90^\circ$, $\pm 120^\circ$, 또는 $\pm 180^\circ$ 등), 최저 가중치 값, 함수 형상의 좌우폭과 높이의 비율에 따라 여러가지 종류가 있을 수 있다. 방향성 가중치 함수 $\Phi(x, y)$ 의

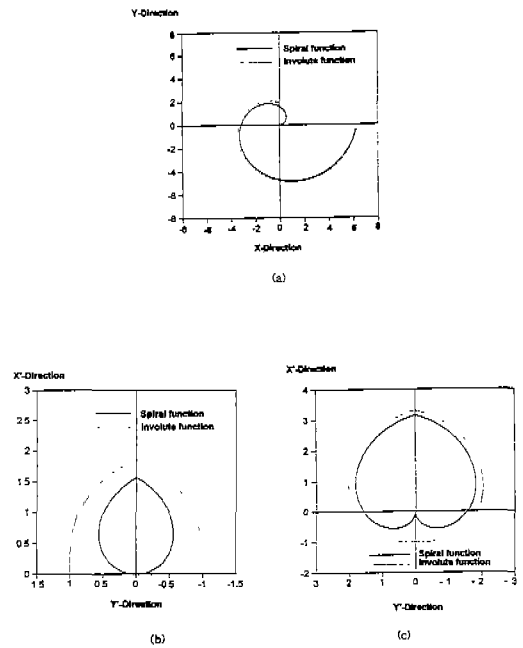


Fig. 7 (a) Spiral and involute functions, (b) Directional weighting functions used in $\pm 90^\circ$ searching range, and (c) Directional weighting functions used in $\pm 180^\circ$ searching range.

예로서 Fig. 7(a)는 Archimedes의 spiral 함수와 involute 함수의 곡선을 보여주고 있다. 여기서 Archimedes의 spiral 함수 $\Phi(x, y)$ 의 곡선식은

$$x = \gamma \cos \theta \quad (8)$$

$$y = \gamma \sin \theta \quad (9)$$

여기서

$$\gamma = a\theta \quad \begin{cases} a = \text{constant} \\ 0 \leq \theta < 2\pi \end{cases} \quad (10)$$

과 같고, 기어의 치형에 사용되는 involute 함수 $\Phi(x, y)$ 의 곡선식은

$$x = a(\cos \theta - \theta \sin \theta) \quad (9)$$

$$y = a(\sin \theta - \theta \cos \theta) \quad \begin{cases} a = \text{constant} \\ 0 \leq \theta < 2\pi \end{cases} \quad (10)$$

과 같다. 이들 두 곡선에서 목표점 방향을 센서좌표계의 +X' 방향으로 고정하고, 제1 상한의 곡선을 좌우대칭으로 만든 가중치 함수가 Fig. 7(b)에서 보여진다. 이들 가중치 함수에 대한 레이저 거리계의 탐색범위는 목표점 방향을 중심으로 $\pm 90^\circ$ 이고, 최저 가중치값은 $\pm 90^\circ$ 에서 각각 0 과 1이다. Fig. 7(c)는 이들 함수에서 제1, 2 상한의 곡선을 이용한 가중치 함수를 보여주고 있고, 이 가중치 함수에 대한 레이저 거리계의 탐색범위는 $\pm 180^\circ$ 이다.

각 가중치 함수의 특징은 다음과 같다. 먼저 거리 데이터를 얻기 위한 레이저 거리계의 탐색범위, 즉 가중치 함수의 영역이 $\pm 90^\circ$ 와 $\pm 180^\circ$ 인 것을 비교하여 보면, 이동 로봇이 오목한 장애물 영역에 들어갔을 경우 탐색범위가 $\pm 180^\circ$ 인 것이 더욱 유리하지만, 반면에 레이저 주사가 더 넓은 영역에서 이루어져야 하기 때문에 $\pm 90^\circ$ 인 것에 비해 데이터 처리시간이 증가하는 단점이 있다. 또한 최저 가중치 값이 0 또는 다른 값을 갖는 경우에 대해서 비교해 보면, 목표점을 중심으로 $\pm 90^\circ$ 방향 근처에만 통로가 있는 경우에 전자의 경우가 후자의 경우보다 더 늦게 전진 방향을 찾는 단점이 있다 (attractive resultant force가 큰 값부터 collision-free path 시험을 순차적으로 수행하면서 전진방향을 찾기 때문에). 또한 가중치 함수의 좌우폭이 좁고 넓음에 따라 앞에서 거론한 최저 가중치 값에 따른 경우와 같은 결과를 예측할 수 있다.

3. 4 Collision-Free Path

앞절에서 거론한 방향성 가중치 방법에 따라 attractive resultant force가 구해지고, 그들이 가장 큰 값부터 순서대로 배열되었다면, 먼저 가장 큰 값을 갖는 attractive resultant force 방향에 대한 collision-free path와 open pathway 시험을 한다. Fig. 8은 collision-free path와 open pathway 시험 영역을 보여주고 있다. 먼저 collision-free path 시험의 경우, 가장 큰값을 갖는

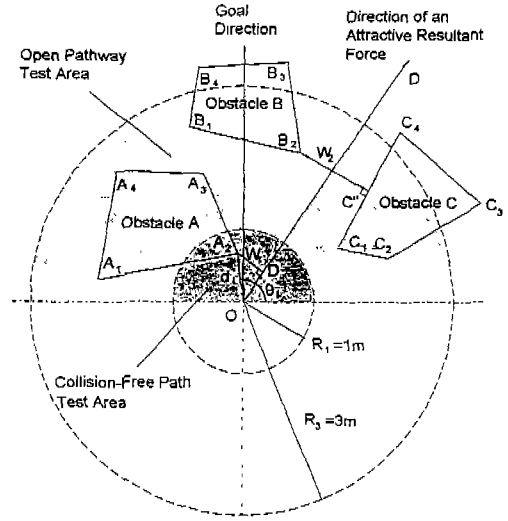


Fig. 8 Collision-free path and open pathway test regions

attractive resultant force 방향을 \overline{OD} 라 가정하면, 반경 $R_1 (=1m)$ 이내에서 직선 \overline{OD} 과 수직거리가 가장 가까운 거리데이터 d_i 를 찾아내고, 그 수직거리 $\overline{A_2D'}$ 를 계산할 수 있다. 그 수직거리를 W_1 이라하고 로봇 몸체의 반경을 R_r , 장애물 회피를 위한 안전여유를 W_s 라 하면 collision-free path 시험조건

$$W_1 \geq (R_r + W_s) \quad (13)$$

을 만족하는지를 판별하여 이 조건을 만족하면 다음단계의 open pathway 시험을 수행하고, 만족하지 않으면 그 다음 큰값을 갖는 attractive resultant force 방향에 대한 collision-free path 시험을 다시 수행한다. 여기서 collision-free path 시험을 반경 $R_1 (=1m)$ 이내로 제한한 것은 이동로봇에 명령이 주어지는 샘플링 시간동안의 최대 전진거리가 약 0.5m이고, 로봇 몸체의 반경이 0.3m, 그리고 진행 방향의 안전여유가 0.2m로 주어지기 때문이다.

collision-free path 시험조건을 만족하면 탐색범위 $R_3 (=3m)$ 내에서 attractive resultant force 방향 즉 \overline{OD} 방향으로 이동로봇이 통과 가능한 통로가 있는지를 시험하여야 한다. 이는 \overline{OD} 방향으로 장애물 사이의 최소폭 사이를 이동로봇이 통과할 수 있는지를 시험함으로써 가능하다. 그럼에서 장애물 사이의 최소폭은 $\overline{B_2C'}$ 가 되고 이를 W_2 라 하면, 다음의 open pathway 시험조건

$$W_2 \geq 2(R_r + W_s) \quad (14)$$

을 만족하면 선택된 attractive resultant force 방향이 최종적으로 이동로봇의 다음 스텝(step)의 전진방향으로 되고, 만족하지 않으면 그 다음 큰값을 갖는 attractive resultant force 방향을 선택하여 collision-free path와 open pathway 시험을 다시 수행해서, 이 두 조건을 모두 만족하는 attractive resultant force 방향을 다음 스텝의 전진 방향으로 결정한다. 이와 같이 결정된 전진방향과 더불어 로봇의 주행에 있어 필요한 것은 속도 또는 샘플링 시간동안 가야할 거리이다. 앞에서 결정된 전진방향으로의 속도는 장애물의 유무와 통로의 폭에 따라 결정되어야 하지만, 여기서는 로봇이 샘플링 시간동안 일정한 거리를 이동하는 것으로 간주하였다.

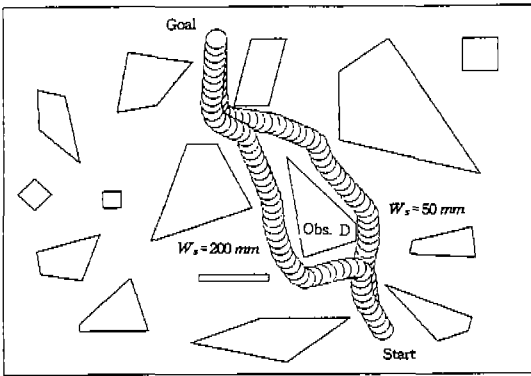


Fig. 9 Navigation result according to change of the safety margin W_s

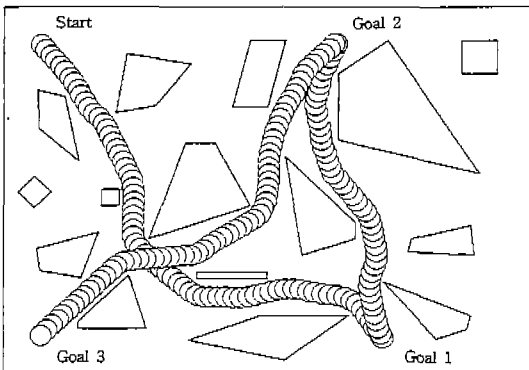


Fig.10 Navigation result in the case of multi-goal command

3. 5 모의 실험

앞에서 거론한 방향성 가중치방법에 기초한 국부 경로 계획 알고리즘의 모의실험(computer simulation)이 IBM-PC(486)에서 이루어 졌고, 그 결과가 Fig. 9와 Fig. 10에 나와 있다. 이들 그림에서는 벽과 장애물로 이루어진 가상 의 실내 환경이 보여진다 (가로 15m와 세로 11m). 그리고 여기서는 두 종류의 센서 데이터가 얻어진다고 가정한다. 그들 중에서 하나는 이동로봇 자신의 위치추정을 위한 것이고, 다른 하나는 장애물을 피하기 위하여 국부적인 주위 환경을 인식하기 위한 것이다. 전자의 센서로는 바퀴 회전 용 엔코더가 사용되고, 후자의 센서로는 앞절에서 거론한 레이저 거리계가 사용된다고 가정하였다. 이 모의실험에서 로봇의 새로운 전진방향 결정을 위한 샘플링 시간은 3sec로 하였고(실제로 방향성 가중치 방법만의 계산시간은 약 0.1sec 이내), 레이저 거리계의 탐색범위는 반경 3m인 원에서 목표점 방향으로 중심으로 $\pm 90^\circ$ 이내의 영역으로 한정하였다. 여기서 사용된 방향성 가중치 함수는 Archimedes의 spiral 곡선이다($a=1$). 또한 샘플링 각도 $\Delta\theta=1^\circ$ 로 하여 181개의 불연속 거리데이터를 사용하였다. 이 모의실험 결과는 매 1sec마다 로봇의 경로를 원으로 표시한 것이다. Fig. 9는 안전여유 W_s 의 변화에 따른 이동로봇의 경로를 보여주고 있다. 그림에서 보면, 출발점에서 목표점으로 향할 때 장애물 D를 만나는 경우 $W_s=50mm$ 일 때는 장애물을 오른쪽으로 돌아서 전진하고, $W_s=200mm$ 일 때는 장애물의 오른쪽보다는 왼쪽의 attractive resultant force가 더 크기 때문에 왼쪽으로 우회하여 전진하는 것을 알 수 있다. 일반적으로 안전여유가 클수록 장애물에서 더 멀리 떨어져서 거동하기 때문에 더욱 안전하지만, 목표점까지의 경로가 길어져서 비경제적이다. Fig. 10은 다수의 목표점 명령이 주어진 경우에 이동로봇의 항법 결과를 보여주고 있다 ($W_s=50mm$). 여기서 로봇은 좁은 통로, 넓은 통로, 접근 불가능한 통로, 그리고 여러개의 통로가 있는 경우의 복잡한 환경에서 다수의 목표점을 성공적으로 통과함을 알 수 있다. 결국 이와같은 결과는 각도와 거리측정에 대한 우수한 분해능을 가지고 있는 레이저 거리계의 거리 데이터와 장애물 유무에 대한 정보를 이용하여, 형상공간 방법과 포텐셜 방법에 기초한 방향성 가중치 방법을 이용한 정교하고 간결한 국부 경로계획 알고리즘에 의해서 얻어질 수 있었다.

4. 결 론

본 연구에서는 미지환경에서 로봇의 자율주행을 위한 센서 정보로서 레이저 거리계의 거리 데이터와 장애물 유무에 대한 정보를 이용한 국부 경로계획 알고리즘을 다루었다. 레이저 거리계가 각도와 거리측정에 대한 우수한 분해능을 가지고 있는 것을 고려하여, 정교하고 간결한 국부 경로계획 알고리즘으로 방향성 가중치 방법이 형상공간 방법과 포텐셜 방법에 기초하여 제안되었다. 이 방향성 가중치 방법은 이동로봇의 전진방향을 주위의 장애물과 충돌하지 않으면서 가장 짧은 경로로 목표점에 접근할 수 있도록 해 준다. 또한 이동로봇의 항법을 위한 제안된 국부 경로계획 알고리즘의 결과가 복잡한 환경에서 모의실험을 통하여 보여졌다.

참고문헌

1. Lozano-Perez T. and Wesley M.A., 1979, "An algorithm for planning collision-free paths among polyhedral obstacles", Commun. ACM, pp.560~570
2. Noborio H., Naniwa T. and Arimoto S., 1988, "A fast path planning algorithm by synchronizing modification and search of its path-graph", Proc. IEEE Intern. Workshop on Artificial unelligent for Industrial Application, pp.351~357.
3. R.Brooks, "Solving the find path problems by good representation of free space" IEEE Trans. Syst. Man Cybern., Vol.SMC-13, No.3,pp.190~197, 1983.
4. Adams M.D. and Probert P.J., 1990 "Towards a real-time navigation strategy for a mobile robot", Proc. of the IEEE Intern Workshop on Intelligent Robots and Systems, pp.743~748.
5. Borenstein J. and Koren Y., 1991, "The vector field gistogram-fast obstacle avoidance for mobile robots", IEEE Trans. on Robotics and Automation, No.3, pp.278~298.
6. S.Ishikawa, "A method of indoor mobile robot navigation by fuzzy control", in Proc. Int. Conf. Intelligent Robots and Systems, pp.1013~1018, Dec. 1991.
7. S. Nagata, M.Sekiguchi and K.Asakawa, "Mobile robot control by a structured hierachical neural network", IEEE Contr. Syst. Mag., Vol. 10, No. 3, pp.69~76, 1990
8. C.Kozakiewicz and M.Ejiri, "Neural network approach to path planning for two dimensional robot motion", in Proc. Int. Conf. Intelligent Robots and Systems, pp.818~823, 1991.