碩士學位論文

미지의 영역에서 활동하는 자율이동로봇의 초음파지도에 근거한 위치인식 시스템개발

濟州大學校 大學院

機械工學科

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

姜 昇 均

1996年 12月

미지의 영역에서 활동하는 자율이동로봇의 초음파지도에 근거한 위치인식 시스템개발

指導敎授 林 鍾 桓

姜 昇 均

이 論文을 工學 碩士學位 論文으로 提出함

1996 年 12 月

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

姜昇均의 工學 碩士學位 論文을 認准함

審査委員長 강 희 식

委 員

委 員 임 종 환

濟州大學校 大學院

1996 年 12 月

Development of a Sonar Map Based Position Estimation System for an Autonomous Mobile Robot Operating in an Unknown Environment

Seung-Kyun Kang
(Supervised by professor Jong-Hwan Lim)

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF
THE REQUIREMENTS FOR THE DEGREE OF MASTER
OF ENGINEERING

DEPARTMENT OF MECHANICAL ENGINEERING
GRADUATE SCHOOL
CHEJU NATIONAL UNIVERSITY

1996 . 12 .

목 차

Summary ····· 1

Ⅰ. 서 론 ····· 2

Ⅱ. 이 론 ····· 5

1. 이동로봇외제어 및 위치 추측법 ····· 5

1.1 로봇의 하드웨어 ····· 5

1.2 로봇의 구동제어 ····· 9

1.3 로봇의 위치추측법 ····· 10

2. 초음파 지도 ····· 12

3. 주행제어 ····· 16

3.1 국부지도 ····· 16

3.2 주행제어 ····· 17

4. 로봇의 위치불확실도의 추정 ····· 21

5. 위치평가 ····· 25

5.1 기준지도 선택방법 ····· 25

5.2 지도사이의 대응성 ····· 26

5.3 위치평가 ····· 27

Ⅲ. 실험 및 결과 ····· 30

1. 로봇의 주행제어 실험 ····· 30

2. 로봇의 위치불확실성 ····· 33

3. 위치평가 ····· 36

3.1 기준지도 선택 ····· 36

3.2 위치평가 ····· 40

Ⅳ. 결 론 ····· 46

Ⅴ. 참고문헌 ····· 47

Ⅵ. 부 록 ····· 50

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

SUMMARY

Among the prerequisite abilities (perception of environment, path planning and position estimation) of an autonomous mobile robot, position estimation has been seldom studied by mobile robot researchers. In most cases, conventional position estimation has been performed by placing landmarks or giving the entire environmental information in advance. Unlikely to the conventional ones, the study addresses a new method that the robot itself can select distinctive features in the environment and save them as landmarks without any a priori knowledge, which can maximize the autonomous behavior of the robot. First, an orientation probability model is applied to construct a local map of robot's surrounding. The feature of the object in the map is then extracted and the map is saved as landmark. Also, presented is the position estimation method that utilizes the correspondence between landmarks and current local map. In doing this, the uncertainty of the robot's current position is estimated in order to select the corresponding landmark stored in the previous steps. The usefulness of all these approaches are illustrated with the results produced by a real robot equipped with ultrasonic sensors.

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

I. 서 론

자율 이동 로봇(Autonomous Mobile Robot)은 주어진 환경에 대한 사전지식이 없는 상태에서 스스로 그 환경에 대처할 수 있는 능력을 가진 로봇을 의미한다. 일반적으로 이동로봇은 매니퓰레이터와는 달리 그 작업영역의 제한이 적고 유연성이 크므로 그 용도가 다양하다. 따라서 유해한 작업환경에 인간을 대체할 수 있으며, 무인 자동화 창고의 운반차량등 산업현장에서도 각광을 받고있다. 뿐만 아니라 무인청소기, 무인 잔디깍기등 가정용으로도 이용될 수 있어 그 응용범위가 대단히 넓다고 할 수 있다.

이동로봇이 자율적인 행동을 하기 위해서는 환경인식, 경로계획 및 주행제어, 그리고 위치인식 및 보정등의 3가지 기본적인 능력을 갖추어야 한다. 환경인식과 경로계획은 지금까지 많은 연구가 수행되어 왔으며, 그 결과 어느 정도 실용적인 단계에 와 있으나, 위치인식 및 보정에 관한 연구는 상대적으로 미흡한 실정이다. 실제 자율이동로봇의 주행에는 지면과 바퀴사이의 미끄럼, 지면의 요철, 그리고 엔코더 회로의 전기적 잡음 및 엔코더 자체의 해상도 등에 의한 랜덤(random)한 오차가 필연적으로 개입된다. 뿐만 아니라, 로봇에 부착된 바퀴들의 형상은 동일하며, 각 바퀴는 이상적인 원형을 이룬다고 가정하지만, 실제 바퀴들의 형상은 동일하지 않으며, 이상적인 원형이 아님에 의해 발생하는 계통오차도 이동로봇의 위치오차에 큰 비중을 차지한다.

이와 같은 요인들에 의해 발생하는 오차는 Dead Reckoning 시스템(바퀴에 부착된 엔코더 정보만을 이용하여 위치를 결정하는 시스템)만으로는 보정할 수 없는 것이며, 따라서 많은 연구자들이 안내선(Guide Line)이나 안내표식(Landmark or Guide Mark) 등을 이용해 왔다. 안내선 방법은 비교적 정확하고 쉽게 위치정보를 얻을 수 있는 반

제주대학교 중앙도서관

면에 작업영역이 극히 제한되므로 자율이동로봇 시스템에는 부적합하며, 주로 AGV (무인반송차)에 적용되고 있다.

안내표식 방법은 비콘(Beacon)센서를 이용하는 방법, 인공안내표식방법, 그리고 자연안내표식방법으로 분류된다. 비콘센서 방식은 센서 자체를 안내표식으로 이용하는 방법이다. Leonard와 Durrent_Whyte(1991)는 초음파 비콘을 작업장 내에 배치하고, 이들로부터의 정보를 칼만필터(Kalman Filter)로 처리하여 로봇의 위치를 평가하는 방법을 제안했다. 또한 Kleeman등(1989, 1992) 은 Dead Reckoning정보와 초음파 비콘정보를 동시에 이용하여 로봇의 위치를 평가하는 방법을 연구하였다.

인공안내표식방법은 현재 가장 일반적으로 이용되는 방법으로, 작업장내에 주위 환경과 쉽게 구별될 수 있는 색상과 모양의 표식을 설치하고 카메라로 이것을 포착하여 위치를 평가하는 방법으로서, 비젼(vision)시스템에서 주로 쓰이고 있다. 최근, 바-코드 형태의 안내표식을 작업장내에 설치하고 레이저 센서로 그 표식을 읽어 위치를 평가하는 방법도 Hyppa(1989)에 의해 연구되었다. 반면에 자연 안내표식 방법은, 작업영역내의 주위환경 그 자체를 안내표식으로 이용하는 방법이다. Crowley(1986, 1992)는 사전에 작업장의 형상을 선분형태로 구성한 기준모델을 로봇에 제공한 후, 작업과정에서 로봇에 장착된 센서의 정보와 이 기준모델을 비교하여 위치를 평가하는 방법을 연구했다. 또한, Chatile 와 Laumond(1992)는 Crowley와 비슷한 방법을 제시했는데, 다만 제공되는 기준모델이 선분형태가 아닌 그리드형태라는 점이 다르다.

이상과 같은 기존의 위치보정방법이 갖는 공통적인 단점은, 사전에 비콘센서나 안내표식을 설치해야 하거나 기준모델을 입력해줄 필요가 있을 뿐만 아니라, 이로 인해 로봇의 작업영역이 제한되므로 환경변화가 심한 곳이나 해저탐사, 우주탐사 및 미지영역에서의 작업과 같이 사전정보가 없거나 안내표식의 설치가 어려운 곳에서는 적용될 수 없다는 점이다.

미지환경에 적용할 수 있는 위치보정방법에 대한 연구가 거의 이루어지지 못한 이유중의 하나는, 센서의 정보만에 의존해야하는 환경인식방법이, 비록 간단한 작업에는 이용될 수 있을 정도이지만, 아직 위치보정에 쓰여질 수 있을 만큼의 단계로 발전되어있지 못하기 때문이다. 비젼시스템에서는 영상이미지로부터 물체의 윤곽을 추출하여, 두 영상을 매칭(Matching)하는 방법을 연구하고 있으나 아직은 단순한 형상이나 제한된 환경에서만 적용될 수 있는 단계이다. 또한, 초음파센서는 장치가 간단하며 직접적인 정보를 얻을 수 있어 자율이동 로봇의 센서로 많이 쓰이지만 정보의 불확실성이 크고 거울효과가 발생하기 때문에 형성된 초음파 지도의 질이 낮아 위치보정에 쓰여질 수 없었다(Cho등 1990). 그러나, 최근 초음파센서의 가장 큰 문제점인 거울효과를 해결하는 연구가 완성되어(Lim 1992) 초음파 지도만을 이용한 위치보정 방법이 제시되었다(임 1992b, Lim 1994).

이 방법은 사전정보가 전혀 없는 상황에서, 초음파센서의 정보를 이용하여 지도를 형성하며, 이 지도로부터 로봇 스스로가 특징 있는 부분을 판단하여 안내표식으로 기억하고, 기억된 안내표식을 이용하여 로봇의 위치를 평가, 보정하는 것이다. 그러나 이 방법은 로봇이 이동함에 따라 발생하는 오차의 범위를 제대로 추정하지 못하기 때문에 위치보정 단계에서 현재의 오차범위내에 존재하는 안내표식을 찾아내는데 어려움이 있을 뿐만 아니라 평가된 위치에 대한 신뢰도를 추정할 수 없는 문제가 있다.

제주대학교 중앙도서관

본 논문에서는 초음파지도에 근거한 기존의 위치평가 방법에서 나타난 한계점을 극복하여 보다 신뢰성 있는 위치평가가 가능한 시스템을 제안한다. 이를 위해 초음파센서를 장착한 이동로봇을 제작하고 dead reckoning에 의한 위치평가방법 및 물체의 표면을 따라 주행하는 제어 알고리즘을 연구하였다. 또한 로봇이 이동함에 따라 누적되는 위치오차를 정량적으로 평가 할 수 있는 방법을 제시하며, 이를 이용하여 위치 오차를 추정하여 보정하는 위치 인식 시스템을 개발하여 실험으로 그 유용성을 검증한다.

II. 이 론

1. 이동 로봇의 제어 및 위치 추측법

1.1 로봇 하드웨어

본 연구에서 사용한 이동로봇은 실험실에서 설계 제작한 CNUAMR-I(Autonomous Mobile Robot of Cheju National University-I)이다. CNUAMR-I는 Fig. 1 과 Fig. 2와 같은 모습이며 구동부, 센서부, 제어부 및 전원 장치부로 구성되어 있다. 로봇의 좌표계는 Fig. 2(b)와 같으며, 두 개의 구동바퀴와 두 개의 보조바퀴로 구성되어 있다. 구동바퀴는 독립적인 DC모터를 사용하여 동시에 제어하며, 3자유도의 이동 동작이 가능하다.

Intel 80586 PC로 로봇을 외부에서 제어하고, 위치평가(Position estimation)를 위해 두 개의 구동바퀴 축에 각각 회전식 엔코더(Rotary encoder)를 설치하였다. 각종 데이터의 수집과 이동제어는 인터럽트(Interrupt)에 의해 동기 되어지며, 로봇의 최대 이동속도는 0.02m/sec이다. 로봇 둘레에 24개의 Murata의 초음파 센서가 장착되어 있으며 거리측정은 로봇내부의 송수신 회로와 카운터 회로에서 담당한다. 로봇과 PC는 인터페이스 카드(PCL-720)를 통하여 직렬통신을 하고 초음파센서의 카운터 값과 모터의 속도명령, 방향제어 명령을 교환한다.

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

24개의 초음파센서는 Fig. 3과 같이 몸체의 중앙부분에 15 °간격으로 원형의 형태로 부착되어있으며 센서의 작동순서는 인접한 센서끼리의 간섭을 최대한 피하기 위해 [6, 1, 11, 2, 10, 3, 9, 4, 8, 5, 7, 12]의 순으로 동시에 두 센서가 작동된다. CNUAMR-I의 제어는 컴퓨터 내부에 디지털 데이터를 처리할 수 있는 인터페이스 카드를 사용하여 제어를 행하였으며, 그 개략도는 Fig. 4와 같다.

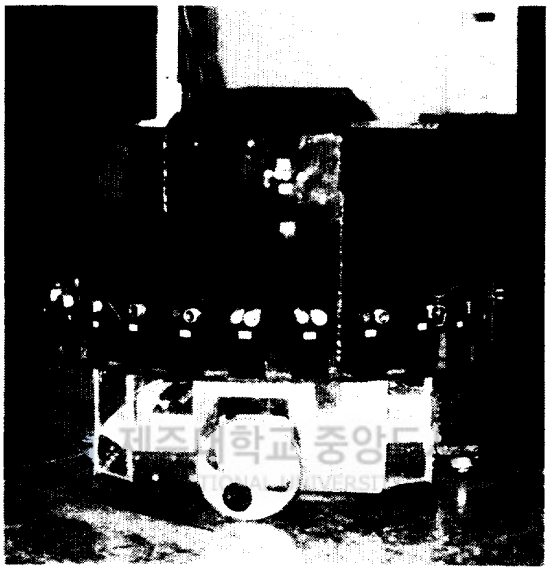
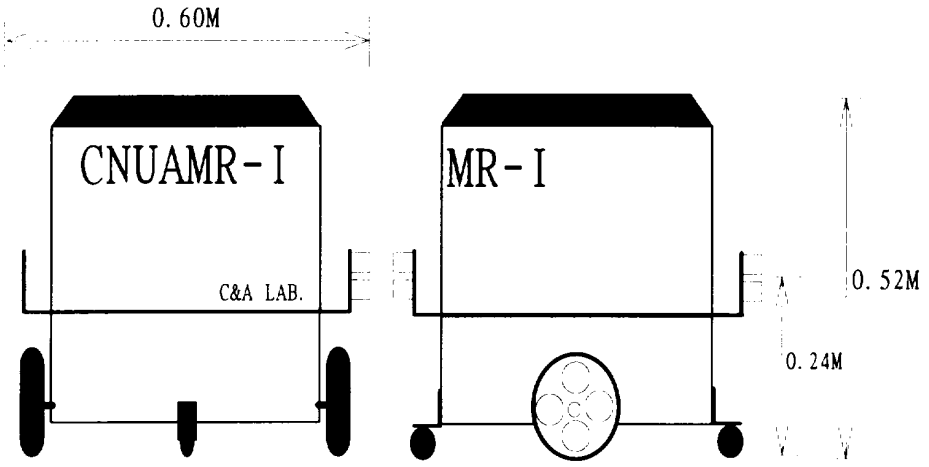
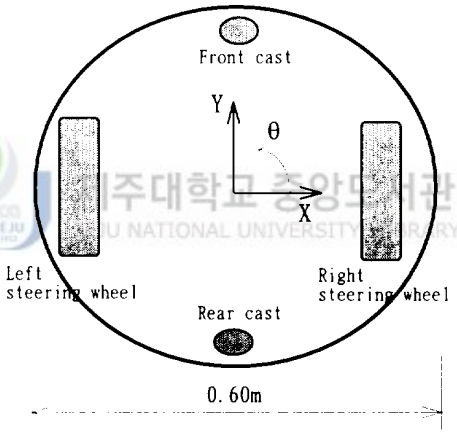


Fig. 1 Photographs of the CNUAMR-I



(a) Physical dimensions of the CNUAMR-I



(b) Coordinate system of the CNUAMR-I

Fig. 2 Configuration of CNUAMR-I

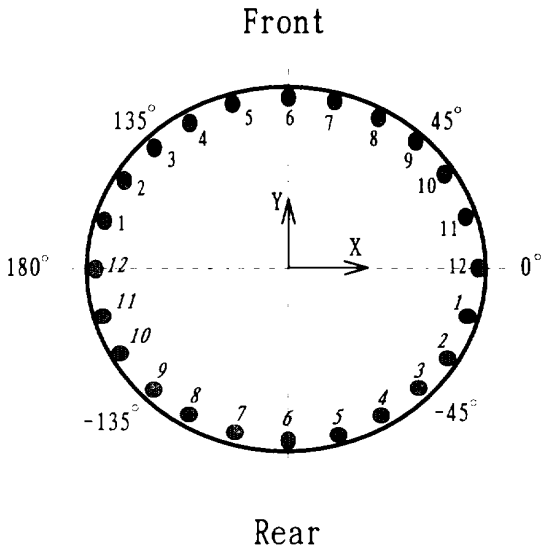


Fig. 3 Configuration of sonar sensors mounted on CNUAMR-I

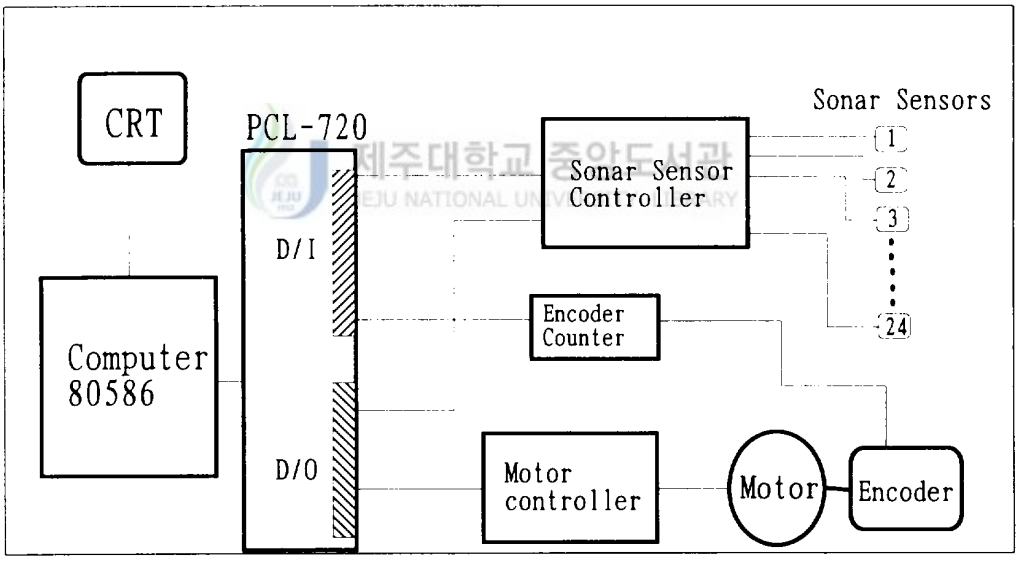


Fig. 4 System architecture of the CNUAMR-I

1.2 로봇의 구동 제어

Fig. 5는 CNUAMR-I의 속도제어에 이용된 PWM(Pulse Width Modulate)제어 회로이다. 우선 컴퓨터에서 일정 값의 디지털 신호가 모터의 제어부로 보내어지면 D/A 변환기를 통하여 이를 아날로그의 값으로 변화시키며, 다시 이 값을 증폭기를 통하여 증폭을 시킨 다음 비교기에서 기준 삼각파와 비교한다. 이때 비교기에서는 속도 신호의 크기에 비례하는 폭을 가진 펄스가 출력되어 4개의 트랜지스터로 이루어진 H브리지 형태의 모터구동회로에 전압형태로 공급됨으로써 DC모터를 제어한다.

이 회로는 그림에서 알 수 있듯이 양쪽 바퀴를 동시에 제어를 할 수 있으며, 각각 분리하여 제어를 할 수도 있어, 로봇의 동작에 유연성을 준다.

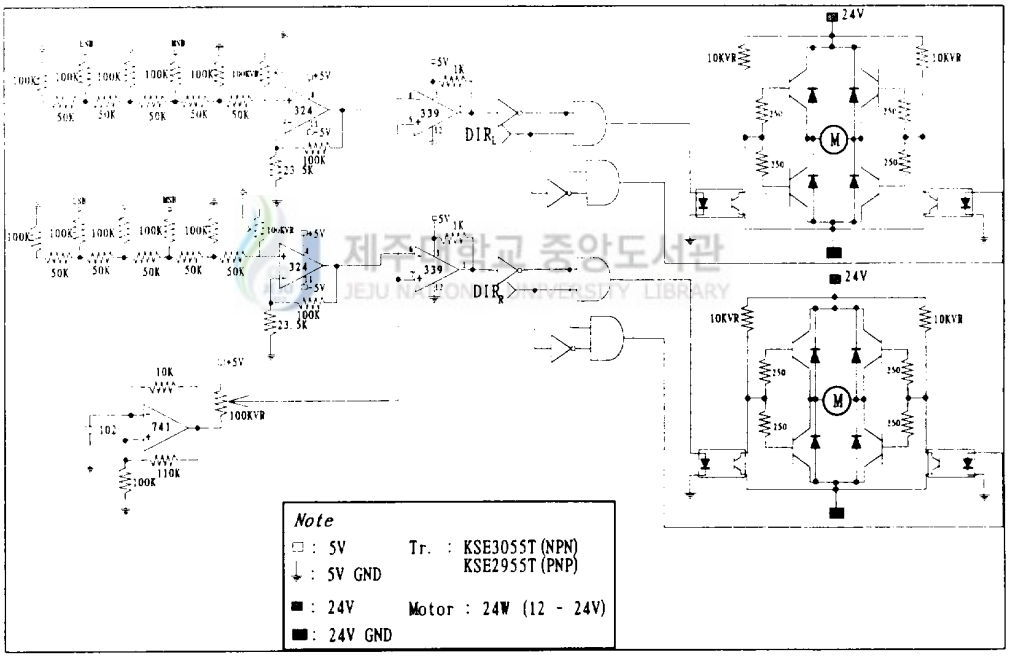


Fig. 5 Motor driver circuit(PWM circuit) of CNUAMR-I

1.3 로봇의 위치 추측법

로봇의 구동은 Differential Steering 알고리즘을 사용하였으며 바퀴의 폭은 0.0126m 이고 양 바퀴사이의 거리 L 은 0.52m이다. Fig. 6과 같이 로봇이 $A(X_{i-1}, Y_{i-1}, \theta_{i-1})$에서 다음 위치인 $B(X_i, Y_i, \theta_i)$이동을 하였다면 B점의 위치는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$D_R = R\theta$$
$$D_L = (L+R)\theta \quad (1)$$

여기서,

R : 이동궤적의 회전중심(o점)에서 오른쪽 바퀴중심 까지의 거리

L : 양 바퀴 중심 사이의 거리

D_R : 오른쪽 바퀴의 이동 거리

D_L : 왼쪽 바퀴의 이동거리

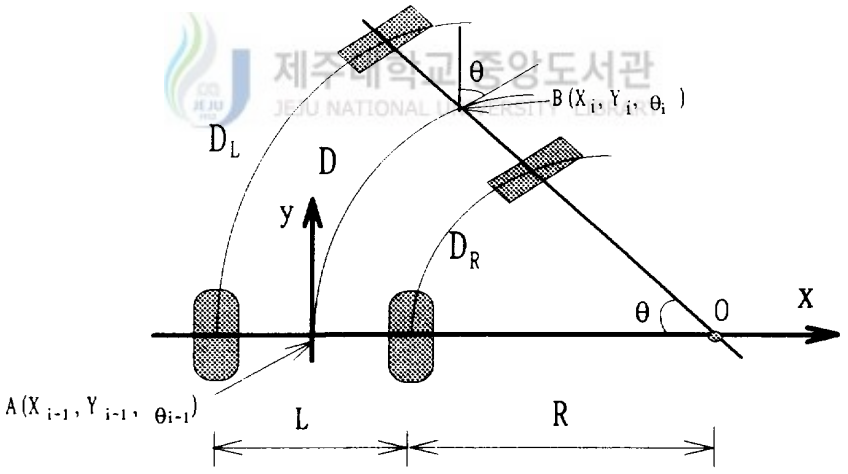


Fig. 6 Dead reckoning position estimation

따라서 각도와 양 바퀴의 중심 거리(R)은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\theta = \frac{(D_L - D_R)}{L}$$
$$R = \frac{D_L}{\theta}$$
$$\mathrm{xp} = (\mathrm{R} + \mathrm{L}/2) \times (1 - \cos\theta) \tag{2}$$
$$\mathrm{yp} = (\mathrm{R} + \mathrm{L}/2) \times \sin\theta$$

여기서, xp와 yp 는 A지점을 원점으로 한 로봇의 현 위치를 나타낸다.

식(2)을 이용하여 기준 좌표계에 대한 위치(B)의 좌표와 방향을 구하는 식은 좌표 변환 공식에 의하여 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{pmatrix} X_i \\ Y_i \\ \theta_i \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos\theta & -\sin\theta & 0 \\ \sin\theta & \cos\theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} xp \\ yp \\ \theta \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} X_{i-1} \\ Y_{i-1} \\ \theta_{i-1} \end{pmatrix} \tag{3}$$

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

또한 제자리회전은 좌표의 변동은 없고 로봇의 방향 변환만이 존재하므로 각도의 변화만 있으면 된다. 즉,

$$X_i = X_{i-1}$$
$$Y_i = Y_{i-1} \tag{4}$$
$$\theta_i = \theta_{i-1} + \delta$$

이 식(3)과 식(4)를 이용하여 로봇의 현재위치와 각도를 추측하게 되며 이것을 Dead reckoning 방법이라 한다.

2. 초음파 지도

확률지도(Certainty grid)란 Fig. 7과 같이 2차원 또는 3차원 공간을 모자이크형상의 셀(Cell)로 구분하여 각 셀에 물체에 점령되어 있을 확률(P_{occ})과 점령되어 있지 않을 확률(P_{emp})을 주어 표현하는 것을 의미한다(Cho 1989, Lim 1993).

P_{occ}와 P_{emp} 사이에는

$$P_{occ} + P_{emp} = 1 \tag{5}$$

인 관계가 성립하므로 실제 셀은 점령확률(P_{occ})만으로 그 구성이 가능하다. 점령확률과 비점령확률 사이의 관계는 다음과 같이 구해진다. P(A|B)를 B라는 사건이 발생했다는 가정 하에, 사건 A가 발생할 확률이라면, 조건확률의 정의에 의해 다음과 같은 관계들이 성립한다.

$$P(o|B \cap A) = \frac{P(B|o \cap A) \times P(o|A)}{P(B|o \cap A) \times P(o|A) + P(B|\bar{o} \cap A) \times P(\bar{o}|A)} \tag{6}$$

$$P(\bar{o}|B \cap A) = \frac{P(B|\bar{o} \cap A) \times P(\bar{o}|A)}{P(B|o \cap A) \times P(o|A) + P(B|\bar{o} \cap A) \times P(\bar{o}|A)} \tag{7}$$

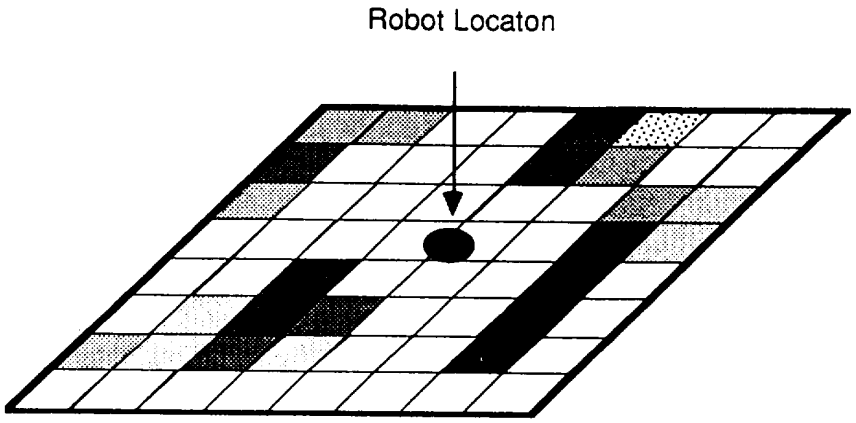


Fig. 7 Certainty grid representation

여기서 o를 어떤 셀의 점령확률, A를 지금까지의 정보, 그리고 B를 새로 입수된 정보로 정의하고 식(6)을 식(7)으로 나누면

$$\frac{P(o_i|B\cap A)}{P(\overline{o_i}|B\cap A)}=\frac{P(B|o_i\cap A)}{P(B|\overline{o_i}\cap A)}\times\frac{P(o_i|A)}{P(\overline{o_i}|A)} \tag{8}$$

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

식(8)에서 첨자 i 는 재배열된 셀들중 i 번째 셀을 나타낸다. 식(8)의 최종적인 형태는 다음과 같이 주어진다.

$$\frac{P(B|o_i\cap A)}{P(B|\overline{o}_i\cap A)}=\frac{\sum_{n=0}^{m}\prod_{q=j}^{j+n-1}P(\overline{H}_q|o_i\cap A)P(H_{j+n}|o_i\cap A)P(H_{j+n}|M)}{\sum_{n=0}^{m}\prod_{q=j}^{j+n-1}P(\overline{H}_q|\overline{o}_i\cap A)P(H_{j+n}|\overline{o}_i\cap A)P(H_{j+n}|M)} \tag{9}$$

식(9)에서 $P(H_i|o_i \cap A)$는 $P(H_i|A)$로 나타낼 수 있으며, $P(H_i|A)$는 현재까지 누적된 정보(A)가 주어진 상황에서 i 번째 셀에 센서 음파가 멈출 확률로서 다음과 같이 표현된다.

$$P(H_i|A) = P(H_i|o_i) \times P(o_i|A) + P(H_i|\overline{o_i}) \times P(\overline{o_i}|A) \tag{10}$$

$P(H_i|o_i)$는 i 번째 셀에 실제로 물체가 있을 때 음파가 그 셀에서 반사될 확률이고 $P(H_i|\overline{o_i})$는 물체가 없는데도 불구하고 음파가 반사될 확률이다. $P(H_i|o_i)$를 $P_{DET,i}$, $P(H_i|\overline{o_i})$를 $P_{FAL,i}$ 로 나타내고 식(10)을 다시 쓰면,

$$P(H_i|A) = P_{DET,i} \times P(o_i|A) + P_{FAL,i} \times P(\overline{o_i}|A) \tag{11}$$

식(11)에서 $P_{DET,i}$, $P_{FAL,i}$ 는 센서의 종류에 따라 달라지는 센서의 특성으로서 기존의 베이지안 업데이트 모델에서는 다음과 같이 근사적으로 구하였다.

P_{DET}는 어떤 셀에 물체가 존재할 때 음파가 그것을 감지할 확률로서 Fig. 8과같이 센서로부터 떨어진 거리가 멀수록, 음파의 중심으로부터 치우친 각도가 클수록 음파의 강도가 떨어지기 때문에 다음과 같이 가정할 수 있다.

$$\begin{aligned} P_{DET} &= P(r) \times P(\theta) \\ P_{FAL} &= CP_{DET} \end{aligned} \tag{12}$$

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

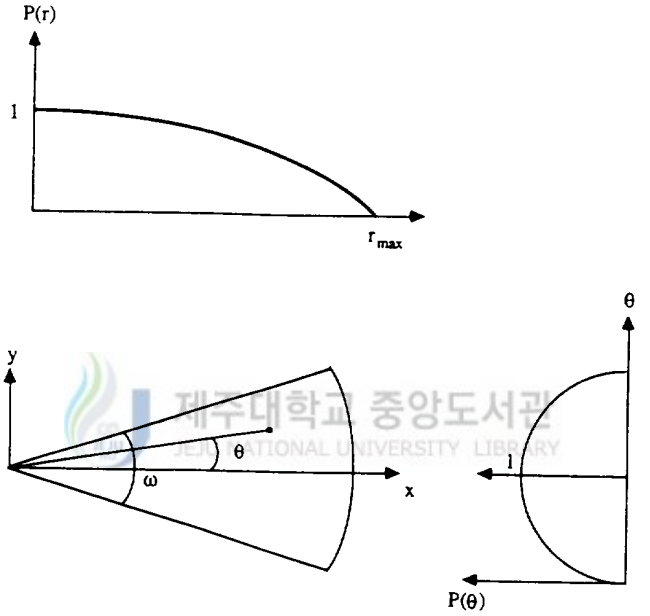
여기서,

$$P(r) = 1 - \left(\frac{r}{r_{max}}\right)^2 \qquad r_{min} \le r \le r_{max}$$

$$P(\theta) = 1 - \left(\frac{\theta}{\omega/2}\right)^2 \qquad -\frac{\omega}{2} \le \theta \le \frac{\omega}{2}$$

ω: beam의 구경

C: 0.0001



제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

Fig.. 8 P_{DET} and P_{FAL}

3. 주행제어

3.1 국부지도

정밀한 주행제어가 이루어지기 위해서는 고행상도의 초음파 지도가 요구된다. 그러나 PC는 기억용량과 처리속도의 한계가 있어 넓은 영역 전체를 하나의 지도로 표현할 경우 그 해상도가 상당히 떨어진다. 이러한 문제점을 해결하기 위한 방안으로 전체 작업공간에 대한 지도보다는 로봇의 현재 위치를 중심으로 일정한 윈도우내만을 대상으로 하여 고해상도의 지도를 형성할 수 있는 국부지도(Fig. 9) 형성방법을 제시한다. 국부지도의 크기는 48×48개의 셀로 구성되어 있으며 각 셀의 크기는 0.05 × 0.05 m^2이다. 지도의 중심은 로봇의 중심과 일치한다.

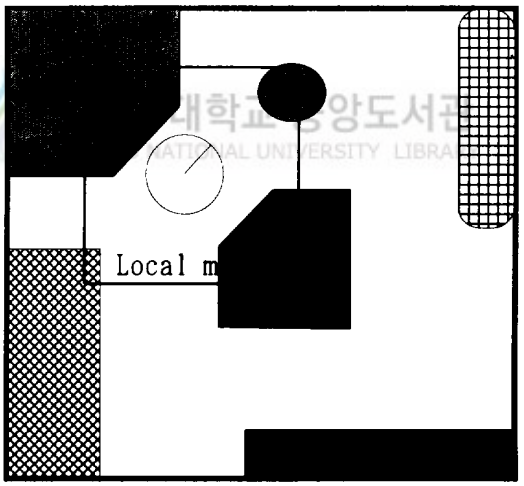


Fig. 9 Configuration of a local map

국부지도는 기준 좌표계에 대해서 회전은 하지 않고 로봇이 국부지도에 대해 상대적인 회전을 한다. 매 주행 싸이클 마다 로봇은 먼저 전 위치에서의 지도를 현 위치로 이동시킨 다음, 현 위치에서 센서로부터 거리정보를 입수하고 이동된 국부지도를 갱신시킨다. 이와 같은 과정을 연속적으로 수행함으로써 전체 작업영역에 대한 고해상도의 초음파 지도를 확보할 수 있다.

국부지도는 단순화된 MBM모델을 이용하여 작성되는데, 이것은 원래의 모델에서 비점령영역에 대한 확률계산을 생략한 것으로서 짧은 시간내에 물체의 개략적인 윤곽의 표현이 가능한 모델이다(임 1992b, 1994).

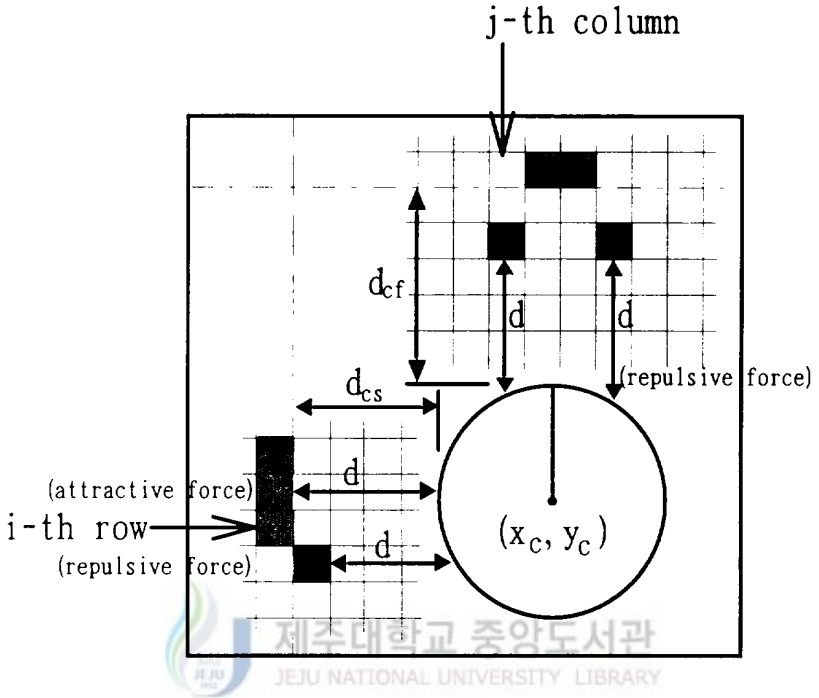
3.2 주행제어

로봇의 주행제어는 크게 두가지 형태로 나누어진다. 첫째는 정해진 목표점을 향해 주행하는 제어이고, 두 번째는 주행 중에 장애물이 나타났을 경우에 필요한 물체 표면 추적제어이다. 정해진 목표점을 찾아가는 주행제어는 기본적으로 직선 주행이므로 설명된 PWM제어 방식이 그대로 적용된다.

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

물체 표면을 추적하는 제어는 물체윤곽에 대한 사전 정보가 없으므로 매 순간 입수되는 센서의 정보에 의존한다. 그러나 센서의 정보는 불확실성이 커 효율적인 제어가 어렵다. 따라서 정보의 불확실성을 최소화하고 현재까지 누적된 정보를 최대한 이용할 수 있는 국부지도에 근거한 제어방법을 제시한다. 물체 표면 추적제어는 국부지도내에 로봇을 중심으로 한 작은 명령지도를 기준으로 수행된다. 명령지도의 크기는 24×30 셀이며 한 셀의 크기는 $0.05\times0.05m^2$ 이다. 명령지도의 모든 셀들은 기준 좌표계에 대하여 로봇의 회전각만큼 반대로 회전시켜 로봇이 항상 지도내에서 일정한 방향(y방향)을 유지하게 한다. 로봇의 진행 속력은 일정하며, 명령지도내의 물체의 형상

에 따라 단지 조향만을 제어한다. 명령지도는 2개의 영역(좌방, 전방)으로 나누어지며 각 셀들은 로봇에 대해 가상적인 힘(f_i)을 발생한다. f_i의 크기는 Fig. 10과 같이 셀과 로봇 외곽 사이의 수직거리와 셀의 확률값에 따라 달라진다.



제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

Fig. 10 Illustration of distance forces in a command window

좌측영역에 속해있는 i 번째 행에서 셀들에 의한 힘(f_i)는 다음과 같이 정의된다.

$$f_i = \begin{cases} -(d-d_{cs})^2 \times P(o), & \text{if } (d < d_{cs}) \\ (d-d_{cs})^2 \times P(o), & \text{otherwise} \end{cases} \tag{13}$$

여기서,

d : 로봇외곽에서 수평 방향으로 가장 가까운 점령셀 까지의 거리

d_{cs} : 좌방영역의 임계거리

P(o) : 최근접 점령셀의 확률값

임계거리는 로봇이 물체를 추적할 때 유지하도록 설정된 물체로부터 로봇표면까지의 거리이다. 로봇으로부터 물체까지의 거리가 좌방 임계거리보다 가까울 때 f_i 는 척력(음의 힘)으로 작용하여 로봇이 물체로부터 멀어지게되며, 그 반대의 경우는 f_i는 인력(양의 힘)으로 작용하여 로봇을 물체쪽으로 끌어 좌방 임계거리가 유지되도록 한다. 만약 수직 방향으로 점령셀이 존재하지 않을 경우의 f_i는 최대인력인 $-d_{cs}^2$이 된다. 반면에 전방영역에서의 f_i는 다음과 같이 척력만으로 정의된다.

$$f_i = \begin{cases} -(d-d_{cf})^2 \times P(o), & \text{if}(d < d_{cf}) \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \qquad (14)$$

여기서,

d : 로봇외곽에서 수평 방향으로 가장 가까운 점령셀 까지의 거리

d_{cf} : 전방영역의 임계거리

P(o) : 최근접 점령셀의 확률값

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

즉, 로봇이 물체 외곽을 추적하는 제어는 좌방영역의 셀들에 의해 수행되며, 전방영역은 단지 물체와의 충돌을 피하기 위한 보조적인 역할을 담당하므로 이 영역의 셀들은 로봇에 대하여 척력만 발생하며 인력을 발생하지는 않는다.

명령지도내의 셀들에 의해 발생되는 가상힘은 로봇의 회전 중심에 대해 다음과 같은 모멘트(M_c)를 발생시킨다.

$$M_c = k_s \times F_s + k_f \times F_f \tag{15}$$

여기서, F_s는 좌측 영역의 힘들의 합, F_f는 전방 영역의 힘들의 합이며 k_s와 k_f 는 설계변수이다. 이 모멘트로부터 로봇에 가해줄 조향명령, 즉 로봇이 수행하여야 할 조향속도(Ωc)가 다음 식으로 계산된다.

$$\Omega_c = - k_p M_c \tag{16}$$

여기서, k_p는 제어기의 이득이다. Fig. 11은 물체추적 제어시스템의 블록선도를 나타낸다. 기준입력모멘트(M_{ref})는 0으로서, 로봇이 정해준 임계거리를 유지하는 상태를 의미하며 M_c 자체가 전체시스템의 오차 신호 역할을 한다. 결국 로봇은 일정한 속력으로 진행하면서 조향명령에 따라 단지 주행방향만 연속적으로 바꾸게 된다.

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

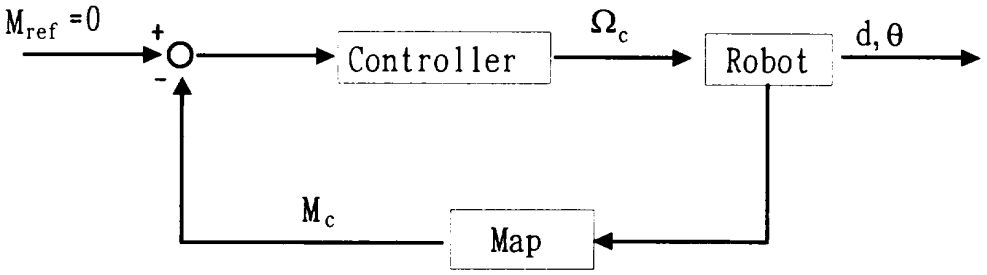


Fig. 11 Block diagram of the wall following control system

4. 로봇의 위치 불확실도의 추정

이동로봇은 바퀴 등의 구동부에 부착된 센서를 이용하여, 매 순간마다 자신이 움직인 량을 측정하며, 이 값을 이용하여 자신의 공간상의 위치를 추정한다. 그러나, 로봇에 부착된 센서의 정밀도의 한계, 바퀴 지름의 차이 등 구동부의 구조적인 불균일, 센서 회로의 잡음에 의한 오동작, 출발 정지시 및 이동 중에 발생하는 바퀴의 미끄러짐 등에 의해서 로봇이 dead reckoning으로 추측한 공간상의 위치는 오차를 가지고 있게 마련이다. 여기서 말하는 위치 불확실도란 로봇이 추측한 위치와 실제 로봇의 위치의 차이를 확률적인 개념을 사용하여 표현한 것이다.

2차원 평면상에서의 로봇의 위치는 (x, y, θ)로 표시되며, 이는 각각 로봇의 위치와 방향을 나타낸다. 근사좌표변환(approximate transformation , AT ; 이하 AT 로 표기)은 어떤 절대적인 좌표계와 불확실성을 갖는 다른 좌표계 사이의 평균적인 위치 관계를 확률적으로 추정하고, 이 추정의 불확실성을 공분산 행렬을 이용하여 표시한 것이다. Fig. 12에서 각 점을 연결하는 화살표는 절대좌표계에서 상대좌표로의 AT를 뜻한다. 타원은 다변량 가우시안 확률분포(multivariate gaussian distribution)에서 2차원상에 같은 확률 값을 갖는 궤적은 나타낸다. 그러므로, 타원이 크다는 것은 그 만큼 위치의 불확실성이 크다는 의미이다.

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

점선의 타원은 로봇의 마지막 위치에 대한 로봇의 상대적 불확실성을 나타내며, 실선의 타원은 기준 좌표계(W)에 대한 로봇 위치의 불확실성을 나타낸다. 그림에서 W는 로봇의 출발점이자, 기준좌표계의 원점이 된다. 로봇이 L_1, L_2, L_3으로 이동함에 따라 W에 대한 로봇의 위치불확실도는 커지게 된다. A, B, C는 W, L_1, L_2, L_3,사이의 좌표변환을 의미한다. AT들을 합성하면 여러 개의 연속적인 AT를 하나의 AT로 만들 수 있다. 그림에서 $L_2(X_3, Y_3, \theta_3)$의 좌표를 절대좌표계 W에 대해서 표시하기 위해 좌표변환 $A(X_1, Y_1, \theta_1)$와 $B(X_2, Y_2, \theta_2)$를 합성하면 다음과 같다(Smith 1986).

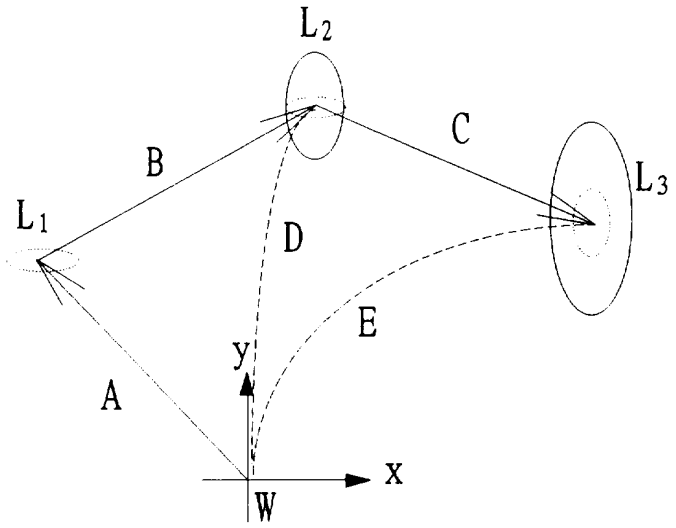


Fig. 12 Approximate transforms of the robot position

$$
\begin{aligned}
X_3 &= f(X_1, Y_1, \theta_1, X_2, Y_2, \theta_2) = X_2\cos\theta_1 - Y_2\sin\theta_1 + X_1 \\
Y_3 &= g(X_1, Y_1, \theta_1, X_2, Y_2, \theta_2) = X_2\sin\theta_1 + Y_2\cos\theta_1 + Y_1 \\
\theta_3 &= h(X_1, Y_1, \theta_1, X_2, Y_2, \theta_2) = \theta_1 + \theta_2
\end{aligned}
\tag{17}
$$

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

함수 f, g, h의 평균과 공분산을 구하기 위해, 모든 변수들을 랜덤 변수로 가정하고, 이 함수들을 각각의 변수들의 평균값의 1차 테일러 급수로 가정하여 전개하면, 함수들의 평균치는,

$$\overline{X_3} \cong f(\overline{X_1}, \overline{Y_1}, \overline{\theta_1}, \overline{X_2}, \overline{Y_2}, \overline{\theta_2})$$
$$\overline{Y_3} \cong g(\overline{X_1}, \overline{Y_1}, \overline{\theta_1}, \overline{X_2}, \overline{Y_2}, \overline{\theta_2}) \quad (18)$$
$$\overline{\theta_3} \cong h(\overline{X_1}, \overline{Y_1}, \overline{\theta_1}, \overline{X_2}, \overline{Y_2}, \overline{\theta_2})$$

와 같이 나타내어진다.

공분산 행렬을 얻기 위해서 테일러 급수 전개를 행렬식으로 쓰면, 아래와 같은 편차의 식으로 표시된다.

$$\begin{pmatrix} \Delta X_3 \\ \Delta Y_3 \\ \Delta \theta_3 \end{pmatrix} \cong J\,(\Delta X_1, \Delta Y_1, \Delta \theta_1, \Delta X_2, \Delta Y_2, \Delta \theta_2)^T \quad (19)$$

식(19)의 J는 다음과 같은 자코비안 행렬이다.

$$J = \begin{pmatrix} \frac{\partial f}{\partial X_1} & \frac{\partial f}{\partial Y_1} & \frac{\partial f}{\partial \theta_1} & \frac{\partial f}{\partial X_2} & \frac{\partial f}{\partial Y_2} & \frac{\partial f}{\partial \theta_2} \\ \frac{\partial g}{\partial X_1} & \frac{\partial g}{\partial Y_1} & \frac{\partial g}{\partial \theta_1} & \frac{\partial g}{\partial X_2} & \frac{\partial g}{\partial Y_2} & \frac{\partial g}{\partial \theta_2} \\ \frac{\partial h}{\partial X_1} & \frac{\partial h}{\partial Y_1} & \frac{\partial h}{\partial \theta_1} & \frac{\partial h}{\partial X_2} & \frac{\partial h}{\partial Y_2} & \frac{\partial h}{\partial \theta_2} \end{pmatrix}$$
$$= \left(\begin{array}{ccc|ccc} 1 & 0 & -(Y_3 - Y_1) & \cos\theta & -\sin\theta & 0 \\ 0 & 1 & (X_3 - X_1) & \sin\theta & \cos\theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 \end{array}\right) \quad (20)$$
$$= [\ H \mid K\ ]$$

A, B의 공분산행렬을 각각 C_1, C_2라 할 때, 식(19)의 양변을 제곱하고, 결과 식의 기대값을 구함으로써, W에 대한 L_2,의 공분산행렬 C_3을 구할 수 있다.

제주대학교 중앙도서관 JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

$C_{ij} = E(\Delta X_i \Delta Y_j)$ 이므로, C_3은,

$$C_3 = J \begin{pmatrix} C_1 & 0 \\ 0 & C_2 \end{pmatrix} J^T = H\ C_1\ H^T + K\ C_2\ K^T \tag{21}$$

로봇이 이동함에 따라 발생하는 위치오차에 대한 확률적인 자료를 알고 있으면, Fig. 12의 A, B, C의 공분산 행렬을 식(21)을 이용하여, 계속 합성해 나감으로써, 각 위치에서의 로봇의 위치불확실도를 예상할 수 있다. 어느 위치에서의 로봇의 공분산 행렬과, 위치추측법으로 계산한 거리를 이용하면, 다변량 가우시안 확률분포의 식으로부터, 평면사의 벡터 x에 로봇이 있을 확률 p(x)는,

$$P(x) = \frac{1}{\sqrt{(2\pi)^n detC}}\ e^{-1/2[(x-\overline{X})^T C^{-1}(x-\overline{X})]} \tag{22}$$

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

이 된다. 여기서 n은 차원의수이고, X는 공칭평균 위치 벡터, x는 평면상의 위치 벡터이고, C는 공분산 행렬이다. 이때 공칭평균 위치벡터 $\overline{X}$는 dead reckoning으로 구한 거리가 된다.

5. 위치평가

5.1 기준지도 선택방법

본 연구에서는 로봇의 자율성을 극대화 하기 위해 초기에 미지영역을 탐사하는 도중 형성되는 국부지도중에서 특징이 있는 부분을 로봇 스스로 선택하여 길잡이(기준지도)로 사용한다. 기준지도는 로봇의 위치와 방향에 대한 최대한의 정보를 줄 수 있는 것이어야 하며 그 선택방법은 실시간 적용이 가능해야 한다. 따라서 다음과 같은 선택기준을 설정하였다(임 1992b, Lim 1994b).

1. 벽 모서리 부근의 지도와 같이 특징이 있는 국부지도를 선택한다. 직선벽은 벽에 대한 로봇의 상대적인 각도 정보는 줄 수 있지만 위치정보는 주지 못한다. 그러나 긴 직선벽 부근에서의 작업시는 로봇의 작은 각도오차가 주행거리의 증가에 따라 큰 위치오차를 유발시킬 수 있으므로, 일정거리(D_{max})마다 직선형상의 지도도 선택을 한다.
2. 가능한 한 점령셀의 갯수가 많은 지도를 선택한다. 점령셀수가 많다는 것은 지도내의 물체 윤곽에 대한 정보가 풍부하다는 의미가 되므로 차후의 위치보정을 위한 매칭에 유리하다.
3. 인접한 기준지도 사이에는 가능한 한 유사성이 적어야한다. 이것은 실제 작업공간에는동일한 형상의 물체들이 여러개 존재할 수 있으므로 매칭시에 로봇이 현재 지도와 대응되는 기준지도를 선택하는 과정에서 문제를 야기시키기 때문이다.
4. 기준지도 사이에는 일정거리(D_{min})를 유지시킨다. 3항에서 언급된 바와 같이 동일 형상의 여러개의 기준지도가 존재할 수 있으므로 한 위치에서 그때의 최대 오차범위내에는 하나 이하의 기준지도만이 존재하는 것이 바람직하다.

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

이와 같은 기준에 따라 기준지도를 선택하는 방법은 다음과 같다.

먼저 이미 선택된 기준지도중 현재 국부지도와 최근접 기준지도 사이의 거리(D)가 D_{max}이상이면 현재의 국부지도가 직선 형상일지라도 기준지도로 선택한다. $D_{min}<D<D_{max}$인 경우에는, 현 국부지도의 형상이 직선이 아니면 기준지도로 선택한다. 만약 $D<D_{min}$인 경우에는 현재 국부지도의 셀갯수나 물체를 형성하는 선분갯수가 최인접 기준지도의 그것들 보다 많은 경우에만 기준지도를 선택하되 기존의 최인접 기준지도는 삭제시킴으로써 매칭에 유리한 지도를 확보한다.

D_{max}와 D_{min}은 실제 로봇의 이동특성에 따라 결정되어질 상수이다. D_{max}는 로봇의 위치오차가 최대 허용오차 범위이내에 들어갈 수 있는 최대 이동거리를 의미한다. 반면에 D_{min}은 임의의 값이 될 수 있으나 너무 크면 선택되는 기준지도의 수가 부족하여 위치오차 보정효율이 떨어지며 너무 작으면 필요이상의 기준지도가 선택됨과 동시에 로봇의 현재 위치오차 범위내에 여러개의 기준지도가 존재하여 대응성 판단에 어려움이 생긴다. 지도형상은 지도내에 형성된 물체의 선분수와 각 선분사이의 각도로서 정의되며, 점령셀들의 방향을 분류함으로써 이들 정보를 추출한다(임 1994)

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

5.2 지도사이의 대응성

매칭으로부터 위치를 평가하기 위해서는 먼저 저장된 여러 기준지도 중에서 현재의 국부지도에 대응되는 지도를 찾아내야 한다. 위치오차가 아주 작은 경우에는 두 지도사이의 거리만으로도 충분히 대응성을 판단할 수 있지만 본 연구에서는 이러한 가정을 하지 않았고, 따라서 다음과 같은 대응성 지수를 정의하여 이것들로부터 두 지도의 대응성을 판단하고자 한다(임 1994, Lim 1994b).

1. **형상지수** : 두 지도의 형상에 대한 대응성을 나타낸다. 국부지도의 형상은 물체를 구성하고 있는 선분의 수와 각 선분들 사이의 각도로 분류된다. 따라서 이 지수는 두 지도의 선분수와 각도가 일치하는지 여부를 알려준다.
2. **거리지수** : 이 지수는 고려되는 기준지도가 현 위치에서 오차 범위(위치불확실성을 나타내는 타원)내에 들어오는 가를 알려준다. 일반적으로 작업영역내에는 형상이 동일한 물체가 다수 존재할 수 있으므로 형상지수 만으로는 현재의 국부지도에 대응하는 기준지도를 찾아내기 어렵다. 따라서 형상지수가 만족되는 기준지도들 중 현재의 오차범위내에 있는 것이 대응되는 기준지도일 확률이 높다.
3. **셀 지수** : 두 지도에 있어서 셀의 갯수의 대응성을 나타낸다. 물체의 재질이나 형상(각도)에 따라 점령 셀의 갯수가 달라질 수 있으므로 셀갯수 자체가 대응성의 단서가 될 수 있다. 또한 매칭의 결과는 셀 수에 크게 의존하며 따라서 이 지수는 두 지도의 셀갯수 비가 매칭이 가능한 비율 이상인가를 나타낸다.

이상과 같은 모든 지수가 만족되면 두 지도가 서로 대응되는 것으로 판단한다.

기존의 연구(임 1994)에서는 로봇의 위치불확실성을 평가하지 못했기 때문에 2항의 거리지수가 제대로 정의되지 못했다. 따라서 매칭시에 대응성 판단에 어려움이 있었고, 그 결과 위치보정의 신뢰도가 낮았다.

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

5.3 위치 평가

로봇의 현재 위치는 대응관계 조사로부터 찾아진 기준지도와 현재지도를 매칭함으로써 평가하게 된다. 매칭은 Fig. 13과 같이 현재의 지도의 각 점령 셀을 임의의 (δx, δy, $\delta\theta$)에 대해서 그 좌표를 변환하였을 때 거기에 대응되는 기준지도의 셀을 조사하

여 그 대응정도가 최대가 되는 때의 (δx, δy, $\delta\theta$)를 찾아내는 작업이다. 각 점령 셀의 좌표를 변환하는 식은 다음과 같다(임 1992b, 1994).

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos\delta\theta & -\sin\delta\theta \\ \sin\delta\theta & \cos\delta\theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x - x_r \\ y - y_r \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \delta x + x_r \\ \delta y + y_r \end{pmatrix} \tag{22}$$

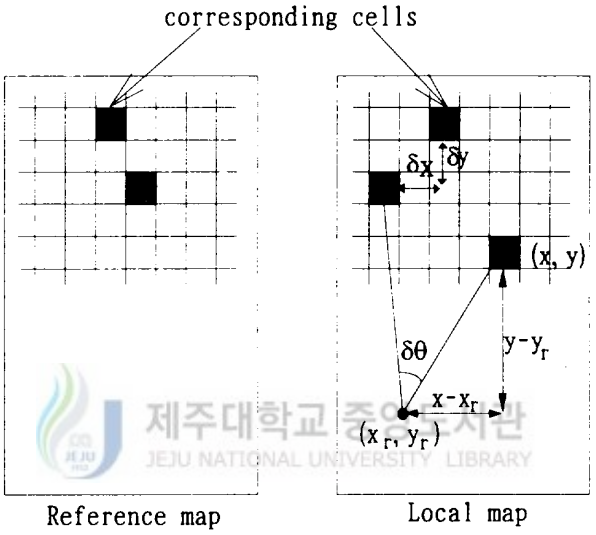


Fig. 13 Schematic diagram of maps for matching

여기서 (x_r , y_r)은 로봇의 현 좌표, (x, y)는 현 지도상의 점령 셀의 좌표, 그리고 (X, Y)는 거기에 대응되는 기준지도상의 셀의 좌표이다. 이와 같이 구해진 한 쌍의 셀 들의 확률 값을 서로 곱하고 전체 점령 셀에 대해서 그 값을 합하였을 때 가장 큰 값을 주는 (δx, δy, $\delta\theta$)를 찾아낸다.

그러나 이 과정은 대략 $O(n^4)$정도의 곱셈이 필요하므로 매우 느리다. 따라서 다음과 같은 방법으로 그 수행시간을 줄일 수 있다. 즉, 원래의 지도($n \times n$)에서 4개의 셀을 하나로 통합한 ($n/2 \times n/2$)크기의 지도를 형성하고 같은 방법으로 n/4지도를 형성한다. 이와 같이 해상도를 줄인 지도중 가장 낮은 해상도의 지도에서부터 매칭을 시작하여 (δx, δy, $\delta\theta$)를 구한 다음, 다음 단계 지도에서는 앞 단계에서 구해진 (δx, δy, $\delta\theta$)근처의 값에 대해 매칭을 실시한다. 같은 과정을 원래의 지도까지 실시하여 최종밀도의 (δx, δy, $\delta\theta$)를 구한다. 이러 한 방법은 곱셈의 수를 대략 O(n)정도로 줄일 수 있기 때문에 현저하게 시간이 단축된다.

그러나 국부지도의 경우는 셀의 수가 적고 그 분포가 지도내의 4분평면내에 국한되므로 n/2보다 작은 지도에 대한 매칭을 수행하면 점령셀의 개수가 극히 적어 그 결과가 아주 나빠진다. 또한 n/2지도에서 시작하면 매칭에 소요되는 시간이 실제 적용에 어려울 정도로 길어진다. 여기서는 두 지도사이의 최대 도심편차가 지도 크기의 1/4이하라는 점에 착안하여 다음과 같이 매칭시간을 줄이고자 하였다. 즉 n/2크기의 두 지도에서 도심을 서로 일치시킨 상태에서 최초 매칭을 시작한다. 이 경우 (δx, δy, $\delta\theta$)의 시도 범위를 원래 지도크기의 1/16으로 줄일 수 있다. 이와 같은 방법을 적용하였을 때 매칭에 요구되는 시간은 수 초 정도로 줄어든다.

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

III. 실험 및 결과

1. 로봇의 주행제어 실험

제안된 물체표면 추적제어 방법을 실제 로봇에 적용하여 그 유용성을 검증하였다. Fig. 14는 국부지도와 명령 지도(command window)의 형상을 보여주며, 명령지도 크기는 $1.2\times1.5m^2$이고 셀 크기는 $0.05\times0.05m^2$ 이다.

초음파 센서는 로봇 주위에 24개의 원 형태로 장착되어 물체를 감지하며, 최대 감지거리는 4m정도이다. 정상상태에서의 로봇의 최대 속력은 0.02m/sec이며, 조향비율은 4단계로 나누어 양쪽 바퀴에 조향속력을 조정하였다.

샘플링 시간은 0.1초이며, 각 샘플링 시간당 2개의 초음파 센서 데이터와 dead reckoning에 의한 거리 정보를 받아들인다. 물체 표면 추적제어의 실험공간은 Fig. 15와 같다. Fig. 16은 Fig. 15의 A지점에서의 국부지도와 명령지도를 예로 나타낸 것이다. 그림에서 좌측은 명령지도를 나타내고 우측은 국부지도를 나타낸다. 원은 로봇을 표시하며 직선이 가리키는 방향이 로봇의 전진 방향이다. 국부지도의 셀들은 translation 만하고 로봇이 회전하는 반면에, 명령지도에서는 로봇의 방향은 고정이 되어있고 점령셀들이 로봇이 회전한 반대 방향으로 회전한다. Fig. 17은 물체표면 추적제어를 행한 로봇의 이동경로를 나타낸 것이다. Fig. 17(a)는 임계거리와 같은 위치에서 출발한 후 곡선벽을 이동한 것이고, Fig. 17(b)는 임계거리이내에서 출발한 경우의 로봇의 이동경로를 나타낸다.

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

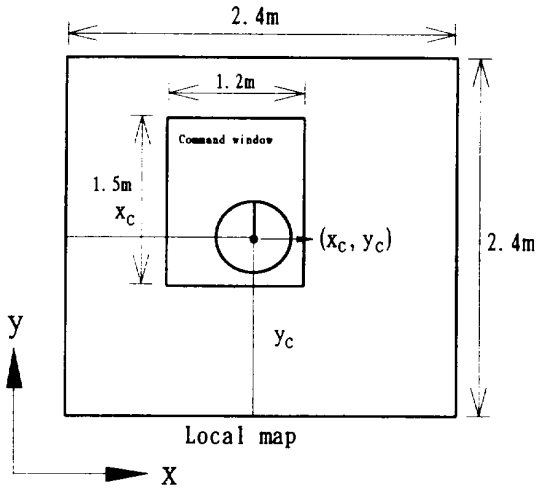
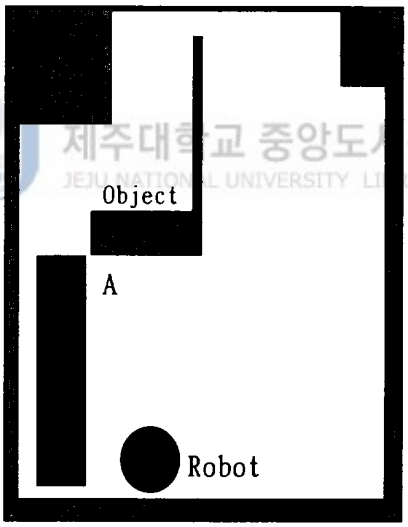


Fig. 14 Configuration of command window



제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

Fig. 15 Experimental environment for boundary following control

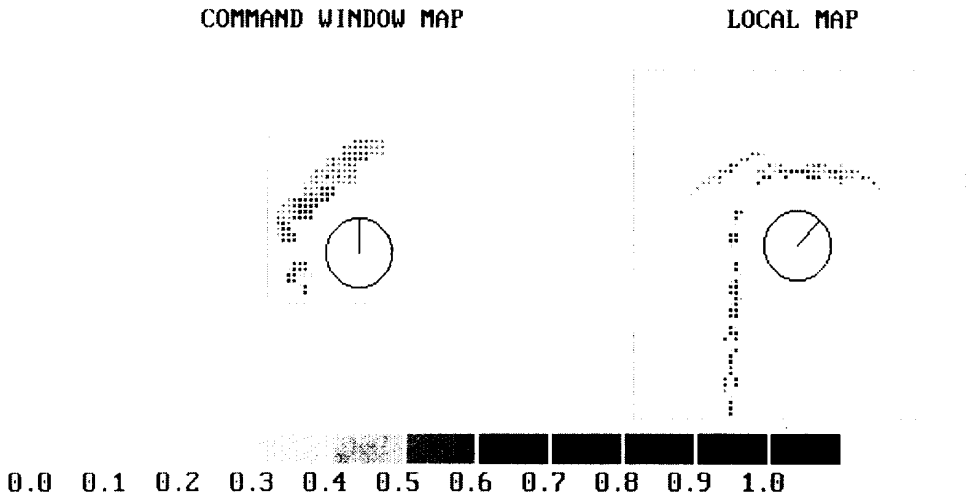
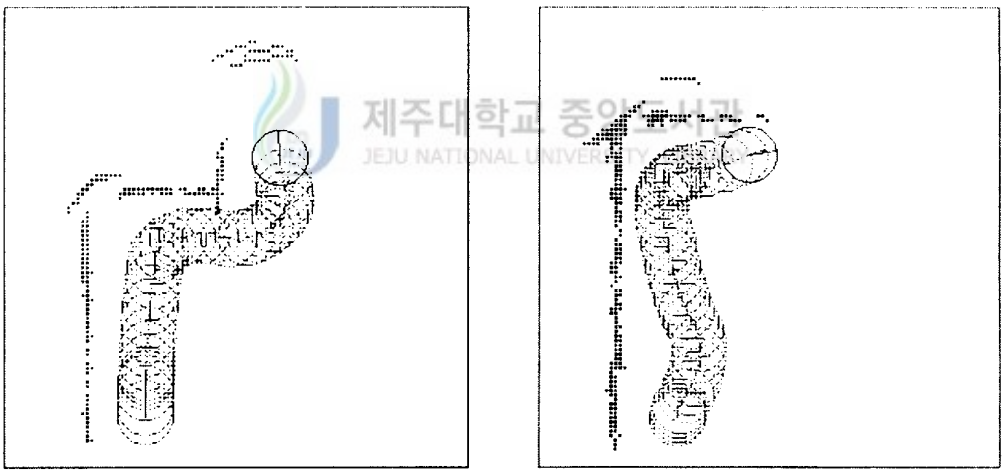


Fig. 16 Example of the local map and the command window at position A



(a) Results for a cornered wall (b) The robot was started near the wall

Fig. 17 Experimental results of boundary following control

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

2. 로봇의 위치불확실성

식(21)과 식(22)를 이용하여 로봇의 위치불확실성을 추정하기 위해서는 로봇이 현 위치에서 다음위치로 이동 했을때의 공분산 행렬이 필요하다. 그러나 공분산 행렬은 로봇의 이동 형태에 따라 달라지며 수많은 이동형태에 따른 모든 공분산행렬을 모두 실험으로 구하는 것은 불가능하다.

실제 로봇의 이동형태는 다양하지만 단위 샘플링 시간당(0.1초) 로봇의 이동량은 그 크기가 미소하므로 회전 후 직진 또는 직진 후 회전의 두가지 형태로 근사가 가능하다. 따라서 본 연구에서는 직선주행과 회전시의 공분산 행렬을 각각 실험으로 구하여 매 샘플링 시간마다 공분산 행렬을 갱신하는 방법을 이용하였다. 그러나 한 샘플링 시간당의 이동거리는 아주 작기 때문에 실제위치와 오차를 측정하기가 매우 어렵다. 만약 동일 환경이라면 같은 동일 직선주행에 대해서는 그 오차의 특성이 같을 것이며 오차의 크기는 이동량에 비례한다고 가정할 수 있다. 회전의 경우도 동일한 가정이 가능하므로 실제 실험은 2m 직선주행과 2radian 회전에 대해 수행하고 이것을 단위 샘플링 시간당으로 환산하여 공분산행렬을 구하였다.

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

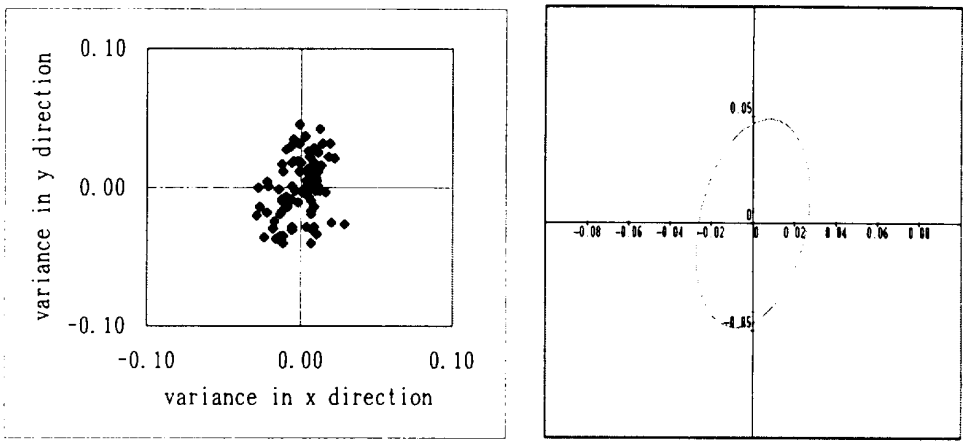
Table 1은 직선이동과, 회전동작에 대해 각각 80회씩 반복실험을 수행하여 얻어진 x, y 및 각도 값의 표준 편차와 상관관계를 나타내며 이를 이용하여 구한 타원방정식을 Fig. 18에 도시하였다. 공분산 행렬과 타원을 구하는 방법은 부록에 설명되어 있다.

Table 1 Statistical properties of position error

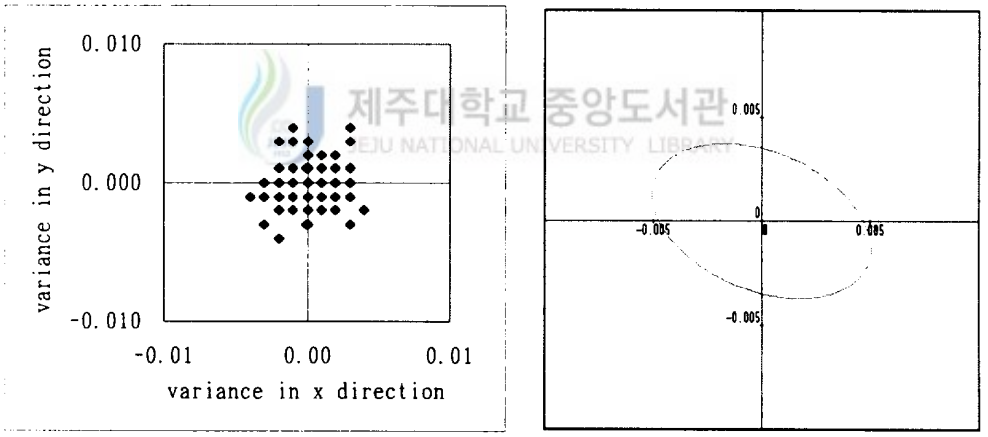
units : m, rad

Variable	move of 2 meter	turn of 2 radian
standard deviation of x	0.01229	0.001773
standard deviation of y	0.02171	0.001709
standard deviation of angle	0.01515	0.03965
covariance of x and y	0.00008	0.143136
covariance of x and angle	0.00002	0.182692
covariance of y and angle	-0.00004	0.148425
correlation between x and y	0.29326	4.28E-07
correlation between x and angle	0.04622	1.27E-05
correlation between y and angle	-0.23029	9.93E-06

제주대학교 중앙도서관



(a) Position error and ellipse after translational movement of 2m



제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

(b) Position error and ellipse after rotation of 2 radian

Fig. 18 Experimental results of position uncertainty

3. 위치 평가

3.1 기준지도 선택

기준지도선택 방법에서 설명된 내용들을 토대로 Fig. 19와 같은 작업영역에 대해 기준지도 선택실험을 수행하였다. 그림에서 S는 로봇의 출발지점을 나타내며, 초기 주행시에 기준지도(base map)가 저장된 부분은 일련번호와 사각형으로 표시되어있다. 기준지도의 크기는 48×48셀(2.4m×2.4m)이며 기준지도 사이의 최소거리(D_{min})는 1.8m, 최대거리(D_{max})는 5.0m로 주었다. 로봇이 작업영역의 벽을 따라 이동하는 도중 4개의 기준지도가 선택되어 저장되었으며 이를 Fig. 20에 나타내었다. 그림에서 국부지도는 주행중 연속적으로 형성된 것으로서 로봇의 중심과 지도의 중심이 일치하며, 이 국부지도상의 점령셀들이 이루는 도심이 기준지도의 중심이 된다.

선택된 기준지도와 실제 실험환경을 비교해보면 벽의 모서리 부분들이 기준지도로 선택되었으며, 거리기준에 의해 선택되어지는 직선벽형태는 각 기준지도 사이의 거리가 최대거리보다 짧기 때문에 기준지도로서 저장이 되지 않았다. 이것은 기준지도를 판단할 때 형상기준이 거리기준보다 우선하기 때문이다.

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

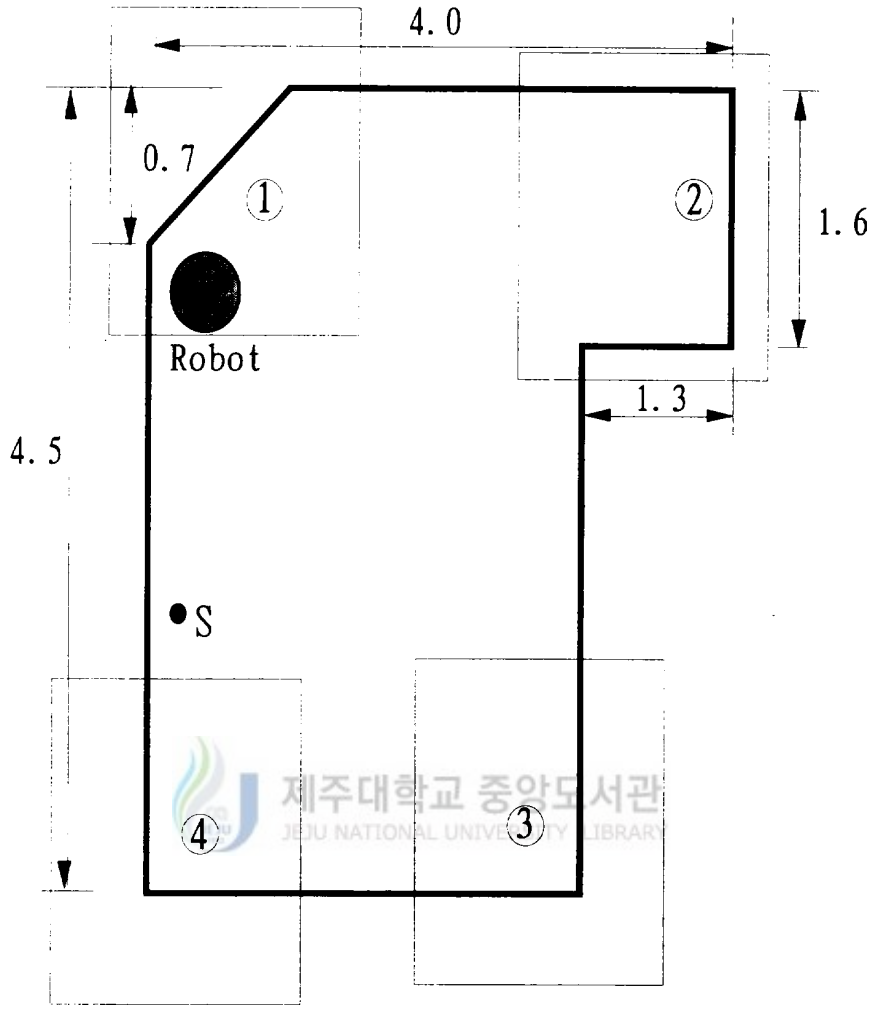
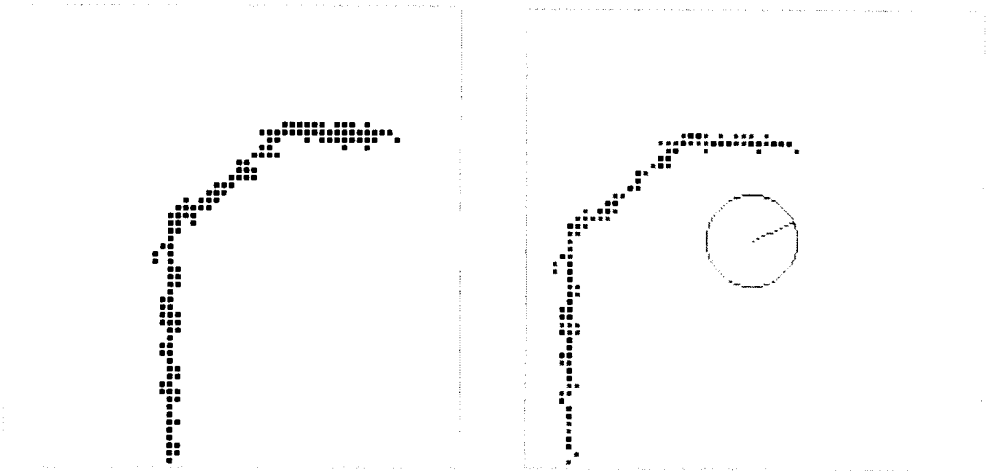


Fig. 19 Experimental environment for position estimation (unit : m)



Base map　　Local map

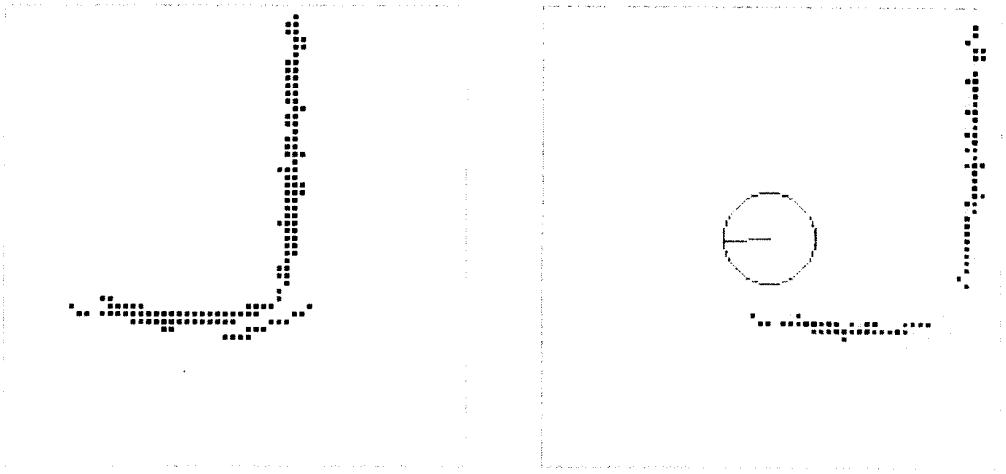
(a) The selected base and local maps for position ①

Base map　　Local map

(b) The selected base and local maps for position ②

Fig. 20 The selected base maps

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY



Base map　　Local map

(c) The selected base and local maps for position ③

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

Base map　　Local map

(d) The selected base and local maps for position ④

Fig. 20(continued)

3.2 위치평가

선택된 기준지도를 이용하여 로봇이 작업도중 발행하는 위치 및 각도오차를 보정하는 실험을 다음과 같이 수행하였다. 즉, 기준지도 선택 실험과 동일한 위치에서 로봇을 출발시킨 후 작업영역내를 임의 경로를 장시간 주행 시킨 다음 다시 초기위치로 되돌아오게 하였다. 이 모든 과정은 엔코더에 의한 dead reckoning으로 수행된 것이기 때문에 최종위치에서 로봇의 실제위치와의 오차를 측정한 결과 x 및 y 방향과 각도오차가 각각 0.30m, -0.15m, 그리고 0.262 radian이었다. 이것을 초기 오차로하여 로봇으로 하여금 다시 한번 전체 작업영역을 탐사하게 하면서 위치 평가 및 보정결과를 관측하였다. 이때 초기오차에 각 매칭지점까지 이동시 발생한 오차가 누적될 수 있도록 하기위해 한 지점에서 위치평가를 수행한 후에도 실제 로봇의 위치를 교정하지 않았다.

실험을 수행한 결과 로봇은 기준지도가 선택된 4지점에서 각각 매칭을 수행하였으며, 그때의 국부지도와 대응성 조사에 의해 찾아진 기준지도를 Fig. 21에 나타내었다. Fig. 22는 각 매칭지점에서 로봇의 위치 불확실성의 범위를 나타내는 타원을 보여 주고 있다. 그림에서 타원의 중심은 오차를 포함한 로봇의 현 위치이며 타원내의 작은 원은 실제 로봇의 위치를 나타낸다.

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

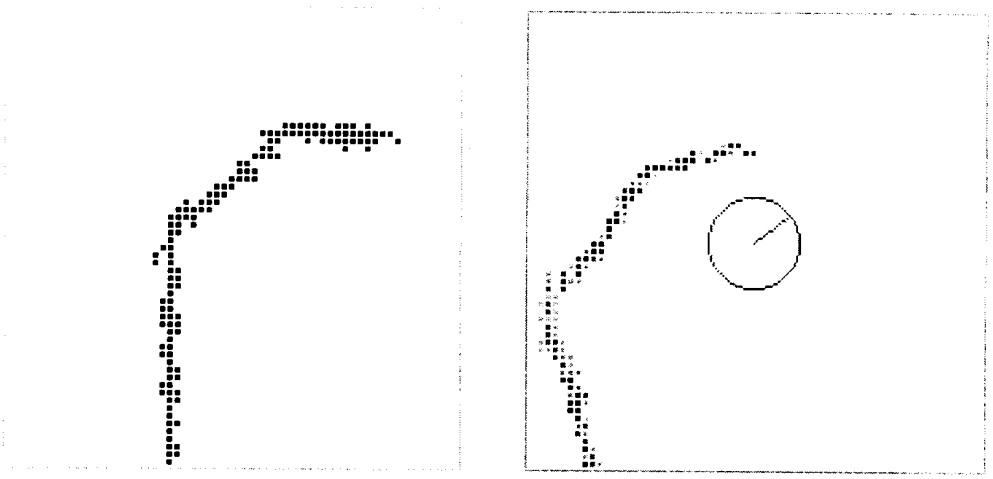
각 지점에서의 위치평가 결과 및 평가오차를 Table 2에 나타내었다. 표에서 알 수 있듯이 1과 2위치에서의 결과는 10cm이내의 위치오차로 보정이 가능했으나, 3과 4위치에서는 20cm정도의 오차가 발생하였다. 이것은 Fig. 21에 보여진 바와 같이 1과 2지점의 지도는 3과 4지점의 것보다 복잡한 형태이며 물체의 형상을 나타내는 점령 셀의 수가 많아 보다 많은 위치정보를 줄 수 있었기 때문이다.

결과적으로, 비록 3과 4지점에서의 오차가 20cm정도(4셀크기)이긴 하지만, 초음파 센서의 낮은 해상도(2cm정도)와 지도 형성시 발생하는 로봇의 위치오차 및 확률지도

형성시에 발생하는 오차에 의해 국부지도나 기준지도에서 물체의 경계면이 2~3셀정도로 넓게 표현되므로 2 셀크기(10cm)정도의 오차는 필연적인 것임을 감안하면 제안된 위치보정 시스템은 상당히 효과적인 것으로 사료된다.

또한 기존 연구에서는(Lim 1994b) 3과 4지점에서와 같이 동일 형상의 기준지도가 가까이 인접해 있을 때 로봇이 현재의 위치 불확실성을 제대로 추정하지 못함으로 인해 다른 위치의 지도끼리 매칭을 수행하는 경우가 발생할 수 있었으며 더욱이 그 결과의 신뢰도를 평가할 방법이 없었다. 그러나 본 연구에서는 각 매칭 지점에서 로봇의 위치 불확실성을 정량적으로 평가함으로써 서로 다른 위치의 지도끼리 매칭하는 문제를 해결할 수 있었으며, 그 결과가 그 지점에서의 위치불확실성 내에 포함되는지 여부로부터 위치보정의 신뢰성을 평가 할 수 있었다.

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY



Selected base map　　Current local map

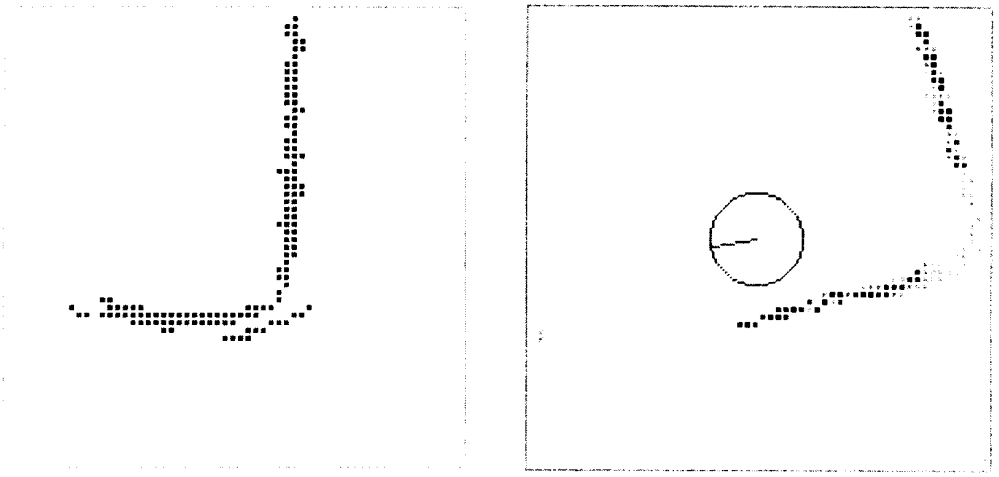
(a) position ①

Selected base map　　Current local map

(b) position ②

Fig. 21 The local and corresponding base maps for matching

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY



Selected base map　　Current local map

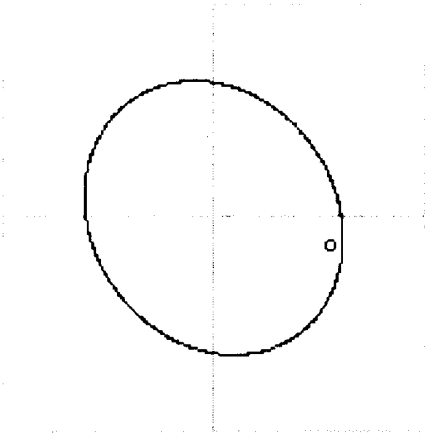
(c) position ③

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

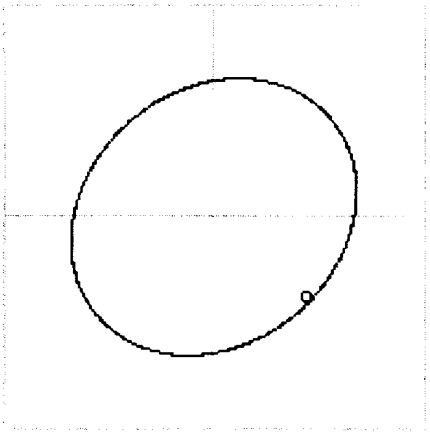
Selected base map　　Current local map

(d) position ④

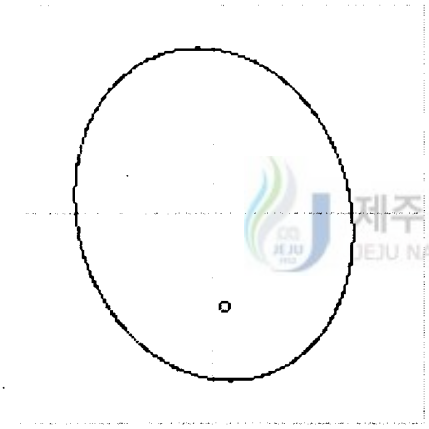
Fig. 21(continued)



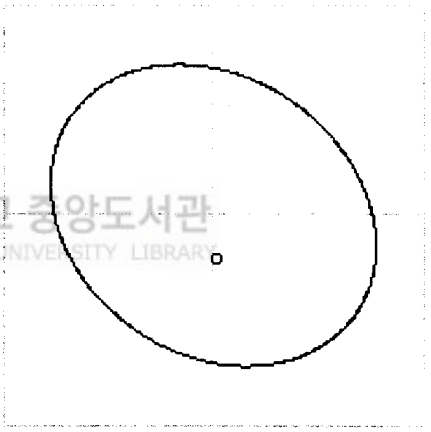
major axis = 1.008m
minor axis = 0.858m
(a) position ①



major axis = 1.080m
minor axis = 0.898m
(b) position ②



major axis = 1.200m
minor axis = 0.965m
(c) position ③



major axis = 1.231m
minor axis = 0.982m
(d) position ④

Fig. 22 Ellipse for matching

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

Table 2 The estimated errors for each position

units : m, rad

position		true position	erroneous position	corrected position	error after correction
1	x	0.565	-0.388	0.494	-0.071
	y	2.065	2.256	2.092	0.027
	θ	5.068	5.350	5.050	0.018
2	x	3.437	2.441	3.333	-0.107
	y	1.813	2.813	1.831	0.018
	θ	3.313	3.595	3.345	0.032
3	x	1.777	1.695	1.696	-0.081
	y	-1.239	-0.580	-1.432	-0.193
	θ	2.109	2.391	2.091	0.018
4	x	0.501	0.478	0.437	-0.064
	y	-1.268	-0.963	-1.472	-0.204
	θ	1.373	1.655	1.355	0.018

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

Ⅳ. 결 론

본 논문에서는 로봇 스스로가 작업영역내의 특징 있는 부분을 길잡이(기준지도)로 선택하고 이것을 이용하여 작업중 발행하는 위치오차를 평가 보정하는 시스템을 개발하였다. 이를 위해 초음파 센서가 장착된 로봇을 제작하였으며, 물체 추적제어 알고리즘을 연구하였다. 또한 기존연구에서 해결하지 못했던 로봇의 위치불확실성을 공분산 행렬을 이용한 다변량 가우시안 분포로서 정량적으로 평가할 수 있음을 보였다. 실제 실험을 통하여 개발된 시스템의 유용성을 검증하였으며, 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 로봇 주위에 대한 국부지도를 형성하여 작업영역에 대한 제한을 극복할 수 있었으며, 형성된 지도의 해상도를 증가시킬 수 있었다.

2. 물체 추적제어에 있어서 불확실성이 큰 센서정보의 신뢰성을 증대시키는 방법으로 국부지도를 이용함으로써 효과적인 제어가 가능하였다.

3. 다변량 가우시안 분포를 이용하여 로봇의 현재 위치 불확실성을 나타내는 타원을 형성함으로써 최대 위치오차 범위를 정량적으로 평가할 수 있음을 확인하였다.

4. 평가된 위치오차 범위와 국부지도 매칭기법을 결합함으로써 효과적으로 로봇의 실제 위치를 인식할 수 있었다.

제주대학교 중앙도서관

V. 참 고 문 헌

Chatila, R. and J. Laumond, 1992, "Position Referencing and Consistent World Modeling for Mobile Robots," IEEE International Conference on Robotics and Automation, St. Louis, MO, USA, pp.138-145.

Cho, D. W. and H. P. Moravec, 1989, "A Bayesian Method for Certainty Grids," AAAI Spring Symposium on Robot Navigation, Stanford, CA, pp.57-60.

Cho, D. W., 1990. "Certainty Grid Representation for Robot Navigation by a Bayesian Method," ROBOTICA, Vol.8, pp.159-165.

Crowley, J., 1986, "Representation and Maintenance of a Composit Surface Model, " IEEE International Conference on Robotics and Automation , San Francisco, CA, USA, pp.1455-1462.

Crowley, J., 1992, " World Modeling and Position Estimation for a mobile robot using ultrasonic ranging," IEEE International Conference on Robotics and Automation , Scottsdale, AZ, USA, pp.674-681.

Elfes, A., 1987, "Sonar-Based Real-World Mapping and Navigation," IEEE Transaction on Robotics and Automation, Vol. RA-3, No.3, pp.249-265.

Hyppa, K., 1989, "Lulea Turbo Turtle (LTT) ," IEEE/IROS, '89 Tsukuba, Japan, pp.620-623.

Leonard, J. and H. Durrent-Whyte, 1991, "Mobile Robot Localiation by Tracking Goemetric Beacons," IEEE Trnasactons on Robotics and Automation, Vol. 7, No. 3, pp.367-382.

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

Lim, J. H. and D. W. Cho, 1992, "Physically Based Sensor Modeling for a Sonar Map in a Specular Environment," IEEE International Conference on Robotics and Automation, Nice, France, pp.1714-1719.

임종환, 조동우, 1992a, "확률지도를 이용한 자율이동로봇의 경로계획", 대한기계학회논문집, 제16권 제4 호, pp.675-683.

임종환, 조동우,황진성, 1992b, "국부지도를 이용한 자율이동로봇의 실시간 지도형성 및 위치평가", '92대한기계학회 추계학술대회 논문집, pp.614-618

임종환, 조동우, 1992c, "GS청소로봇의 환경인식, 위치인식 및 주행제어", 금성사연구보고서.

Lim, J. H. and D. W. Cho, 1993, "Experimental Investigation of Mapping and Path Planning for an Autonomous Mobile Robot basd on Certainty Grids using Sonar Sensor," ROBOTICA, Vol. 11, pp. 7-17.

임종환, 조동우, 1993, "다중반사경로효과를 고려한 자율이동로봇의 초음파 지도형성", '93한국자동제어학술회의 논문집, pp.106-112.

Lim, J. H. and D. W. Cho, 1994a, " Specular Reflection Probability in the Certainty Grid Representation," ,Transactions. of ASME Journal, Vol. 116, pp.512-520

Lim, J. H. and D. W. Cho, 1994b, "Real Time Map Construction and Position Estimation for an Autonomous Mobile Robot using Sonar Sensors", ISCA, Vol. 1, No. 2, pp.111-124.

임종환, 1994, "초음파센서를 이용한 자율이동로봇의 지도형성, 탐사 및 위치평가", 포항공과대학 박사학위논문.

Lim, J. H and D. W. Cho, 1995, "A New Certainty Grid Based Mapping and Navigation System for an Autonomous Mobile Robot", The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Vol. 10, pp.139-149.

제주대학교 중앙도서관

민병권, 1992, "자율이동로봇의 위치 불확실성을 고려한 초음파 지도작성 및 경로계획", 연세대학교 석사학위논문, pp.11-30.

Moravec, H. P. and A. Elfes, 1985 "High Resolution Maps from Wide Angle Sonar," IEEE International Conference on Robotics and Automation, St.Louis, pp.116-121.

Murata Corporation, 1990, Murata Ultrasonic Sensor Manual, Murata, Japan.

Kleeman, L., 1989, " Ultrasonic Autonomous Robot Localization System, " IEEE/IROS, '89 Tsukuba, Japan, pp.212-219.

Kleeman, L., 1992, " Optimal Estimation of Position and Heading for Mobile Robots Using Ultrasonic Beacons and Dead-Reckoning," IEEE International Conference on Robotics and Automation , Nice, France, pp.2582-2587.

Smith, R. C. and Cheesman P., 1986, " On the Representation and Estimation of Spatial Uncertainty", The International Journal of Robotics Research, Vol. 5, No. 4, pp.56-68.

Polaroid Corporation, 1982, Ultrasonic Range Finders, Cambridge, Mass., Polaroid.

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

Ⅵ. 부 록

A.1 타원의 파라미터(parameter)의 계산

공분산 행렬로부터 평면상에 같은 확률값을 갖는 타원의 궤적을 얻는 방법과, 그 타원의 파라미터들을 구하는 방법은 다음과 같다.

식(22)으로부터 같은 확률값을 갖는 궤적으로 타원면의 방정식은

$$(x-\overline{X})^T C(x-\overline{X}) = k^2 \tag{A.1}$$

와 같이 되고, 이때 k는 신뢰구간을 결정해 주는 상수가 된다. 식(22)의 공분산 행렬에서 평면상의 위치에 해당하는 x, y위치에 관한 성분만을 추출하면, 2x2 공분산 행렬은

$$C = \begin{pmatrix} \sigma_x^2 & \rho\sigma_x\sigma_y \\ \rho\sigma_x\sigma_y & \sigma_y^2 \end{pmatrix} \tag{A.2}$$

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

와 같고, 여기서 ρ는 x와 y사이의 상관 관계이다. 식(22)을 x, y성분에 대하여 구하면,

$$P(x,y) = \frac{1}{2\pi\sqrt{\sigma_x^2\sigma_y^2(1-\rho^2)}}\, e^{-\frac{1}{2(1-\rho^2)}\left[\frac{x^2}{\sigma_x^2} + \frac{2\rho xy}{\sigma_x\sigma_y} + \frac{y^2}{\sigma_y^2}\right]} \tag{A.3}$$

와 같이된다. 이때 식(A.1)의 k와 점(x, y)가 타원 안에 있을 확률과의 관계는

$$P(x, y \in ellipse) = 1 - e^{\frac{-k^2}{2}} \tag{A.4}$$

와 같은 식으로부터 결정되며, 이때 점(x, y)가 타원에 들어갈 확률이 90%라면 k의 값은 4.605가 된다.

식(A.3)으로부터 x, y평면에서의 타원의 방정식을 구한 것이

$$Ax^2 + 2Bxy + Cy^2 - k^2 = 0 \tag{A.5}$$

일 때, 이 타원의 장축 및 단축과 x축의 양의 방향이 이루는 각 θ는 다음과 같다.

$$\theta = \frac{1}{2}\arctan\left(\frac{2B}{A-C}\right)$$

$$a = \sqrt{\frac{2k^2}{A+C-T}} \tag{A.6}$$

$$b = \sqrt{\frac{2k^2}{A+C+T}}$$

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

여기서, $T = \sqrt{A^2 + C^2 - 2AC + 4B^2}$ 이다.

감사의 글

순식간에 지나버린 2년이란 세월, 이 논문을 만들면서 지나온 시간들이 하나둘씩 기억속에서 스쳐지나갑니다. 즐거운일, 힘든일. 미약하나마 이 작은 성과로 매듭지어지면서 여기서 끝이 아닌 새로운 시작의 발판이되길 다짐하여 봅니다. 지난 2년간 부족한 저를 논문이 나오기까지 지도하여 주신 임종환교수님께 감사드리며, 많은 조언을 해주신 권기린교수님, 김귀식교수님, 허종철교수님, 현명택교수님께 감사의뜻을 전합니다.

또한 어렵고 힘든 여건속에서 저를 도와주신 양순량 선생님, 이동원 선생님께 고마운 마음을 전하며, 여러 대학원생 여러분께도 감사드립니다. 어려울 때, 힘들 때 걱정하시며 용기를 북돋아주신 부모님, 형님, 형수님, 동생에게도 이 논문을 바칩니다. 마지막으로 이 책과 더불어 나의 영원한 동반자가 되어줄 사랑하는 희정이와 짧으나마 저를 걱정하여주신 장인.장모님께도 감사드립니다.

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

碩士學位論文

미지의 영역에서 활동하는 자율이동로봇의 초음파지도에 근거한 위치인식 시스템개발

濟州大學校 大學院

機械工學科

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

姜 昇 均

1996年 12月

미지의 영역에서 활동하는 자율이동로봇의 초음파지도에 근거한 위치인식 시스템개발

指導敎授 林 鍾 桓

姜 昇 均

이 論文을 工學 碩士學位 論文으로 提出함

1996 年 12 月

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

姜昇均의 工學 碩士學位 論文을 認准함

審査委員長 강 희 식

委 員

委 員 임 종 환

濟州大學校 大學院

1996 年 12 月

Development of a Sonar Map Based Position Estimation System for an Autonomous Mobile Robot Operating in an Unknown Environment

Seung-Kyun Kang
(Supervised by professor Jong-Hwan Lim)

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF
THE REQUIREMENTS FOR THE DEGREE OF MASTER
OF ENGINEERING

DEPARTMENT OF MECHANICAL ENGINEERING
GRADUATE SCHOOL
CHEJU NATIONAL UNIVERSITY

1996 . 12 .

목 차

Summary ····· 1

Ⅰ. 서 론 ····· 2

Ⅱ. 이 론 ····· 5

1. 이동로봇외제어 및 위치 추측법 ····· 5

1.1 로봇의 하드웨어 ····· 5

1.2 로봇의 구동제어 ····· 9

1.3 로봇의 위치추측법 ····· 10

2. 초음파 지도 ····· 12

3. 주행제어 ····· 16

3.1 국부지도 ····· 16

3.2 주행제어 ····· 17

4. 로봇의 위치불확실도의 추정 ····· 21

5. 위치평가 ····· 25

5.1 기준지도 선택방법 ····· 25

5.2 지도사이의 대응성 ····· 26

5.3 위치평가 ····· 27

Ⅲ. 실험 및 결과 ····· 30

1. 로봇의 주행제어 실험 ····· 30

2. 로봇의 위치불확실성 ····· 33

3. 위치평가 ····· 36

3.1 기준지도 선택 ····· 36

3.2 위치평가 ····· 40

Ⅳ. 결 론 ····· 46

Ⅴ. 참고문헌 ····· 47

Ⅵ. 부 록 ····· 50

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

SUMMARY

Among the prerequisite abilities (perception of environment, path planning and position estimation) of an autonomous mobile robot, position estimation has been seldom studied by mobile robot researchers. In most cases, conventional position estimation has been performed by placing landmarks or giving the entire environmental information in advance. Unlikely to the conventional ones, the study addresses a new method that the robot itself can select distinctive features in the environment and save them as landmarks without any a priori knowledge, which can maximize the autonomous behavior of the robot. First, an orientation probability model is applied to construct a local map of robot's surrounding. The feature of the object in the map is then extracted and the map is saved as landmark. Also, presented is the position estimation method that utilizes the correspondence between landmarks and current local map. In doing this, the uncertainty of the robot's current position is estimated in order to select the corresponding landmark stored in the previous steps. The usefulness of all these approaches are illustrated with the results produced by a real robot equipped with ultrasonic sensors.

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

I. 서 론

자율 이동 로봇(Autonomous Mobile Robot)은 주어진 환경에 대한 사전지식이 없는 상태에서 스스로 그 환경에 대처할 수 있는 능력을 가진 로봇을 의미한다. 일반적으로 이동로봇은 매니퓰레이터와는 달리 그 작업영역의 제한이 적고 유연성이 크므로 그 용도가 다양하다. 따라서 유해한 작업환경에 인간을 대체할 수 있으며, 무인 자동화 창고의 운반차량등 산업현장에서도 각광을 받고있다. 뿐만 아니라 무인청소기, 무인 잔디깍기등 가정용으로도 이용될 수 있어 그 응용범위가 대단히 넓다고 할 수 있다.

이동로봇이 자율적인 행동을 하기 위해서는 환경인식, 경로계획 및 주행제어, 그리고 위치인식 및 보정등의 3가지 기본적인 능력을 갖추어야 한다. 환경인식과 경로계획은 지금까지 많은 연구가 수행되어 왔으며, 그 결과 어느 정도 실용적인 단계에 와 있으나, 위치인식 및 보정에 관한 연구는 상대적으로 미흡한 실정이다. 실제 자율이동로봇의 주행에는 지면과 바퀴사이의 미끄럼, 지면의 요철, 그리고 엔코더 회로의 전기적 잡음 및 엔코더 자체의 해상도 등에 의한 랜덤(random)한 오차가 필연적으로 개입된다. 뿐만 아니라, 로봇에 부착된 바퀴들의 형상은 동일하며, 각 바퀴는 이상적인 원형을 이룬다고 가정하지만, 실제 바퀴들의 형상은 동일하지 않으며, 이상적인 원형이 아님에 의해 발생하는 계통오차도 이동로봇의 위치오차에 큰 비중을 차지한다.

이와 같은 요인들에 의해 발생하는 오차는 Dead Reckoning 시스템(바퀴에 부착된 엔코더 정보만을 이용하여 위치를 결정하는 시스템)만으로는 보정할 수 없는 것이며, 따라서 많은 연구자들이 안내선(Guide Line)이나 안내표식(Landmark or Guide Mark) 등을 이용해 왔다. 안내선 방법은 비교적 정확하고 쉽게 위치정보를 얻을 수 있는 반

제주대학교 중앙도서관

면에 작업영역이 극히 제한되므로 자율이동로봇 시스템에는 부적합하며, 주로 AGV (무인반송차)에 적용되고 있다.

안내표식 방법은 비콘(Beacon)센서를 이용하는 방법, 인공안내표식방법, 그리고 자연안내표식방법으로 분류된다. 비콘센서 방식은 센서 자체를 안내표식으로 이용하는 방법이다. Leonard와 Durrent_Whyte(1991)는 초음파 비콘을 작업장 내에 배치하고, 이들로부터의 정보를 칼만필터(Kalman Filter)로 처리하여 로봇의 위치를 평가하는 방법을 제안했다. 또한 Kleeman등(1989, 1992) 은 Dead Reckoning정보와 초음파 비콘정보를 동시에 이용하여 로봇의 위치를 평가하는 방법을 연구하였다.

인공안내표식방법은 현재 가장 일반적으로 이용되는 방법으로, 작업장내에 주위 환경과 쉽게 구별될 수 있는 색상과 모양의 표식을 설치하고 카메라로 이것을 포착하여 위치를 평가하는 방법으로서, 비젼(vision)시스템에서 주로 쓰이고 있다. 최근, 바-코드 형태의 안내표식을 작업장내에 설치하고 레이저 센서로 그 표식을 읽어 위치를 평가하는 방법도 Hyppa(1989)에 의해 연구되었다. 반면에 자연 안내표식 방법은, 작업영역내의 주위환경 그 자체를 안내표식으로 이용하는 방법이다. Crowley(1986, 1992)는 사전에 작업장의 형상을 선분형태로 구성한 기준모델을 로봇에 제공한 후, 작업과정에서 로봇에 장착된 센서의 정보와 이 기준모델을 비교하여 위치를 평가하는 방법을 연구했다. 또한, Chatile 와 Laumond(1992)는 Crowley와 비슷한 방법을 제시했는데, 다만 제공되는 기준모델이 선분형태가 아닌 그리드형태라는 점이 다르다.

이상과 같은 기존의 위치보정방법이 갖는 공통적인 단점은, 사전에 비콘센서나 안내표식을 설치해야 하거나 기준모델을 입력해줄 필요가 있을 뿐만 아니라, 이로 인해 로봇의 작업영역이 제한되므로 환경변화가 심한 곳이나 해저탐사, 우주탐사 및 미지영역에서의 작업과 같이 사전정보가 없거나 안내표식의 설치가 어려운 곳에서는 적용될 수 없다는 점이다.

미지환경에 적용할 수 있는 위치보정방법에 대한 연구가 거의 이루어지지 못한 이유중의 하나는, 센서의 정보만에 의존해야하는 환경인식방법이, 비록 간단한 작업에는 이용될 수 있을 정도이지만, 아직 위치보정에 쓰여질 수 있을 만큼의 단계로 발전되어있지 못하기 때문이다. 비젼시스템에서는 영상이미지로부터 물체의 윤곽을 추출하여, 두 영상을 매칭(Matching)하는 방법을 연구하고 있으나 아직은 단순한 형상이나 제한된 환경에서만 적용될 수 있는 단계이다. 또한, 초음파센서는 장치가 간단하며 직접적인 정보를 얻을 수 있어 자율이동 로봇의 센서로 많이 쓰이지만 정보의 불확실성이 크고 거울효과가 발생하기 때문에 형성된 초음파 지도의 질이 낮아 위치보정에 쓰여질 수 없었다(Cho등 1990). 그러나, 최근 초음파센서의 가장 큰 문제점인 거울효과를 해결하는 연구가 완성되어(Lim 1992) 초음파 지도만을 이용한 위치보정 방법이 제시되었다(임 1992b, Lim 1994).

이 방법은 사전정보가 전혀 없는 상황에서, 초음파센서의 정보를 이용하여 지도를 형성하며, 이 지도로부터 로봇 스스로가 특징 있는 부분을 판단하여 안내표식으로 기억하고, 기억된 안내표식을 이용하여 로봇의 위치를 평가, 보정하는 것이다. 그러나 이 방법은 로봇이 이동함에 따라 발생하는 오차의 범위를 제대로 추정하지 못하기 때문에 위치보정 단계에서 현재의 오차범위내에 존재하는 안내표식을 찾아내는데 어려움이 있을 뿐만 아니라 평가된 위치에 대한 신뢰도를 추정할 수 없는 문제가 있다.

제주대학교 중앙도서관

본 논문에서는 초음파지도에 근거한 기존의 위치평가 방법에서 나타난 한계점을 극복하여 보다 신뢰성 있는 위치평가가 가능한 시스템을 제안한다. 이를 위해 초음파센서를 장착한 이동로봇을 제작하고 dead reckoning에 의한 위치평가방법 및 물체의 표면을 따라 주행하는 제어 알고리즘을 연구하였다. 또한 로봇이 이동함에 따라 누적되는 위치오차를 정량적으로 평가 할 수 있는 방법을 제시하며, 이를 이용하여 위치 오차를 추정하여 보정하는 위치 인식 시스템을 개발하여 실험으로 그 유용성을 검증한다.

II. 이 론

1. 이동 로봇의 제어 및 위치 추측법

1.1 로봇 하드웨어

본 연구에서 사용한 이동로봇은 실험실에서 설계 제작한 CNUAMR-I(Autonomous Mobile Robot of Cheju National University-I)이다. CNUAMR-I는 Fig. 1 과 Fig. 2와 같은 모습이며 구동부, 센서부, 제어부 및 전원 장치부로 구성되어 있다. 로봇의 좌표계는 Fig. 2(b)와 같으며, 두 개의 구동바퀴와 두 개의 보조바퀴로 구성되어 있다. 구동바퀴는 독립적인 DC모터를 사용하여 동시에 제어하며, 3자유도의 이동 동작이 가능하다.

Intel 80586 PC로 로봇을 외부에서 제어하고, 위치평가(Position estimation)를 위해 두 개의 구동바퀴 축에 각각 회전식 엔코더(Rotary encoder)를 설치하였다. 각종 데이터의 수집과 이동제어는 인터럽트(Interrupt)에 의해 동기 되어지며, 로봇의 최대 이동속도는 0.02m/sec이다. 로봇 둘레에 24개의 Murata의 초음파 센서가 장착되어 있으며 거리측정은 로봇내부의 송수신 회로와 카운터 회로에서 담당한다. 로봇과 PC는 인터페이스 카드(PCL-720)를 통하여 직렬통신을 하고 초음파센서의 카운터 값과 모터의 속도명령, 방향제어 명령을 교환한다.

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

24개의 초음파센서는 Fig. 3과 같이 몸체의 중앙부분에 15 °간격으로 원형의 형태로 부착되어있으며 센서의 작동순서는 인접한 센서끼리의 간섭을 최대한 피하기 위해 [6, 1, 11, 2, 10, 3, 9, 4, 8, 5, 7, 12]의 순으로 동시에 두 센서가 작동된다. CNUAMR-I의 제어는 컴퓨터 내부에 디지털 데이터를 처리할 수 있는 인터페이스 카드를 사용하여 제어를 행하였으며, 그 개략도는 Fig. 4와 같다.

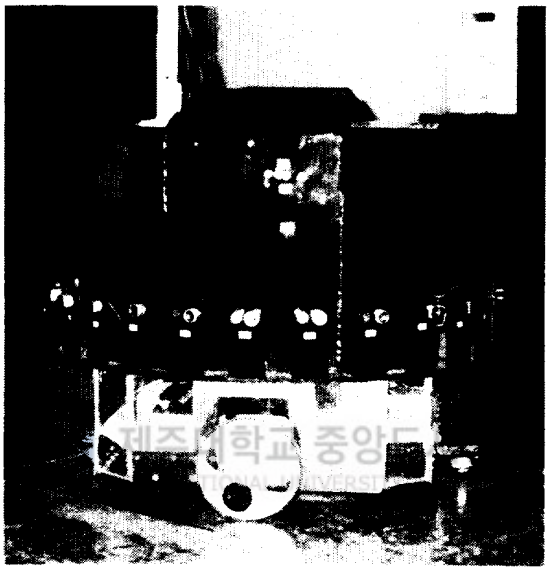
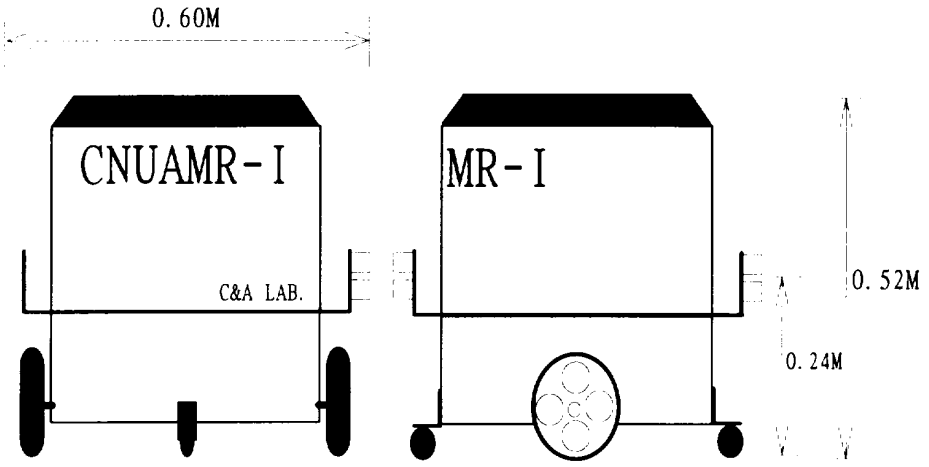
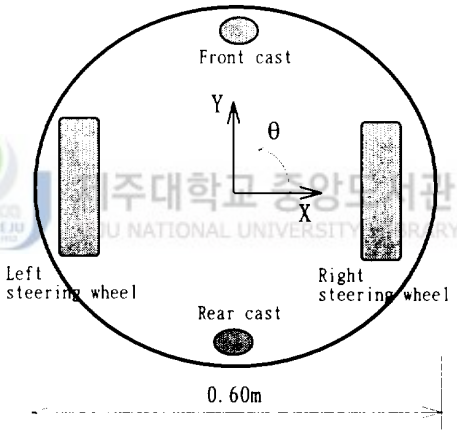


Fig. 1 Photographs of the CNUAMR-I



(a) Physical dimensions of the CNUAMR-I



(b) Coordinate system of the CNUAMR-I

Fig. 2 Configuration of CNUAMR-I

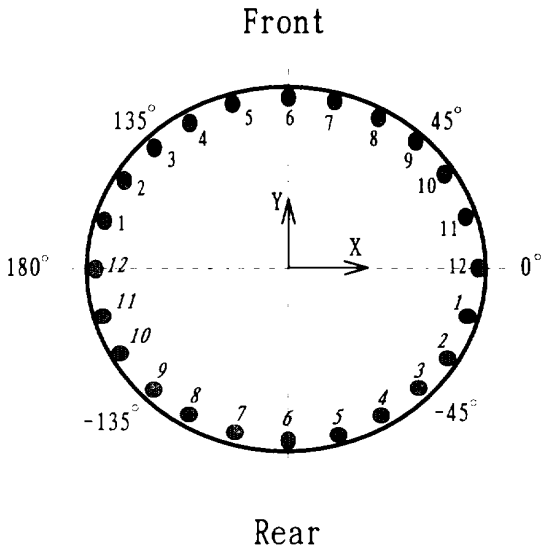


Fig. 3 Configuration of sonar sensors mounted on CNUAMR-I

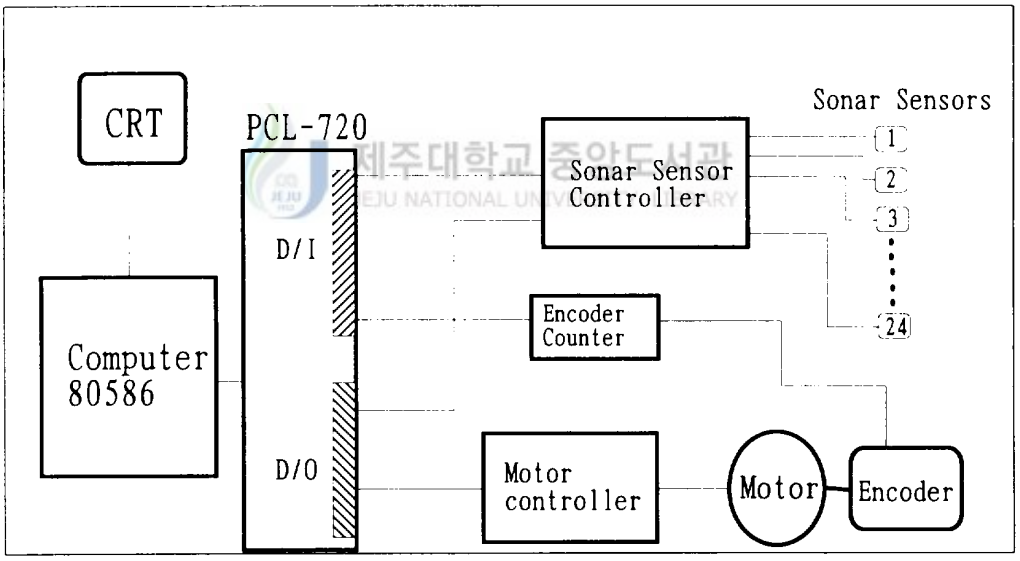


Fig. 4 System architecture of the CNUAMR-I

1.2 로봇의 구동 제어

Fig. 5는 CNUAMR-I의 속도제어에 이용된 PWM(Pulse Width Modulate)제어 회로이다. 우선 컴퓨터에서 일정 값의 디지털 신호가 모터의 제어부로 보내어지면 D/A 변환기를 통하여 이를 아날로그의 값으로 변화시키며, 다시 이 값을 증폭기를 통하여 증폭을 시킨 다음 비교기에서 기준 삼각파와 비교한다. 이때 비교기에서는 속도 신호의 크기에 비례하는 폭을 가진 펄스가 출력되어 4개의 트랜지스터로 이루어진 H브리지 형태의 모터구동회로에 전압형태로 공급됨으로써 DC모터를 제어한다.

이 회로는 그림에서 알 수 있듯이 양쪽 바퀴를 동시에 제어를 할 수 있으며, 각각 분리하여 제어를 할 수도 있어, 로봇의 동작에 유연성을 준다.

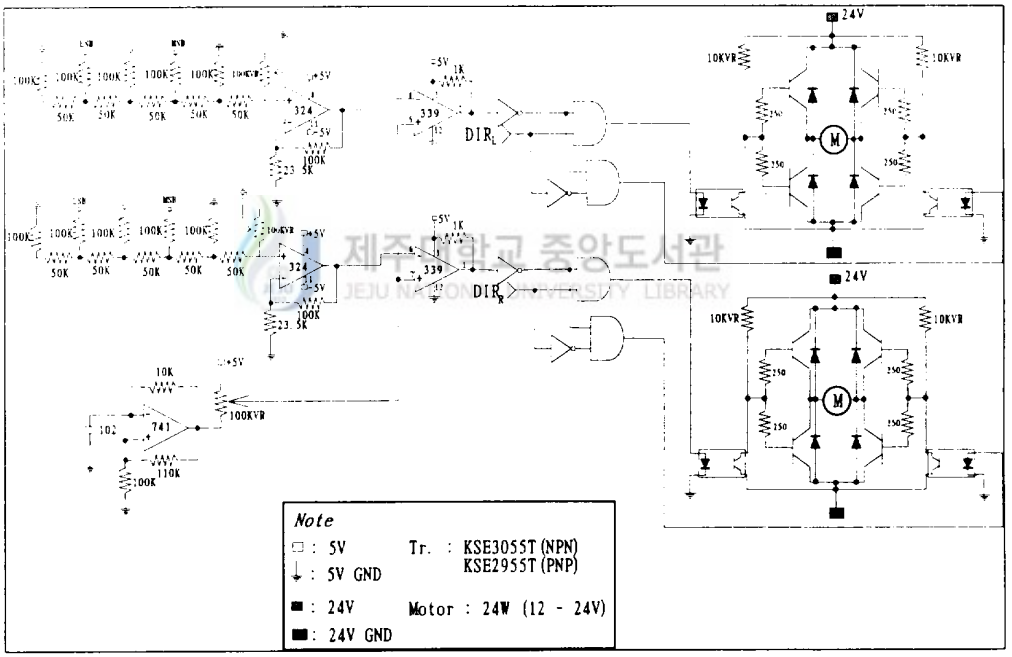


Fig. 5 Motor driver circuit(PWM circuit) of CNUAMR-I

1.3 로봇의 위치 추측법

로봇의 구동은 Differential Steering 알고리즘을 사용하였으며 바퀴의 폭은 0.0126m 이고 양 바퀴사이의 거리 L 은 0.52m이다. Fig. 6과 같이 로봇이 $A(X_{i-1}, Y_{i-1}, \theta_{i-1})$에서 다음 위치인 $B(X_i, Y_i, \theta_i)$이동을 하였다면 B점의 위치는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$D_R = R\theta$$
$$D_L = (L+R)\theta \quad (1)$$

여기서,

R : 이동궤적의 회전중심(o점)에서 오른쪽 바퀴중심 까지의 거리

L : 양 바퀴 중심 사이의 거리

D_R : 오른쪽 바퀴의 이동 거리

D_L : 왼쪽 바퀴의 이동거리

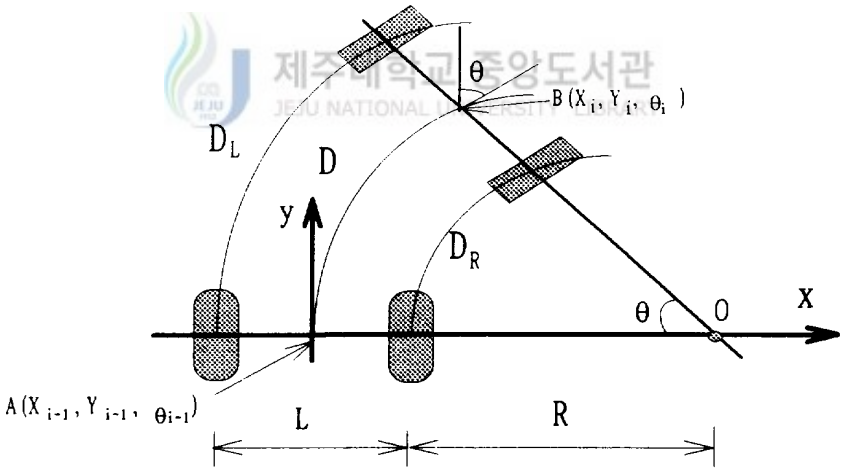


Fig. 6 Dead reckoning position estimation

따라서 각도와 양 바퀴의 중심 거리(R)은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\theta = \frac{(D_L - D_R)}{L}$$
$$R = \frac{D_L}{\theta}$$
$$\mathrm{xp} = (\mathrm{R} + \mathrm{L}/2) \times (1 - \cos\theta) \tag{2}$$
$$\mathrm{yp} = (\mathrm{R} + \mathrm{L}/2) \times \sin\theta$$

여기서, xp와 yp 는 A지점을 원점으로 한 로봇의 현 위치를 나타낸다.

식(2)을 이용하여 기준 좌표계에 대한 위치(B)의 좌표와 방향을 구하는 식은 좌표 변환 공식에 의하여 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{pmatrix} X_i \\ Y_i \\ \theta_i \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos\theta & -\sin\theta & 0 \\ \sin\theta & \cos\theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} xp \\ yp \\ \theta \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} X_{i-1} \\ Y_{i-1} \\ \theta_{i-1} \end{pmatrix} \tag{3}$$

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

또한 제자리회전은 좌표의 변동은 없고 로봇의 방향 변환만이 존재하므로 각도의 변화만 있으면 된다. 즉,

$$X_i = X_{i-1}$$
$$Y_i = Y_{i-1} \tag{4}$$
$$\theta_i = \theta_{i-1} + \delta$$

이 식(3)과 식(4)를 이용하여 로봇의 현재위치와 각도를 추측하게 되며 이것을 Dead reckoning 방법이라 한다.

2. 초음파 지도

확률지도(Certainty grid)란 Fig. 7과 같이 2차원 또는 3차원 공간을 모자이크형상의 셀(Cell)로 구분하여 각 셀에 물체에 점령되어 있을 확률(P_{occ})과 점령되어 있지 않을 확률(P_{emp})을 주어 표현하는 것을 의미한다(Cho 1989, Lim 1993).

P_{occ}와 P_{emp} 사이에는

$$P_{occ} + P_{emp} = 1 \tag{5}$$

인 관계가 성립하므로 실제 셀은 점령확률(P_{occ})만으로 그 구성이 가능하다. 점령확률과 비점령확률 사이의 관계는 다음과 같이 구해진다. P(A|B)를 B라는 사건이 발생했다는 가정 하에, 사건 A가 발생할 확률이라면, 조건확률의 정의에 의해 다음과 같은 관계들이 성립한다.

$$P(o|B \cap A) = \frac{P(B|o \cap A) \times P(o|A)}{P(B|o \cap A) \times P(o|A) + P(B|\bar{o} \cap A) \times P(\bar{o}|A)} \tag{6}$$

$$P(\bar{o}|B \cap A) = \frac{P(B|\bar{o} \cap A) \times P(\bar{o}|A)}{P(B|o \cap A) \times P(o|A) + P(B|\bar{o} \cap A) \times P(\bar{o}|A)} \tag{7}$$

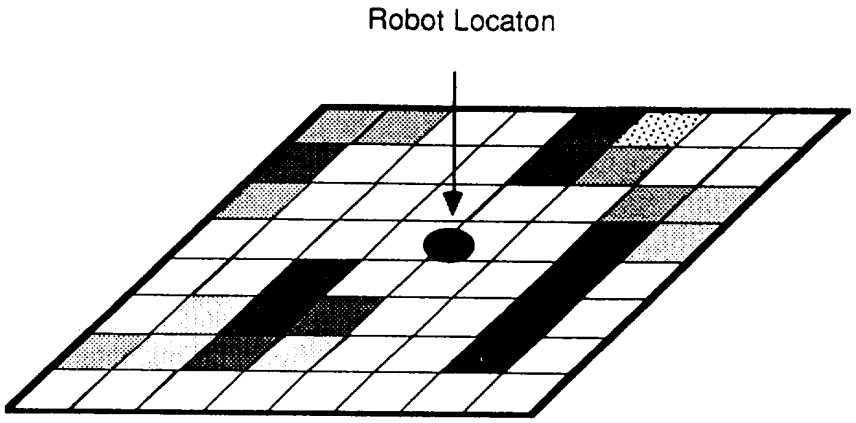


Fig. 7 Certainty grid representation

여기서 o를 어떤 셀의 점령확률, A를 지금까지의 정보, 그리고 B를 새로 입수된 정보로 정의하고 식(6)을 식(7)으로 나누면

$$\frac{P(o_i|B\cap A)}{P(\overline{o_i}|B\cap A)}=\frac{P(B|o_i\cap A)}{P(B|\overline{o_i}\cap A)}\times\frac{P(o_i|A)}{P(\overline{o_i}|A)} \tag{8}$$

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

식(8)에서 첨자 i 는 재배열된 셀들중 i 번째 셀을 나타낸다. 식(8)의 최종적인 형태는 다음과 같이 주어진다.

$$\frac{P(B|o_i\cap A)}{P(B|\overline{o}_i\cap A)}=\frac{\sum_{n=0}^{m}\prod_{q=j}^{j+n-1}P(\overline{H}_q|o_i\cap A)P(H_{j+n}|o_i\cap A)P(H_{j+n}|M)}{\sum_{n=0}^{m}\prod_{q=j}^{j+n-1}P(\overline{H}_q|\overline{o}_i\cap A)P(H_{j+n}|\overline{o}_i\cap A)P(H_{j+n}|M)} \tag{9}$$

식(9)에서 $P(H_i|o_i \cap A)$는 $P(H_i|A)$로 나타낼 수 있으며, $P(H_i|A)$는 현재까지 누적된 정보(A)가 주어진 상황에서 i 번째 셀에 센서 음파가 멈출 확률로서 다음과 같이 표현된다.

$$P(H_i|A) = P(H_i|o_i) \times P(o_i|A) + P(H_i|\overline{o_i}) \times P(\overline{o_i}|A) \tag{10}$$

$P(H_i|o_i)$는 i 번째 셀에 실제로 물체가 있을 때 음파가 그 셀에서 반사될 확률이고 $P(H_i|\overline{o_i})$는 물체가 없는데도 불구하고 음파가 반사될 확률이다. $P(H_i|o_i)$를 $P_{DET,i}$, $P(H_i|\overline{o_i})$를 $P_{FAL,i}$ 로 나타내고 식(10)을 다시 쓰면,

$$P(H_i|A) = P_{DET,i} \times P(o_i|A) + P_{FAL,i} \times P(\overline{o_i}|A) \tag{11}$$

식(11)에서 $P_{DET,i}$, $P_{FAL,i}$ 는 센서의 종류에 따라 달라지는 센서의 특성으로서 기존의 베이지안 업데이트 모델에서는 다음과 같이 근사적으로 구하였다.

P_{DET}는 어떤 셀에 물체가 존재할 때 음파가 그것을 감지할 확률로서 Fig. 8과같이 센서로부터 떨어진 거리가 멀수록, 음파의 중심으로부터 치우친 각도가 클수록 음파의 강도가 떨어지기 때문에 다음과 같이 가정할 수 있다.

$$\begin{aligned} P_{DET} &= P(r) \times P(\theta) \\ P_{FAL} &= CP_{DET} \end{aligned} \tag{12}$$

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

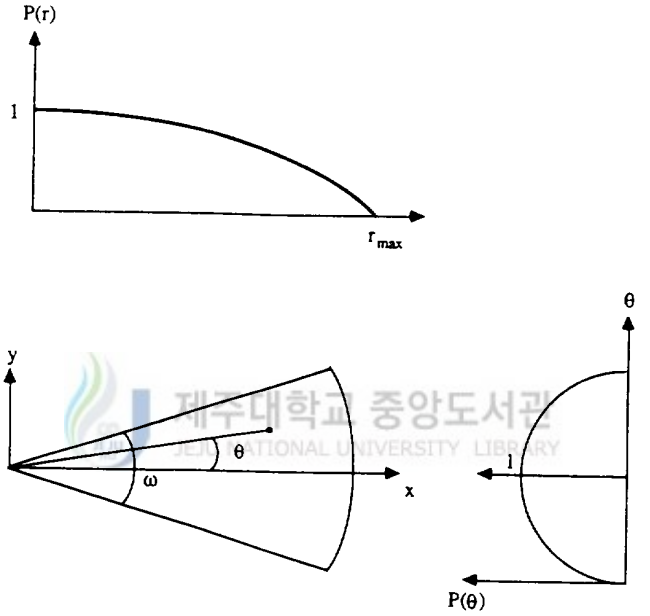
여기서,

$$P(r) = 1 - \left(\frac{r}{r_{max}}\right)^2 \qquad r_{min} \le r \le r_{max}$$

$$P(\theta) = 1 - \left(\frac{\theta}{\omega/2}\right)^2 \qquad -\frac{\omega}{2} \le \theta \le \frac{\omega}{2}$$

ω: beam의 구경

C: 0.0001



제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

Fig.. 8 P_{DET} and P_{FAL}

3. 주행제어

3.1 국부지도

정밀한 주행제어가 이루어지기 위해서는 고행상도의 초음파 지도가 요구된다. 그러나 PC는 기억용량과 처리속도의 한계가 있어 넓은 영역 전체를 하나의 지도로 표현할 경우 그 해상도가 상당히 떨어진다. 이러한 문제점을 해결하기 위한 방안으로 전체 작업공간에 대한 지도보다는 로봇의 현재 위치를 중심으로 일정한 윈도우내만을 대상으로 하여 고해상도의 지도를 형성할 수 있는 국부지도(Fig. 9) 형성방법을 제시한다. 국부지도의 크기는 48×48개의 셀로 구성되어 있으며 각 셀의 크기는 0.05 × 0.05 m^2이다. 지도의 중심은 로봇의 중심과 일치한다.

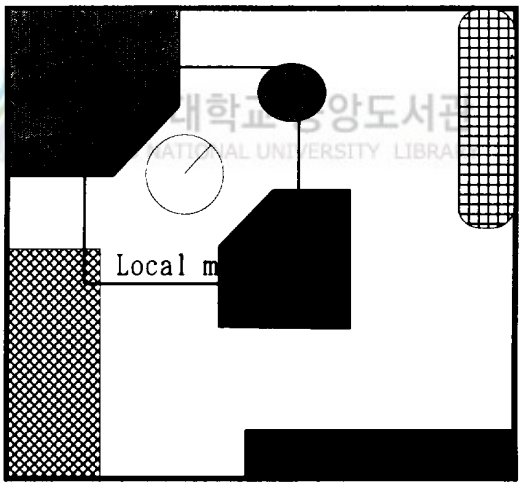


Fig. 9 Configuration of a local map

국부지도는 기준 좌표계에 대해서 회전은 하지 않고 로봇이 국부지도에 대해 상대적인 회전을 한다. 매 주행 싸이클 마다 로봇은 먼저 전 위치에서의 지도를 현 위치로 이동시킨 다음, 현 위치에서 센서로부터 거리정보를 입수하고 이동된 국부지도를 갱신시킨다. 이와 같은 과정을 연속적으로 수행함으로써 전체 작업영역에 대한 고해상도의 초음파 지도를 확보할 수 있다.

국부지도는 단순화된 MBM모델을 이용하여 작성되는데, 이것은 원래의 모델에서 비점령영역에 대한 확률계산을 생략한 것으로서 짧은 시간내에 물체의 개략적인 윤곽의 표현이 가능한 모델이다(임 1992b, 1994).

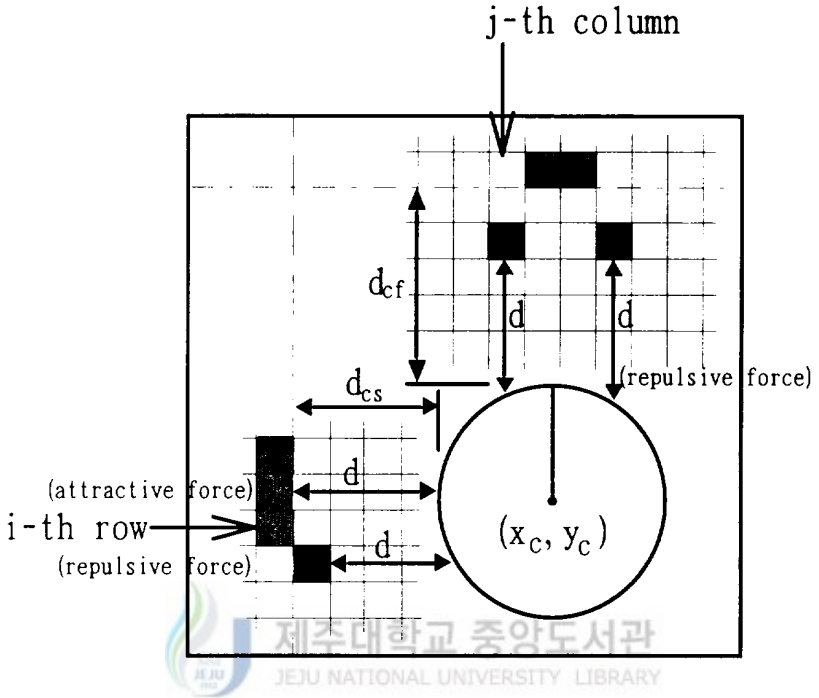
3.2 주행제어

로봇의 주행제어는 크게 두가지 형태로 나누어진다. 첫째는 정해진 목표점을 향해 주행하는 제어이고, 두 번째는 주행 중에 장애물이 나타났을 경우에 필요한 물체 표면 추적제어이다. 정해진 목표점을 찾아가는 주행제어는 기본적으로 직선 주행이므로 설명된 PWM제어 방식이 그대로 적용된다.

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

물체 표면을 추적하는 제어는 물체윤곽에 대한 사전 정보가 없으므로 매 순간 입수되는 센서의 정보에 의존한다. 그러나 센서의 정보는 불확실성이 커 효율적인 제어가 어렵다. 따라서 정보의 불확실성을 최소화하고 현재까지 누적된 정보를 최대한 이용할 수 있는 국부지도에 근거한 제어방법을 제시한다. 물체 표면 추적제어는 국부지도내에 로봇을 중심으로 한 작은 명령지도를 기준으로 수행된다. 명령지도의 크기는 24×30 셀이며 한 셀의 크기는 $0.05\times0.05m^2$ 이다. 명령지도의 모든 셀들은 기준 좌표계에 대하여 로봇의 회전각만큼 반대로 회전시켜 로봇이 항상 지도내에서 일정한 방향(y방향)을 유지하게 한다. 로봇의 진행 속력은 일정하며, 명령지도내의 물체의 형상

에 따라 단지 조향만을 제어한다. 명령지도는 2개의 영역(좌방, 전방)으로 나누어지며 각 셀들은 로봇에 대해 가상적인 힘(f_i)을 발생한다. f_i의 크기는 Fig. 10과 같이 셀과 로봇 외곽 사이의 수직거리와 셀의 확률값에 따라 달라진다.



제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

Fig. 10 Illustration of distance forces in a command window

좌측영역에 속해있는 i 번째 행에서 셀들에 의한 힘(f_i)는 다음과 같이 정의된다.

$$f_i = \begin{cases} -(d-d_{cs})^2 \times P(o), & \text{if } (d < d_{cs}) \\ (d-d_{cs})^2 \times P(o), & \text{otherwise} \end{cases} \tag{13}$$

여기서,

d : 로봇외곽에서 수평 방향으로 가장 가까운 점령셀 까지의 거리

d_{cs} : 좌방영역의 임계거리

P(o) : 최근접 점령셀의 확률값

임계거리는 로봇이 물체를 추적할 때 유지하도록 설정된 물체로부터 로봇표면까지의 거리이다. 로봇으로부터 물체까지의 거리가 좌방 임계거리보다 가까울 때 f_i 는 척력(음의 힘)으로 작용하여 로봇이 물체로부터 멀어지게되며, 그 반대의 경우는 f_i는 인력(양의 힘)으로 작용하여 로봇을 물체쪽으로 끌어 좌방 임계거리가 유지되도록 한다. 만약 수직 방향으로 점령셀이 존재하지 않을 경우의 f_i는 최대인력인 $-d_{cs}^2$이 된다. 반면에 전방영역에서의 f_i는 다음과 같이 척력만으로 정의된다.

$$f_i = \begin{cases} -(d-d_{cf})^2 \times P(o), & \text{if}(d < d_{cf}) \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \qquad (14)$$

여기서,

d : 로봇외곽에서 수평 방향으로 가장 가까운 점령셀 까지의 거리

d_{cf} : 전방영역의 임계거리

P(o) : 최근접 점령셀의 확률값

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

즉, 로봇이 물체 외곽을 추적하는 제어는 좌방영역의 셀들에 의해 수행되며, 전방영역은 단지 물체와의 충돌을 피하기 위한 보조적인 역할을 담당하므로 이 영역의 셀들은 로봇에 대하여 척력만 발생하며 인력을 발생하지는 않는다.

명령지도내의 셀들에 의해 발생되는 가상힘은 로봇의 회전 중심에 대해 다음과 같은 모멘트(M_c)를 발생시킨다.

$$M_c = k_s \times F_s + k_f \times F_f \tag{15}$$

여기서, F_s는 좌측 영역의 힘들의 합, F_f는 전방 영역의 힘들의 합이며 k_s와 k_f 는 설계변수이다. 이 모멘트로부터 로봇에 가해줄 조향명령, 즉 로봇이 수행하여야 할 조향속도(Ωc)가 다음 식으로 계산된다.

$$\Omega_c = - k_p M_c \tag{16}$$

여기서, k_p는 제어기의 이득이다. Fig. 11은 물체추적 제어시스템의 블록선도를 나타낸다. 기준입력모멘트(M_{ref})는 0으로서, 로봇이 정해준 임계거리를 유지하는 상태를 의미하며 M_c 자체가 전체시스템의 오차 신호 역할을 한다. 결국 로봇은 일정한 속력으로 진행하면서 조향명령에 따라 단지 주행방향만 연속적으로 바꾸게 된다.

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

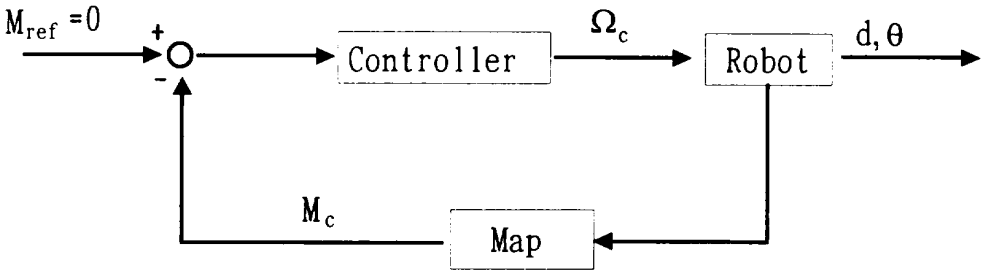


Fig. 11 Block diagram of the wall following control system

4. 로봇의 위치 불확실도의 추정

이동로봇은 바퀴 등의 구동부에 부착된 센서를 이용하여, 매 순간마다 자신이 움직인 량을 측정하며, 이 값을 이용하여 자신의 공간상의 위치를 추정한다. 그러나, 로봇에 부착된 센서의 정밀도의 한계, 바퀴 지름의 차이 등 구동부의 구조적인 불균일, 센서 회로의 잡음에 의한 오동작, 출발 정지시 및 이동 중에 발생하는 바퀴의 미끄러짐 등에 의해서 로봇이 dead reckoning으로 추측한 공간상의 위치는 오차를 가지고 있게 마련이다. 여기서 말하는 위치 불확실도란 로봇이 추측한 위치와 실제 로봇의 위치의 차이를 확률적인 개념을 사용하여 표현한 것이다.

2차원 평면상에서의 로봇의 위치는 (x, y, θ)로 표시되며, 이는 각각 로봇의 위치와 방향을 나타낸다. 근사좌표변환(approximate transformation , AT ; 이하 AT 로 표기)은 어떤 절대적인 좌표계와 불확실성을 갖는 다른 좌표계 사이의 평균적인 위치 관계를 확률적으로 추정하고, 이 추정의 불확실성을 공분산 행렬을 이용하여 표시한 것이다. Fig. 12에서 각 점을 연결하는 화살표는 절대좌표계에서 상대좌표로의 AT를 뜻한다. 타원은 다변량 가우시안 확률분포(multivariate gaussian distribution)에서 2차원상에 같은 확률 값을 갖는 궤적은 나타낸다. 그러므로, 타원이 크다는 것은 그 만큼 위치의 불확실성이 크다는 의미이다.

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

점선의 타원은 로봇의 마지막 위치에 대한 로봇의 상대적 불확실성을 나타내며, 실선의 타원은 기준 좌표계(W)에 대한 로봇 위치의 불확실성을 나타낸다. 그림에서 W는 로봇의 출발점이자, 기준좌표계의 원점이 된다. 로봇이 L_1, L_2, L_3으로 이동함에 따라 W에 대한 로봇의 위치불확실도는 커지게 된다. A, B, C는 W, L_1, L_2, L_3,사이의 좌표변환을 의미한다. AT들을 합성하면 여러 개의 연속적인 AT를 하나의 AT로 만들 수 있다. 그림에서 $L_2(X_3, Y_3, \theta_3)$의 좌표를 절대좌표계 W에 대해서 표시하기 위해 좌표변환 $A(X_1, Y_1, \theta_1)$와 $B(X_2, Y_2, \theta_2)$를 합성하면 다음과 같다(Smith 1986).

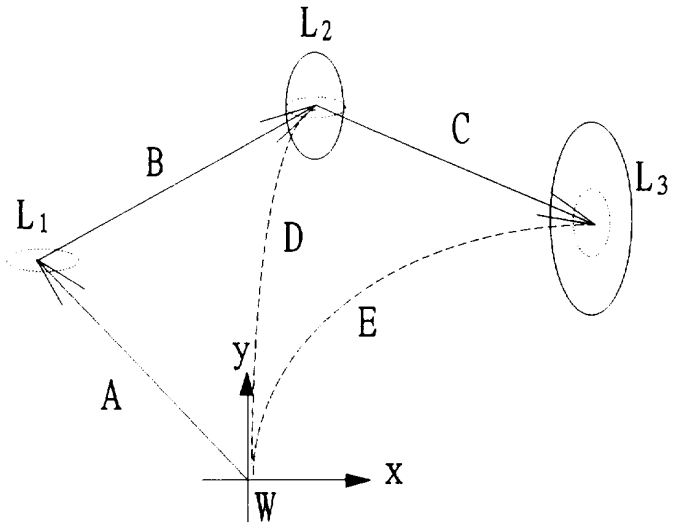


Fig. 12 Approximate transforms of the robot position

$$
\begin{aligned}
X_3 &= f(X_1, Y_1, \theta_1, X_2, Y_2, \theta_2) = X_2\cos\theta_1 - Y_2\sin\theta_1 + X_1 \\
Y_3 &= g(X_1, Y_1, \theta_1, X_2, Y_2, \theta_2) = X_2\sin\theta_1 + Y_2\cos\theta_1 + Y_1 \\
\theta_3 &= h(X_1, Y_1, \theta_1, X_2, Y_2, \theta_2) = \theta_1 + \theta_2
\end{aligned}
\tag{17}
$$

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

함수 f, g, h의 평균과 공분산을 구하기 위해, 모든 변수들을 랜덤 변수로 가정하고, 이 함수들을 각각의 변수들의 평균값의 1차 테일러 급수로 가정하여 전개하면, 함수들의 평균치는,

$$\overline{X_3} \cong f(\overline{X_1}, \overline{Y_1}, \overline{\theta_1}, \overline{X_2}, \overline{Y_2}, \overline{\theta_2})$$
$$\overline{Y_3} \cong g(\overline{X_1}, \overline{Y_1}, \overline{\theta_1}, \overline{X_2}, \overline{Y_2}, \overline{\theta_2}) \quad (18)$$
$$\overline{\theta_3} \cong h(\overline{X_1}, \overline{Y_1}, \overline{\theta_1}, \overline{X_2}, \overline{Y_2}, \overline{\theta_2})$$

와 같이 나타내어진다.

공분산 행렬을 얻기 위해서 테일러 급수 전개를 행렬식으로 쓰면, 아래와 같은 편차의 식으로 표시된다.

$$\begin{pmatrix} \Delta X_3 \\ \Delta Y_3 \\ \Delta \theta_3 \end{pmatrix} \cong J\,(\Delta X_1, \Delta Y_1, \Delta \theta_1, \Delta X_2, \Delta Y_2, \Delta \theta_2)^T \quad (19)$$

식(19)의 J는 다음과 같은 자코비안 행렬이다.

$$J = \begin{pmatrix} \frac{\partial f}{\partial X_1} & \frac{\partial f}{\partial Y_1} & \frac{\partial f}{\partial \theta_1} & \frac{\partial f}{\partial X_2} & \frac{\partial f}{\partial Y_2} & \frac{\partial f}{\partial \theta_2} \\ \frac{\partial g}{\partial X_1} & \frac{\partial g}{\partial Y_1} & \frac{\partial g}{\partial \theta_1} & \frac{\partial g}{\partial X_2} & \frac{\partial g}{\partial Y_2} & \frac{\partial g}{\partial \theta_2} \\ \frac{\partial h}{\partial X_1} & \frac{\partial h}{\partial Y_1} & \frac{\partial h}{\partial \theta_1} & \frac{\partial h}{\partial X_2} & \frac{\partial h}{\partial Y_2} & \frac{\partial h}{\partial \theta_2} \end{pmatrix}$$
$$= \left(\begin{array}{ccc|ccc} 1 & 0 & -(Y_3 - Y_1) & \cos\theta & -\sin\theta & 0 \\ 0 & 1 & (X_3 - X_1) & \sin\theta & \cos\theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 \end{array}\right) \quad (20)$$
$$= [\ H \mid K\ ]$$

A, B의 공분산행렬을 각각 C_1, C_2라 할 때, 식(19)의 양변을 제곱하고, 결과 식의 기대값을 구함으로써, W에 대한 L_2,의 공분산행렬 C_3을 구할 수 있다.

제주대학교 중앙도서관 JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

$C_{ij} = E(\Delta X_i \Delta Y_j)$ 이므로, C_3은,

$$C_3 = J \begin{pmatrix} C_1 & 0 \\ 0 & C_2 \end{pmatrix} J^T = H\ C_1\ H^T + K\ C_2\ K^T \tag{21}$$

로봇이 이동함에 따라 발생하는 위치오차에 대한 확률적인 자료를 알고 있으면, Fig. 12의 A, B, C의 공분산 행렬을 식(21)을 이용하여, 계속 합성해 나감으로써, 각 위치에서의 로봇의 위치불확실도를 예상할 수 있다. 어느 위치에서의 로봇의 공분산 행렬과, 위치추측법으로 계산한 거리를 이용하면, 다변량 가우시안 확률분포의 식으로부터, 평면사의 벡터 x에 로봇이 있을 확률 p(x)는,

$$P(x) = \frac{1}{\sqrt{(2\pi)^n detC}}\ e^{-1/2[(x-\overline{X})^T C^{-1}(x-\overline{X})]} \tag{22}$$

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

이 된다. 여기서 n은 차원의수이고, X는 공칭평균 위치 벡터, x는 평면상의 위치 벡터이고, C는 공분산 행렬이다. 이때 공칭평균 위치벡터 $\overline{X}$는 dead reckoning으로 구한 거리가 된다.

5. 위치평가

5.1 기준지도 선택방법

본 연구에서는 로봇의 자율성을 극대화 하기 위해 초기에 미지영역을 탐사하는 도중 형성되는 국부지도중에서 특징이 있는 부분을 로봇 스스로 선택하여 길잡이(기준지도)로 사용한다. 기준지도는 로봇의 위치와 방향에 대한 최대한의 정보를 줄 수 있는 것이어야 하며 그 선택방법은 실시간 적용이 가능해야 한다. 따라서 다음과 같은 선택기준을 설정하였다(임 1992b, Lim 1994b).

1. 벽 모서리 부근의 지도와 같이 특징이 있는 국부지도를 선택한다. 직선벽은 벽에 대한 로봇의 상대적인 각도 정보는 줄 수 있지만 위치정보는 주지 못한다. 그러나 긴 직선벽 부근에서의 작업시는 로봇의 작은 각도오차가 주행거리의 증가에 따라 큰 위치오차를 유발시킬 수 있으므로, 일정거리(D_{max})마다 직선형상의 지도도 선택을 한다.
2. 가능한 한 점령셀의 갯수가 많은 지도를 선택한다. 점령셀수가 많다는 것은 지도내의 물체 윤곽에 대한 정보가 풍부하다는 의미가 되므로 차후의 위치보정을 위한 매칭에 유리하다.
3. 인접한 기준지도 사이에는 가능한 한 유사성이 적어야한다. 이것은 실제 작업공간에는동일한 형상의 물체들이 여러개 존재할 수 있으므로 매칭시에 로봇이 현재 지도와 대응되는 기준지도를 선택하는 과정에서 문제를 야기시키기 때문이다.
4. 기준지도 사이에는 일정거리(D_{min})를 유지시킨다. 3항에서 언급된 바와 같이 동일 형상의 여러개의 기준지도가 존재할 수 있으므로 한 위치에서 그때의 최대 오차범위내에는 하나 이하의 기준지도만이 존재하는 것이 바람직하다.

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

이와 같은 기준에 따라 기준지도를 선택하는 방법은 다음과 같다.

먼저 이미 선택된 기준지도중 현재 국부지도와 최근접 기준지도 사이의 거리(D)가 D_{max}이상이면 현재의 국부지도가 직선 형상일지라도 기준지도로 선택한다. $D_{min}<D<D_{max}$인 경우에는, 현 국부지도의 형상이 직선이 아니면 기준지도로 선택한다. 만약 $D<D_{min}$인 경우에는 현재 국부지도의 셀갯수나 물체를 형성하는 선분갯수가 최인접 기준지도의 그것들 보다 많은 경우에만 기준지도를 선택하되 기존의 최인접 기준지도는 삭제시킴으로써 매칭에 유리한 지도를 확보한다.

D_{max}와 D_{min}은 실제 로봇의 이동특성에 따라 결정되어질 상수이다. D_{max}는 로봇의 위치오차가 최대 허용오차 범위이내에 들어갈 수 있는 최대 이동거리를 의미한다. 반면에 D_{min}은 임의의 값이 될 수 있으나 너무 크면 선택되는 기준지도의 수가 부족하여 위치오차 보정효율이 떨어지며 너무 작으면 필요이상의 기준지도가 선택됨과 동시에 로봇의 현재 위치오차 범위내에 여러개의 기준지도가 존재하여 대응성 판단에 어려움이 생긴다. 지도형상은 지도내에 형성된 물체의 선분수와 각 선분사이의 각도로서 정의되며, 점령셀들의 방향을 분류함으로써 이들 정보를 추출한다(임 1994)

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

5.2 지도사이의 대응성

매칭으로부터 위치를 평가하기 위해서는 먼저 저장된 여러 기준지도 중에서 현재의 국부지도에 대응되는 지도를 찾아내야 한다. 위치오차가 아주 작은 경우에는 두 지도사이의 거리만으로도 충분히 대응성을 판단할 수 있지만 본 연구에서는 이러한 가정을 하지 않았고, 따라서 다음과 같은 대응성 지수를 정의하여 이것들로부터 두 지도의 대응성을 판단하고자 한다(임 1994, Lim 1994b).

1. **형상지수** : 두 지도의 형상에 대한 대응성을 나타낸다. 국부지도의 형상은 물체를 구성하고 있는 선분의 수와 각 선분들 사이의 각도로 분류된다. 따라서 이 지수는 두 지도의 선분수와 각도가 일치하는지 여부를 알려준다.
2. **거리지수** : 이 지수는 고려되는 기준지도가 현 위치에서 오차 범위(위치불확실성을 나타내는 타원)내에 들어오는 가를 알려준다. 일반적으로 작업영역내에는 형상이 동일한 물체가 다수 존재할 수 있으므로 형상지수 만으로는 현재의 국부지도에 대응하는 기준지도를 찾아내기 어렵다. 따라서 형상지수가 만족되는 기준지도들 중 현재의 오차범위내에 있는 것이 대응되는 기준지도일 확률이 높다.
3. **셀 지수** : 두 지도에 있어서 셀의 갯수의 대응성을 나타낸다. 물체의 재질이나 형상(각도)에 따라 점령 셀의 갯수가 달라질 수 있으므로 셀갯수 자체가 대응성의 단서가 될 수 있다. 또한 매칭의 결과는 셀 수에 크게 의존하며 따라서 이 지수는 두 지도의 셀갯수 비가 매칭이 가능한 비율 이상인가를 나타낸다.

이상과 같은 모든 지수가 만족되면 두 지도가 서로 대응되는 것으로 판단한다.

기존의 연구(임 1994)에서는 로봇의 위치불확실성을 평가하지 못했기 때문에 2항의 거리지수가 제대로 정의되지 못했다. 따라서 매칭시에 대응성 판단에 어려움이 있었고, 그 결과 위치보정의 신뢰도가 낮았다.

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

5.3 위치 평가

로봇의 현재 위치는 대응관계 조사로부터 찾아진 기준지도와 현재지도를 매칭함으로써 평가하게 된다. 매칭은 Fig. 13과 같이 현재의 지도의 각 점령 셀을 임의의 (δx, δy, $\delta\theta$)에 대해서 그 좌표를 변환하였을 때 거기에 대응되는 기준지도의 셀을 조사하

여 그 대응정도가 최대가 되는 때의 (δx, δy, $\delta\theta$)를 찾아내는 작업이다. 각 점령 셀의 좌표를 변환하는 식은 다음과 같다(임 1992b, 1994).

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos\delta\theta & -\sin\delta\theta \\ \sin\delta\theta & \cos\delta\theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x - x_r \\ y - y_r \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \delta x + x_r \\ \delta y + y_r \end{pmatrix} \tag{22}$$

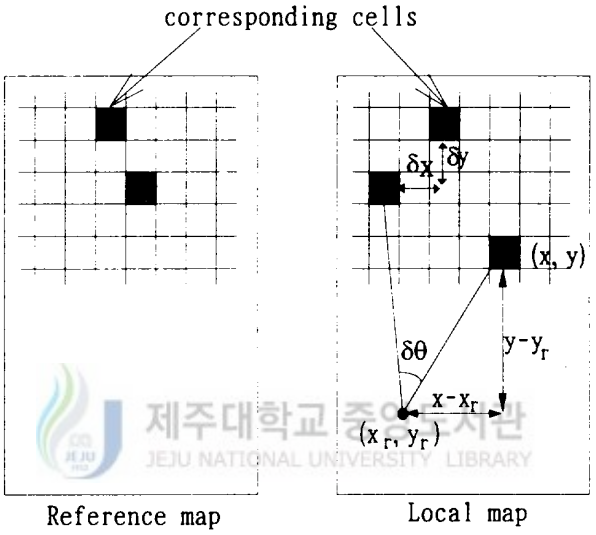


Fig. 13 Schematic diagram of maps for matching

여기서 (x_r , y_r)은 로봇의 현 좌표, (x, y)는 현 지도상의 점령 셀의 좌표, 그리고 (X, Y)는 거기에 대응되는 기준지도상의 셀의 좌표이다. 이와 같이 구해진 한 쌍의 셀 들의 확률 값을 서로 곱하고 전체 점령 셀에 대해서 그 값을 합하였을 때 가장 큰 값을 주는 (δx, δy, $\delta\theta$)를 찾아낸다.

그러나 이 과정은 대략 $O(n^4)$정도의 곱셈이 필요하므로 매우 느리다. 따라서 다음과 같은 방법으로 그 수행시간을 줄일 수 있다. 즉, 원래의 지도($n \times n$)에서 4개의 셀을 하나로 통합한 ($n/2 \times n/2$)크기의 지도를 형성하고 같은 방법으로 n/4지도를 형성한다. 이와 같이 해상도를 줄인 지도중 가장 낮은 해상도의 지도에서부터 매칭을 시작하여 (δx, δy, $\delta\theta$)를 구한 다음, 다음 단계 지도에서는 앞 단계에서 구해진 (δx, δy, $\delta\theta$)근처의 값에 대해 매칭을 실시한다. 같은 과정을 원래의 지도까지 실시하여 최종밀도의 (δx, δy, $\delta\theta$)를 구한다. 이러 한 방법은 곱셈의 수를 대략 O(n)정도로 줄일 수 있기 때문에 현저하게 시간이 단축된다.

그러나 국부지도의 경우는 셀의 수가 적고 그 분포가 지도내의 4분평면내에 국한되므로 n/2보다 작은 지도에 대한 매칭을 수행하면 점령셀의 개수가 극히 적어 그 결과가 아주 나빠진다. 또한 n/2지도에서 시작하면 매칭에 소요되는 시간이 실제 적용에 어려울 정도로 길어진다. 여기서는 두 지도사이의 최대 도심편차가 지도 크기의 1/4이하라는 점에 착안하여 다음과 같이 매칭시간을 줄이고자 하였다. 즉 n/2크기의 두 지도에서 도심을 서로 일치시킨 상태에서 최초 매칭을 시작한다. 이 경우 (δx, δy, $\delta\theta$)의 시도 범위를 원래 지도크기의 1/16으로 줄일 수 있다. 이와 같은 방법을 적용하였을 때 매칭에 요구되는 시간은 수 초 정도로 줄어든다.

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

III. 실험 및 결과

1. 로봇의 주행제어 실험

제안된 물체표면 추적제어 방법을 실제 로봇에 적용하여 그 유용성을 검증하였다. Fig. 14는 국부지도와 명령 지도(command window)의 형상을 보여주며, 명령지도 크기는 $1.2\times1.5m^2$이고 셀 크기는 $0.05\times0.05m^2$ 이다.

초음파 센서는 로봇 주위에 24개의 원 형태로 장착되어 물체를 감지하며, 최대 감지거리는 4m정도이다. 정상상태에서의 로봇의 최대 속력은 0.02m/sec이며, 조향비율은 4단계로 나누어 양쪽 바퀴에 조향속력을 조정하였다.

샘플링 시간은 0.1초이며, 각 샘플링 시간당 2개의 초음파 센서 데이터와 dead reckoning에 의한 거리 정보를 받아들인다. 물체 표면 추적제어의 실험공간은 Fig. 15와 같다. Fig. 16은 Fig. 15의 A지점에서의 국부지도와 명령지도를 예로 나타낸 것이다. 그림에서 좌측은 명령지도를 나타내고 우측은 국부지도를 나타낸다. 원은 로봇을 표시하며 직선이 가리키는 방향이 로봇의 전진 방향이다. 국부지도의 셀들은 translation 만하고 로봇이 회전하는 반면에, 명령지도에서는 로봇의 방향은 고정이 되어있고 점령셀들이 로봇이 회전한 반대 방향으로 회전한다. Fig. 17은 물체표면 추적제어를 행한 로봇의 이동경로를 나타낸 것이다. Fig. 17(a)는 임계거리와 같은 위치에서 출발한 후 곡선벽을 이동한 것이고, Fig. 17(b)는 임계거리이내에서 출발한 경우의 로봇의 이동경로를 나타낸다.

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

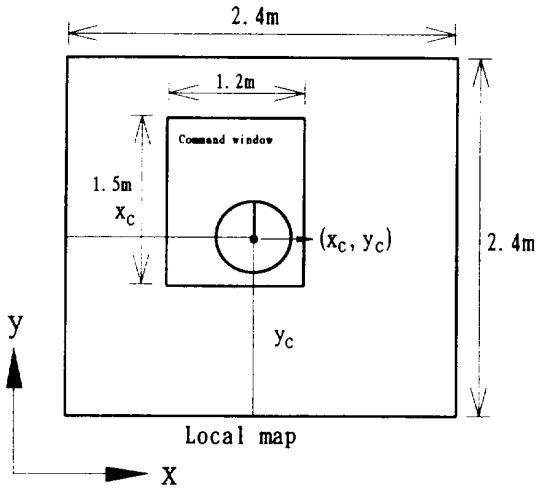
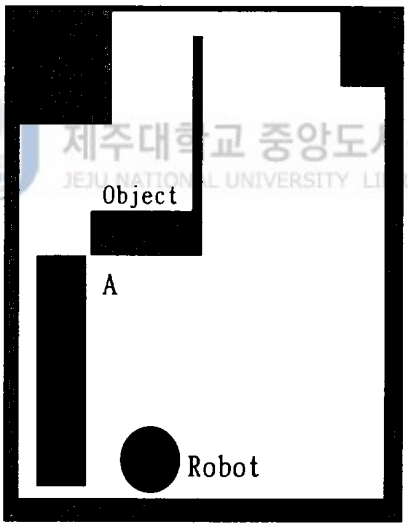


Fig. 14 Configuration of command window



제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

Fig. 15 Experimental environment for boundary following control

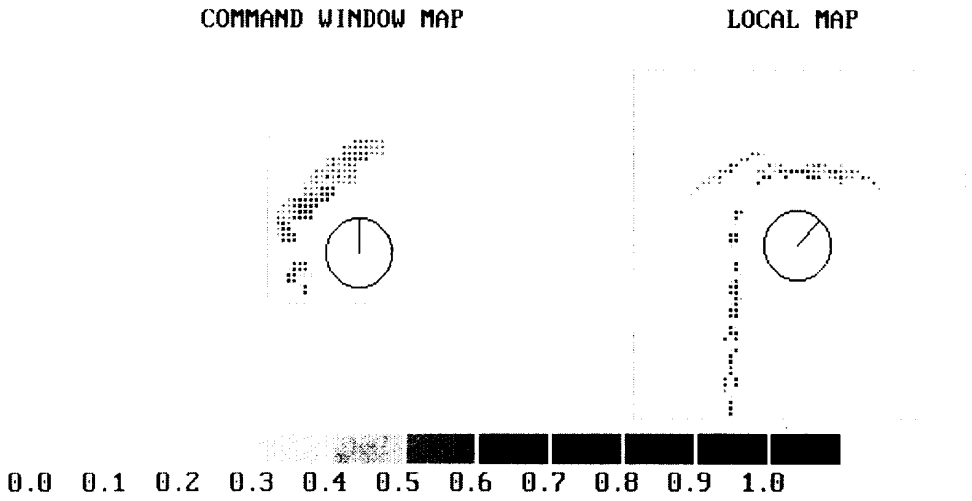
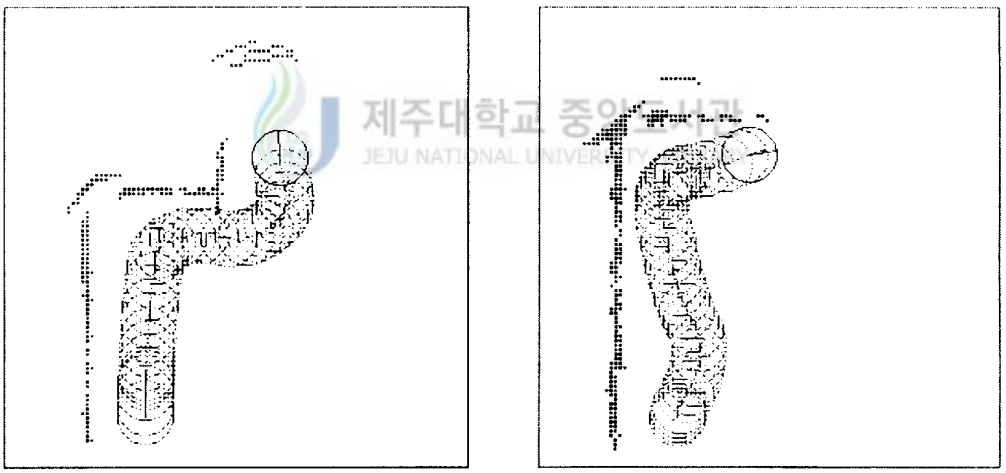


Fig. 16 Example of the local map and the command window at position A



(a) Results for a cornered wall (b) The robot was started near the wall

Fig. 17 Experimental results of boundary following control

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

2. 로봇의 위치불확실성

식(21)과 식(22)를 이용하여 로봇의 위치불확실성을 추정하기 위해서는 로봇이 현 위치에서 다음위치로 이동 했을때의 공분산 행렬이 필요하다. 그러나 공분산 행렬은 로봇의 이동 형태에 따라 달라지며 수많은 이동형태에 따른 모든 공분산행렬을 모두 실험으로 구하는 것은 불가능하다.

실제 로봇의 이동형태는 다양하지만 단위 샘플링 시간당(0.1초) 로봇의 이동량은 그 크기가 미소하므로 회전 후 직진 또는 직진 후 회전의 두가지 형태로 근사가 가능하다. 따라서 본 연구에서는 직선주행과 회전시의 공분산 행렬을 각각 실험으로 구하여 매 샘플링 시간마다 공분산 행렬을 갱신하는 방법을 이용하였다. 그러나 한 샘플링 시간당의 이동거리는 아주 작기 때문에 실제위치와 오차를 측정하기가 매우 어렵다. 만약 동일 환경이라면 같은 동일 직선주행에 대해서는 그 오차의 특성이 같을 것이며 오차의 크기는 이동량에 비례한다고 가정할 수 있다. 회전의 경우도 동일한 가정이 가능하므로 실제 실험은 2m 직선주행과 2radian 회전에 대해 수행하고 이것을 단위 샘플링 시간당으로 환산하여 공분산행렬을 구하였다.

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

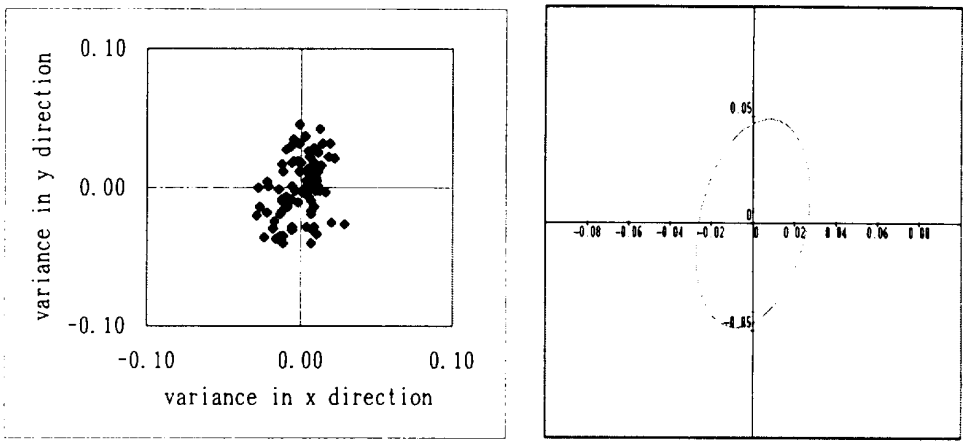
Table 1은 직선이동과, 회전동작에 대해 각각 80회씩 반복실험을 수행하여 얻어진 x, y 및 각도 값의 표준 편차와 상관관계를 나타내며 이를 이용하여 구한 타원방정식을 Fig. 18에 도시하였다. 공분산 행렬과 타원을 구하는 방법은 부록에 설명되어 있다.

Table 1 Statistical properties of position error

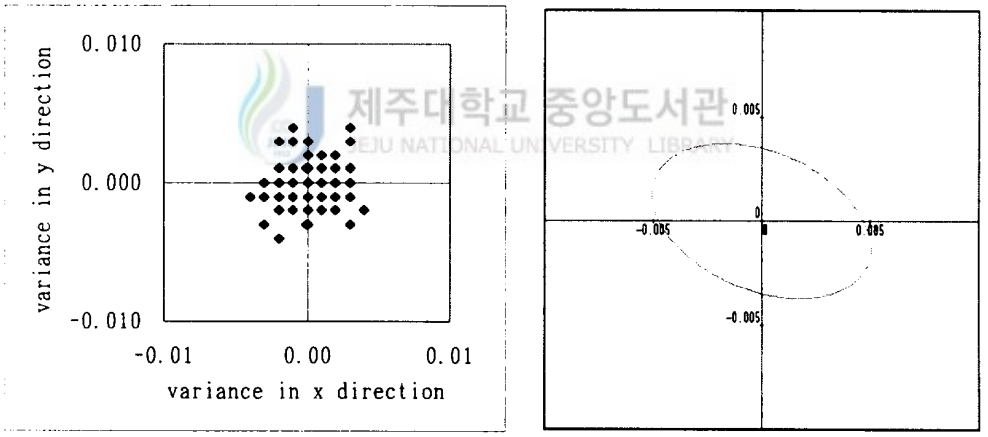
units : m, rad

Variable	move of 2 meter	turn of 2 radian
standard deviation of x	0.01229	0.001773
standard deviation of y	0.02171	0.001709
standard deviation of angle	0.01515	0.03965
covariance of x and y	0.00008	0.143136
covariance of x and angle	0.00002	0.182692
covariance of y and angle	-0.00004	0.148425
correlation between x and y	0.29326	4.28E-07
correlation between x and angle	0.04622	1.27E-05
correlation between y and angle	-0.23029	9.93E-06

제주대학교 중앙도서관



(a) Position error and ellipse after translational movement of 2m



제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

(b) Position error and ellipse after rotation of 2 radian

Fig. 18 Experimental results of position uncertainty

3. 위치 평가

3.1 기준지도 선택

기준지도선택 방법에서 설명된 내용들을 토대로 Fig. 19와 같은 작업영역에 대해 기준지도 선택실험을 수행하였다. 그림에서 S는 로봇의 출발지점을 나타내며, 초기 주행시에 기준지도(base map)가 저장된 부분은 일련번호와 사각형으로 표시되어있다. 기준지도의 크기는 48×48셀(2.4m×2.4m)이며 기준지도 사이의 최소거리(D_{min})는 1.8m, 최대거리(D_{max})는 5.0m로 주었다. 로봇이 작업영역의 벽을 따라 이동하는 도중 4개의 기준지도가 선택되어 저장되었으며 이를 Fig. 20에 나타내었다. 그림에서 국부지도는 주행중 연속적으로 형성된 것으로서 로봇의 중심과 지도의 중심이 일치하며, 이 국부지도상의 점령셀들이 이루는 도심이 기준지도의 중심이 된다.

선택된 기준지도와 실제 실험환경을 비교해보면 벽의 모서리 부분들이 기준지도로 선택되었으며, 거리기준에 의해 선택되어지는 직선벽형태는 각 기준지도 사이의 거리가 최대거리보다 짧기 때문에 기준지도로서 저장이 되지 않았다. 이것은 기준지도를 판단할 때 형상기준이 거리기준보다 우선하기 때문이다.

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

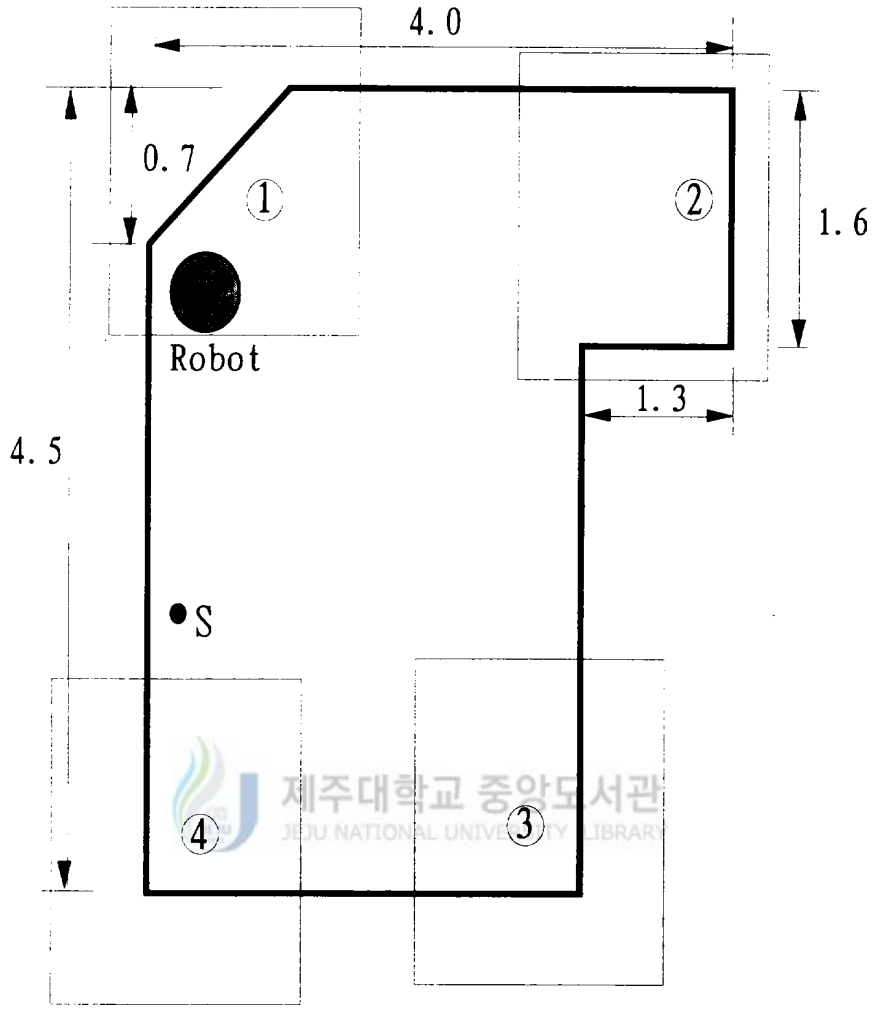
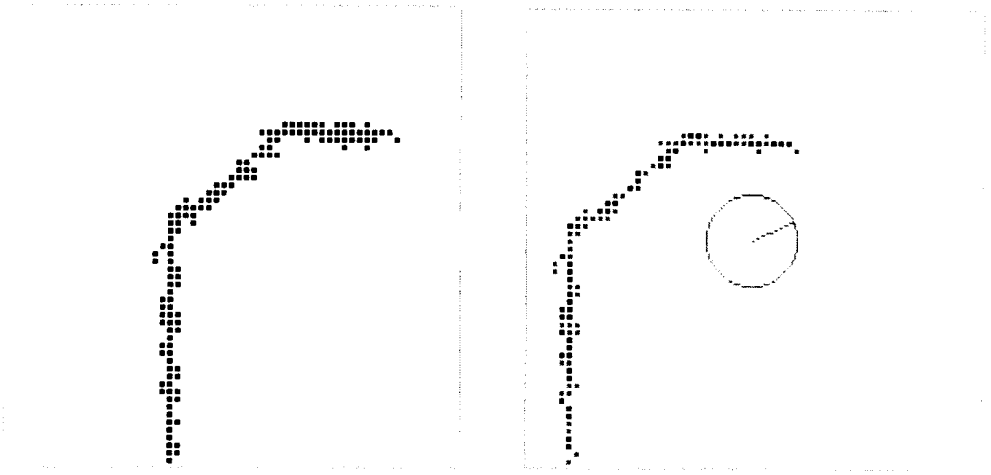


Fig. 19 Experimental environment for position estimation (unit : m)



Base map　　Local map

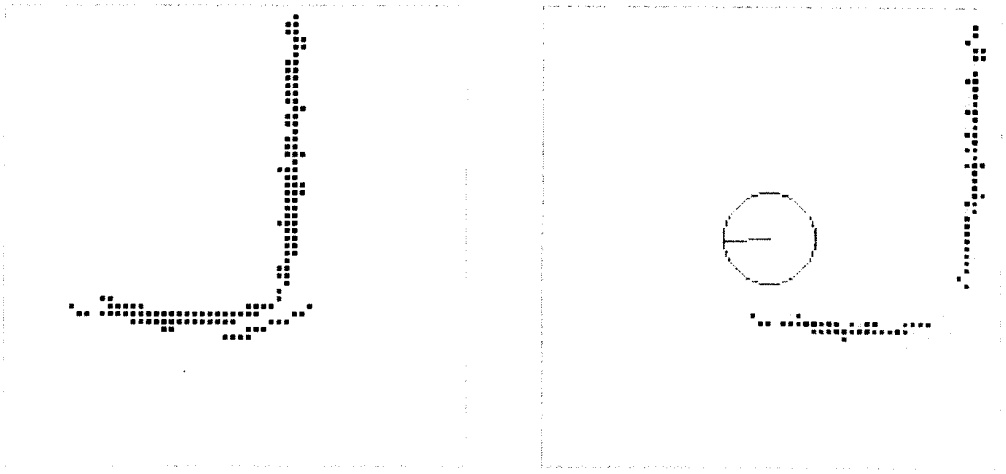
(a) The selected base and local maps for position ①

Base map　　Local map

(b) The selected base and local maps for position ②

Fig. 20 The selected base maps

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY



Base map　　Local map

(c) The selected base and local maps for position ③

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

Base map　　Local map

(d) The selected base and local maps for position ④

Fig. 20(continued)

3.2 위치평가

선택된 기준지도를 이용하여 로봇이 작업도중 발행하는 위치 및 각도오차를 보정하는 실험을 다음과 같이 수행하였다. 즉, 기준지도 선택 실험과 동일한 위치에서 로봇을 출발시킨 후 작업영역내를 임의 경로를 장시간 주행 시킨 다음 다시 초기위치로 되돌아오게 하였다. 이 모든 과정은 엔코더에 의한 dead reckoning으로 수행된 것이기 때문에 최종위치에서 로봇의 실제위치와의 오차를 측정한 결과 x 및 y 방향과 각도오차가 각각 0.30m, -0.15m, 그리고 0.262 radian이었다. 이것을 초기 오차로하여 로봇으로 하여금 다시 한번 전체 작업영역을 탐사하게 하면서 위치 평가 및 보정결과를 관측하였다. 이때 초기오차에 각 매칭지점까지 이동시 발생한 오차가 누적될 수 있도록 하기위해 한 지점에서 위치평가를 수행한 후에도 실제 로봇의 위치를 교정하지 않았다.

실험을 수행한 결과 로봇은 기준지도가 선택된 4지점에서 각각 매칭을 수행하였으며, 그때의 국부지도와 대응성 조사에 의해 찾아진 기준지도를 Fig. 21에 나타내었다. Fig. 22는 각 매칭지점에서 로봇의 위치 불확실성의 범위를 나타내는 타원을 보여 주고 있다. 그림에서 타원의 중심은 오차를 포함한 로봇의 현 위치이며 타원내의 작은 원은 실제 로봇의 위치를 나타낸다.

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

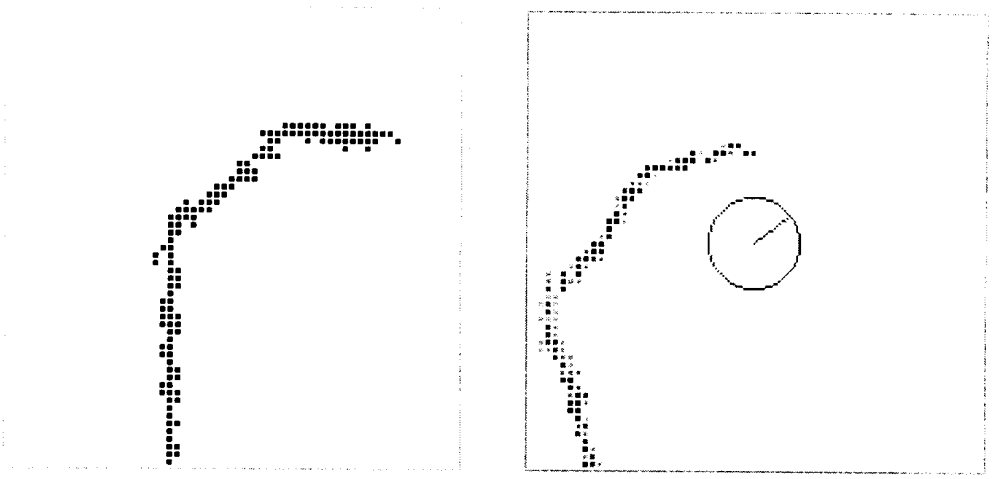
각 지점에서의 위치평가 결과 및 평가오차를 Table 2에 나타내었다. 표에서 알 수 있듯이 1과 2위치에서의 결과는 10cm이내의 위치오차로 보정이 가능했으나, 3과 4위치에서는 20cm정도의 오차가 발생하였다. 이것은 Fig. 21에 보여진 바와 같이 1과 2지점의 지도는 3과 4지점의 것보다 복잡한 형태이며 물체의 형상을 나타내는 점령 셀의 수가 많아 보다 많은 위치정보를 줄 수 있었기 때문이다.

결과적으로, 비록 3과 4지점에서의 오차가 20cm정도(4셀크기)이긴 하지만, 초음파 센서의 낮은 해상도(2cm정도)와 지도 형성시 발생하는 로봇의 위치오차 및 확률지도

형성시에 발생하는 오차에 의해 국부지도나 기준지도에서 물체의 경계면이 2~3셀정도로 넓게 표현되므로 2 셀크기(10cm)정도의 오차는 필연적인 것임을 감안하면 제안된 위치보정 시스템은 상당히 효과적인 것으로 사료된다.

또한 기존 연구에서는(Lim 1994b) 3과 4지점에서와 같이 동일 형상의 기준지도가 가까이 인접해 있을 때 로봇이 현재의 위치 불확실성을 제대로 추정하지 못함으로 인해 다른 위치의 지도끼리 매칭을 수행하는 경우가 발생할 수 있었으며 더욱이 그 결과의 신뢰도를 평가할 방법이 없었다. 그러나 본 연구에서는 각 매칭 지점에서 로봇의 위치 불확실성을 정량적으로 평가함으로써 서로 다른 위치의 지도끼리 매칭하는 문제를 해결할 수 있었으며, 그 결과가 그 지점에서의 위치불확실성 내에 포함되는지 여부로부터 위치보정의 신뢰성을 평가 할 수 있었다.

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY



Selected base map　　Current local map

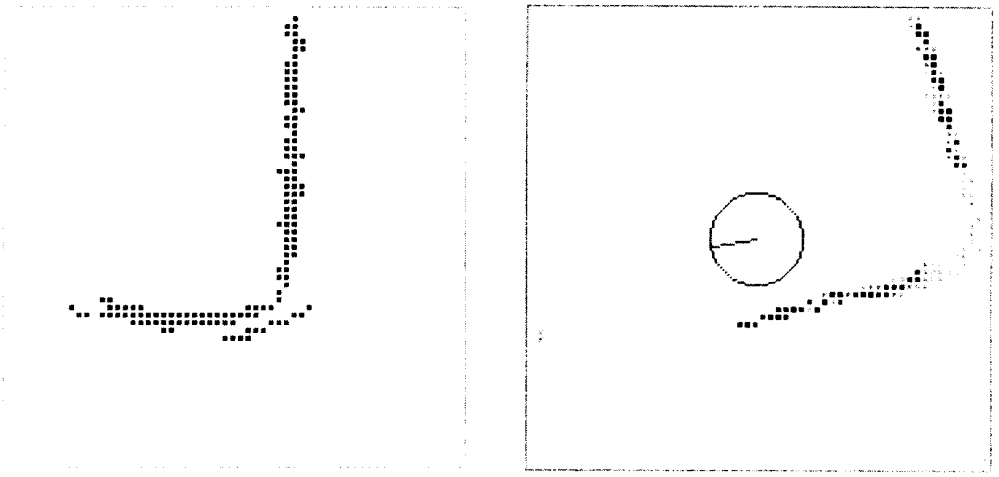
(a) position ①

Selected base map　　Current local map

(b) position ②

Fig. 21 The local and corresponding base maps for matching

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY



Selected base map　　Current local map

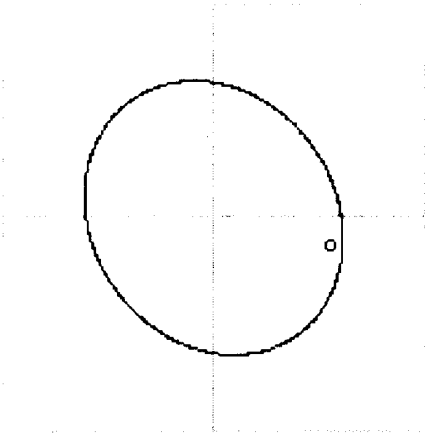
(c) position ③

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

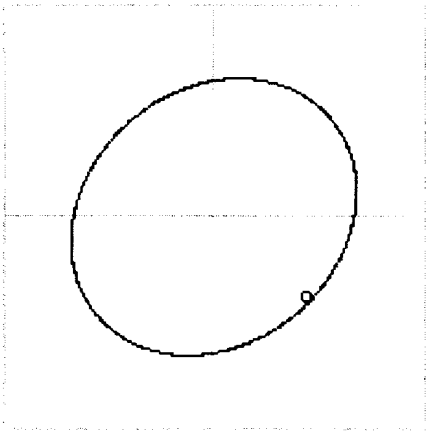
Selected base map　　Current local map

(d) position ④

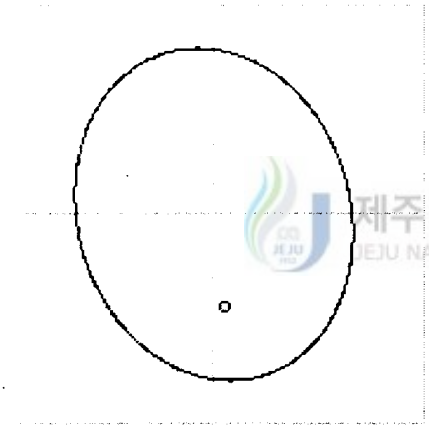
Fig. 21(continued)



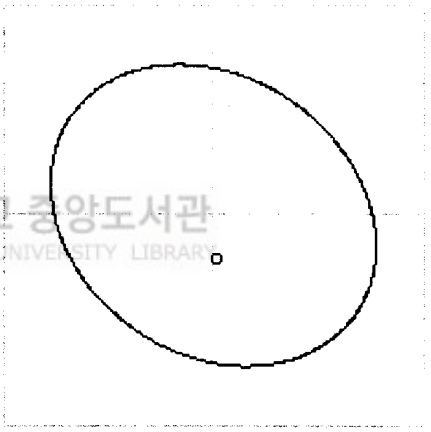
major axis = 1.008m
minor axis = 0.858m
(a) position ①



major axis = 1.080m
minor axis = 0.898m
(b) position ②



major axis = 1.200m
minor axis = 0.965m
(c) position ③



major axis = 1.231m
minor axis = 0.982m
(d) position ④

Fig. 22 Ellipse for matching

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

Table 2 The estimated errors for each position

units : m, rad

position		true position	erroneous position	corrected position	error after correction
1	x	0.565	-0.388	0.494	-0.071
	y	2.065	2.256	2.092	0.027
	θ	5.068	5.350	5.050	0.018
2	x	3.437	2.441	3.333	-0.107
	y	1.813	2.813	1.831	0.018
	θ	3.313	3.595	3.345	0.032
3	x	1.777	1.695	1.696	-0.081
	y	-1.239	-0.580	-1.432	-0.193
	θ	2.109	2.391	2.091	0.018
4	x	0.501	0.478	0.437	-0.064
	y	-1.268	-0.963	-1.472	-0.204
	θ	1.373	1.655	1.355	0.018

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

Ⅳ. 결 론

본 논문에서는 로봇 스스로가 작업영역내의 특징 있는 부분을 길잡이(기준지도)로 선택하고 이것을 이용하여 작업중 발행하는 위치오차를 평가 보정하는 시스템을 개발하였다. 이를 위해 초음파 센서가 장착된 로봇을 제작하였으며, 물체 추적제어 알고리즘을 연구하였다. 또한 기존연구에서 해결하지 못했던 로봇의 위치불확실성을 공분산 행렬을 이용한 다변량 가우시안 분포로서 정량적으로 평가할 수 있음을 보였다. 실제 실험을 통하여 개발된 시스템의 유용성을 검증하였으며, 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 로봇 주위에 대한 국부지도를 형성하여 작업영역에 대한 제한을 극복할 수 있었으며, 형성된 지도의 해상도를 증가시킬 수 있었다.

2. 물체 추적제어에 있어서 불확실성이 큰 센서정보의 신뢰성을 증대시키는 방법으로 국부지도를 이용함으로써 효과적인 제어가 가능하였다.

3. 다변량 가우시안 분포를 이용하여 로봇의 현재 위치 불확실성을 나타내는 타원을 형성함으로써 최대 위치오차 범위를 정량적으로 평가할 수 있음을 확인하였다.

4. 평가된 위치오차 범위와 국부지도 매칭기법을 결합함으로써 효과적으로 로봇의 실제 위치를 인식할 수 있었다.

제주대학교 중앙도서관

V. 참 고 문 헌

Chatila, R. and J. Laumond, 1992, "Position Referencing and Consistent World Modeling for Mobile Robots," IEEE International Conference on Robotics and Automation, St. Louis, MO, USA, pp.138-145.

Cho, D. W. and H. P. Moravec, 1989, "A Bayesian Method for Certainty Grids," AAAI Spring Symposium on Robot Navigation, Stanford, CA, pp.57-60.

Cho, D. W., 1990. "Certainty Grid Representation for Robot Navigation by a Bayesian Method," ROBOTICA, Vol.8, pp.159-165.

Crowley, J., 1986, "Representation and Maintenance of a Composit Surface Model, " IEEE International Conference on Robotics and Automation , San Francisco, CA, USA, pp.1455-1462.

Crowley, J., 1992, " World Modeling and Position Estimation for a mobile robot using ultrasonic ranging," IEEE International Conference on Robotics and Automation , Scottsdale, AZ, USA, pp.674-681.

Elfes, A., 1987, "Sonar-Based Real-World Mapping and Navigation," IEEE Transaction on Robotics and Automation, Vol. RA-3, No.3, pp.249-265.

Hyppa, K., 1989, "Lulea Turbo Turtle (LTT) ," IEEE/IROS, '89 Tsukuba, Japan, pp.620-623.

Leonard, J. and H. Durrent-Whyte, 1991, "Mobile Robot Localiation by Tracking Goemetric Beacons," IEEE Trnasactons on Robotics and Automation, Vol. 7, No. 3, pp.367-382.

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

Lim, J. H. and D. W. Cho, 1992, "Physically Based Sensor Modeling for a Sonar Map in a Specular Environment," IEEE International Conference on Robotics and Automation, Nice, France, pp.1714-1719.

임종환, 조동우, 1992a, "확률지도를 이용한 자율이동로봇의 경로계획", 대한기계학회논문집, 제16권 제4 호, pp.675-683.

임종환, 조동우,황진성, 1992b, "국부지도를 이용한 자율이동로봇의 실시간 지도형성 및 위치평가", '92대한기계학회 추계학술대회 논문집, pp.614-618

임종환, 조동우, 1992c, "GS청소로봇의 환경인식, 위치인식 및 주행제어", 금성사연구보고서.

Lim, J. H. and D. W. Cho, 1993, "Experimental Investigation of Mapping and Path Planning for an Autonomous Mobile Robot basd on Certainty Grids using Sonar Sensor," ROBOTICA, Vol. 11, pp. 7-17.

임종환, 조동우, 1993, "다중반사경로효과를 고려한 자율이동로봇의 초음파 지도형성", '93한국자동제어학술회의 논문집, pp.106-112.

Lim, J. H. and D. W. Cho, 1994a, " Specular Reflection Probability in the Certainty Grid Representation," ,Transactions. of ASME Journal, Vol. 116, pp.512-520

Lim, J. H. and D. W. Cho, 1994b, "Real Time Map Construction and Position Estimation for an Autonomous Mobile Robot using Sonar Sensors", ISCA, Vol. 1, No. 2, pp.111-124.

임종환, 1994, "초음파센서를 이용한 자율이동로봇의 지도형성, 탐사 및 위치평가", 포항공과대학 박사학위논문.

Lim, J. H and D. W. Cho, 1995, "A New Certainty Grid Based Mapping and Navigation System for an Autonomous Mobile Robot", The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Vol. 10, pp.139-149.

제주대학교 중앙도서관

민병권, 1992, "자율이동로봇의 위치 불확실성을 고려한 초음파 지도작성 및 경로계획", 연세대학교 석사학위논문, pp.11-30.

Moravec, H. P. and A. Elfes, 1985 "High Resolution Maps from Wide Angle Sonar," IEEE International Conference on Robotics and Automation, St.Louis, pp.116-121.

Murata Corporation, 1990, Murata Ultrasonic Sensor Manual, Murata, Japan.

Kleeman, L., 1989, " Ultrasonic Autonomous Robot Localization System, " IEEE/IROS, '89 Tsukuba, Japan, pp.212-219.

Kleeman, L., 1992, " Optimal Estimation of Position and Heading for Mobile Robots Using Ultrasonic Beacons and Dead-Reckoning," IEEE International Conference on Robotics and Automation , Nice, France, pp.2582-2587.

Smith, R. C. and Cheesman P., 1986, " On the Representation and Estimation of Spatial Uncertainty", The International Journal of Robotics Research, Vol. 5, No. 4, pp.56-68.

Polaroid Corporation, 1982, Ultrasonic Range Finders, Cambridge, Mass., Polaroid.

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

Ⅵ. 부 록

A.1 타원의 파라미터(parameter)의 계산

공분산 행렬로부터 평면상에 같은 확률값을 갖는 타원의 궤적을 얻는 방법과, 그 타원의 파라미터들을 구하는 방법은 다음과 같다.

식(22)으로부터 같은 확률값을 갖는 궤적으로 타원면의 방정식은

$$(x-\overline{X})^T C(x-\overline{X}) = k^2 \tag{A.1}$$

와 같이 되고, 이때 k는 신뢰구간을 결정해 주는 상수가 된다. 식(22)의 공분산 행렬에서 평면상의 위치에 해당하는 x, y위치에 관한 성분만을 추출하면, 2x2 공분산 행렬은

$$C = \begin{pmatrix} \sigma_x^2 & \rho\sigma_x\sigma_y \\ \rho\sigma_x\sigma_y & \sigma_y^2 \end{pmatrix} \tag{A.2}$$

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

와 같고, 여기서 ρ는 x와 y사이의 상관 관계이다. 식(22)을 x, y성분에 대하여 구하면,

$$P(x,y) = \frac{1}{2\pi\sqrt{\sigma_x^2\sigma_y^2(1-\rho^2)}}\, e^{-\frac{1}{2(1-\rho^2)}\left[\frac{x^2}{\sigma_x^2} + \frac{2\rho xy}{\sigma_x\sigma_y} + \frac{y^2}{\sigma_y^2}\right]} \tag{A.3}$$

와 같이된다. 이때 식(A.1)의 k와 점(x, y)가 타원 안에 있을 확률과의 관계는

$$P(x, y \in ellipse) = 1 - e^{\frac{-k^2}{2}} \tag{A.4}$$

와 같은 식으로부터 결정되며, 이때 점(x, y)가 타원에 들어갈 확률이 90%라면 k의 값은 4.605가 된다.

식(A.3)으로부터 x, y평면에서의 타원의 방정식을 구한 것이

$$Ax^2 + 2Bxy + Cy^2 - k^2 = 0 \tag{A.5}$$

일 때, 이 타원의 장축 및 단축과 x축의 양의 방향이 이루는 각 θ는 다음과 같다.

$$\theta = \frac{1}{2}\arctan\left(\frac{2B}{A-C}\right)$$

$$a = \sqrt{\frac{2k^2}{A+C-T}} \tag{A.6}$$

$$b = \sqrt{\frac{2k^2}{A+C+T}}$$

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

여기서, $T = \sqrt{A^2 + C^2 - 2AC + 4B^2}$ 이다.

감사의 글

순식간에 지나버린 2년이란 세월, 이 논문을 만들면서 지나온 시간들이 하나둘씩 기억속에서 스쳐지나갑니다. 즐거운일, 힘든일. 미약하나마 이 작은 성과로 매듭지어지면서 여기서 끝이 아닌 새로운 시작의 발판이되길 다짐하여 봅니다. 지난 2년간 부족한 저를 논문이 나오기까지 지도하여 주신 임종환교수님께 감사드리며, 많은 조언을 해주신 권기린교수님, 김귀식교수님, 허종철교수님, 현명택교수님께 감사의뜻을 전합니다.

또한 어렵고 힘든 여건속에서 저를 도와주신 양순량 선생님, 이동원 선생님께 고마운 마음을 전하며, 여러 대학원생 여러분께도 감사드립니다. 어려울 때, 힘들 때 걱정하시며 용기를 북돋아주신 부모님, 형님, 형수님, 동생에게도 이 논문을 바칩니다. 마지막으로 이 책과 더불어 나의 영원한 동반자가 되어줄 사랑하는 희정이와 짧으나마 저를 걱정하여주신 장인.장모님께도 감사드립니다.

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY