

전방향 능동 거리 센서를 이용한 이동로봇의 자기 위치 추정

정인수*, 조형석**

Self-localization for Mobile Robot Navigation using an Active Omni-directional Range Sensor

In-Soo Joung*, Hyung-Suck Cho**

ABSTRACT

Most autonomous mobile robots view only things in front of them, and as a result, they may collide with objects moving from the side or behind. To overcome this problem, an Active Omni-directional Range Sensor System has been built that can obtain an omni-directional range data through the use of a laser conic plane and a conic mirror. Also, mobile robot has to know its current location and heading angle by itself as accurately as possible to successfully navigate in real environments. To achieve this capability, we propose a self-localization algorithm of a mobile robot using an active omni-directional range sensor in an unknown environment. The proposed algorithm estimates the current position and head angle of a mobile robot by a registration of the range data obtained at two positions, current and previous. To show the effectiveness of the proposed algorithm, a series of simulations was conducted and the results show that the proposed algorithm is very efficient, and can be utilized for self-localization of a mobile robot in an unknown environment.

Key Words : Self-localization(자기위치 추정), Active omni-directional range sensor(전방향 능동거리 센서), Free-form curve registration(자유곡선의 정합), mobile robot(이동로봇)

1. 서론

현재 여러 센서들을 이용하여 이동로봇을 자율 주행시키는 많은 연구들이 진행되고 있다. 그 중 분해능이 비교적 높은 시각 센서를 사용하는 연구 [1]-[6]가 많이 이루어지고 있는데, 대부분 이동로봇이 주행하는 전(前)방향의 장애물을 측정하는데만 국한되어 있다. 따라서, 주행 시 좌우 측면 또는 뒤에서 접근하는 장애물에 대해서는 충돌을 회피

하기가 어렵다. 이에, 원뿔 거울과 카메라 및 원뿔형 레이저면을 이용하여 전(全)방향을 측정할 수 있는 이동로봇용 전방향 능동 거리 센서 시스템 [7]을 개발하였다. 제안된 센서 시스템은 삼각 측정법에 의해 한번에 전(全)방향에 산재되어 있는 장애물간의 거리를 정확히 구하고, 그 측정된 거리 정보는 이동 로봇의 자율 주행뿐만 아니라 이동 로봇의 상대적인 위치와 자세를 알아내는 자기 위치 추정 작업에 있어서도 매우 중요한 정보로

* 삼성전자 경영기술대학 메카트로닉스학과

** 한국과학기술원 기계공학과

이용된다.

이동로봇이 원하는 작업을 수행하기 위해서는 자신의 현재 위치와 자세를 추정할 수 있어야 하고, 이를 위해 사용되는 자기 위치 추정 방법으로는 테드렉콘(dead reckoning), 관성 주행, CCD 카메라와 표식(landmark)을 사용하는 방법, 표지탑(beacon)을 사용하는 방법 등이 있다. 테드렉콘[8]이나 관성 주행 시스템은 매 시각마다 이동로봇의 속도나 가속도를 측정하므로써 이동로봇의 위치를 연속적으로 계산될 수 있다는 장점은 있으나, 주행거리가 길어지거나 휠의 미끄러짐 등이 발생하면 치명적인 누적 오차가 발생된다. 이러한 문제점을 해결하기 위해 CCD 카메라와 랜드마크를 사용하는 연구[9][10]가 진행되었으나, 카메라가 랜드마크로부터 멀어질수록 위치 오차가 커지고, 어둡거나 밝은 환경 또는 연기가 자욱한 환경에서는 사용할 수가 없다. 이에, 개선된 형태의 자기 위치 추정 방법으로 주변 환경의 여러 곳에 기준이 되는 위치 표지탑(beacon)을 설치하고 레이저 빔이나 초음파에 의해 이동로봇의 위치를 추정하는 연구[11]-[13]가 진행되었으나 표지탑이 설치된 영역이 넓어질수록 측정 오차는 커지고, 심지어 이동로봇이 그 영역을 벗어나면 측정 오차가 너무 커져서 위치 측정값을 신뢰할 수 없다. 이와 더불어 사전에 얻어진 주변 환경 모델과 초음파 센서들로 부터 측정된 데이터를 비교하므로써 이동로봇의 위치를 추정하려는 모델 기준 방법(model based method)[14]-[17]들도 행해졌으나 사전에 주변 환경을 알고 있어야 한다는 제약 때문에 복잡한 형태로 구성되거나 시시각각 변화되는 실제 환경에 대해서는 적합하지 못하다. 또한 레이저 레인지 파인더를 이용하여 이동로봇의 자기 위치를 추정하는 연구[18]도 행해졌으나, 이 방법 역시 모델 기준 방법을 이용하므로써 실제 환경에는 적합하지 못하며, 레인지 정보를 직선으로 표현한 후 그 특징치(feature)들을 통해 사전에 가지고 있던 모델과 비교하는 기법을 사용하므로써 전처리 작업량이 많아지고 이로 인해 처리 시간이 길어지는 단점들이 있다. 따라서 사전의 정보 없이 복잡하게 변화되는 주변 환경하에서도 이동로봇의 위치와 자세를 정확히 추정할 수 있는 자기 위치 추정 방법이 절실히 요구된다.

이에 본 논문에서는 개발된 전방향 능동 거리 센서 시스템에 의해 주변 환경의 2차원 거리 정보

를 얻고, 서로 다른 위치에서 얻어진 두개의 2차원 거리 정보들을 정합하므로써 이동로봇의 정확한 위치 및 자세를 추정할 수 있는 새로운 자기 위치 추정 알고리즘을 제안하고자 한다. 제안된 방법은 주변 환경에 대한 사전 정보가 필요없으므로 복잡하게 변화되는 주변 환경하에서도 이동로봇의 현 위치와 자세를 정확히 추정할 수 있으며, 주변에 산재되어 있는 장애물들의 동적 특성도 추정이 가능하다. 또한 본 논문에서는 세그먼트들의 특징치 정도(feature measure of segments) 개념을 제안하여 2차원 거리 정보들의 정합 속도를 향상시켰다. 이에 제안된 자기 위치 추정 알고리즘의 성능을 평가하기 위해 가정된 여러 환경하에서 모의 실험을 수행하였고 그 결과는 매우 고무적이었다. 특히 제안된 자기 위치 추정 알고리즘은 테드레콘 방법에 의한 이동로봇의 자기 위치 추정시 누적 오차의 가장 큰 원인이 되는 자세(head angle)오차에 대해서 더욱 탁월한 능력을 발휘한다는 것을 알 수 있었다.

2. 전방향 능동 거리 센서 시스템

CCD 카메라와 원뿔 거울을 적절히 배치하면 원뿔 거울의 고유한 특성에 의해 전(全)방향의 주변 환경을 한번에 볼 수 있게 된다. 그 특성을 이용하기 위해 본 연구에서는 그림 1과 같이 원뿔 거울과 CCD 카메라를 수직으로 배치하고, 전(全)방향의 거리 정보를 구하기 위해 그 수직축 선상에 레이저 광원을 두어 수직축 중심으로 회전시키므로써 원뿔형의 레이저면을 형성시켰다. 즉, 레이저 점광원을 고속으로 회전시키면 잔상현상에 의해 주변환경에 레이저띠가 형성되고, 원뿔 거울을 통해 전(全)방향에 맺힌 레이저 띠 영상을 카메라로 읽어 들인다. 이때 레이저 띠는 방위각(azimuth angle)에 따라 유일하게 결정되는 각 레이저 점 광원들의 집합체이므로 삼각 측정법을 이용하여 각 레이저 점 광원들에 대한 거리를 측정하면 한번에 주변 환경에 대한 2차원 거리 정보를 구하는 결과가 된다. 이에 제안된 센서 시스템의 장점은 다음과 같다.

첫째, 한번의 영상 포착으로 전(全)방향에 대한 1차원 거리 정보를 구할 수 있으므로 이동로봇과 같은 전(全)방향에 대한 장애물을 인식할 필요가 있는 시스템에는 유효한 센서 시스템이다. 둘째,

주사하는 레이저의 파장 대에 맞는 밴드 패스 필터(band-pass filter)를 통해 영상을 포착하므로 영상에 대한 전처리 과정이 매우 간단하며, 거리를 측정하는 계산 역시 빠른 속도로 이루어 질 수 있어 실시간으로 주변 환경에 대한 2차원 거리 정보를 구할 수 있다. 세째, 원뿔형의 레이저 면을 위,아래 각도로 조절하면서 얻어진 2차원 거리 정보들을 조합해 나가면 전(全)방향의 주변 환경에 대한 3차원 거리 정보도 얻을 수 있다[7]. 즉 물체 인식 작업에도 응용될 수 있다.

2.1 센서 시스템 구성 및 원리

그림 1에서 알 수 있듯이 제안된 센서 시스템은 크게 광원과 카메라 검출부로 이루어져 있다. 광원은 점 광원인 레이저와 그 광원을 어떤 방향으로도 주사하여줄 수 있는 기구부 및 제어부로 구성되며, 카메라 검출부는 전(全)방향을 한번에 볼 수 있도록 해주는 원뿔 거울과 CCD 카메라 및 필터 등으로 구성되어 있다. 이때 레이저 광원과 원뿔 거울의 중심은 같은 수직축 선상에 있으며, 레이저 광원을 수직축 중심으로 회전시켜서 원뿔형의 레이저면을 형성시키고 원뿔 거울을 이용하여 전(全)방향에 맺힌 레이저면 영상이 카메라에 맺히게 한다. 이에 삼각 측정법을 이용하여 한번에 주변 환경에 대한 2차원 거리 정보를 구하게 된다. 그림 2는 제안된 센서 시스템을 제작하여 이동로봇에 실제 장착한 전체 시스템을 보여주고 있다. 이때 CCD 카메라가 영상을 포착하는 시간이 약 1/30초 이고 그 시간 이내에 전(全)방향에 대해 적어도 한번은 레이저가 주사 될 수 있어야 하므로 수직축 중심으로 회전하는 레이저 회전 구동 모터 회전 수는 1800 rpm 이상은 되어야 하는데, 지나치게 레이저 회전 속도를 증가시키면 영상에 맺히는 레이저의 광량이 줄어들므로 이진화(threshold) 영상처리와 관련하여 적절한 회전 속도를 유지해야 한다. 본 논문에서는 레이저 회전 구동 모터 회전 수를 3000 rpm 으로 하고, 이진화 영상처리를 위한 이진화값은 20 으로 설정하였다. 또한 주변 환경에 대한 3차원 거리 정보를 알기 위해서는 원뿔형의 레이저 면을 위,아래로 움직일 수 있어야 하는데 이를 위해 높은 분해능(0.2°/pulse)을 갖는 스텝 모터를 사용하였다. 더불어 센서 시스템 제작에 사용된 레이저 점광원은 634 nm - 12 mW 다이오드 레이저(Power Tech. Co.)이고 CCD

카메라는 1/2" XC-75(Sony Co.)이며, 630 nm용 밴드 패스 필터를 부착하였다. 전체 시스템의 크기는 420 mm × 460 mm × 730 mm (너비×길이×높이)이며, i586(75Mhz) PC와 DT-2867 비전 보드(Data Translation Co.)가 사용되었다. 이에 그림 3은 이동로봇의 기준좌표계에서의 제안된 센서 시스템에 대한 기구 구성도이고, 표 1은 제작된 센서 시스템의 최종적인 사양이다. 시스템 변수들의 설계 기준 및 보정에 대한 연구는 참고문헌 [7]에 상세히 기술되어 있다.

Table 1 Specifications of the implemented sensor system

ITEM	SPECIFICATION
Diode laser	634 nm, 12 mW (Power Tech.)
Conic mirror	vertex angle(α) = 113°, H = 60 mm
CCD camera	1/2" (SONY)
Band-pass filter	630 nm
Focal length	7.5 mm
Effective measurable height	0 mm ~ 681 mm
Effective measurable distance	0.6 m ~ 3 m
Resolution of distance	12.5 mm ~ 54.5 mm
Distance between floor and laser (H_L)	390.0 mm
Distance between floor and lens center (H_L)	535.1 mm
Distance between floor & vertex of conic mirror (H_{cv})	640.0 mm
Laser rotating speed	over 1800 rpm
Resolution of laser swing angle	0.2°

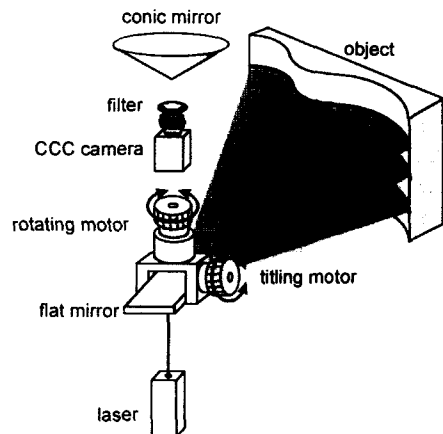


Fig. 1 The schematic diagram of the proposed sensor system

2.2 센서 시스템의 거리 측정 오차

제작된 센서 시스템의 거리 측정 정밀도를 알아보기 위한 실험이 수행되었다. 즉, 측정 가능 유효 거리 내에서 10 cm 간격으로 25 개의 기준점이 설정되었고, 그림 3 과 같이 레이저 빔의 천정각 ϕ_L 은 90° 로 설정하였다. 또한 본 센서 시스템의 거리 측정 반복도를 평가하기 위해 실험은 10 번씩 반복되었다. 표 2 에서 알 수 있듯이 본 센서 시스템의 거리 측정 오차의 평균값은 30.1 mm 이고 표준편차는 9.86 이며, 측정코자 하는 물체의 거리가 멀어질수록 그 거리 측정 오차는 더욱 커짐을 알 수 있다. 결론적으로 본 센서 시스템은 유효 측정 거리 영역내에서 약 30.1 mm 의 측정 오차가 발생한다는 것을 알 수 있고, 이 측정 오차는 본 센서 시스템이 이동로봇에 적용된다는 관점에서 볼 때 고려되어 질 수 있는 측정 오차라 사려 된다.

Table 2 Experimental results for measurement accuracy of the proposed sensor system

real distance (mm)	mean error (mm)	max. error (mm)	error/distance x100 (%)
600	21.3	34.4	3.55
700	12.5	31.5	1.79
800	12.8	30.7	1.60
900	23.5	49.0	2.61
1000	24.4	44.5	2.44
1100	29.8	49.0	2.71
1200	25.3	46.0	2.10
1300	29.4	50.0	2.26
1400	35.4	57.6	2.53
1500	28.7	52.8	1.92
1600	30.6	57.0	1.91
1700	29.2	49.8	1.72
1800	24.4	48.6	1.35
1900	22.9	59.4	1.21
2000	15.1	39.0	0.76
2100	25.8	44.1	1.23
2200	32.6	60.2	1.48
2300	38.6	57.4	1.68
2400	38.2	79.2	1.59
2500	27.8	72.0	1.11
2600	38.9	68.0	1.50
2700	36.4	64.4	1.35
2800	40.5	69.3	1.45
2900	44.8	67.6	1.54
3000	54.6	96.0	1.82
Total mean	30.1	-	1.74
σ	9.86	-	-
σ^2	97.20	-	-

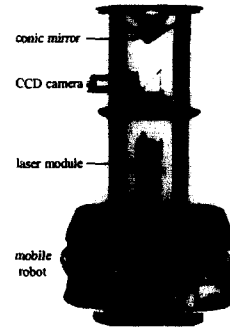


Fig. 2 The proposed sensor system, mounted on a mobile robot

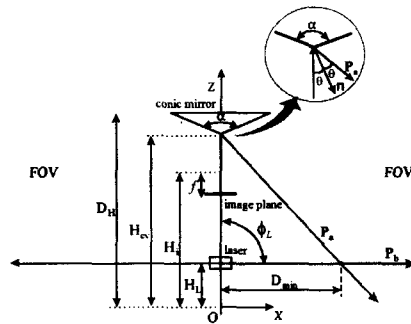
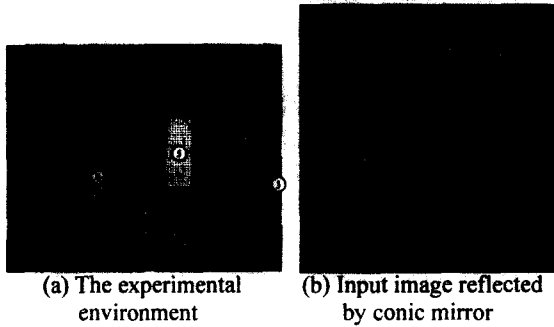


Fig. 3 Geometric configuration of the proposed sensor system

2.3 전방향의 2차원 거리 정보 측정 실험

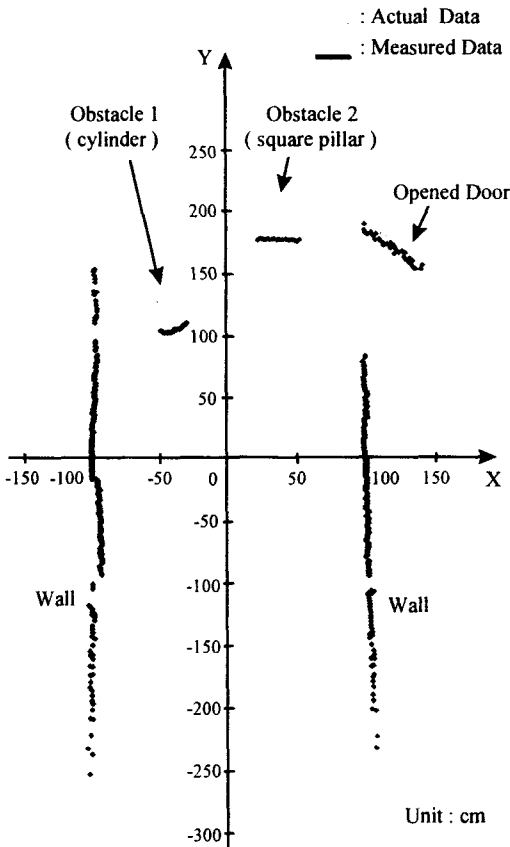
개발된 센서 시스템의 성능을 평가하기 위해 이동로봇의 자율 주행을 위한 2차원 거리 정보를 구하여 보았다. 이때 원뿔 거울을 통해 포착되는 영상의 잡음을 줄이기 위해 CCD 카메라 앞에 630nm 밴드 패스 필터를 부착하였다. 레이저 광원의 천정각 ϕ_L 은 90° 로 설정하였다. 그림 4(a)는 실험한 장소로써 여러 형태의 장애물들이 산재해 있고, 열려 있거나 닫혀있는 문들이 존재하는 복도이다. 그림 4(b)는 레이저 점 광원을 회전시킴에 의해 형성된 레이저 띠를 원뿔 거울을 거쳐 CCD 카메라로 읽어 들이고 그 이미지를 이진화(threshold)한 영상이며, 이진화 값은 20 이다. 또한 그림 4(c)는 실험 장소의 실제 거리와 센서 시스템에 의해 측정된 거리 정보를 함께 보여주고 있다. 좀더 상세한 오차 분석을 위해 그림 4(d)와 같이 실제 거리에 따른 측정 오차를 도시해 보았다. 결과적으로 이동로봇을 중심으로 약 3 m 반경을

갖는 영역 내에서의 평균 거리 측정 오차는 21.3 mm 이고 최대 측정 오차가 78.0 mm 이었다. 또한, 본 센서 시스템의 거리 측정 속도에 대한 성능을 검토하기 위해 전방향에 대한 2차원 거리 정보를 구하는 거리 측정 과정을 100회 반복하여 그 평균 값을 계산해 보았더니 그 값은 85.4 msec 이었다.

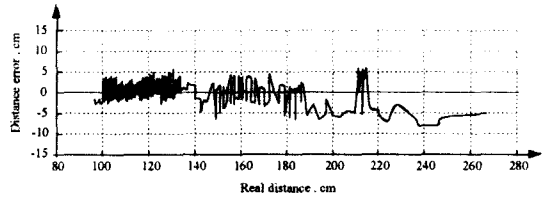


(a) The experimental environment

(b) Input image reflected by conic mirror



(c) Measured two-dimensional depth data



(d) Real distance vs. measurement error

Fig. 4 Experimental results of two-dimensional depth data measurement

3. 이동로봇의 위치 및 자세 추정

3.1 제안된 추정 알고리즘의 개념

이에 본 논문에서는 서로 다른 두 위치에서 본 센서 시스템에 의해 측정된 2차원 거리 정보들을 정합하므로써, 주변 환경에 대한 사전 정보 없이, 이동로봇의 상대적인 위치와 자세의 변환 정보를 추정하는 새로운 자기위치 추정 알고리즘을 제안하고자 한다. 이를 위해서는 모든 물체가 강체이고, 각 물체들은 연속된 점으로 표현 가능하며, 레인지 정보의 정합을 위해 작은 움직임(small motion)이라는 가정이 필요하다[19]. 이에 레인지 정보에 나타난 주변 물체들을 표현하기 위해 어떠한 물체도 표현 가능한 자유곡선 표현 방법(free-form curve representation method)을 사용한다. 따라서 이동로봇이 자율 주행시 전, 후 위치에서 얻은 2차원 거리 정보들을 자유곡선으로 표현하고 그 두 자유곡선의 직교 거리를 최소화하는 최적 기법을 이용하여 두 자유곡선들을 정합한다. 정합을 위해 사용되는 최적화 기법들은 여러 가지가 있는데[20], 일반적으로 많이 사용하는 기법은 선형 최소 자승법(linear Least Squares Method)이다. 그러나 이동로봇이 주행하면서 얻어지는 레인지 정보에는 아웃라이어(outlier : noise, occlusion, appearance)가 되는 데이터들이 존재하는 경우가 많은데, 이러한 경우에는 선형 최소 자승법 등의 일반적인 방법은 많은 추정 오차를 유발한다. 즉, 이동로봇의 레인지 정보를 정합하는 경우에는 이러한 아웃라이어가 존재하는 경우에도 정확한 값을 추정할 수 있는 더욱 강건한 최적화 기법이 필요하고, 현재 제안된 여러 방법 중에서 본 논문에서는 M-estimator 최적화 방법을 이용하였다. 즉, 주변 환경에 대한 사전 정보가 없는 상태에서 레인지 정보들을 정합하여 이동로봇의 현위치를 추정해야 하므로 정확

한 일치점을 알 필요가 없는 M-estimator 최적화 방법이 적합하다. 이때 작은 움직임이라는 가정을 만족시키기 위해서는 정합 속도를 높여 자기 위치 추정의 전체적인 처리 시간을 줄여야 하는 문제가 있다. 이에 정합 속도를 높이기 위해 레인지 정보의 세분화(segmentation)과정을 통해 얻어진 세그먼트들의 크기와 형태의 복잡성을 고려하여 최적의 정합점(optimal matching point)을 추정해 내고 이를 이용하여 정합 속도를 향상시키는 방법을 제안한다.

3.2 자유곡선의 정합

본 논문에서는 이동로봇이 자율 주행시 서로 다른 위치에서 측정된 2차원 거리 정보들을 자유곡선으로 표현하였고, 정합코자 하는 두 자유곡선은 유클리디언 변환(Euclidean transformation) 관계에 있다. 이에 두 곡선 사이의 변환 관계는

$$\mathbf{T} = \mathbf{T}(a, b, c, d) = \begin{bmatrix} a & -b & c \\ b & a & d \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

여기서 a, b, c, d는 두 자유곡선사이의 운동 매개변수(motion parameter)이고, T는 변환행렬(transformation matrix)이다.

또한 자유곡선 정합을 위해 이동로봇이 주행시 전 위치와 현 위치에서 구한 두 곡선 사이의 직교 거리를 구해야 한다. 이를 위해, 그림 5에서 알 수 있듯이, 전 위치에서 구해진 곡선상의 한 점 $P_i(x_i, y_i)$ 에서 법선을 구한 후 그 법선을 따라 현 위치에서 구해진 곡선과 만나는 점을 구하고 다시 그 점에 대한 접선을 구한다. 이에 그 접선과 점 $P_i(x_i, y_i)$ 사이의 거리, 즉 두 곡선 사이의 직교 거리 d_i 를 구할 수 있다.

여기서 임의의 직선 $Ax + By + C = 0$ 와 임의의 한 점인 $P(x_0, y_0)$ 사이의 거리는

$$d = \frac{Ax_0 + By_0 + C}{\sqrt{A^2 + B^2}} \quad (2)$$

따라서 이동 전 위치에서 구해진 곡선상의 i번째의 점 $P_i(x_i, y_i)$ 에서의 d_i 는

$$d_i = \frac{[A_i, B_i, C_i]}{\sqrt{A_i^2 + B_i^2}} [x_i, y_i, 1] \quad (3)$$

이며, 이는 곡선상에 존재하는 모든 점에 적용된다. 이때, 이동로봇이 실제 환경에서 장애물을 피해야 하며 자율 주행을 할 때에는 정합에 오차를 유발시키는 잡음, 즉 장애물의 이동, 사라짐, 등장 등이 발생하므로 일반적인 최소 자승법은 두 곡선 사이의 정확한 운동 매개변수를 구하기 어렵다. 다시 말하면 이동로봇 주행과 같은 작업하에서의 정합 문제에는 더욱 강건한 최적화 기법이 요구된다. 이를 위한 많은 강건 기법이 있으나, 주변 환경에 대한 사전 정보가 없는 상태에서의 레인지 정보 정합 문제에 있어서는 정확한 일치점을 알 필요가 없는 M-estimator 기법이 가장 적합하다고 판단되어 이를 적용코자 한다. 이에 오차 함수를 정의하면

$$e_k = \sum_i w_i^k (d_i^k)^2 \quad (4)$$

$$w_i^k = \begin{cases} 1 & d_i^{k-1} < \sigma \\ \frac{\sigma}{|d_i^{k-1}|} & \sigma < d_i^{k-1} < 3\sigma \\ 0 & d_i^{k-1} > 3\sigma \end{cases} \quad (5)$$

여기서 w는 weight 함수이며, σ 는 k-1 번째의 오차들에 대한 표준편차이다.

식(5)는 Huber[21]에 의해 제안되어 널리 사용되는 형태이다. 그러므로 이 오차 함수를 최소화 하는 운동 매개변수들을 구해야 하고, 이에 운동 매개변수들에 대한 오차 함수의 편 미분에 의해 다음과 같은 식을 유도할 수 있다

$$\begin{bmatrix} \sum w(Ax + By)^2 & \sum w(Bx - Ay)(Ax + By) & \sum wA(Ax + By) & \sum wB(Ax + By) \\ \sum w(Bx - Ay)(Ax + By) & \sum w(Bx - Ay)^2 & \sum wA(Bx - Ay) & \sum wB(Bx - Ay) \\ \sum wA(Ax + By) & \sum wA(Bx - Ay) & \sum wA^2 & \sum wAB \\ \sum wB(Ax + By) & \sum wB(Bx - Ay) & \sum wAB & \sum wB^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a \\ b \\ c \\ d \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\sum wC(Ax + By) \\ -\sum wC(Bx - Ay) \\ -\sum wC.A \\ -\sum wC.B \end{bmatrix} \quad (6)$$

즉, 식(3) ~ 식(6)들을 반복적으로 수행하므로써 두 자유 곡선들을 정합하고, 그 결과에 의해 두 곡선 사이의 운동 매개변수 a,b,c,d들을 구해낸다. 그러므로 최종적인 이동로봇의 상대 위치 변수 (x_i, y_i, θ_R) 는 다음과 같은 식에 의해 추정된다

$$x_i = -c \tag{7a}$$

$$y_i = -d \tag{7b}$$

$$\theta_R = -\tan^{-1}\left(\frac{b}{a}\right) \tag{7c}$$

그러나 M-estimator에 의한 일반적 정합 방법은 정합점들의 개수가 많아지면 그 처리 시간이 길어져서 원활한 이동로봇의 자율 주행이 어려워진다. 이에 정합 속도를 높이기 위해 레인지 정보의 세분화 과정을 통해 얻어진 각 세그먼트들의 특징치 정도를 고려하여 최적의 정합점을 추정해 나가는 방법을 제안한다. 정합 속도를 높이는 것이 그 목적이므로 최적의 정합점들을 추정하는 방법 역시 간단하면서 효과적이어야 한다.

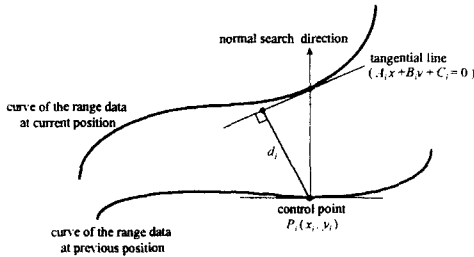


Fig. 5 Error distance between two free-form curves

3.3 최적의 정합점 결정

성공적인 정합의 주요 요건은 정합코자 하는 데이터들에 대한 특징치의 뚜렷함 정도이다. 즉 정합하고자 하는 데이터들의 특징치가 뚜렷하다면 그 정합의 정확도 및 정합 속도는 높아진다. 본 논문에서는 이동로봇의 전, 후 위치에서 얻은 두 레인지 정보들을 자유곡선으로 표현하고 그 두 자유곡선의 직교 거리를 최소화하는 최적 기법을 이용하여 두 자유곡선을 정합하는 방법을 사용하므로 데이터 특징치의 뚜렷함이란 직교 방향(normal direction)값들의 분산이 큰 경우를 말하는 것이다. 이에 본 논문에서는 각 세그먼트 형태의 복잡성을 나타내는 특징치 정도 C_f 를 다음과 같이 정의하고 이에 따라 각 세그먼트 형태에 따른 최적의 정

합점을 결정하므로써 정합 속도를 증가시키고자 한다. 우선 각 세그먼트들에 대한 특징치 정도를 구하기 위해 정합코자 하는 레인지 정보를 세분화하여야 한다. 이를 위해 다음과 같은 가정이 필요하다.

(가정) : 본 센서 시스템은 CCD 카메라로 레이저 띠 영상을 읽어 들여 주변 환경에 대한 거리를 측정한다. 이때 CCD 카메라를 통해 얻은 영상에서 2픽셀 이내에 인접해 있는 데이터들은 연속된 점이라고 가정하여 한 세그먼트내에 존재하는 데이터로 간주한다. 본 센서 시스템의 사양에 의한 CCD 카메라 한 픽셀의 거리 분해능은 최대 40.1 mm 이므로 약 8 cm 이내에 있는 점들은 한 세그먼트내에 존재하는 데이터로 간주되는 것이다.

또한 상기의 가정에 의한 세분화 과정은 잡음을 제거해 주는 효과를 가지고 있다. 이에 구해진 각 세그먼트들에 대해 그림 6과 같이 최소 자승법에 의해 직선 파라미터를 추정한다. 즉, 추정되는 직선 방정식이 $y=Ax+B$ 이라면 다음식에 의해 직선 파라미터를 추정할 수 있다

$$\begin{bmatrix} \sum x^2 & \sum x \\ \sum x & \sum 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A \\ B \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum xy \\ \sum y \end{bmatrix} \tag{8}$$

이에 추정된 직선과 실제 데이터들의 오차인 직교 거리(orthogonal distance) d_{ne} 를 구하면

$$d_{ne} = \frac{\sum_{i=1}^{N_m} \|e_{ni}\|}{N_m} = \frac{\sum_{i=1}^{N_m} \left\| \frac{Ax_i - y_i + B}{\sqrt{A^2 + 1}} \right\|}{N_m} \tag{9}$$

여기서 N_m 는 세그먼트를 구성하는 데이터 수이다.

이에 그 세그먼트의 특징치 정도 C_f 는 다음과 같이 정의한다

$$C_f = \begin{cases} \frac{d_{ne} + R_{ms}}{10R_{ms}} & \frac{d_{ne} + R_{ms}}{10R_{ms}} < 1 \\ 1 & \frac{d_{ne} + R_{ms}}{10R_{ms}} > 1 \end{cases} \tag{10}$$

여기서 R_{ms} 는 본 연구에서 제안한 전방향 능동 거리 센서 시스템의 최저 측정 분해능이다.

그러므로 각 세그먼트들에 대한 최적의 정합점 갯수 N_m 은

$$N_m(0) = \begin{cases} C_f \cdot N_m / 5 \\ N_m \end{cases} \quad C_f \cdot N_m / 5 > N_m \quad (11)$$

$$N_m(k) = \begin{cases} 2 \cdot N_m(k-1) & d_e(k) > d_e(k-1) \\ N_m(k-1) & d_e(k) < d_e(k-1) \end{cases}$$

여기서 m 은 세그먼트 번호(segment number), k 는 반복 횟수, d_e 는 정합 오차(matching error)이다.

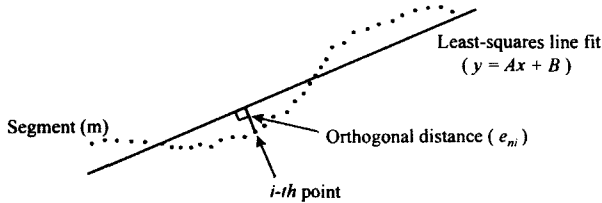
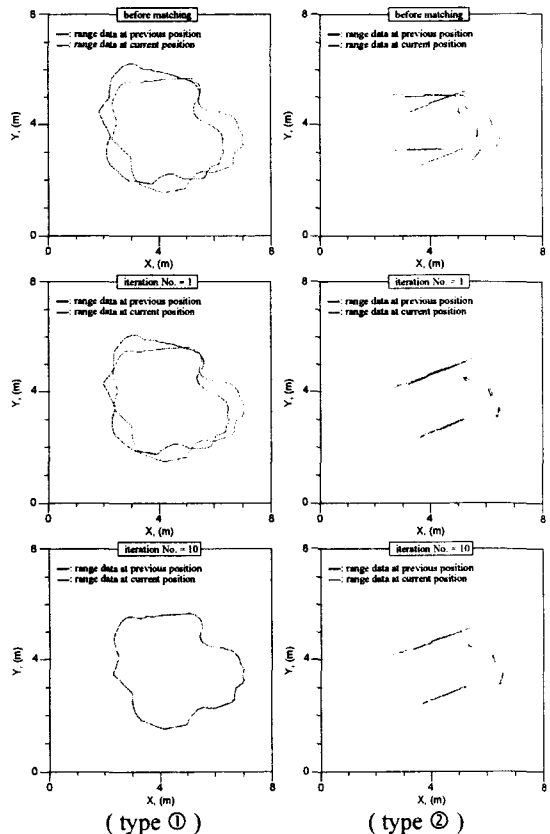


Fig. 6 Orthogonal distance between real data and fitting line

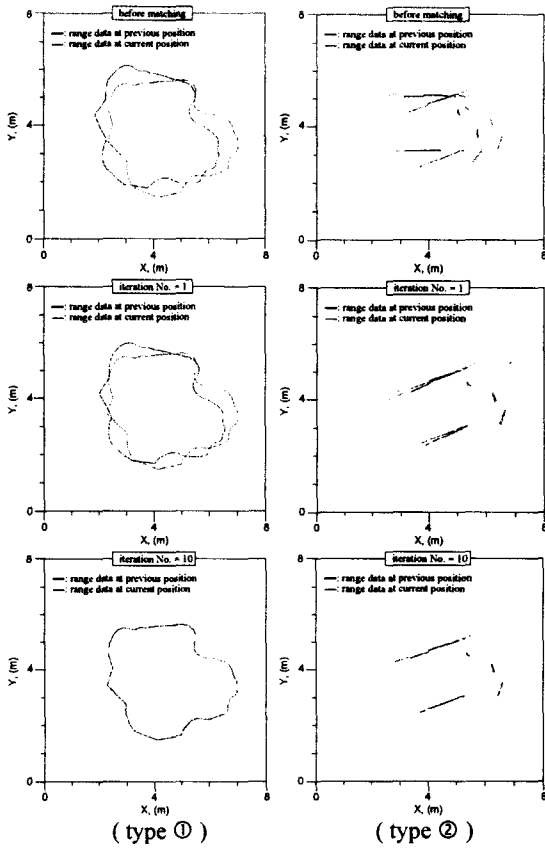
3.4 모의 실험

이에 본 연구에서 제안된 자기 위치 추정 알고리즘의 성능을 평가하기 위해 다음과 같은 모의 실험을 수행하였다. 모의 실험에 사용된 데이터는 임의 형태의 2차원 거리 정보와 실제 복도에서 얻은 2차원 거리 정보이다. 아웃라이어가 존재하지 않는 경우와 약 30% 존재하는 경우에 대해서 일반적인 M-estimator 방법과 제안된 알고리즘인 최적의 정합점 결정 방법을 각각 적용해 보므로써 그 성능을 비교해 보았다. 이동로봇은 0 mm ~ 600 mm 사이에서 x, y 축 방향으로 100 mm 씩 이동, 방향은 0° ~ 50° 사이에서 10° 씩 회전시켜가며 실험하였다. 한 예로 그림 7 과 그림 8 은 이동로봇의 이동 위치가 X 축으로 500 mm, Y 축으로 -200 mm, 방향은 20° 인 경우에 대한 실험 결과이다. 그림 7 은 아웃라이어가 존재하지 않는 경우 M-estimator 의 일반적 정합 방법과 제안된 방법에 의한 모의 실험 결과이다. 그림에서 알 수 있듯이 두 방법 모두 반복 횟수 10 번 이내에 원하는 값을 추정한다. 그러나 표 3 에서 알 수 있듯이 정

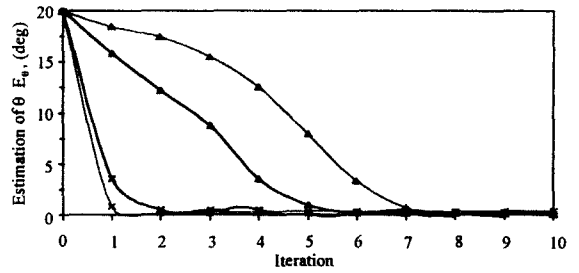
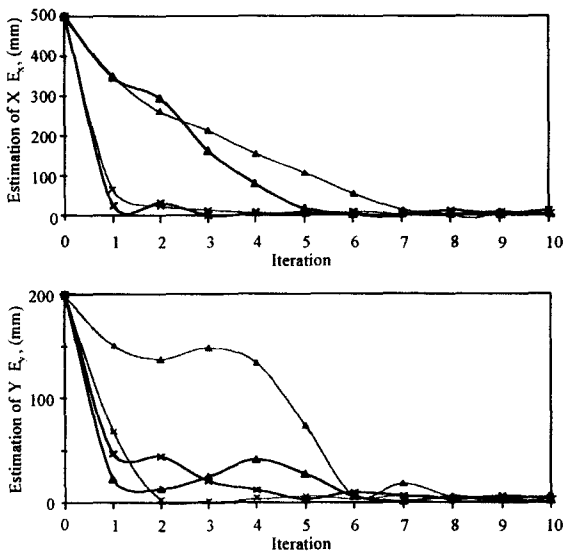
합 속도는 M-estimator 의 일반적인 정합 방법에 비해 제안된 방법의 정합 속도가 약 6 배 이상 빠름을 알 수 있다. 더불어 그림 8 은 약 30%의 아웃라이어가 존재하는 경우 M-estimator 의 일반적 정합 방법과 제안된 방법에 의한 모의 실험 결과이다. 이때 본 센서 시스템은 밴드 패스 필터를 사용하므로 잡음이 거의 없고, 이동로봇의 주행 특성상 아웃라이어 대부분은 사라짐(occlusion)과 다른 물체의 출현(appearance)이다. 따라서 모의 실험 역시 그러한 상황을 고려하여 아웃라이어를 발생시켰다. 이에 표 3 에서 알 수 있듯이 아웃라이어가 존재하는 경우에는 예상했던 대로 추정 오차가 다소 커지나 이동로봇의 자기 위치 추정에 사용하기에는 만족할 만한 성능을 발휘한다고 판단된다. 이 경우에도 정합 속도는 M-estimator 의 일반적인 정합 방법에 비해 제안된 방법의 정합 속도가 약 5 배 이상 빠름을 알 수 있다.



(a) Estimation results of mobile robot pose by general M-estimator



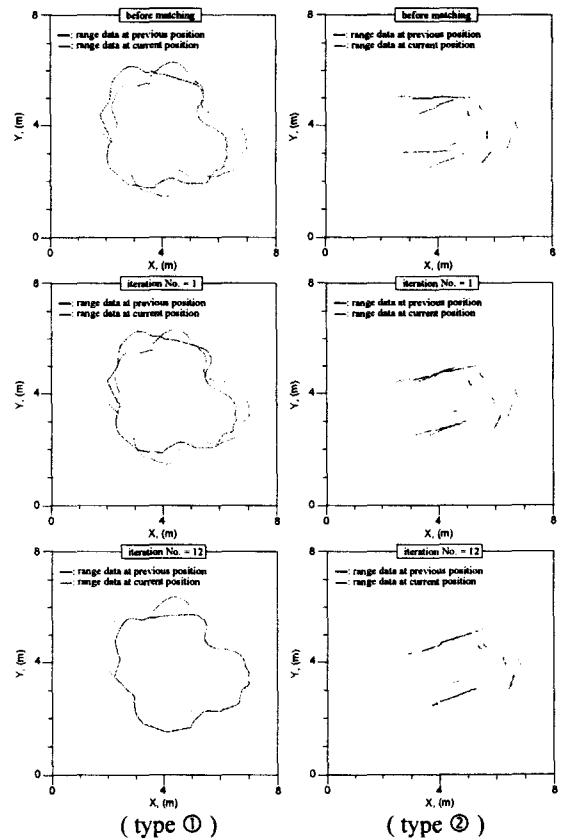
(b) Estimation results of mobile robot pose by the proposed localization algorithm



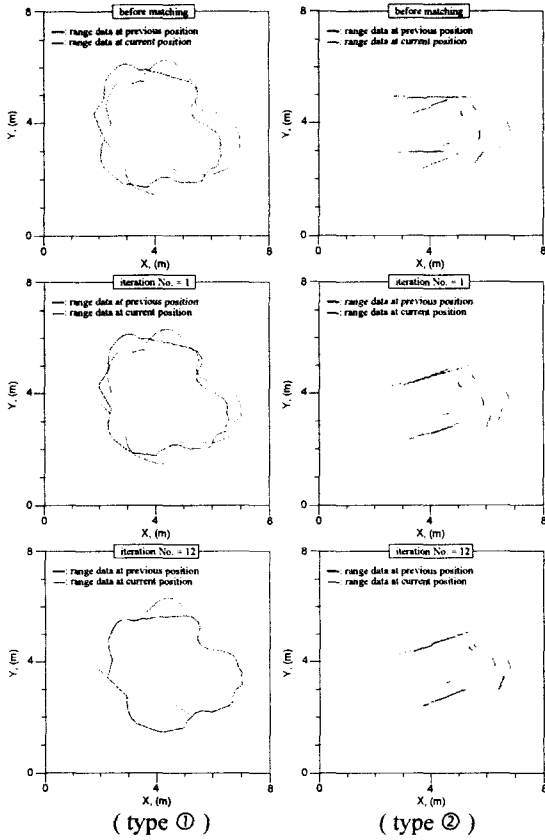
- estimation error of the proposed algorithm (range data of an arbitrary shape, type 1)
- - -■- - estimation error of the proposed algorithm (range data in a hallway, type 2)
- ▲— estimation error of the general M-estimator (range data of an arbitrary shape, type 1)
- - -◆- - estimation error of the general M-estimator (range data in a hallway, type 2)

(c) Estimation error of mobile robot position and head angle w.r.t two types

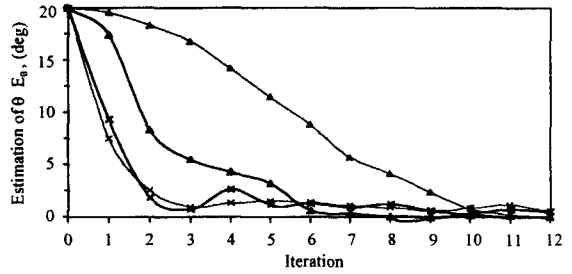
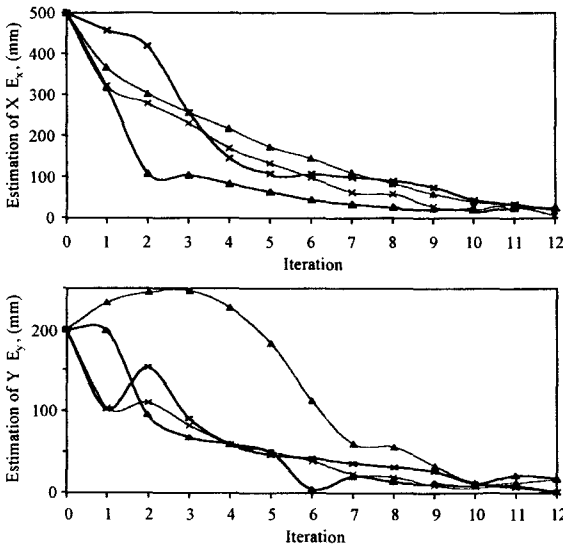
Fig. 7 Estimation results of mobile robot pose in case of the range data without outlier



(a) Estimation results of mobile robot pose by general M-estimator



(b) Estimation results of mobile robot pose by the proposed localization algorithm



(c) Estimation error of mobile robot position and head angle w.r.t two types

Fig. 8 Estimation results of mobile robot pose in case of the range data with 30% outlier (moving obstacles)

Table 3 Comparison of estimation errors and process time of localization by the general M-estimator and the proposed localization algorithm

	General M-estimator		Optimal Matching Point Determination		T_o/T_g (%)
	Error (mm, °)	Proc. Time T_s (sec)	Error (mm, °)	Proc. Time T_s (sec)	
No Outlier	$E_x = 1.53$ $E_y = 3.62$ $E_\theta = 0.11$	90.57	$E_x = 2.59$ $E_y = 1.82$ $E_\theta = 0.10$	15.38	16.9 8
	$E_x = 8.19$ $E_y = 5.71$ $E_\theta = 0.40$	27.65	$E_x = 11.66$ $E_y = 5.06$ $E_\theta = 0.06$	4.32	15.6 2
Exist Outlier (30%)	$E_x = 27.48$ $E_y = 16.55$ $E_\theta = 0.08$	111.33	$E_x = 26.04$ $E_y = 18.63$ $E_\theta = 0.03$	24.01	21.5 7
	$E_x = 6.2$ $E_y = 1.89$ $E_\theta = 0.48$	29.34	$E_x = 20.84$ $E_y = 1.90$ $E_\theta = 0.55$	5.05	17.2 1
Average	-	-	-	-	17.8 5

- ① Two-dimensional range data of the arbitrary shape
- ② Two-dimensional range data in a hallway

4. 결론

본 논문에서는 원뿔 거울과 카메라 및 원뿔형 레이저면을 이용하여 전(全)방향을 측정할 수 있는 이동로봇용 전방향 능동 거리 센서 시스템을

개발하였다. 개발된 센서 시스템은 유효 측정 영역에서 평균 30.1 mm의 측정 오차가 발생하고 전(全)방향에 대한 2차원 거리 정보를 측정하는 평균시간은 85.4 msec 로써 거의 실시간에 가깝다.

또한 제안된 센서 시스템에 의해 측정된 2차원 레인지 거리 정보를 이용하여 주변 환경에 대한 사전 정보가 없이 이동로봇의 정확한 현 위치 및 자세를 추정할 수 있는 새로운 자기 위치 추정 알고리즘도 제안되었다. 즉, 서로 다른 두 위치에서 얻어진 레인지 정보들을 정합하므로써 이동로봇의 상대적인 위치와 자세의 변환 정보를 추정할 수 있다. 이때 정합 속도의 향상을 위해 세그먼트의 특징치 정도라는 함수를 정의하여 적용하였다. 이에 이동로봇의 자기 위치 추정에 대한 제안된 알고리즘의 성능을 평가하기 위해 모의 실험이 수행되었다. 실제 복도에서 얻은 레인지 정보에 의한 자기 위치 추정 오차 $P_e = [E_x, E_y, E_\theta]^T = [11.66 \text{ mm}, 5.06 \text{ mm}, 0.06^\circ]^T$ 이었다. 이때 처리 시간은 4.32 sec 로써, 제안된 최적의 정합점 결정 방법에 의한 추정 속도가 일반적인 M-estimator 방법에 비해 6 배 이상 빠름을 알 수 있다. 모의실험에서 알 수 있듯이 제안된 방법은 2 ~ 3회 반복으로 이미 만족할만한 값을 추정해 내므로 최종 반복횟수를 줄이거나, 하드웨어를 향상시키면 더욱 빠른 속도의 추정이 가능하다. 또한 약 30 %의 아웃라이어 존재하는 경우에도 이동로봇의 자기 위치 추정에 만족할 만한 성능을 발휘하므로써 제안된 자기 위치 추정 방법의 강건함도 증명되었다. 특히 제안된 자기 위치 추정 알고리즘은 테드레콘에 의한 이동로봇의 자기 위치 추정시 누적 오차의 가장 큰 원인이 되는 자세(head angle)오차에 대해서 더욱 탁월한 능력을 발휘한다는 점 또한 고무적이다. 더불어 제안된 알고리즘은 이동로봇의 위치 및 자세를 추정할 수 있을 뿐만 아니라 주변의 물체들에 대한 특성 즉, 주변 물체들의 움직임 유무 또는 움직인다면 그 방향 및 속도 등을 추정할 수 있다. 이에 주변에 산재되어 있는 물체들의 인식 및 그 특성들을 추정하는 알고리즘에 대해 연구가 진행 중이다.

참고문헌

1. Thorpe, C., Shafer, S. A., Kanade, T., and Hebert, M. H., "Vision and navigation for the Carnegie-Mellon Navlab," IEEE trans. on PAMI, Vol. 10, No. 3, pp. 362-373, 1988.
2. Dhond, U. R., and Aggarwal, J. K., "Structure from stereo - A review," IEEE trans. on Systems, Man and Cybernetics, Vol. 19, No. 6, pp. 1489-1510, 1989.
3. Fiala, J. C., Lumia, R., Roberts, K. J., and Wavering, A. J., "TRICLOPS : A tool for studying active vision," Int. Journal of Computer Vision, pp. 231-250, 1994.
4. Bimbo, A. D., Landi, L., and Santini, S., "Determination of road directions using feedback neural nets," Signal Processing 32, pp. 140-160, 1993.
5. Turk, M. A., Morgenthaler, D. G., Greban, K. D., and Marra, M., "VITS - A vision system for autonomous land vehicle navigation," IEEE trans. on PAMI, Vol. 10, No. 3, pp. 342-361, 1988.
6. Kahn, P., Kitchen, L., and Riseman, E. M., "A fast line finder for vision -guided robot navigation," IEEE trans. on PAMI, Vol. 12, No. 11, pp. 1098-1102, 1990.
7. Joung, I. S., and Cho, H. S., "An Active Omnidirectional Range Sensor for Mobile Robot Navigation," IFAC-IFIP-IMACS Conf. on Control of Industrial System, Belfort, France, Vol. 2, pp. 431-436, 1997.
8. Yuta, S., "An implementation of MICHIA locomotion command system for intelligent mobile robot," in Proc. Int. Conf. Advanced Robotics, pp. 127-134, 1985.
9. Kim, J. H., and Cho, H. S., "Real time determination of a mobile robot's position by linear scanning of a landmark," Robotica, Vol. 10, pp. 309-319, 1992.
10. Fukui, I., "TV image processing to determine the position of a robot vehicle," Pattern Recognition, Vol. 24, No. 1-6, pp. 101-109, 1981.
11. Nishide, K., Hanawa, M., and Kondo, T., "Automatic position findings of vehicle by means of laser," in Proc. IEEE Conf. Robotics and Automation, pp. 1343-1348, 1986.
12. Arai, T., and Nakano, E., "Development of measuring equipment for location and direction

- using ultrasonic waves," *Trans. ASME, J. of DSMC*, Vol. 105, pp. 152-156, 1982.
13. Kleeman, L., "Optimal estimation of position and heading for mobile robots using ultrasonic beacons and dead reckoning," in *Proc. IEEE Int. Conf. Robotics and Automation*, pp. 2582-2587, 1992.
 14. Drumheller, M., "Mobile robot localization using sonar," *IEEE trans. PAMI*, Vol. 9, No. 3, pp. 376-382, 1991.
 15. Leonard, J. J., and Durrant-Whyte, H. F., "Mobile robot localization by tracking geometric beacons," *IEEE trans. on Robotics & Automation*, Vol. 7, No. 3, pp. 376-382, 1991.
 16. Holenstein, A. A., Muller, M. A., and Badreddin, E., "Mobile robot localization in structured environment cluttered with obstacles," in *Proc. IEEE Int. Conf. Robotics & Automation*, pp. 2576-2581, 1992.
 17. Beom, H. R., "AI navigation and obstacle detection for mobile robots," Ph. D. thesis, KAIST, 1994.
 18. Gonzales, J., Stentz, A., and Ollero, A., "An iconic position estimator for a 2D laser rangefinder," in *Proc. IEEE Int. Conf. Robotics and Automation*, pp. 2646-2651, 1992.
 19. Zhang, Z., "Iterative point matching for registration of free-form curves," *INRIA Technical Report*, No. 1658, 1992.
 20. Zhang, Z., "Parameter estimation techniques: a tutorial with application to conic fitting," *INRIA Technical Report*, No. 2676, 1995.
 21. Huber, P. J., "Robust Statistics," John Willey and Sons, 1981.