

스테레오 비전 방식을 이용한 자율 이동로봇의 격자지도 작성

김종협*, 최창혁*, 송재복*, 박성기**, 김문상**

Building of Occupancy Grid Map of an Autonomous Mobile Robot Based on Stereo Vision

Jong-Hyup Kim*, Chang-Hyuk Choi*, Jae-Bok Song*, Sung-Kee Park**, and Munsang Kim**

ABSTRACT

This paper presents the way of building an occupancy grid map which a mobile robot needs to autonomously navigate in the unknown environment. A disparity map resulting from stereo matching can be converted into the 2D distance information. If the stereo matching has some errors, however, the subsequent map becomes unreliable. In this paper, a new morphological filter is proposed to reject 'spikes' of the disparity map due to stereo mismatch by considering the fact that these spikes occur locally. The new method has advantages that it is simpler and more easily realized than existing similar algorithms. Several occupancy grid maps based on stereo vision using the proposed algorithm have been built and compared with the actual distance information to verify the validity of the proposed method.

Key Words: Stereo vision(스테레오 비전), Matching(정합), Disparity map(변위 지도), Spikes(스파이크), Occupancy grid map(점유 격자지도)

1. 서론

자율 이동로봇이 미지의 환경에서 안전하게 주행하기 위해서는 로봇이 그 환경을 충분히 인지하고 있어야 한다. 환경에 대한 정보는 보통 지도로 표현되지만, 환경은 계속적으로 변하므로 지도도 꾸준히 갱신되어야 한다.

점유 격자지도의 작성이나 장애물 회피에 컴퓨터 비전을 적용한 연구는 초음파 센서나 레이저 레인지 파인더를 사용한 연구^[3-7]보다 늦게 시작되었다. 그러나 스테레오 비전은 초음파 센서 등 다

른 센서를 통해 얻을 수 없는, 3차원 정보를 얻을 수 있다는 장점 때문에 최근 활발히 연구되고 있다. Meikle^[8]는 휠체어 시스템에 스테레오 비전을 장착하여 미지의 환경에서 지도를 작성하는 알고리즘을 개발하였다.

본 논문에서는 이동로봇이 미지의 내부 환경에서 자율적으로 주행할 수 있도록 영역 기반 방식의 스테레오 비전에 기초한 점유 격자지도의 작성에 대한 연구를 수행하였다. 스테레오 비전은 오류에 매우 민감한 센서로, 불연속한 변위를 가진 곳에서 3차원 데이터를 2차원으로 변형시킬 때

... 2001년 9월 7일 접수

* 고려대학교 기계공학과

** KIST 휴먼로봇센터

‘스파이크(spike)’ 형태의 오류를 가진다. Don Murray^[1]는 이러한 스파이크를 영역 분할 방식을 이용하여 해결하고자 하였다. 그러나 영역 분할 방식은 전체 영역에 대해 영역을 분할하고, 각 분할된 영역을 취급하여야 하기 때문에 복잡하고, 계산 시간도 길게 된다.

본 논문에서는 이러한 오류를 발생시키는 영역 기반 스테레오 비전의 특징을 살펴 본다. 그리고 스파이크를 제거하기 위해 단순하고 구현하기 쉬운 새로운 방법을 제안하고, 이를 통하여 비전에 기초하는 지도의 신뢰성을 향상시키는 방식에 대하여 연구한다.

2. 영역 기반 알고리즘

2.1 이동로봇

Fig. 1은 실험에 사용된 Pioneer 2-DX 로봇으로 2개의 구동륜과 1개의 수동 캐스터로 구성되어 있으며, 물체 주위에 16개의 초음파 센서를 장착하고 있다. 또한, 이동로봇의 제어 및 알고리즘의 수행을 위해서 PC가 장착되어 있으며, 스테레오 비전을 수행하기 위해서 흑백 CCD 카메라 2대와 프레임 그래버인 Meteor2/MC를 장착하였다. 프로그램은 Window 98 기반의 Visual C++를 사용하였다.



Fig. 1 Pioneer 2-DX mobile robot equipped with 2 cameras and industrial PC.

두 대의 카메라는 카메라 사이의 거리가 10cm 가 되도록 받침대로 고정하였으며, 시스템은 Tsai^[2]의 방법을 사용하여 보정하였다. 카메라의 잘못된 정렬이나 양 영상의 밝기 차이 등은 프로그램을 통하여 보정하였다. 이러한 영상의 보정을

통하여, 에피폴러 선(epipolar line)은 영상에서 직선의 형태로 나타나며 에피폴러 선 위에 영상의 쌍이 놓이게 된다.

2.2 영역 기반 알고리즘

영역 기반 알고리즘(area-based algorithm)은, 기준 영상(보통 좌측 영상)에서 정합하려는(matching) 점을 포함하는 일정한 넓이의 기준 영역(patch)을 설정한 다음에, 이 영역을 다른 영상(우측 영상)의 에피폴러 선 상에서 움직이면서 상관 관계를 구하고, 상관 관계가 최대가 되는 점을 찾음으로써 변위(disparity) 값을 구하는 방식이다. 이 방식은 변위 함수가 연속적으로 완만하게 변하는 경우에는 우수한 결과를 주지만, 깊이(depth)가 불연속적으로 변하거나 경사가 급격하게 변하는 경우에는 오차가 많이 발생할 수 있고, 계산량이 비교적 많다는 단점이 있다. 따라서 영역 기반 알고리즘에서 상관 관계값은 보통 SSD(sum of squared difference)나 SAD(sum of absolute difference)를 이용하여 이 문제점을 해결하는데, 본 논문에서는 계산이 단순한 SAD를 사용한다.

$$SAD = \sum_{i,j \in N} |f_1(i, j) - f_2(i - disparity, j)| \quad (1)$$

여기서, f_1 과 f_2 는 좌측 및 우측 영상, $disparity$ 는 영상 쌍의 변위, $f(i, j)$ 는 픽셀 (i, j) 의 영상 밝기, N 은 패치 영역을 나타낸다. SAD는 변위의 변화에 따른 두 영상의 밝기 값의 차를 구한 후, 절대값의 합을 구하는 것이다. SAD는 현재 픽셀 (i, j) 가 속한 에피폴러 선 위에서 수행되며, 하나의 픽셀에 대한 변위 값은 SAD를 최소로 만드는 변위 값으로 결정된다.

보다 신뢰할 수 있는 변위 지도를 작성하기 위해서 영역 기반 알고리즘을 적용하기 전에 텍스처 시험을 수행하였다.

3. 스테레오 비전과 점유 격자지도

3.1 점유 격자지도

Moravec^[9]과 Elfes^[10]에 의해 제시된 점유 격자지도 기법은 지도가 단순하고 강인하며, 여러 종류 센서들을 유연하게 접목시킬 수 있고 동적 환경에서도 잘 적용하기 때문에 이동로봇 지도 작성

에 가장 많이 사용되고 있다. 점유 격자지도 기법은 환경을 일정한 크기의 격자로 세분한 다음, 그 격자 위치에 장애물이 존재할 가능성을 확률값으로 표현한다. 본 논문에서는 Murray^[1]의 방법을 사용한다. 초기에 모든 격자는 격자가 가질 수 있는 최대값의 50%에 해당되는 값을 가진다. 이 값은 격자에 장애물이 존재할 확률과 존재하지 않을 확률이 같다는 것을 의미한다. 스테레오 비전이 장애물을 감지할 경우, 장애물에 해당되는 격자의 확률값은 증가시키고, 카메라와 장애물 사이에 해당되는 격자의 확률값은 감소시킨다. 최종적으로 계산된 모든 격자를 임계치와 비교하고 이진화하여 지도를 완성시킨다.

3.2 픽셀 이하 단위 보간법

점유 격자지도를 작성하기 위해서는 정확한 거리 정보가 필요하다. 픽셀 단위의 거리 정보는 해상도가 제한되어 있어서 불확실할 수 있다. 이를 보정하기 위해 픽셀 이하 단위의 정확도를 구현할 필요가 있는데, 이는 보통 SAD의 최소점 주변에서 보간법을 적용하여 특정 함수 형태로 근사시킨 다음, 근사 함수의 최소점을 찾는 방식으로 수행된다. 본 연구에서는 가장 보편적으로 사용되는 2차 다항식 보간법을 이용하여 픽셀 이하 단위 정확도를 구현하였다(subpixel interpolation).

3.3 2차원 거리 정보 구성

대부분의 이동 로봇은 2D 점유 격자지도를 사용한다. 3D인 실세계를 2D로 변환시키는 과정에서 많은 데이터 손실이 발생하지만, 내부 환경에서 주행하는 이동로봇은 2차원 바닥에서 3자유도(X, Y, θ)를 가지고 주행하기 때문에 데이터 손실은 그리 문제가 되지 않는다. 따라서 모든 장애물을 바닥에 투영하여 점유된 영역과 점유되지 않은 영역을 구분할 수 있다.

Fig. 2, 3, 4, 5는 하나의 스테레오 영상으로부터 거리 정보를 얻는 과정을 보여 주고 있다. Fig. 2는 카메라 영상(320×240)이고, Fig. 3는 변위 지도이다. 검정 부분은 유효하지 않은 영역으로 거리 계산에 사용되지 않는다. Fig. 4는 각 열(column)의 최대 변위로 이루어진 1차원 배열이다. 이 때, 좌우측의 검은 색은 유효하지 않은 최대 변위로 거리를 계산하는 데에 있어서 사용되지 않는다. 양쪽의 검은 색 영역 내부의 영역은 최대 변위값을 나타내

는 것으로, 밝을수록 가까운 거리를 나타내며, 어두울수록 먼 거리를 나타낸다. 이렇게 구한 최대 변위값을 각 열의 최대 변위는 로봇에서 가장 가까운 장애물을 나타내기 때문에 거리 정보를 얻는데 아주 중요한 요소가 된다. 최대 변위가 구해지면 다음 식에 의해 각 열에서 가장 가까운 장애물의 거리를 구할 수 있다.



Fig. 2 Original left image.



Fig. 3 Disparity map.

$$Z = b \frac{f}{x_l - x_r} \tag{2}$$

여기서, Z 는 로봇과 장애물 간의 거리, $(x_l - x_r)$ 은 변위, b 는 기준선(baseline)의 거리, f 는 초점거리를 각각 나타낸다. 위 식을 적용한 결과를 Fig. 5에 거리와 열에 대한 그래프로 나타내었다. Fig. 5에서는 3개의 스파이크(spike)가 존재하고 있는데, 이에 대한 제거 방법은 4.1절에서 다룰 것이다.

로봇이 새로운 영상을 획득할 때마다, 위와 같은 과정을 통하여 거리 정보가 얻어지고, 이는 점

유 격자지도에 갱신되어 지도가 작성된다.



Fig. 4 Maximum disparity in each column of disparity with spikes.

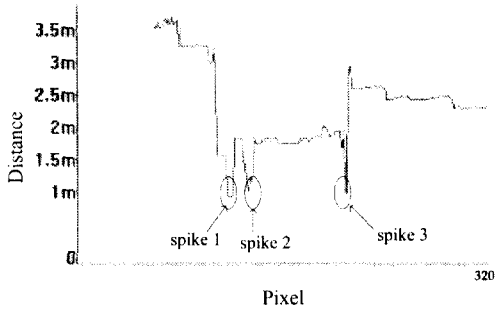


Fig. 5 Depth vs. column graph with spikes.

3.4 지도 갱신

지도 갱신(map updating)을 위해서는 계산이 간편한 Murray^[1]의 방법을 사용한다. 이 방법은 센서 오류나 변위 지도의 오류에 민감하지 않다는 장점이 있다. 갱신 식은 다음과 같다.

$$\text{If } i \in \text{OCC}(r), \quad \text{then } G(i) = G(i) + K.$$

$$\text{If } i \in \text{CLEAR}(r), \quad \text{then } G(i) = G(i) - K.$$

여기서, i 는 점유 격자의 위치, r 은 센서 정보, $\text{OCC}(r)$ 은 점유 영역, $\text{CLEAR}(r)$ 은 비점유 영역을 표현한다. $G(i)$ 는 i 번째 점유 격자의 점유값이고, $G_{\max} = 255$, $G_{\min} = 0$ 이다. K 는 어떤 상수라도 될 수 있지만, 본 연구에서는 $K = 20$ 일 때 효과적으로 지도가 생성되므로 이 값을 사용하였다. 로봇이 미지 영역을 탐색한 후에, 최종 지도를 작성하기 위하여 $G(i) < 50$ 이면 빈 공간으로, $G(i) > 150$ 이면 장애물로, $(G_{\max} - G_{\min})/2$ 정도의 값이 되는 $G(i)$ 의 범위(본문에서는 50~150)에 대해서는 미지 영역으로 나타내었다.

4. 스파이크의 제거

4.1 스파이크의 특징

이 장에서는 Fig. 5에 나타난 스파이크를 제거하기 위해, 간단하고 구현하기 쉬운 새로운 모폴

로지컬 필터(morphological filter)를 제안한다. 스파이크는 영역 기반 정합 방식에서 깊이가 불연속적으로 변하거나 경사가 급격하게 변하는 경우에 발생하며, 국소적으로 나타난다는 특징이 있다. 따라서 국소적으로 나타난다는 특징을 이용하여 스파이크를 제거할 수 있다.

변위 지도에서 스파이크가 존재할 경우, 스파이크가 존재하는 열에서, 스파이크 값은 다른 값들에 비해서 상대적으로 큰 값을 갖는다. 따라서 그 열에서 스파이크 값과 진짜 최대값 사이에는 일정값 C 이상의 차이가 존재하게 된다. 효과적으로 스파이크를 제거하는 C 는 9~11이라는 것을 경험적으로 확인하였다.

4.2 스파이크 제거 알고리즘

먼저 사용된 변위 지도(Fig. 3)에서 각 열의 최대값과 0이 아닌 값들의 평균을 구한다. 0의 값은 3.3절에서 설명한 바와 같이 검은 색 부분에 해당하는 것으로 텍스처(texture)가 낮아서 변위가 구해지지 않는 경우를 나타낸다. 따라서 이 값들은 평균값을 계산하는 데 사용하지 않는다. 이렇게 평균과 최대값을 구하였으면, 다음 알고리즘을 적용하여 스파이크가 제거된 1차원 최대 변위 배열을 생성한다.

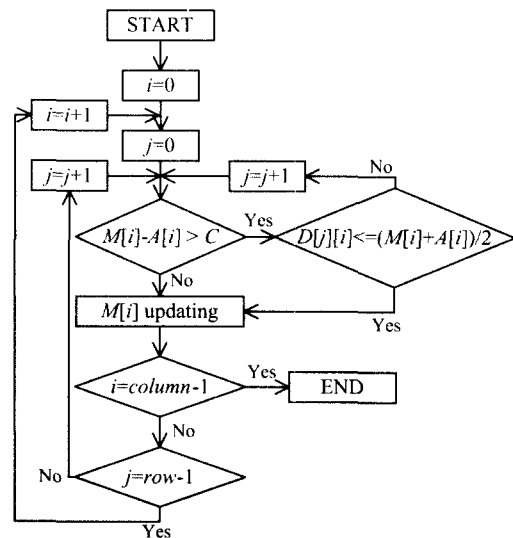


Fig. 6 Algorithm for spike removal

Fig. 6에서, i, j 는 각각 열과 행의 좌표를 나타내

고, *row*, *column*은 영상의 크기의 행과 열에 해당되는 값으로 240, 320이다. 또한, $D[j][i]$ 는 (j, i) 에서 변위값을, $M[i]$ 는 열 i 의 최대값을, $A[i]$ 는 열 i 의 평균을 나타낸다.

스파이크 제거 알고리즘은 $D[j][i]$ 가 스파이크에 해당하면 최대값을 갱신하지 않고, 스파이크가 아니면 최대값을 갱신하는 방식이다. 위의 알고리즘이 끝난 후에 남아 있을지 모르는 스파이크를 제거하기 위하여 미디언 필터(*median filter*)를 적용한다.

5. 실험 및 고찰

5.1 스파이크 제거에 대한 실험

입력 영상은 640×480의 크기를 갖는 영상이지만, 이는 영상의 크기가 너무 커서 영상처리를 하는데 많은 시간을 필요로 한다. 따라서 영상의 특징은 그대로 가지면서 크기만 320×240으로 축소하여 사용하였다. 그리고 LOG를 적용하여 텍스처 시험(*texture test*)을 수행한 후, SAD를 사용하여 변위 지도를 작성하였다.

텍스처 시험은 영상 패치에 충분한 밝기 변화가 존재하는지를 알아보기 위한 것으로 LOG (*Laplacian of Gaussian*) 영상에서 N 에 해당되는 픽셀의 합을 조사함으로써 수행된다. 이 값이 작으면 밝기 변화가 거의 없으므로 결과는 신뢰할 수 없게 되고, 이 픽셀에서 잘못된 변위값이 추출될 수 있기 때문에 이 픽셀에 대한 변위값은 고려하지 말아야 한다. 변위 지도에서 얻은 스파이크가 포함된 1차원 최대 변위 배열은 Fig. 4에 나타나 있고, 4.2절의 알고리즘을 사용하여 구한 스파이크가 제거된 1차원 최대 변위 배열은 Fig. 7에 나타내었다. 또한, 이를 통해 구한 최대 거리값을 Fig. 8에 나타내었다. 이 그림을 통해 스파이크가 깨끗하게 제거되었음을 알 수 있다.



Fig. 7 Maximum disparity in each column of disparity without spikes.

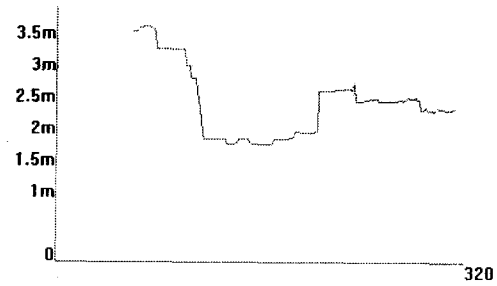
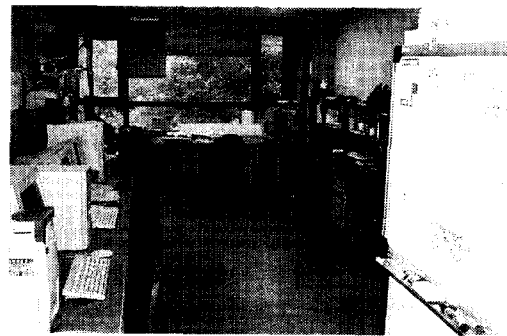
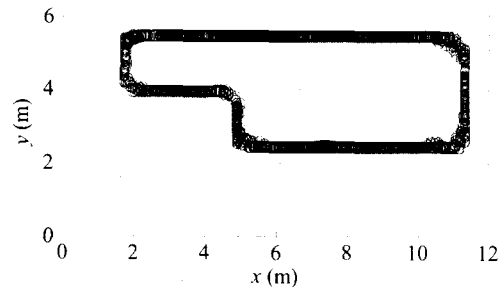


Fig. 8 Depth vs. column graph without spikes.

5.2 점유 격자지도에 대한 실험



(a) Indoor environment 1.



(b) Occupancy grid map 1.

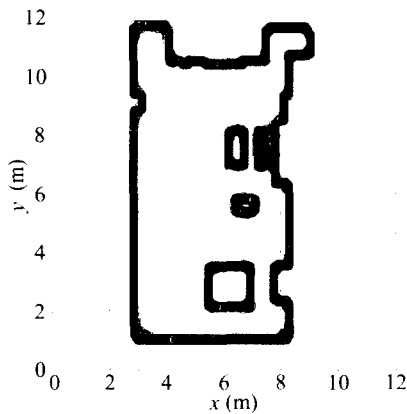
Fig. 9 Occupancy grid map using stereo vision for indoor environment 1.

Fig. 9는 9m×3.5m인 내부 중심부에 물체가 없는 환경을, Fig. 10은 6m×11m인 내부 중심부에 물체가 있는 환경을 표현하는 점유 격자지도이다. 지도는 장애물이 존재하는 부분만을 표현해 놓았고, 내부는 빈 공간을, 외부는 미지의 영역을 나타낸다. 직선 부분에서는 대체로 지도가 깨끗하게

작성되었지만, 모서리 부분에서는 약간의 라운딩 현상이 발생하였다. 이는 모서리 부분을 나타내는 두 영상에서 잘못된 정합을 수행했기 때문에 나타나는 결과로 알고리즘을 보정하여 더욱 깨끗한 지도를 작성할 수 있다. 또한, 물체와 물체 사이의 틈새가 작으면 그 틈새를 빈 공간으로 처리하지 않고, 두 물체를 하나의 물체로 인식하는 오류도 발견되었다. 이는 장애물에 해당되는 격자의 확률값은 증가시키고, 카메라와 장애물 사이에 해당되는 격자의 확률값은 감소시키는 현재 지도 작성 방식의 문제로, 이 방식이 작은 틈새에서는 잘 적용되지 않는 것을 알 수 있다. 따라서 이는 차후 연구에서 개선하여야 할 것이다.



(a) Indoor environment 2.



(b) Occupancy grid map 2.

Fig. 10 Occupancy grid map using stereo vision for indoor environment 2.

5.3 고찰

스테레오 비전은 3차원 정보를 얻을 수 있다는 장점 때문에 널리 사용되고 있지만, 아직도 캘리브레이션과 정합상의 문제로 깊이 정보를 정확하게 측정하지 못하고 있는 실정이다. 그러므로 실험값에 어느 정도의 오차가 발생되는지를 조사하는 것이 중요하다. 사람과 상자에 대한 실험을 여러 번 수행한 결과에서 얻은 깊이값의 오차를 Table. 1에 나타내었다. 오차는 대략 10% 내외로 나타났다.

Table 1 Error chart.

	Actual distance	Measured distance	Error
Test 1	1.7m	1.9m	10.5%
Test 2	1.9m	2.1m	9.5%
Test 3	1.8m	2.0m	10.0%
Test 4	3.5m	3.9m	10.3%
Test 5	4.5m	5.1m	11.8%

오차는 캘리브레이션과 정합의 복합적인 문제로 나타나기 때문에 이를 보정하기 위해서는 다음의 문제를 하나하나 살펴 보아야 한다.

1. 캘리브레이션 문제

- 두 카메라의 광축이 평행하지 않은 경우.
- 기준선과 광축이 수직이 되지 않은 경우.
- 좌우 영상의 밝기가 제대로 보정되지 않은 경우.
- 초점 거리가 제대로 측정이 안된 경우.
- 렌즈의 비틀림 현상이 보정되지 않은 경우.

2. 정합 문제

- 캘리브레이션 문제로 에피폴러 선이 직선이 아닌 경우.
- 현재 패치의 크기에 충분한 밝기 값이 존재하지 않은 경우.

6. 결론

본 논문에서는 스테레오 비전의 영역 방식 정합 기법과 점유 격자지도 방식을 이용하여 이동로봇이 미지의 환경에서 안전하게 주행하는 데 필요한 지도를 작성하였다. 스테레오 비전 방식의 잘못된

정합에서 기인되는 스파이크 형태의 오류 문제를 해결하기 위해서, 이의 특성을 파악하고, 이를 제거하는 새로운 morphological 필터를 제안한 후, 점유 격자지도 작성 실험을 통해 이를 검증하였다. 제안된 방법은 스파이크 존재 여부를 파악하고 이를 기준으로 최대 변위값을 얻는 방식으로, 단순하고 구현하기 용이하여 기존의 방법보다 지도를 더 빨리 갱신할 수 있다는 장점을 가진다.

그러나 변위 지도에서 각 열의 밝기값에 큰 표준편차가 존재하면 스파이크뿐만 아니라, 실제 변위까지 제거되어 잘못된 변위값을 측정하는 경우가 간혹 관찰되었으며, 물체와 물체 사이의 작은 틈새를 인식하지 못하는 오류도 관찰되었다. 이와 같은 문제는 스테레오 비전 방식에서 완전히 제거하기는 어렵지만, 이를 개선하기 위한 연구가 현재 진행 중이다.

향후 작성된 지도를 바탕으로 전역지도와 국소지도 사이의 정합을 통해 로봇의 절대 위치를 알아내는 위치추적(localization) 방식에 대한 연구가 진행될 계획이다.

후 기

이 연구는 서비스로봇 기술개발사업의 일환으로 한국과학기술연구원(KIST)의 지원하에 수행되었음.

참고문헌

1. D. Murray and J. Little, "Using real-time stereo vision for mobile robot navigation," *Autonomous Robots*, Vol. 8, No. 2, pp. 161-171, 2000.
2. R. Y. Tsai, "A versatile camera calibration technique for high-accuracy 3D machine vision metrology using off-the-shelf TV cameras and lenses," *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, Vol. 3, pp. 323-344, 1987.
3. S.B. Nickerson et al., "Autonomous navigation of a mobile robot in a known environment," In *IAS-3*, pp.288-293, 1993.
4. G. Dudek, M. Jenkin, E. Miliotis, and D. Wilkes, "On building and navigating with a local metric environmental map," In *ICAR-97*, 1997.
5. G. Dudek, E. Miliotis, M. Jenkin, and D. Wilkes,

"Map validation and self-location for robot with a graph-like map," *Robotics and Autonomous Systems*, 1996.

6. R. A. Brooks, J. Connell, and P. N. Herbert, "A second generation mobile robot," A.I. Memo No. 1016, MIT AI Laboratory, 1988.
7. R. A. Brooks, "A robust layered control system for a mobile robot," *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, pp.14-23, 1987.
8. S. Meikle, R. Yates and A. Harris, "Computer vision algorithms for autonomous mobile robot map building and path planning," *Proc. of IEEE Int'l Conf. on Intelligent Transportation System*, pp. 99 - 104, 1997.
9. H. P. Moravec and A. Elfes, "High-resolution maps from wide-angle sonar," *Proc. of IEEE Int'l Conf. on Robotics and Automation*, pp. 116-121, 1985.
10. A. Elfes, "Using occupancy grids for mobile robot perception and navigation," *Computer*, Vol. 22, No. 6, pp. 46-57, 1989.