

이동 로봇을 위한 실시간 충돌 회피

범 회 락 조 형 석
한국과학기술원 생산공학과

Real-time Obstacle Avoidance for Mobile Robot

Hee R. Beom Hyung S. Cho
Dept. of Production Eng. KAIST

ABSTRACT

In this paper, a real-time obstacle avoidance for mobile robot based on the readings of the ultrasonic sensors is presented. The twenty eight ultrasonic sensors are arranged in ring and controlled by microprocessor. The readings of the ultrasonic sensor is converted into the virtual forces called repulsive forces, which are the elastic and damping forces. Then, the direction and speed of mobile robot in the cluttered environment are determined by the virtual forces. The effectiveness of the proposed method is verified from a series of simulation studies.

1. 서론

자율형 이동로봇은 산업현장에서 물류의 자동화라든지 Material Handling 그리고 건물내에서 각종 서어비스를 제공할 목적으로 많이 개발되고 있으나, 개발된 종류의 양만큼 지능을 갖춘 이동로봇은 그다지 많지 않다. 이동로봇을 지능화하기 위하여 가장 먼저 개발되어야 할 분야는 센서 분야이다. 또한 각종 센서를 서로 융합하여 새로운 정보 다시 말해 불확실성이 제거된 정보를 얻는 것이 필수적이라 할 수 있다. 지능형 이동 로봇은 센서로부터 받은 정보를 이용하여 현재의 로봇의 위치 및 장애물의 위치 그리고 주위환경에 대한 모델링을 통하여 수행해야 할 작업을 스스로 판단 결정하여 처리하는 형태가 되어야 한다. 이러한 지능형 이동 로봇이 스스로 판단하고 결정하여, 어느 지점에서 어떤 작업을 해야 할 때, 지능형 이동 로봇은 장애물과 충돌하지 않고 지정된 경로를 따라 목적지 까지 가야 한다. 지정된 경로는 전체지도(Global Map)에 근거하여 경로 계획법으로 구할 수 있다[1]. 그러나 이동 로봇이 지정된 경로를 따라 이동할 때 바닥면의 불균일성 등으로 인하여 미끄럼이 발생하고, 그로인하여 지정된 경로를 이탈 하게 된다. 이탈된 정도는 표지판(Landmark)

인식을 통하여 이동 로봇의 현재 위치를 보정 할 수 있으나 Landmark 인식은 아직 실시간으로 처리 할 수 없으므로 어려움이 많다. 또한 지정된 경로를 따라 가더라도 Global Map에 등록 되지 않은 장애물이 나타날 수 있으며 그때마다 적절히 장애물을 회피해야 한다. 따라서 이러한 이유 때문에 이동 로봇에서 실시간 충돌 회피가 필요 하다.

이동 로봇의 충돌 회피방법로서 Certainty Grid 방법 [2,6,7]과 Potential 방법[4,5,8,9]으로 크게 나눌 수 있다. Certainty Grid 방법은 로봇 주위에 국소적인 지도를 Grid로 형성시킨 다음 로봇이 진행하면서 초음파 센서로부터 들어온 거리 정보를 이용하여 Grid에 장애물의 유무를 기록한다. 그리하여 전체 Grid의 장애물의 점유정도를 가지고 로봇의 진행 방향을 Bayes Decision Theory 를 이용하여 결정 한다. 그러나 이 방법은 확률 밀도를 계산하는 데 많은 시간이 소요되므로 실시간으로 사용 하기에는 부적합 하다. 이와 반대로 Potential Field Method는 실시간으로 처리하는 데 적합하나 로봇 주위에 장애물이 나타나면 목적지까지 가는데, 특히 좁은 복도와 같은 환경하에서는 많은 Oscillation을 유발하게 된다 [5]. 그리하여 본 논문에서는 Potential field를 이용하였을 때의 문제점을 해결할 목적으로 이동 로봇의 제한 조건(Constraint)과 가상의 힘을 이용한다. 본 논문에서는 로봇의 주위 환경에 대한 사전정보가 주어지지 않고 장애물은 정지되어 있으며 장애물의 형상은 볼록(Convex)한 형태로 되어 있다고 가정하였다.

2. 이동 로봇의 개요

본 논문에서 사용한 이동로봇의 모델은 실험실에서 자체 제작한 것으로 사진 1과 같은 형태로 되어 있으며, 그의 이름은 LCAR이라 부른다. 이동 로봇의 휠은 4개로 구성되어 있으며 그중에서 2개의 휠은 서보 모터와 서보 드라이버에 의해 구동되며, 또다른 2개의 휠은 로봇의 평형을 유지해 주는 역할을 하는 Castor로 이루어져 있다. LCAR에 장착된 센서로는 2개의 엔코더와 26개의 초음파 센서, 그리고 스테레오시

각 장치가 장착 되어 있다.

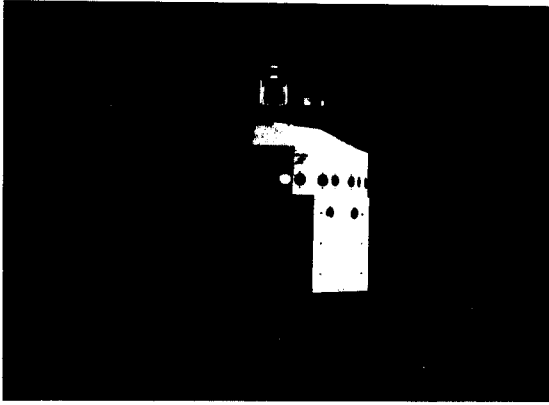


사진 1. 이동 로봇 LCAR의 외관.

그림 1은 LCAR에서의 초음파 센서와 각 휠의 배치된 모양을 보여 주고 있다.

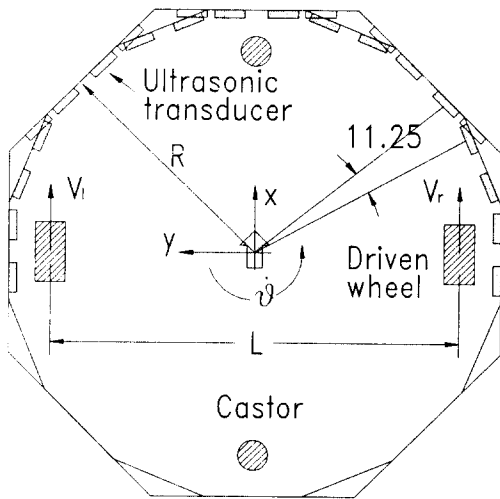


그림 1. 초음파 센서의 배열.

그림 2처럼 이동 로봇이 일정한 선속도 V 와 각속도 $\dot{\theta}$ 를 가지고 움직일 때, 회전 반경 r 은 아래와 같이 주어진다.

$$V = (V_L + V_R)/2 \quad (1)$$

$$\dot{\theta} = (V_L - V_R)/L \quad (2)$$

$$r = (V_L + V_R)/(2\dot{\theta}) \quad (3)$$

여기서, L 은 두 구동 휠 사이의 거리이고 V_L, V_R 은 왼쪽과 오른쪽 바퀴의 중심에서의 선속도이다. 그림 1과 같은 이동 로봇은 두 바퀴의 속도차에 의해 $\dot{\theta}$ 이 발생한다. 또한 서보 모

터의 구동 능력이 제한되어 있고, 원심력에 의한 미끄럼 발생을 예방하기 위하여 그림 2와 같이 로봇이 어떤 일정한 선속도를 가지고 회전하는 경우에 회전 반경 r 이 제한된다. 본 논문에서는 이동 로봇의 두바퀴가 항상 동일방향으로 움직이도록 하기 위하여 한쪽 바퀴의 속도를 최대로 하고 다른 한쪽 바퀴의 속도를 0으로 했을 때를 최소 회전 반경으로 하였다. 따라서 (3)식을 정리하면 최소 회전 반경 r_{min} 은 $L/2$ 로 된다.

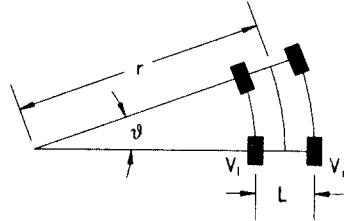


그림 2. 회전반경과 휠의 속도관계.

3. 초음파 거리 감지 장치

이동 로봇에서 많이 사용되는 장애물 감지용 센서로는 시각센서, Laser센서, 근접 센서, 초음파 센서등이 많이 사용된다. 그중에서도 초음파 센서는 다른 센서들에 비해 장애물을 감지하는 데 걸리는 시간이 짧고 가격이 저렴하다는 장점을 가지고 있다. 한편 센서의 각해상도(Angular Resolution)이 좋지 않다는 단점을 가지고 있다. 각해상도를 개선하기 위하여 초음파 펄스를 발사하는 주파수를 높이면 가능하다. 그러나 주파수가 높아지면 공기중에서의 감쇄가 많이 일어나 근거리의 장애물 밖에 감지할 수 없다. 또한 주파수가 낮아지면 감쇄는 적으나 발사되는 빔폭(Beam Width)가 커지게 되어 각해상도는 좋지 않게 된다. 초음파는 물체의 표면상태에 따라 전반사가 발생하여 반사된 신호가 수신되지 못하는 단점이 있다. 이러한 단점에도 불구하고 실시간으로 장애물의 위치를 감지할 수 있기 때문에 많이 사용된다. LCAR 로봇에 사용된 초음파 센서는 Polaroid사의 제품으로 송신과 수신을 동시에 할 수 있다. 초음파 센서의 배열은 그림 1처럼 환형으로 하고 서로 근접해 있는 센서들간의 거리정보를 융합할 수 있도록 하기위하여 센서의 사이각을 11.25도로 하였다. Polaroid사의 초음파 센서의 Beam Pattern은 그림 3과 같으며 센서의 축 방향을 기준으로 -3dB 이상된 영역은 대략 15도가 된다. 이러한 센서를 이용하여 거리를 측정하기 위하여 제어 장치가 필요하며 제어장치는 그림 4와 같다. 초음파는 공기중에서는 감쇄를 하게 됨으로 먼거리에 있는 물체에 반사되어 들어오는 신호를 감지하기 위하여 시간에 따라 이득(Gain)을 크게 해주어야 하며 반사파가 들어올 때 까지의 시간을 거리로 환산하여 Main Controller인 PC/AT에 전송하여야 한다. 이

와같은 일련의 일은 Intel의 8031 Micro Controller에 의해 처리 된다. 또한 Micro Controller는 여러가지 Mode로 센서들 제어할 수 있다.

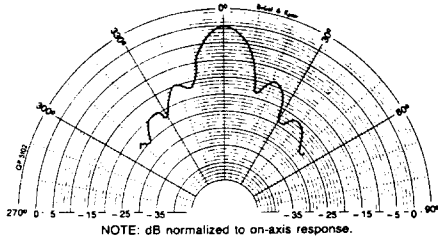


그림 3. 50kHz에서의 초음파 센서의 Beam Pattern.

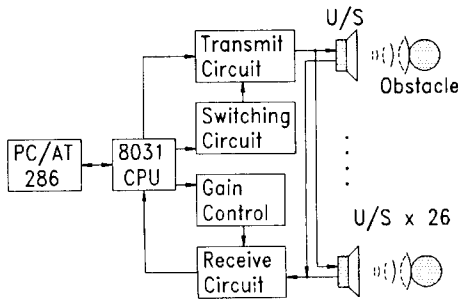


그림 4. 초음파 거리감지 시스템의 구성.

3. 센서의 거리정보를 이용한 충돌 회피

3.1 Force Field 형성

이동로봇이, 장애물이 산재해 있는 환경하에서 목적지까지 안전하게 가기 위하여 장애물 회피가 필요하다. 본 논문에서는 그것을 실시간으로 가능하게 하기 위하여 Force Field 방법을 사용한다. 먼저 초음파 센서로부터 얻은 거리정보를 이용하여 가상의 반력(Repulsive Force)를 형성하고 목적지와 현재의 로봇의 위치를 이용하여 가상의 인력(Attractive Force)를 형성한다. Repulsive Force 크기는 로봇이 장애물 가까이 접근하면 할수록 커지며, Attractive Force의 크기는 로봇이 목적지에서 멀어질수록 커지게 된다. 위와 같은 개념을 환경과 이동로봇 사이에 Spring과 Damper를 사용하여 나타내면 그림 5와 같이 된다.

그림에서 알 수 있듯이 장애물 표면에는 한쪽 끝이 자유로운 압축 스프링을 설치한다. 또한 목적지와 로봇을 연결한 스프링은 로보트가 출발지점에 있을 때, 최대로 인장되어 있는 상태이며 압축력은 발생하지 않는다고 가정한다. 따라서 스프링에 의한 반력의 합을 F_{rsp} 라 하고 Damper에 의하여 발생하는

힘의 합을 F_{rdm} 이라 하면 전체의 반력 F_{rep} 는 다음과 같이 표시할 수 있다.

$$F_{rep} = F_{rsp} + F_{rdm} \quad (4)$$

스프링에 의한 Repulsive Force는 장애물이 로봇에 가까이 있을 때에 큰 힘을 발생하고 멀리 있을 때는 작은 힘을 발생 시키기 위하여 아래와 같이 정의한다.

$$F_{rsp} = \sum_i^N k_i (X_{i0} - X_r) / \|X_r - X_{i0}\|^2 \quad (5)$$

$$\text{if } \|X_r - X_{i0}\| < (R_{us} + R)$$

$$F_{rsp} = 0 \quad \text{Otherwise}$$

여기서 $\|X_r - X_{i0}\|$ 는 i 번째 초음파 센서에서 받아들인 거리이다. 또한 X_r 는 현재의 로봇의 위치이며 X_{i0} 는 i 번째의 초음파 센서의 방향으로 존재하는 장애물의 위치이다. 그리고 N 은 센서의 갯수이고 k_i 는 장애물과 로봇을 연결한 i 번째의 스프링의 상수이며, R_{us} 는 그림 5에서 보는 바와 같이 초음파 센서의 최대 감지 거리이다.

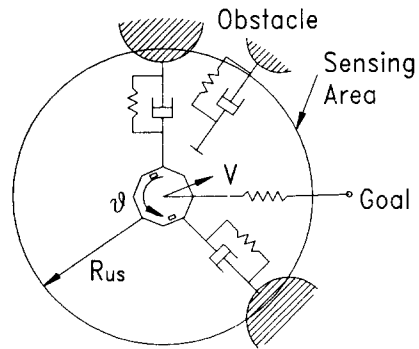


그림 5. Virtual Force Field.

Damper에 의한 Repulsive Force는 로봇이 장애물을 향해 가는 속도가 크면 클수록 큰 힘을 발생하도록 하기 위하여 아래식과 같이 정의한다.

$$F_{rdm} = \sum_i^N c_i \|V\| \cos \alpha_i (X_{i0} - X_r) / \|X_r - X_{i0}\| \quad (6)$$

$$\text{if } |\alpha_i| < \pi/2$$

$$F_{rdm} = 0 \quad \text{Otherwise}$$

여기서 α_i 는 로봇의 진행방향과 i 번째 초음파 센서가 이루는

각이며 c_i 는 Damper의 Damping 상수이다. 마지막으로 목표점에서 발생하는 인력 F_{att} 의 크기는 로봇과 목적지 사이의 거리에 의존하며 다음과 같이 표현된다.

$$F_{att} = k_a(X_g - X_r) / \|X_r - X_g\|^2 \quad (7)$$

여기서 k_a 는 스프링 상수이고 X_g 는 목표점의 위치이다. 위와 같은 인력과 반력을 사용하여 그림 7과 같이 로봇이 진행해야 할 방향과 속도들을 결정해야 한다.

3.2 이동 로봇의 속도 및 방향

3.1절에서 사용한 Force Field를 직접 이용하여 로봇의 방향과 속도를 결정할 경우에는 복도와 같이 폭이 좁은 환경이나, 장애물이 많이 놓인 환경하에서는 로봇은 심하게 좌우로 흔들리면서 진행하게 된다[5]. 이러한 문제는 센서의 감지영역에 장애물이 연속적으로 들어오는 경우 즉 로봇이 저속으로 움직이는 경우에는 흔들림이 비교적 작아진다. 그러나 이동 로봇을 고속으로 움직이는 경우에는 흔들림이 심해져 이동로봇의 방향과 속도를 조금 수정해야 한다. 먼저 이동 로봇의 속도는 초음파 센서로 감지되는 영역내의 초음파 센서로 감지된 횟수를 이용하여 속도를 결정한다. 즉 장애물이 로봇의 근방에 많이 존재하면 로봇의 속도를 줄이고 장애물이 없을 때는 최고속도인 V_{max} 으로 진행한다. 그림 6에서 A_0 와 A_1 은 장애물 영역이며 그영역의 면적은 초음파 센서로부터 얻은 거리 정보에 센서 사이의 각을 고려하면 근사적으로 구할 수 있다.

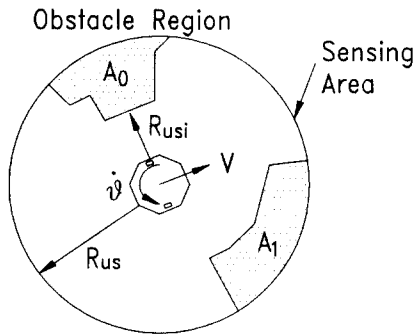


그림 6. 진행 속도 크기 결정.

그러하여 위와 같은 조건을 만족시키기 위하여 진행 속도 V 를 다음과 같이 결정한다.

$$V = V_{max} (1 - A_0 - A_1) / \{(\pi(R_{us} + R)^2 - \pi R^2)\} \\ = V_{max} \sum_i^N R_{usi} C / 180 / \{(\pi(R_{us} + R)^2 - \pi R^2)\} \quad (8)$$

여기서 R_{usi} 는 i 번째 센서에서 받은 거리 데이터이고, C 는 센서간의 배치각도이다. 본 논문에서의 C 는 11.25° 로 하였다.

속도가 결정된후의 방향은 Repulsive Force와 Attractive Force에 의해 결정된 방향 θ 를 사용하되 아래와 같은 조건을 만족하는 범위 내에서 변화를 시킨다. 그림 7에서 보는 바와 같이 현재의 속도를 V 라 하고 그다음 진행해야 할 속도가 V' 라 할 때 Force Field에 의하여 결정된 방향은 θ' 가 된다.

그러나 한 Sampling Time, T_s 동안에 로봇이 속도 V 에서 V' 로 진행할 때는 로봇의 제한조건들 때문에 속도의 크기에 따라 방향이 조금씩 수정되어야 한다. 그리하여 로봇의 방향을 결정할 때에는 앞 절에서 언급했듯이 최소 회전 반경을 기준으로 새로운 방향 ϕ 를 결정한다. 따라서 로봇의 방향 수정은 아래와 같이 한다.

$$\phi = \theta' \quad \text{if } |\theta - \theta'| < (V + V') T_s / r_{min} \quad (9) \\ \phi = (V + V') T_s / r_{min} + \theta \quad \text{Otherwise}$$

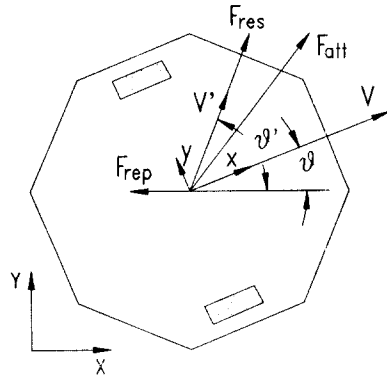


그림 7. 로봇의 속도와 방향 결정.

4. 시뮬레이션 결과 및 검토

실제로 실험에 들어가기 전에 위에서 제시한 알고리즘의 효율성을 검토하기 위하여 일련의 시뮬레이션을 해 보았다. 먼저 시뮬레이션에 사용된 장애물은 원형의 모양을 갖는 장애물을 사용하였다. 그림 8은 속도와 방향을 모두 Force Field에 의거하여 결정한후 충돌회피 알고리즘을 실행시켰을 때의 결과를 보여주고 있다.

그림 8에서 이동로봇은 왼쪽상단에서 출발하여 오른쪽 하단으로 이동한다. 그림에서 알 수 있듯이 장애물과의 충돌은 발생하지 않으나 첫번째 장애물 근방에서 로봇은 심하게 좌우로 흔들리는 것을 볼 수 있다.

그림 9는 센서 감지영역에 있는 장애물의 영역을 고려하여 속도를 조절하고, 로봇의 진행 방향은 로봇의 최소 회전 반경을

이용하여 급격히 변화하지 않도록 조절했을 때의 결과를 보여 준다. 그림에서 알 수 있듯이 이동 로봇은 장애물이 센서 감지 영역에 있을지라도 좌우로 흔들림 없이 목적지로 부드럽게 이동함을 볼 수 있다. 그림 10은 로봇의 최소 회전 방향을 크게 하였을 경우의 결과를 보여 주고 있으며 최소 회전반경이 크면 클수록 장애물 근방에서 로봇이 많이 이탈됨을 볼 수 있다.

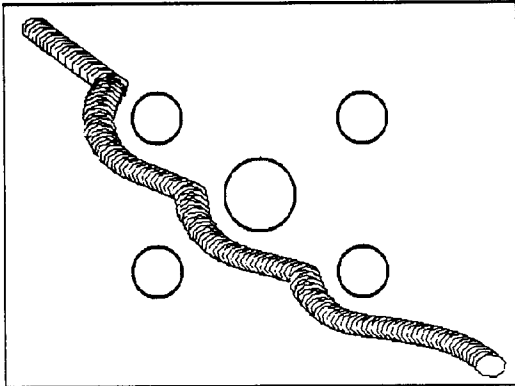


그림 8. Force Field만으로 방향을 결정한 경우.

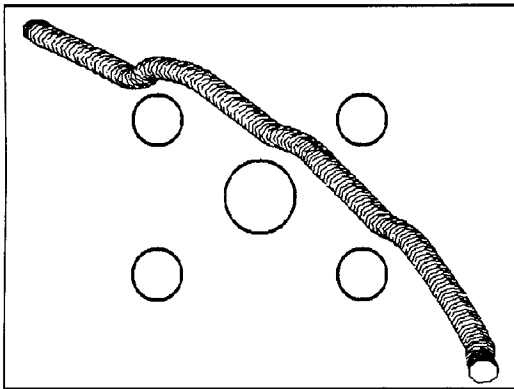


그림 9. 감지영역을 고려하여 방향을 결정한 경우.

5. 결론 및 향후과제

초음파 센서를 로봇의 주위에 Ring형태로 설치하여 장애물을 감지하고, 감지된 장애물까지의 거리 데이터를 이용하여 가상의 Force Field를 형성한후, 장애물 회피를 모의 실험을 통하여 수행하여 보았다. 그 결과 Force Field를 이용한 충돌회피의 단점인 흔들림은 센서의 감지영역에 걸쳐 있는 장애물의 크기를 고려하여 진행 속도를 조절하고, 로봇의 진행 방향 결정은 Force Field에 의하여 결정된 양을 이동로봇의 최소 회전반경을 고려하여 수정하였다. 그 결과 만족스러운 결과를 얻을 수 있었다. 따라서 앞으로는 이러한 모델을 기초

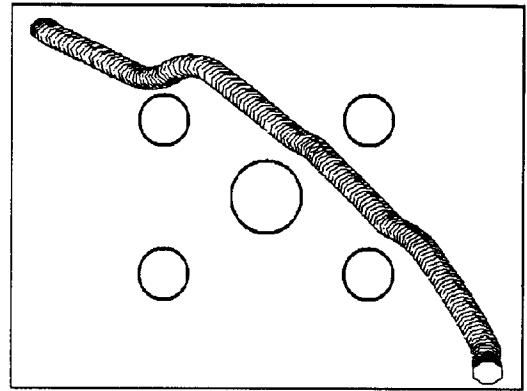


그림 10. 회전반경을 크게 했을 경우.

로 하여 LCAR로봇에 직접 적용하여 보고자 한다.

REFERENCES

- [1] T. Lozano-Perez and M.A. Wesley, "An Algorithm for Planning Collision-free Paths among Polyhedral Obstacles", Communication of the ACM, Oct., 1979, Vol. 22(10) pp.560-570
- [2] Moravec, H.P. and Elfes, A., 1985, "High Resolution Maps from Wide Angle Sonar." IEEE Conference on Robotics and Automation.
- [3] Khatib, O., "Real-time Obstacle Avoidance for Manipulators and Mobile Robots", IEEE Conference on Robotics and Automation, 1985, pp. 500-505
- [4] Alois A. Holenstein, Essam Badreddin, "Collision Avoidance in a Behavior-based Mobile Robot", IEEE Conference on Robotics and Automation, 1991, pp. 898-903
- [5] Koren Y. and Borenstein J., "Potential Field Methods and Their Inherent Limitations for Mobile Robot Navigation", IEEE Conference on Robotics and Automation, 1991, pp. 1398-1404
- [6] Borenstein J. and Koren Y., "Real-time Obstacle Avoidance for Fast Mobile Robots", IEEE Transactions
- [7] Elfes a., "Sonar-based Real World Mapping and Navigation", IEEE J. of Robotics and Automation, Vol. RA-3, June, 1987, PP. 249-265
- [8] Charles W. Warren, "Global Path Planning Using Artificial Potential Fields", IEEE Conference on Robotics and Automation, 1989, pp. 316-321
- [9] Rezah Shahidi and Mark Shayman, " Mobile Robot Navigation Using Potential Functions", IEEE Conference on Robotics and Automation, 1991, pp. 2047-2052