

## PPF 를 이용한 4 족 로봇의 장애물 회피

조경수\*(전남대 대학원 메카트로닉스), 김동진(전남대 대학원 메카트로닉스),  
기창두(전남대 기계시스템 공학부)

### Obstacle Avoidance using Power Potential Field for Stereo Vision based Mobile Robot

K. S. Cho(Mechatronics. Eng. Dept. CNU), D. J. Kim(Mechatronics Eng. Dept. CNU),  
C. D. Kee(Machanical System. Eng. Dept. CNU)

#### ABSTRACT

This paper describes power potential field method for the collision-free path planning of stereo-vision based mobile robot. Area based stereo matching is performed for obstacle detection in uncertain environment. The repulsive potential is constructed by distributing source points discretely and evenly on the boundaries of obstacles and superposing the power potential which is defined so that the source potential will have more influence on the robot than the sink potential when the robot is near to source point. The mobile robot approaches the goal point by moving the robot directly in negative gradient direction of the main potential. We have investigated the possibility of power potential method for the collision-free path planning of mobile robot through various experiments.

**Key Words :** Power Potential Field(파워 포텐셜 필드), mobile Robot(이동로봇), Stereo vision(스테레오 비전)

#### 1. 서론

최근 연구가 많이 진행되고 있는 이동 로봇분야에서 자율주행은 주위환경의 인식, 장애물 감지, 로봇의 충돌회피 경로계획과 같은 지능적 능력을 필요로 한다. 대부분의 이동 로봇은 주로 2 차원의 환경 정보에 의지하여 수행 되었으며, 주어진 환경에 대해 장애물과의 충돌을 회피하기 위한 최적의 경로계획에 대한 연구가 많이 수행되었다. 그러나 실제 로봇의 작업환경은 3 차원 정보가 필수적이며 이에 따라 이동로봇의 자율주행을 위해 비전 센서에 의한 장애물의 검출과 회피에 관한 연구가 활발하게 진행되고 있다. 특히, 스테레오 비전<sup>(1)(2)</sup>은 많은 영상 데이터 처리와 조명의 영향 등 극복해야 할 문제로 인해 실제 로봇의 응용은 많은 제약조건을 가지고 있으나, 초음파와 같은 센서를 통해 얻을 수 없는 물체의 색상정보나 3 차원 정보를 얻을 수 있다는 점에서 큰 장점을 가지고 있어 최근 많은 관심과 연구가 지속되고 있다<sup>(3)(4)(5)</sup>.

본 논문에서는 이동로봇이 자율주행을 위해 영역기반의 스테레오 비전에 기초한 장애물의 검출에

대한 연구를 수행하였으며 이동로봇의 장애물 회피를 위해 sink 와 source 의 특성을 이용한 파워 포텐셜 필드 (Power Potential Field) 방법을 제안하였다. Khatib<sup>(1)</sup>에 의해 제안된 포텐셜법과는 달리 파워 포텐셜은 목적점에 sink 를 배치하고 장애물 경계에 source 들을 불연속적으로 균일하게 분포시켜 장애물과 로봇의 위치관계에 의해 새롭게 포텐셜장을 정의하였다. sink 와 source 를 사용해서 포텐셜을 만드는 방법의 장점은 두 점 사이 거리를 이용해서 포텐셜을 만들기 때문에 계산이 단순하고, 복잡한 장애물에 대한 포텐셜도 비교적 쉽게 계산할 수 있으며, 반발 포텐셜과 수렴 포텐셜을 체계적인 방법으로 정의할 수 있다. 또한 제시한 알고리즘의 타당성을 모의실험과 실제실험을 통하여 검증 하였다.

#### 2. 스테레오 매칭 기법

본 논문에서는 영상처리를 위해 로봇으로부터 취득한 이미지를 그레이로 변환하고 렌즈 왜곡을 제거하는 전처리 과정을 통해 신뢰성 있는 데이터를 얻도록 하였고 스테레오 매칭은 영역기반 정합

알고리즘인 SSD(Sum of Squared Differences)을 사용하였다.

SSD 상관도 알고리즘은 몇 가지 가정이 필요하다. 먼저 매칭에 사용되어지는 한 쌍의 이미지는 카메라 보정(Camera Calibration)과 Rectification 을 거쳐서 각 이미지의 수평선이 동일하다는 것이다. 다음으로 실 좌표계의 한 점에 해당되는 각 이미지 좌표점의 밝기값은 동일하다는 것이다. 만약 동일하지 않은 경우는 이미지에 대한 Normalization 이 필요하다.

영역기반 매칭 알고리즘은 좌측이미지의 각 픽셀에 대하여 우측이미지 수평선의 각 픽셀에 작은 윈도우를 씌우고 비교를 한다. 본 논문에서는 영역기반 스테레오 매칭에서 잘 쓰여지고 있는 SSD 를 적용하였다. SSD 를 구하는 식은 아래와 같다.

$$SSD = \frac{\sum_i \sum_j [I_L(x+i, y+j) - I_R(x+i+d, y+j)]^2}{\sqrt{\sum_i \sum_j I_L(x+i, y+j)^2 \sum_i \sum_j I_R(x+i+d, y+j)^2}} \quad (1)$$

$$d(x, y) = \arg \min SSD(x, y, d) \quad (2)$$

여기서  $I_L$  와  $I_R$  은 좌우 영상을 나타내며,  $d$  는 disparity 를 나타낸다. 각 픽셀의 대응점은 SSD 의 값이 최소가 되는 좌우 영상의 픽셀간 거리가 disparity 가 된다.

### 3. 4족 로봇의 구조

#### 3.1 로봇의 시스템 구성

실험에 사용한 로봇은 4 족의 보행 로봇이며 구동 관절은 각 다리에 3 개씩 능동 관절을 두어 직진 보행과 회전보행을 할 수 있으며 구동부는 제어 및 설치가 간단한 RC 서보 모터를 기반으로 컨트롤러는 Intel-KC196 을 사용하였고, FPGA 에 의해 PWM 신호를 발생하여 각각의 모터를 동시에 제어한다. 로봇의 머리부에 2 대의 CCD 카메라를 사용하여 이미지를 취득하고, 이를 영상모듈을 통해 원격지의 컴퓨터에 전송하게 된다. 로봇의 구조를 살펴보면 아래 Fig. 1 과 같다. 보행로봇은 안정도(stability), 최대 속도, 에너지 소비량의 관점에서 4 각 로봇의 보행패턴은 Fig. 2. 에서와 같이 세가지 걸음새, 즉 트롯(trot), 페이스(pace), 그리고 바운드(bound)가 있는데, 이중 안전성을 보장하는 최대 속도에서 트롯 걸음새가 에너지 소비량의 관점에서 가장 적합한 걸음새 이므로 이를 채택했다. 기본적인 동작으로 전진, 후진, 회전(방향전환) 동작을 구현하게 된다.

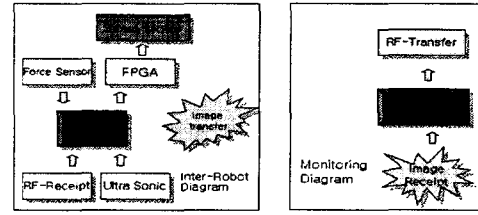


Fig. 1 System of mobile robot

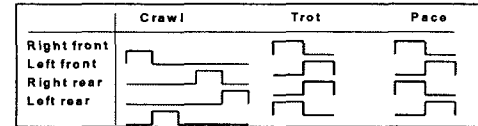


Fig. 2 Gate motion

#### 3.2 로봇의 기구학 분석

아래 Fig. 3 은 로봇의 간단한 좌표계를 보여주고 있으며 Fig.4 와 같이 다리부에서 두개의 모터는 다리의 전후진 이동과 올리고 내리는 동작을 구현하여 어깨의 역할을 담당하고 나머지 한 개의 모터는 무릎의 역할을 하게 된다. 무릎 관절의 추가로 보다 정확하고 안정된 보행을 보장하게 된다.

해석을 간략화 하기 위해 왼쪽 앞다리에 대한 해석을 하고 나머지 다리는 좌표계 위치를 이동 시키는 방법을 사용하였다

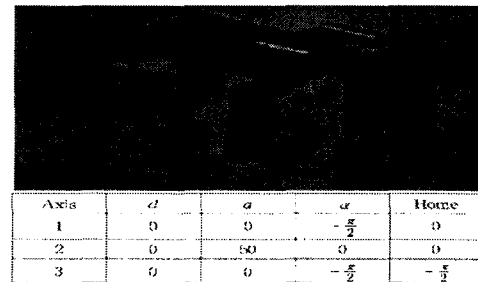


Fig. 3 Coordinate system of mobile robot

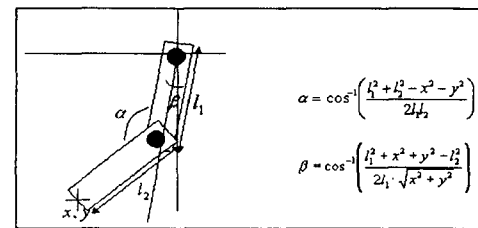


Fig. 4 Kinematics model

### 4. 이동 로봇의 충돌회피 경로계획

#### 4.1 Source 와 Sink potential 구성

본 논문에서는 기존의 포텐셜 함수를 사용하지 않고 유체 역학에서 정의되는 sink 와 source 함수

를 이용하여 포텐셜 함수를 형성한다. Fig. 5에서 처럼 source 점에서 로봇까지의 거리  $r_c$ , sink 와 로봇사이의 거리를  $r_{kc}$  그리고 sink 와 source 사이의 거리를  $r_k$  라 놓으면 sink 포텐셜과 source 포텐셜은 다음식(3), (4)와 같이 쓸 수 있다.

$$\Phi_{source} = -\ln(r_c) \cdot M / (2\pi) \quad (3)$$

$$\Phi_{sink} = \ln(r_k) \cdot M / (2\pi) \quad (4)$$

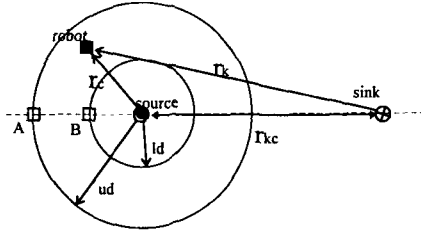


Fig. 5 Source and sink configuration

#### 4.2 주 포텐셜(Main potential)의 형성

이동로봇의 경로 계획을 위한 주 포텐셜을 만들기 위해 장애물 경계에 source 들을 불연속적으로 균일하게 분포 시키고, 목적점에는 분포된 모든 source 들의 세기를 합한 값과 같은 크기의 세기를 갖는 sink 를 하나 배치한다. 포텐셜의 음의 그래디언트 방향은 포텐셜이 가장 급격하게 감소하는 방향이며 로봇은 source 와 sink 로 이루어진 포텐셜의 음의 그래디언트 방향으로 이동한다. sink 포텐셜과 source 포텐셜의 음의 그래디언트는 각각  $-\ln(r_c) \cdot M / (2\pi)$ ,  $\ln(r_k) \cdot M / (2\pi)$  이고, 그 크기는 로봇과의 거리에 반비례한다. 로봇이 source 와 sink 사이에 있을 때는 목적점인 sink 쪽으로 이동하나, Fig. 5에서 A 점과 같은 상황에 있을 때는 목적점에서 멀어지는 방향으로 이동하게 되는데 이와 같은 경우에 대비하여 source 에서 ud 만큼 떨어진 곳에서는 로봇이 더 이상 멀어지지 않고 source 포텐셜과 sink 포텐셜의 음의 그래디언트 크기가 균형을 이루도록 하기 위해 source 포텐셜에 비례 상수,  $\beta = ud / (r_{kc} + ud)$  를 곱한다. 조정된 포텐셜 필드내에서는 로봇이 source 에서 A 점 방향으로 ud 보다 멀리 떨어져 있는 경우와 ud 보다 가까운 곳에 위치한 경우 모두 로봇은 ud 만큼 떨어진 점으로 이동하게 됨을 쉽게 알 수 있다.

위와 같은 포텐셜 필드에서 로봇이 목적점으로 부터 계속 멀어지는 문제는 해결되지만 넓은 영역에 분포되어 있는 source 들 보다는 목적점에 위치한 sink 가 상대적으로 큰 영향력을 갖게 되어 로봇이 장애물에 너무 가까운 곳으로 이동하거나 장애물과 충돌하는 경우가 발생한다. 로봇과 장애물사

이에 두어야 할 최소 거리인 ld 보다 로봇이 장애물에 가까워지는 경우를 방지하고, 장애물과 멀리 떨어진 곳에서는 source 포텐셜과 sink 포텐셜만이 영향력을 갖도록해서 장애물의 전체적인 형상과 목적점이 보다 효율적으로 고려된 경로를 계획하기 위해서, 장애물과 source 와의 거리가 ld 보다 작을 때는 포텐셜이 급격하게 증가하고 ld 보다 클 때는 포텐셜이 반대로 급격하게 감소하는 파워 포텐셜이 필요하다. 포텐셜의 그래디언트 크기가 source 에서 멀어질수록 감소하도록 하기 위해서 파워 포텐셜의 그래디언트를  $c/(r_c)^p$  와 같은 함수로 나타내면, c 와 p 는 다음과 같이 결정된다. Source 에서 ld 만큼 떨어진 곳에서 sink 포텐셜의 그래디언트를  $1/(2\pi r_k)$  라 할 때,  $r_{kc} \gg ld$  라고 가정하면  $r_k \approx r_{kc}$  가 되고,  $c = -n/(2\pi r_{kc}) \cdot ld^p$  로 하면, source 에서 ld 만큼 떨어진 곳에서 파워 포텐셜 그래디언트의 크기와 source 포텐셜 그래디언트 크기가 같게 됨을 알 수 있다.  $r_k \approx r_{kc}$  라는 가정의 오차로 인해 실제로는 source 에서 ld 보다  $\epsilon$  만큼 더 떨어진 곳에서 포텐셜과 source 포텐셜의 그래디언트 크기가 같게 되며,  $\alpha = \epsilon / ld$  라 할 때  $\alpha \ll 1$  위해서는  $p \gg 1/(2\alpha)$  함을 알 수 있다. 요약하면, 파워 포텐셜은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\Phi_{power} = \frac{1}{p-1} \cdot \frac{ud^p}{r_c^{p-1}} \cdot \frac{1}{2\pi(r_{kc} + ud)} \quad (5)$$

그러므로 주 포텐셜 함수는 다음식(6)과 같다.

$$\Phi_{main} = \Phi_{repulsive} + \Phi_{attractive} \quad (6)$$

$$\text{Repulsive Potential: } \Phi_{repulsive} = \sum^n \Phi_{power} \quad (7)$$

$$\text{Attractive Potential: } \Phi_{attractive} = \Phi_{sink} \quad (8)$$

이와 같이 sink 와 source 를 사용해서 포텐셜을 만드는 방법의 장점은 두 점 사이 거리를 이용해서 포텐셜을 만들기 때문에 계산이 단순하고, 복잡한 장애물에 대한 포텐셜도 비교적 쉽게 계산할 수 있으며, 반발 포텐셜과 수렴 포텐셜을 체계적인 방법으로 정의할 수 있고, 장애물 전체 형상에 대한 정보를 갖는 형상 포텐셜을 정의하여 국소 최소점 탈출에 이용할 수 있으며, 장애물을 모델링 하는데 소실점들을 직접 이용할 수도 있다는 점이다.

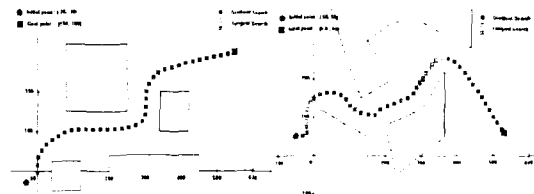


Fig. 4 Planning a collision-free path among obstacles

### 5. 실험

이 논문에서 실험한 로봇은 Fig. 6 과 같으며 14 자유도를 갖고, 두대의 CCD 카메라로 구성된 스테레오의 비전 기반의 보행 로봇이다.

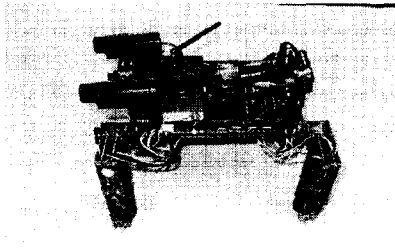


Fig. 6 Stereo vision based mobile robot

Fig. 7(a), (b)는 원 이미지를 그레이 스케일로 변환 후 왜곡을 제거한 전처리 과정이며, Fig. 7(c)는 disparity map 을 형성한 이미지를 보여주고 있다.

Fig. 7(d)은 상면에서 본 격자 지도로 주변환경에 있는 장애물의 위치를 나타내고 있다. 이 지도에서 형성된 데이터를 기준으로 본 논문에서 유도한 파워 포텐셜 필드 방법을 이용하여 장애물 회피 경로를 생성한다.

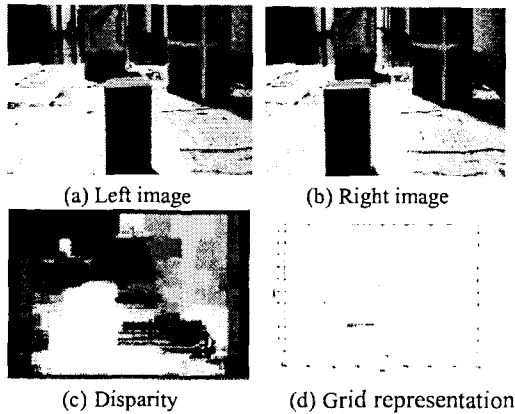


Fig. 7 Stereo matching

Fig. 8 은 장애물에 따른 지도형성을 하여 효과적으로 목표 지점에 도달하는 시뮬레이션 결과를 나타내고 있다.

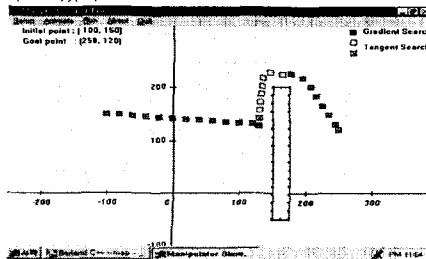


Fig. 8 Path generation in local grid map using PPF

### 6. 결론

본 논문에서는 이동로봇이 자율주행을 위해 영역기반의 스테레오 비전에 기초한 장애물의 검출에 대한 연구를 수행하였으며 장애물 회피 경로계획을 위한 파워 포텐셜 필드 방법을 제시하였다. 미지의 장애물 검출을 위해 영역기반의 스테레오 매칭 알고리즘이 적용되었으며 계산된 disparity map 으로부터 후처리 과정을 통하여 환경지도를 작성하였다. 다양한 모의 실험을 통해 이동 로봇의 경로탐색에 파워 포텐셜 필드 기법의 타당성을 검증하였으며 로봇의 장애물 회피 실험을 통해 가능성을 확인하였다. 실제 주행의 적용을 위해서는 센서 데이터의 오류를 줄이거나 개선 하기위한 환경모델링 방법의 연구가 필요할 것으로 생각된다.

### 참고문헌

1. O.Faugeras et al., "Real time correlation based stereo: algorithm, implementation and applications," Research Report 2013, INRIA Sophia-Antipolis, 1993.
2. A.Fusiello, E.Truccho and A.Verri, "A compact algorithm for rectification of stereo pairs," *Machine Vision*, Nov. 12(1), pp.16-22, 2000.
3. C.Jennings, D.Murry, and J.Little "Cooperative Robot Localization with Vision based Mapping," *Proc.IEEE Conference on Robotics and Automation*, pp. 2659-2665, 1999
4. C.Jennings, D.Murry, and J.Little "Cooperative Robot Localization with Vision based Mapping," *Proc.IEEE Conference on Robotics and Automation*, pp. 2659-2665, 1999.
5. H.Moravec, "Robot spatial perception by stereoscopic vision and 3D evidence grids," Carnegie Mellon University technical report CMU-RI-TR-96-34, 1996.
6. Kanade,T.and Okutomi, M. "A stereo matching algorithm with an adaptive window: theory and experiments," *IEEE Transactions on Patten Analysis and Machine Intelligence*,Vol.16(9), pp.920-932, 1994
7. O. Khatib, "Real-Time Obstacle Avoidance for Manipulators and Mobile Robots," *Inter. J. Robotics Research*, Vol. 5, No 1, pp.90-98, 1986.
8. 장민근, 기창두 "역 포텐셜 방법을 이용한 이동 로봇의 네비게이션", *대한기계학회집(A)*, pp456-461, 1997.