

## 충돌 벡터를 이용한 이동로봇의 동적 장애물 회피

# Dynamic Obstacle Avoidance of a Mobile Robot Using a Collision Vector

서대근, 류은태, 이장명\*  
(DaeGeun Seo, EunTae Lyu, and JangMyung Lee)

**Abstract :** An efficient obstacle avoidance algorithm is proposed in this paper to avoid dynamic obstacles using a collision vector while a tele-operated mobile robot is moving. For the verification of the algorithm, an operator watches through a monitor and controls the mobile robot with a force-reflection joystick. The force-reflection joystick transmits a virtual force to the operator through the Inter-net, which is generated by an adaptive impedance algorithm. To keep the mobile robot safe from collisions in an uncertain environment, the adaptive impedance algorithm generates the virtual force which changes the command of the operator by pushing the operator's hand to a direction to avoid the obstacle. In the conventional virtual force algorithm, the avoidance of moving obstacles was not solved since the operator cannot recognize the environment realistically by the limited communication bandwidth and the narrow view-angle of the camera. To achieve the dynamic obstacle avoidance, the adaptive virtual force algorithm is proposed based on the collision vector that is a normal vector from the obstacle to the mobile robot. To verify the effectiveness of the proposed algorithm, mobile robot navigation experiments with multiple moving obstacles have been performed, and the results are demonstrated.

**Keywords :** collision vector, mobile robot, inter-net, virtual force, dynamic obstacle

### I. 서론

공장 자동화 및 의료 분야 등에 사용되고 있는 무인 반송차(AGV) 시스템은 전자기 유도선이나 반사 테이프 등의 궤도 추종방식으로 운행되며 작업공간의 제약 및 적용범위의 한계가 있다. 이의 개선을 위한 환경변화에 유연하게 대처할 수 있는 이동 로봇(mobile robot)의 필요성이 최근 증대되고 있다. 이와 더불어 이동로봇의 자율주행에 관한 연구가 주목을 받고 있으며, 최종 목표점을 찾아가는 경로 계획(path planning)에 대한 연구와 경로 상에 존재할 수 있는 장애물과의 충돌을 회피하여 원하는 목적지에 도달하는 연구 및 두 방법을 결합하는 연구가 활발하게 진행되고 있다.

목표지점을 향한 정확한 주행능력을 위하여, 정적/동적 장애물과 충돌하지 않으면서 주어진 시작점에서 목표점까지 이동하도록 경로 계획을 수립하고, 주행 중 실시간에 장애물을 회피하는 것이 이동로봇에 있어서 중요한 문제다. 그동안 발표된 이동로봇의 경로계획에 관한 연구들은 대부분 고정된 장애물을 회피하는데 관심을 두고 있었다. WFM(Wall Following Method)[1]은 미리 정해진 간격으로 벽면을 따라 주행하는 방법이다. 만일 주행 중 장애물을 만나면 이 장애물을 다른 벽으로 간주하고 기준경로를 찾을 때까지 계속해서 우회해간다. 이는 건물 내 복도와 같은 특수한 환경 내에서만 적합하다.

PFM(Potential Field Method)[2-4]는 이동로봇과 목표지점에는 인력이 작용하고, 주행 시 만나는 장애물과는 척력이 작용한다고 가정하는 경우에만 적용되는 방법이다. 이 방법은 가까이 있는 장애물에 대해 빠르게 경로계획을 할 수 있다는

장점이 있다. 하지만 이 방법은 장애물이 밀집해 있는 경우 이동로봇이 주행 경로를 찾지 못하는 경우가 생긴다.

또한, 기존의 충돌회피 경로계획 방법들은 일반적으로 최적 경로 생성에 초점이 맞추어져 있으므로 경로계획과 계획된 경로에 시간정보를 최적으로 설정하는 제계계획이 서로 분리되어 이루어진다. 이처럼 기존의 경로계획 알고리즘은 이동로봇의 동 특성을 고려하지 않고 경로의 최적성만을 계획하므로 실제 이동로봇이 추종하기 어려운 경로가 생성될 수 있다.

로봇의 작업 공간 내에는 다른 로봇, 작업 대상물, 각종 기기, 그리고 작업자들이 위치해 있을 가능성이 충분히 존재한다. 이러한 상황에서 로봇은 주어진 작업을 수행하면서 장애물들과 충돌하지 않아야 한다. 이러한 장애물들은 그 위치와 형상이 고정되어 있는 고정 장애물, 시간에 따라 위치와 방향이 변화하는 시변 장애물(time-varying obstacle)[5]로 구분할 수 있다. 경로를 실시간에 추종하기 위해서는 이동장애물의 동 특성을 고려한 알고리즘이 필요하다.

이를 위해 경로계획에 임피던스제어 알고리즘을 사용하였다. 임피던스제어란 불확실한 환경과 로봇과의 상호작용을 임피던스로 모델링하여 피드백 되는 힘에 의해 위치를 조정하며 일정한 힘을 유지해 나가는 알고리즘이다[6]. 하지만, 경로계획에 임피던스제어 알고리즘을 사용할 경우 동적 장애물의 출현 시 비정상적인 속도증가로 충돌회피 알고리즘으로 직접 적용하기에 적합하지 못한 문제점이 존재한다. 이를 보완하기 위해 본 논문에서는 장애물과 이동로봇의 충돌 가능성에 따라 적절한 속도제어가 가능하도록 하기 위해서 충돌벡터 검출법을 적용하여 개선된 가상 임피던스제어 알고리즘을 사용하였다.

본 논문의 구성은 먼저 II장에서 연구를 위한 이동로봇 시스템에 대해서 설명하고, III장에서는 이동 장애물의 동 특성을 고려한 가상 임피던스 제어 알고리즘에 대해서 설명하고, IV장에서 장애물에 대한 충돌벡터 검출법을 제안한다. 그리

\* 책임저자(Corresponding Author)

논문접수 : 2006. 10. 31., 채택확정 : 2007. 4. 2.

서대근, 류은태, 이장명 : 부산대학교 전자공학과

(sdk@pusan.ac.kr/pbman02@pusan.ac.kr/jmlee@pusan.ac.kr)

※ 본 연구는 정보통신부에서 주관하는 “정보통신 선도기반기술개발 사업”에 의해 지원 받은 연구임.

고 V장과 VI장에서는 충돌벡터를 이용한 가상 임피던스 제어 알고리즘에 대해 설명하고 이를 시뮬레이션과 실험을 통해 알고리즘의 타당성을 검증하고 마지막으로 VII장에서 결론을 맺는다.

II. 이동로봇 시스템

1. 이동로봇의 기구학

본 연구에서는 초음파 센서 시스템을 갖춘 이동로봇 시스템을 이용하였다. 초음파 센서 시스템은 자율주행 및 장애물 회피에 필요한 외부 환경 정보를 얻는다. 먼저, 이동로봇의 운동을 해석하기 위하여 그림 1과 같이 좌표계를 설정하고 2차원 평면으로 구성된 전역좌표계에서 이동로봇의 상태를 위치와 방향을 갖는 벡터  $p=[x \ y \ \theta]^T$  로 표현한다. 일반적으로 이동로봇의 운동은 두 제어입력인 선형속도  $u$ 와 각속도  $\omega$ 에 의해 제어되는 시스템으로 모델링된다[7,8].

선형속도  $u$ 와 회전속도  $\omega$ 는 로봇의 중심에서의 진행방향 속도와 회전각속도이므로 (1)로 나타낼 수 있다.

$$u = \frac{1}{2}(v_R + v_L) \tag{1a}$$

$$\dot{\theta} = \frac{1}{L}(v_R - v_L) \tag{1b}$$

여기서  $v_L$ 과  $v_R$ 은 각각 왼쪽과 오른쪽 바퀴의 속도를 나타낸다. 그리고 로봇의 방향은 회전속도를 적분한 값으로 (2)의 이산 식으로 구해진다.

$$\theta[n] = K \sum_{k=0}^n \left( \frac{1}{m} \sum_{i=n-m}^n (V[i] - offset) \right) \delta t \tag{2}$$

여기서 K는 이득상수, m은 적분 window의 크기, n은 이산시간을 나타내며,  $V[i] - offset$ 은 속도센서의 출력에서 offset 값을 보정한 결과를 의미한다.

2. 이동로봇의 구동부

이동로봇은 전체적으로 3층 구조를 가지고 그림 2와 같이 PC기반으로 설계되어 있다. 두 개의 DC 모터로 각 바퀴를 구동시키며, 앞뒤로 두 개의 무지향성 수동 바퀴를 장착하였다. 모터를 제어하기 위해 PID 알고리즘을 사용하였고 각각

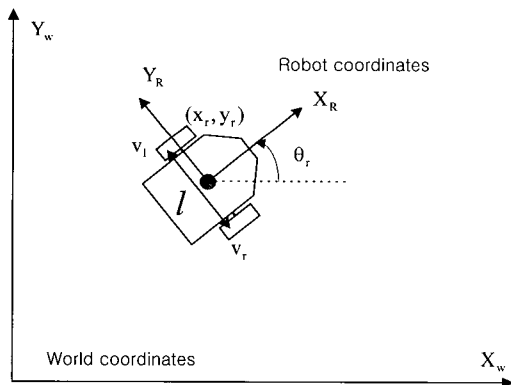


그림 1. 이동로봇 모델.  
Fig. 1. Modeling of a mobile robot.

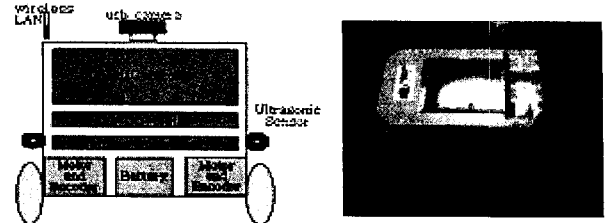


그림 2. 이동로봇의 제어구조와 실제 이동로봇.  
Fig. 2. A control structure of the mobile robot.

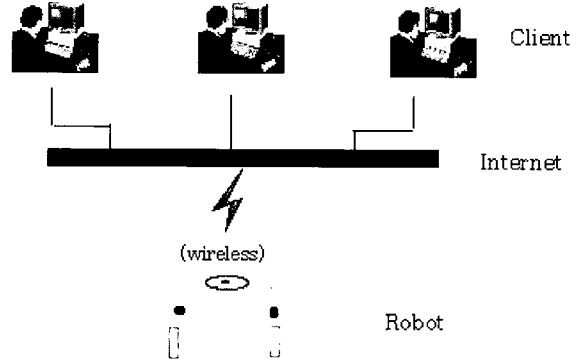


그림 3. Wireless-LAN을 이용한 원격제어시스템.  
Fig. 3. A tele-operation system using wireless-LAN.

의 모터를 실시간으로 제어하기 위해 고속 연산에 적합한 TI사의 TMS230LF2407A Controller를 사용하였다.

3. 이동로봇의 원격제어 시스템

원격제어 시스템은 그림 3과 같이 Internet과 Wireless-LAN을 통하여 서버 시스템과 클라이언트 시스템으로 구성되었고, 로봇의 위치 정보들은 Internet을 통하여 실시간 교환이 가능하도록 했다.

III. 가상 임피던스제어 알고리즘

가상 임피던스 방법(virtual impedance method)[9-11]은 일반적인 임피던스 알고리즘을 이동로봇의 주행 및 충돌 회피 분야에 적용한 것이다. 그림 4에서와 같이 가상 임피던스 방법은 로봇과 reference point, 그리고 로봇과 장애물과의 관계를 스프링(spring)과 댐퍼(damper)로 모델링하여, 거리 및 속도 정보에 따라 가상의 힘을 생성시키는 방법이다.

즉, GPP(Global Path Planner)가 reference point들로 구성되는 궤적  $X(t), \dot{X}(t)$ 를 생성하면, 그 주어진 reference point에서 로봇과 물체 사이의 거리에 기인한 가상의 힘을 발생시켜 주어진 궤적으로부터 이탈을 허용하는 로봇의 가속도  $\ddot{x}$ 를 구하는 방법이다. 그림 4와 같이, 가상 임피던스 방법으로 모델링하여 얻은 이동로봇의 운동 방정식은 다음과 같다.

$$\ddot{x} = \frac{1}{M_s} \left( F_m + \sum_{i=1}^{n_{os}} F_{os,i} + \sum_{i=1}^{n_{od}} F_{od,i} \right) \tag{3}$$

여기서  $n_{os}$ 는 고정 장애물의 개수를,  $n_{od}$ 는 동적 장애물의 개수를 나타낸다. 또한, 이 식에서  $M_s$ 는 로봇의 실제 중량을 의미하는 것이 아니라, 로봇의 궤적의 상대적인 변화율을

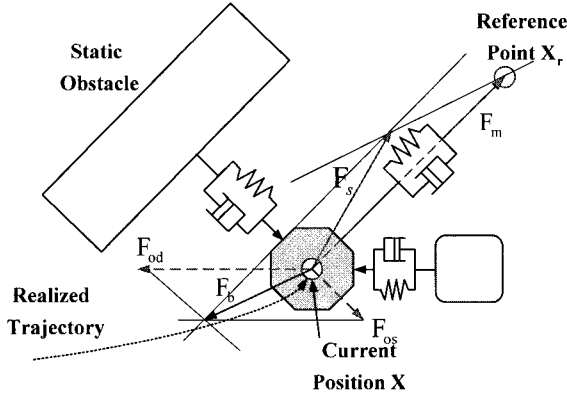


그림 4. 가상 임피던스 방법.  
Fig. 4. Virtual impedance method.

조절하게 되는 인자가 된다. 즉,  $M_s$  를 크게 하면 로봇이 원래의 궤적을 이탈하게 되는 변화율이 작게 되고,  $M_s$  를 작게 하면 그 변화율이 커지게 됨을 의미한다. 따라서, 장애물과 충돌하지 않는 범위 내에서 보다 큰  $M_s$  를 갖는 이동로봇은 보다 좋은 궤적추종 성능을 갖게 된다.

(4)에서  $F_m$  은 현재 로봇의 위치  $X$  와 마스터 측의 조종자에 의해서 생성된 reference point  $X_r$  사이에 존재하는 가상의 인력으로서,  $F_m$  은 다음의 식에 의해서 생성된다.

$$F_m = K_r \cdot X_{r-} + D_r \cdot \dot{X}_{r-} = -K_r(X - X_r) - D_r(\dot{X} - \dot{X}_r) \quad (4)$$

여기서,  $K_r$  는 현재 로봇의 위치  $X$  와 reference point  $X_r$  사이에 작용하는 스프링 상수이며,  $D_r$  는 현재 로봇의 속도  $\dot{X}$  와 reference point에서의 속도  $\dot{X}_r$  사이의 댐핑 상수이다.

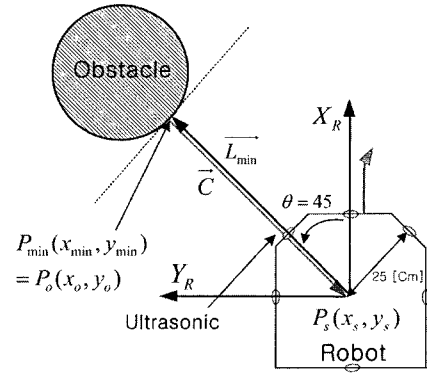
그림 4에서  $F_{os}$  와  $F_{od}$  는 각각 현재 로봇의 위치  $X$  와 정지 물체, 그리고 움직이는 물체와의 가상의 척력을 나타내고 있다. 가상의 척력들의 합은 임피던스 모델에 따라 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$F_{os} = K_{o,s} \cdot X_{o,s} + D_{o,s} \cdot \dot{X}_{o,s} = \sum_{i=1}^{n_{os}} \{K_{o,s}(X - X_{si}) + D_{o,s}(\dot{X} - \dot{X}_{si})\} \quad (5)$$

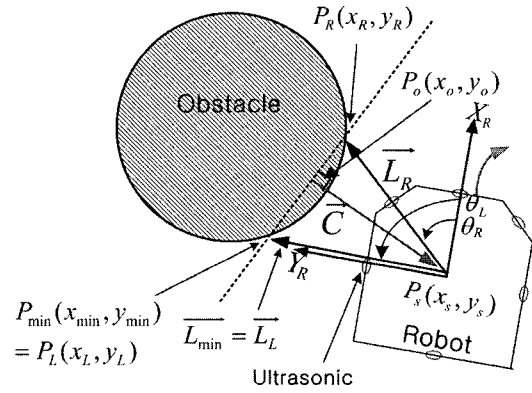
여기서,  $K_{o,s}$  와  $D_{o,s}$  는 각각 정지장애물과 로봇의 거리에 따른 스프링 상수와, 접근 속도에 따른 댐핑 상수이며,  $X_{si}$  는 정지 장애물의 위치를 나타낸다.  $F_{od}$  는 (5)에서 s 대신 d 를 대입하여 구할 수 있다.

**IV. 장애물에 대한 충돌벡터검출**

본 논문에서는 이동로봇의 중심을 향하고 장애물의 접선에 수직인 벡터를 충돌벡터,  $\vec{C}$  로 정의하고, 이 충돌 벡터와 30도 이내의 존재하는 초음파 센서의 데이터를 이용하여 비교적 정확한 거리 정보를 구한다. 또한, 이 정보들을 이용하여 가상의 척력을 구하는 가상 임피던스 방법을 제안하였다.



(a) Case I



(b) Case II

그림 5. 장애물에 대한 충돌벡터 검출.  
Fig. 5. Definition of collision vector.

실험에서 사용한 이동로봇은 전방에 초음파센서가 3개 양 측면에 2개의 초음파 센서가 부착되어 있다. 따라서, 초음파 센서가 감지하는 이동 장애물이 원거리에 위치하는 경우와 근거리에 위치하는 경우 즉, 2가지 형태로 이동 장애물을 분류하였다. 본 논문에서 실험에서 사용된 이동로봇은 사각형태의 로봇을 사용하였지만, 장애물은 그 형상이 복잡할 수 있으므로 원통형태로 근사화한다.

Case I: 동적 장애물이 원거리에 있는 경우로서 초음파 센서에 1개에 의해서만 검출되는 그림 5(a)와 같은 경우. 이때의 충돌벡터는 측정된 센서의 거리정보로부터 얻을 수 있다. 동적 장애물 회피에 있어서 Case I의 경우에는 1차적으로 장애물을 회피하기 위해 충돌벡터를 도출하고 회피 경로를 결정한다.

$$\vec{C} = \overline{L_{min}} \quad (6)$$

Case II: 동적 장애물이 근거리에 있는 경우로서 초음파 센서 2개에 의해서 검출되는 그림 5(b)와 같은 경우. 이때 이 동로봇은 검출된 충돌벡터를 이용하여 장애물과의 최단 거리 벡터를 기준으로 충돌 없이 동적 장애물을 회피하기 위해 속도를 증가시켜 효과적인 회피 경로를 결정한다.

초음파 센서를 통하여 측정된 2개의 거리벡터중 크기가 작은 것을  $\overline{L_{min}}$  로 정의하고, 나머지 거리벡터는  $\overline{L_{min}}$  을 기

준으로  $\overline{L}_R$ , 혹은  $\overline{L}_L$  로 정의된다. 그림 5(b)와 같은 경우, 나머지 거리벡터가 오른쪽에 위치하므로  $\overline{L}_R$  로 정의하고  $\overline{L}_{min}$  를  $\overline{L}_L$  로 다시 정의한다.  $\overline{L}_L$  과  $\overline{L}_R$  이 모두 정의되고 나면 검출된 점  $P_L, P_R$  을 이용하여 선분  $\overline{P_L P_R}$  를 구하고 이 선분의 법선 벡터 중 점  $P_s$  를 지나는 충돌벡터  $P_o$  를 구할 수 있다.

$$P_L = (x_L, y_L) = (d_L \cos \theta_L, d_L \sin \theta_L) \quad (7)$$

$$P_R = (x_R, y_R) = (d_R \cos \theta_R, d_R \sin \theta_R) \quad (8)$$

$$P_o = (x_o, y_o) = \left( \frac{V \cdot x_L - y_L}{V + \frac{1}{V}}, -\frac{-x_L + \frac{1}{V} \cdot y_L}{V + \frac{1}{V}} \right) \quad (9)$$

$$\overline{C} = \overline{P_o P_s} \quad (10)$$

여기서  $v = \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1}$  이며,  $\theta$  는 로봇의 진행방향인  $X_R$  과 각 초음파 센서가 이루는 각이다.

**V. 충돌벡터를 이용한 제안된 가상 임피던스 알고리즘**

본 논문에서는 일반적인 가상 임피던스 방법에서 이동로봇과 장애물간의 속도차로서 댐퍼를 정의하는 것과 달리 그 충돌벡터의 변화분(즉, 접근속도)으로 댐퍼를 정의하는 새로운 가상 임피던스 방법을 제안하였다.

제안된 가상 임피던스 방법은 다음과 같이 정의되어 진다.

$$F_{od} = K_{o,d} \cdot X_{o,d} + D_{o,d} \cdot \dot{X}_{o,d} = \begin{cases} \sum_{i=0}^{n_{od}} \{K_{o,d}(\rho_0 - \|d_i\|) \frac{d_i}{\|d_i\|} - D_{o,d}(\Delta(d_i)) \frac{d_i}{\|d_i\|}\} & \text{when } \|d_i\| < \rho_0, \\ \text{otherwise} & 0 \end{cases} \quad (11)$$

여기서,  $\Delta(d_i) = d_i[n] - d_i[n-1]$ ,  $\rho_0$  는 초음파 센서의 거리 측정 가능범위이며,  $d_i$  는 거리 벡터로서  $d_i = X - X_{di}$  이다. IV장에서 구한 충돌벡터  $\overline{C}$  를 이용하여 (11)에서 제안된 가상 임피던스 모델식을 다시 표현하면 (12)와 같이 된다.

$$F_{od} = K_{o,d} \cdot X_{o,d} + D_{o,d} \cdot \dot{X}_{o,d} = \begin{cases} \sum_{i=0}^{n_{od}} \{K_{o,d}(\rho_0 - \|\overline{C}\|) \overline{C}_{unit} - D_{o,d}(\Delta\|\overline{C}\|) \overline{C}_{unit}\} & \text{when } \|\overline{C}\| < \rho_0, \overline{C}_{unit} = \text{unit vector of } \overline{C} \\ \text{otherwise,} & 0 \end{cases} \quad (12)$$

본 논문에서 제안한 장애물에 대한 충돌벡터 검출법의 유용성은 아래의 시뮬레이션 결과들에서 설명될 수 있다. 그림 6은 이동장애물의 다양한 형태의 한 예로 두 개의 장애물을 피하고 목표 방향으로 나아가는 이동로봇의 충돌회피 과정을 시뮬레이션을 통해 보여준다.

그림 7에서는 충돌벡터를 적용하지 않고 가상 임피던스 알고리즘만을 사용하였을 경우로써, 이동하고 있는 장애물A를 회피함에 있어서 정확한 회피 경로를 찾지 못하고 장애물과 충돌하는 것을 볼 수 있다. 이는 일반적인 PFM(Potential Field Method)[2-4]과 같은 것으로 초음파 센서 정보들의 합을 이용하여 장애물의 면적에 비례하게 가상의 척력을 발생시키고 있다. 그림 6은 위에서 제시한 장애물의 충돌벡터 검출법을 이용하여 (12)와 같이 가상의 척력을 발생시켰을 경우, 이동 로봇의 동적 장애물 회피 동작을 시뮬레이션 한 결과이다.

먼저, 그림 7을 보면 't=5.0'점 부근에서 이동로봇이 동적 장애물 회피를 위해 경로 계획을 세우지 못하고 방향의 변화가 적음을 볼 수 있다. 이것은 장애물과 로봇의 거리에 따라

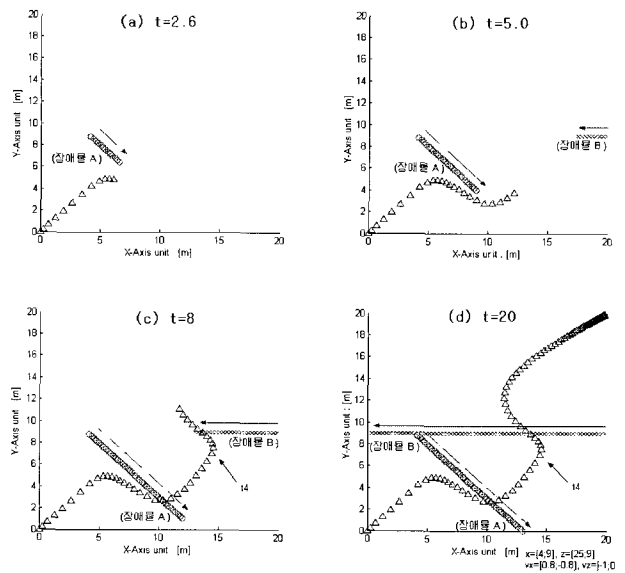


그림 6. 장애물에 대한 전방 충돌 회피. Fig. 6. Collision avoidance of two moving obstacles.

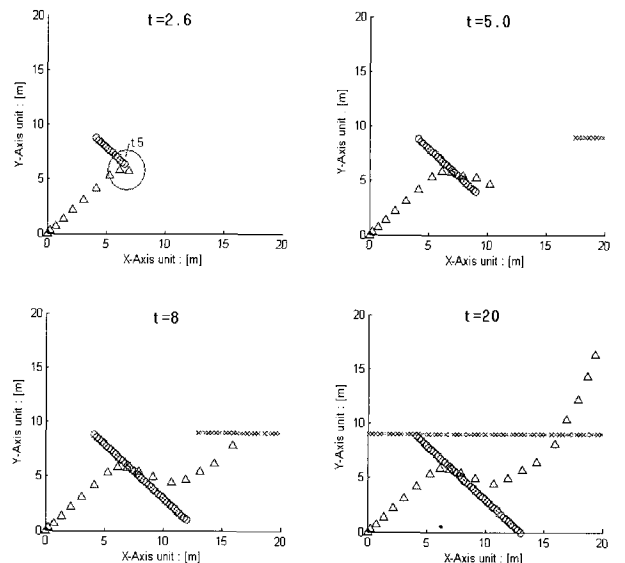


그림 7. 충돌벡터를 적용하지 않은 결과. Fig. 7. Simulations without using a collision vector.

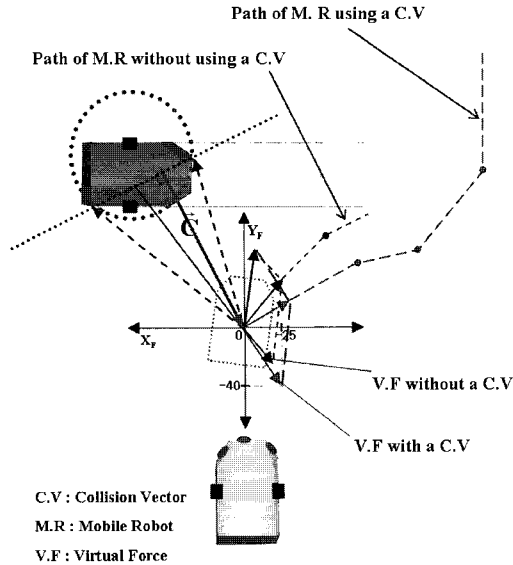


그림 8. 동적 장애물 회피 메커니즘.  
Fig. 8. Dynamic obstacle avoidance mechanism.

장애물을 검출하는 센서의 수가 다르게 되어 척력의 합이 변화하기 때문에 발생하는 결과이다. 반면, 그림 6에서는 이러한 현상이 개선됨을 알 수 있다.

동적 장애물이 원거리에 있는 경우와 근거리에 있는 경우에 대해서 이동로봇의 동적 장애물 회피 메커니즘을 그림 8에서 설명하고 있다. 그림 8은 동적 장애물이 근거리에 있는 경우로서 초음파 센서 2개에 의해서 충돌벡터가 정의 되는 경우를 보여주고 있다. 일반적인 PFM방법과 충돌벡터 검출법에 의해 정의된  $\vec{C}$ 를 이용하여 가상의 힘을 생성하는 것을 비교하여 보여주고 있다. 그림에서 알 수 있듯이 충돌벡터를 이용하는 경우 가상의 힘은 장애물과 수직의 방향으로 생성되어 장애물 회피를 위하여 효율적으로 작용함을 볼 수 있다. 그 결과로서 이동로봇의 진행 방향과 속도가 결정되며, 이동로봇이 동적 장애물을 회피하는 경우에 일반적인 PFM알고리즘만을 적용한 경우에는 그림 7에서와 같이 동적 장애물 회피 시에 있어서 충돌 가능성이 존재한다. 반면 충돌벡터를 적용하여 동적 장애물을 회피하는 경우에는 이동로봇의 중심을 향하고 장애물의 접선에 수직인 벡터를 이용하여 생성된 충돌벡터를 이용함으로써 그림 6에서 보듯이 동적 장애물 회피에 있어서 보다 효율적인 메커니즘으로 충돌을 회피할 수 있음을 보여주고 있다.

결과적으로 (6)-(12)에서 정의된 충돌벡터를 적용한 가상 임피던스 알고리즘을 이용하면 이동로봇과 동적 장애물 사이에서 존재하는 충돌가능성을 줄이고 효율적으로 목표점으로 갈 수 있음을 알 수 있다. 충돌벡터를 이용하여 동적 장애물과의 수직방향 벡터를 충돌회피에 활용하기 때문에 충돌벡터를 적용하지 않은 경우보다 동적 장애물 회피에 보다 효율적임을 시뮬레이션을 통하여 검증한 것을 실험을 통하여 확인하고자 한다.

**VI. 이동로봇의 동적 장애물 회피 실험**

장애물이 존재하는 실험 환경에서 직선 주행을 하는 이동

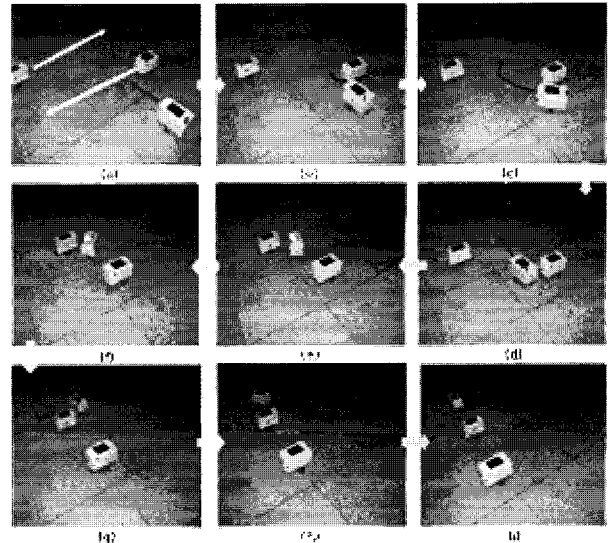


그림 9. 직선 장애물 충돌 회피 연속사진.  
Fig. 9. Collision avoidance of parallel motion obstacles.

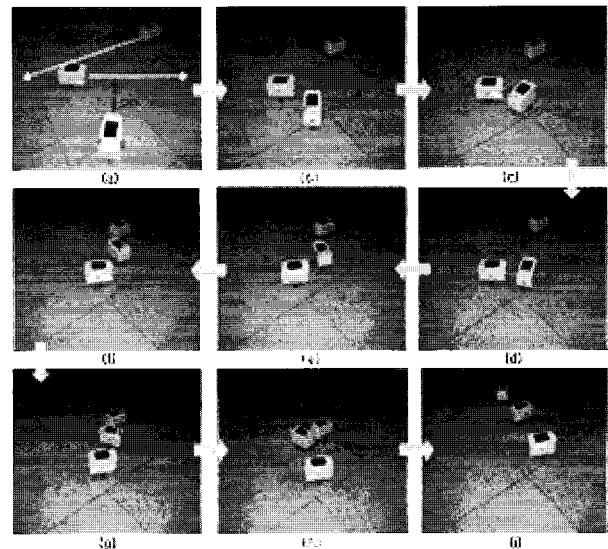


그림 10. 대각선 장애물 회피 연속사진.  
Fig. 10. Collision avoidance of diagonal motion obstacles.

로봇과 2대의 동적 장애물이 충돌벡터를 활용하지 않은 경우에는 장애물 회피가 성공적으로 되지 않음을 확인 한 후에 충돌벡터를 사용하여 충돌회피가 가능함을 실험적으로 입증하는 과정을 거쳤다. 충돌벡터의 효율성을 보이기 위하여 두 가지 종류의 장애물의 이동경로에 대해 검증하였다.

첫 번째의 경우는 반대 방향으로 평행으로 이동하는 두 대의 장애물 로봇과의 충돌을 회피하고 가로질러 주행하는 과정을 보여준다. 그림 9(a)-(i)까지 사진은 실제 실험에서 동적 장애물을 회피하여 이동로봇이 나아가는 경로를 나타내고 있다.

두 번째 경우는 한대는 이동로봇의 진행 방향에 수직으로 또 한대는 대각선 방향으로 이동하는 경우를 살펴보았다. 그림 10에 알 수 있듯이 이동 로봇은 충돌을 피하면서 원하는 목표 방향으로 진행한다.

## VII. 결론

일반적인 충돌회피 알고리즘은 이동로봇과 장애물의 동적 특성을 고려하지 않고 최적의 경로생성에만 초점을 맞추었기에 실제 상황에서는 이동로봇이 추종하기 어려운 경로를 생성하는 가능성이 존재하고 있다. 본 연구에서는 이동로봇과 장애물간의 동적 특성을 충돌벡터로 정의하여 가상 임피던스제어 알고리즘에 적용하였다. 이를 통하여 일반적인 PFM 알고리즘을 적용 시 갑작스런 장애물의 출현 시 부적합한 속도제어를 하게 되어 충돌 가능성이 여전히 존재함을 극복하게 되었다. 본 논문에서는 충돌벡터를 이용한 가상 임피던스 제어알고리즘이 동적 장애물 회피에 유용함을 충돌벡터를 적용했을 경우와 적용하지 않았을 경우의 비교를 통해 확인할 수 있었다. 실제 이동로봇과 동적 장애물이 존재하는 실험환경을 구성하고 제시한 알고리즘의 유용성을 두 가지 형태의 이동 장애물이 존재하는 상황에서 실험을 통해 검증했다. 즉, 이동 장애물과의 수직 방향의 충돌벡터를 활용하여 충돌회피를 위한 속도 및 회전속도와 같은 새로운 행동계획을 수립하므로 기존의 PFM 보다 동적 장애물 회피에 보다 효율적이라는 것을 실험을 통해 확인하였다.

## 참고문헌

- [1] H. P. Moravec and A. Elfes, "High resolution maps from wide angle sonar," *IEEE Conf. on Robotics and Automation*, Washington D.C., pp. 116-121, 1985.
- [2] O. Khatib, "Real-time obstacle avoidance for robot manipulator and mobile robots," *The International Journal of Robotics Research*, vol. 5, no. 1, pp. 90-98, 1986.
- [3] J. Borenstein and Y. Koren, "Real-time obstacle avoidance for fast mobile robots," *IEEE Trans. on System, Man and Cybernetics*, vol. 19, no. 5, pp. 1179-1187, 1989.
- [4] J. Borenstein and Y. Koren, "Histogramic in-motion mapping for mobile robot obstacle avoidance," *IEEE Trans. on Robotics and Automation*, vol. 7, pp. 535-539, Aug. 1991.
- [5] 고낙용, "관측 시간 개념을 이용한 로봇 매니플레이터의 시변 장애물 회피 동작 계획," 서울대학교 박사학위 논문, 1993.
- [6] N. Hogan, "Impedance control: An approach to manipulation," *IEEE J. Dynamic Systems, Measurement, & Control*, pp. 1-23, 1985.
- [7] Y. Zhao and S. L. BeMent, "Kinematics, dynamics and control of wheeled mobile robots," *IEEE Conf. Robotics and Automation*, pp. 91-96, 1992.
- [8] S. H. Lee, S. Y. Yi, J. O. Park, and C. W. Lee, "Reference adaptive impedance control and its application to obstacle avoidance trajectory planning," *Proc. IEEE/RSJ Int. Workshop on Intel. Robotics and Systems*, vol. 2, pp. 1158-1162, 1997.
- [9] N. Hogan, "Impedance control : An approach to manipulation," *IEEE J. of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, pp. 1-23, 1985.
- [10] T. Arai, H. Ogata, and T. Suzuki, "Collision avoidance among multiple robots using virtual impedance," *Proc. of IEEE/RSJ Int. Workshop on Intelligent Robots and Systems*, pp. 479-485, Sept. 1989.
- [11] J. Ota, T. Arai, E. Yoshida, D. Kurabayashi, and T. Mori, "Real time planning method for multiple mobile robots," *Proc. of IEEE Int. Symposium on, Assembly and Task Planning*, pp. 406-411, 1995.
- [12] Y. Zhao and S. L. BeMent, "Kinematics, dynamics and control of wheeled mobile robots," *Proc. of IEEE Conf. Robotics and Automation*, pp. 91-96, May. 1992.
- [13] D. K. Roh, I. M. Kim, B. H. Kim, and J. M. Lee, "Localization of a mobile robot using the information of a moving object," *J. of Control, Automation and Systems Engineering*, vol. 7, no. 11, Nov. 2001.
- [14] S. K. An, S. J. Han, H. R. Hur, and J. M. Lee, "Implementation of a remote peg-in-hole operation using a two degrees of freedom force-reflective joystick," *J. of Electrical Engineering and Information Science*, vol. 4, no. 3, pp. 315-322, Jun.. 1999.



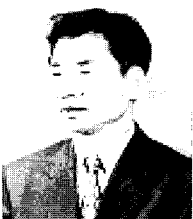
서 대 군

2006년 동서대학교 전자공학과 졸업.  
2006년~현재 부산대학교 대학원 석사 과정 재학중. 관심분야는 지능로봇제어, Localization, 센서네트워크.



류 은 태

2004년 부경대학교 전자정보통신공학과 졸업. 2005년~현재 부산대학교 대학원 석사 과정 재학중. 관심분야는 지능로봇제어, RFID, 센서네트워크.



이 장 명

1980년 서울대학교 전자공학과 졸업.  
1982년 동 대학원 석사. 1990년 USC(미국 남가주대학교) 공학박사. 1992년~현재 부산대학교 전자전기통신공학부교수. 관심분야는 지능로봇제어, 마이크로 프로세서 응용시스템 설계, USN System.