

# 이동 로봇의 지역 장애물 회피를 위한 새로운 방법 A New Method for Local Obstacle Avoidance of a Mobile Robot

°김 성 철\*, 고 낙 용\*, 김 재 열\*\*

\*조선대학교 공과대학 제어계측공학과

\*\*조선대학교 공과대학 정밀기계공학과

## ABSTRACT

This paper presents a new solution approach to moving obstacle avoidance problem for a mobile robot. A new concept avoidability measure(AVM) is defined to describe the state of a pair of a robot and an obstacle regarding the collision between them. As an AVM, virtual distance function(VDF) is derived as a function of the distance from the obstacle to the robot and outward speed of the obstacle relative to the robot. By keeping the virtual distance above some positive limit value, the robot avoids the obstacle. In terms of the VDF, an artificial potential field is constructed to repel the robot away from the obstacle and to attract the robot toward a goal location. At every sampling time, the artificial potential field is updated and the force driving the robot is derived from the gradient of the artificial potential field. The suggested algorithm drives the robot to avoid moving obstacles in real time. Since the algorithm considers the mobility of the obstacle as well as the distance, it is effective for moving obstacle avoidance. Some simulation studies show the effectiveness of the proposed approach.

## 1. 서론

이동 로봇의 장애물 회피 문제는 이동 로봇이 장애물과 충돌하지 않으면서 주어진 시작점에서 목표점까지 이동하도록 동작 계획하는 문제이다. 로봇은 주어진 작업을 수행하면서 다른 로봇, 작업 대상물, 작업자 등이 장애물들과 충돌하지 않아야 한다. 시간에 따라 위치와 형상이 변화하는 시변 장애물에 대한 실시간(real-time) 충돌 회피의 문제가 대두되고 있으며, 본 논문에서는 장애물의 운동성을 반영하여 실시간 장애물 회피 문제를 다룬다.

장애물의 운동성을 다루기 위한 방법의 하나는 장애물 운동을 확률적으로 모델링하는 것이다[1]. 이동 장애물의 동작에 대한 표현과 예측을 위해 숨겨진 마코프 모델(Hidden Markov model)을 이용한 확률론적 충돌 회피 동작 제어 알고리즘이 제안되었으며[2], 로봇 경로상의 장애

물을 포아송 분포(Poisson distribution)로 모델링하고 이를 피하기 위한 로봇의 동작 계획 방법이 제안되었다[3]. 장애물의 이동성을 표현하기 위한 다른 방법은 공간-시간 공간(space-time space)을 이용하는 것이다[4,5]. 이 방법에서는 로봇의 형상 공간(configuration space)에 시간 차원을 추가하여 공간-시간 공간을 구성하면 시변 장애물이 고정 장애물로 표현되므로 이를 피하기 위한 로봇의 경로를 선택하면 충돌 회피가 가능하다. 그러나 시변하는 장애물에 대한 정보를 로봇 동작 계획전에 알고 있어야 하는 단점이 있다. Borenstein과 Korem은 장애물의 감지에 초음파 센서를 사용하기 위해 인공 전위계 방법을 응용한 가상 역장(VFF : Virtual Force Field)[6]과, 벡터장 히스토그램(VFH : Vector Field Histogram)[7] 방법을 제안하였으나 시변 장애물의 회피에 적합하지 못하다.

본 연구에서는 실시간 이동 장애물 회피를 위하여 새로운 개념인 충돌 회피 가능도(AVM : Avoidability Measure)와 가상 거리 함수(VDF : Virtual Distance Function) 개념을 도입한다. 충돌 회피 가능도는 로봇이 장애물을 회피할 수 있는 가능성의 크기를 나타낸다. 충돌 회피 가능도의 하나로서 가상 거리 함수를 도입하며 매 샘플링 시각마다 가상 거리 함수의 향으로 인공 전위계를 구성하고, 로봇은 인공 전위계로부터 얻어지는 척력과 인력에 의해서 운동한다. 제안한 알고리즘은 로봇이 실시간에 장애물을 회피할 수 있게 하며, 장애물의 이동성을 고려하였으므로 기존의 방법들과는 달리 이동 장애물 회피에 적합한 방법이다.

본 논문은 2장에서 이동 로봇의 장애물 회피 문제를 구성하고, 3장에서 충돌 회피 가능도와 가상 거리 함수를 정의한다. 4장에서는 가상 거리 함수에 근거한 인공 전위계 방법을 이용하여 충돌 회피 동작 계획 방법을 제시하고, 5장에서는 제안한 방법을 컴퓨터 모의실험을 통해 그 효용성을 보이며, 6장에서 결론을 내린다.

## 2. 이동 장애물 회피 문제의 구성

로봇의 이동 장애물 회피 문제의 해결을 위해 다음과

같은 표기법을 사용한다.

$P = (x, y)$	2차원 평면에서의 한 점의 위치
$P_r(t) = (x_r(t), y_r(t))$	시간 $t$ 에서의 로봇의 위치
$m$	로봇의 질량
$P_o(t) = (x_o(t), y_o(t))$	시간 $t$ 에서의 장애물 중심의 위치
$r_o$	장애물의 반지름
$P_{r,s} = (x_{r,s}, y_{r,s})$	로봇 운동의 시작점
$P_{r,g} = (x_{r,g}, y_{r,g})$	로봇 운동의 목표점
$t_i$	$i$ 번째 샘플링 시각

이상의 표기법에 의해서 로봇의 이동 장애물 회피 문제가 다음과 같이 수학적으로 구성된다,

### [이동 장애물 회피 문제]

2차원 평면에서 장애물의 위치  $P_o(t_i)$ 와 속도  $\dot{P}_o(t_i)$ 가 매 샘플링 시각  $t_i$  ( $i=0, 1, 2, \dots$ )마다 주어질 때, 로봇이 이를 피하며 주어진 시작점  $P_{r,s}$ 에서 목표점  $P_{r,g}$ 까지 이동하도록 동작 계획한다. 여기에서 로봇은 점 로봇(point robot), 장애물은 반지름이  $r_o$ 인 원으로 가정한다.

### 3. 충돌 회피 가능성도와 가상 거리 함수

고정 장애물의 회피를 위해서는 로봇과 장애물의 위치, 그리고 그들 사이의 거리만을 고려하면 되지만, 이동 장애물 회피에서는 로봇에 대한 장애물의 운동성이 충돌 회피 동작에 큰 영향을 미친다. 장애물의 운동성을 고려하기 위해 충돌 회피 가능성을 정의한다.

#### 3.1 충돌 회피 가능성도

로봇과 장애물의 충돌은 그들 사이의 거리에 의해서 표현할 수 있다. 로봇에 대한 장애물의 거리 및 외향 속도는 로봇과 장애물의 향후 충돌 가능성을 예측할 수 있게한다. 즉, 거리 및 외향 속도가 충돌 회피 가능성을 결정한다. 충돌 회피 가능성도(AVM : Avoidability Measure)는 다음과 같은 두 개의 변수를 가진 함수로 정의한다.

[정의] : 시간  $t$ 에서 충돌 회피 가능성도는 거리  $d_{o,r}(t)$ , 외향 속도  $v_{o,r}(t)$ 의 함수이며, 다음의 조건을 만족한다.

(조건 1) 거리  $d_{o,r}(t)$ 가 클수록 충돌 회피 가능성도는 크다.

(조건 2) 외향 속도  $v_{o,r}(t)$ 가 클수록 충돌 회피 가능성도는 크다

여기서, 로봇과 장애물 사이의 거리  $d_{o,r}(t)$ 과 로봇에 대한 장애물의 외향 속도  $v_{o,r}(t)$ 는

$$d_{o,r}(t) = \| P_o(t) - P_r(t) \| - r_o \quad (1)$$

$$v_{o,r}(t) = \dot{P}_o(t) \cdot \frac{P_o(t) - P_r(t)}{\| P_o(t) - P_r(t) \|} \quad (2)$$

과 같이 정의되고, 여기서  $v_{o,r}(t)$ 는 장애물 속력을 로봇에서 장애물 방향으로의 단위 벡터와 내적한 값이다. 이

값이 양수이면 장애물이 로봇에서 멀어지는 경우이고, 음수이면 장애물이 로봇을 향해서 이동하는 경우이다. 그리고 장애물이 로봇에서 빠른 속도로 멀어질수록 커지고, 장애물이 로봇에 빨리 다가갈수록 작아진다. 충돌 회피 가능도의 향에서 장애물 회피 문제는 충돌 회피 가능성을 회피가 보장되는 최소값 이상으로 유지하도록 동작 계획한다. 이러한 충돌 회피 가능도의 하나로서 가상 거리 함수를 이용한다.

#### 3.2 가상 거리 함수

앞절의 정의에서와 같이 충돌 회피 가능도의 조건을 만족시키는 함수의 값은 매우 많다. 수치적인 방법을 이용하여 로봇의 구동력을 구하기 위해 충돌 회피 가능도의 하나로서 제안하는 가상 거리 함수는

$$vd_{o,r}(d_{o,r}(t), v_{o,r}(t)) = \frac{\alpha}{\beta - v_{o,r}(t)} \cdot d_{o,r}(t) \quad (3)$$

과 같으며, 여기서

$$\alpha > 0, \beta > \max\{v_{o,r}(t)\} > 0 \quad (\alpha, \beta \in \mathbb{R}) \quad (4)$$

이다. 지금부터는 편의상  $vd_{o,r}(d_{o,r}(t), v_{o,r}(t))$ 는  $vd_{o,r}(t)$ 로 표기한다.  $d_{o,r}(t)$ 나  $v_{o,r}(t)$ 가 증가하면  $vd_{o,r}(t)$ 가 증가한다. 그러므로 이 함수는 충돌 회피 가능도의 조건을 만족한다.  $vd_{o,r}(t)$ 가 일정한 값 이하가 되었을 때부터 로봇이 장애물 회피 동작을 시작한다고 가정한다.

식 (3)에서  $\beta$ 가 증가하면  $v_{o,r}(t)$ 의 변화에 따른  $vd_{o,r}(t)$ 의 변화가 작아진다. 즉, 로봇과 장애물 사이의 거리 변화가 장애물의 외향 속도의 변화보다 가상 거리에 더 큰 영향을 미치게 된다. 반면에  $\beta$ 가 작아지면 로봇의 경로와 제적은 장애물의 운동에 대하여 너무 민감하게 변화하게 된다.  $\alpha$ 는 가상 거리  $vd_{o,r}(t)$ 을 비례 확대하거나 축소한다. 만일  $v_{o,r}(t)=0$ 이면, 즉 장애물의 직선

$P_o(t) P_r(t)$  방향의 속도 성분이 0이면  $vd_{o,r}(t) = (\alpha/\beta)d_{o,r}(t)$ 가 되어 장애물은 운동을 하지 않고 있거나 또는 고정 장애물이다. 이러한 경우에  $vd_{o,r}(t)$ 는 실제 거리  $d_{o,r}(t)$ 에 비례한 값을 가지며, 그 비례 상수는  $\alpha/\beta$ 가 된다.  $vd_{o,r}(t)$ 가 일정한 값 이하가 되었을 때부터 로봇이 장애물 회피 동작을 시작하므로,  $\alpha < \beta$ 이면 로봇은 장애물로부터 먼 거리에 떨어져 있을 때부터 회피 동작을 시작하게 되며,  $\alpha > \beta$ 이면 로봇은 장애물과 근접한 거리에서 충돌 회피 동작을 시작한다. 그러므로  $\alpha$ 와  $\beta$ 는 이 상에서 고찰한 사항들을 고려하여 적절한 값으로 선정되어야한다.

$\alpha$ 와  $\beta$ 가 위의 (4)의 조건을 만족시키는 경우,  $vd_{o,r}(t) > 0$ 이면  $d_{o,r}(t) > 0$ 가 된다. 따라서 충돌 회피를 조건은

$$vd_{o,r}(t) > 0, \quad t \geq t_0 \quad (5)$$

과 같이 된다. 이동 장애물 회피 동작 계획 문제는 (5)의 조건을 만족시키도록  $P_{r,s}$ 에서  $P_{r,g}$ 까지 로봇의 경로  $P_r(t)$ 를 결정하고 제어하는 문제가 된다.

#### 4. 이동 장애물 회피 방법

가상 거리를 여유값 이상으로 유지하도록 하여 로봇과 이동 장애물 사이의 충돌을 회피하기 위해서 본 연구에서는 인공 전위계를 이용하였다.

##### 4.1 가상 거리에 의한 인공 전위계

인공 전위계는 장애물은 로봇에 대하여 척력을 발생하고 목표점은 로봇에 대하여 인력을 발생하는 가상의 역장(virtual force field)[8-11]이며, 로봇을 이 역장에서 발생하는 힘에 따라 이동하게 하여 장애물과의 충돌을 피하게 한다. 제안된 많은 인공 전위계 함수 중, 본 논문에서는 Khatib[8]가 제안한 인공 전위계 함수를 적용한다. Khatib가 제안한 전위계는 장애물의 운동성이 고려되지 않았으므로 본 연구에서는 가상 거리 함수를 도입하여 이동 장애물 회피에 적용할 수 있도록 개선한다. 한 지점  $P$ 에서 전위계 값  $U_{art}(P, P_o(t), P_{r,g})$ 는 다음과 같다.

$$U_{art}(P, P_o(t), P_{r,g}) = U_o(P, P_o(t)) + U_g(P, P_{r,g}) \quad (6)$$

여기서

$$U_o(P, P_o(t)) = \begin{cases} \frac{1}{2} \eta \left( \frac{1}{vd_{o,r}(t)} - \frac{1}{\epsilon_{wd}} \right)^2, & \text{if } vd_{o,r}(t) \leq \epsilon_{wd} \\ 0, & \text{if } vd_{o,r}(t) > \epsilon_{wd}, (\epsilon_{wd} > 0) \end{cases} \quad (7)$$

이고,

$$U_g(P, P_{r,g}) = \frac{1}{2} \zeta \| P - P_{r,g} \|^2 \quad (8)$$

$U_o(P, P_o(t))$ 는  $P_o(t)$ 에 위치한 로봇을 장애물로부터 밀어내는 척력을 발생시키는 인공 전위계이고,  $U_g(P, P_{r,g})$ 는  $P_{r,g}(t)$ 에 위치한 로봇을 목표점으로 끌어들이는 인력을 발생시키는 인공 전위계이다. 식 (7)에서  $\epsilon_{wd}$ 는 전위계 영향력 한계 가상 거리이고,  $vd_{o,r}(t)$ 는 2차원 평면  $P$ 에서  $P_o(t)$ 까지의 가상 거리이다.  $\epsilon_{wd}$ 가 클수록  $U_o(P, P_o(t))$ 가 더 넓은 영역에 영향을 미치게 되어, 로봇이 장애물로부터 더 먼 거리에서부터 장애물 회피 동작을 시작한다.  $\eta$ 와  $\zeta$ 는 각각 척력과 인력을 발생시키는 전위계의 계수이다.

전위계로부터 로봇에 가해지는 구동력은

$$\begin{aligned} F_{art}(P, P_o(t), P_{r,g}) &= -\nabla U_{art}(P, P_o(t), P_{r,g}) \\ &= -\nabla U_o(P, P_o(t)) - \nabla U_g(P, P_{r,g}(t)) \\ &= F_o(P, P_o(t)) + F(P, P_{r,g}(t)) \end{aligned} \quad (9)$$

이후로  $F_{art}(P, P_o(t), P_{r,g}(t))$ 는  $F_{art}(P)$ 로 간략하게 표기한다. 척력  $F_o(P, P_o(t))$ 는 로봇이 장애물에 접근할수록 커지고, 목표점으로의 인력  $F(P, P_{r,g}(t))$ 는 로봇이 목표점에 접근할수록 작아진다. 따라서 로봇의 위치  $P_r(t)$ 에서 발생하는 힘  $F_{art}(P_r(t))$ 는 로봇이 장애물을 피해가면서 목표점까지 이동하도록 한다.  $F_{art}(P_r(t))$ 는 로봇의 운동 능력을 초과하는 힘이 될 수도 있으므로 이러한 경우에는  $F_{art}(P_r(t))$ 를 비례 축소한다.

##### 4.2 이동 장애물 회피 알고리즘

매 샘플링 시각  $t_i$  마다 얻어진 장애물의 위치와 속도 정보로부터 인공 전위계가 구성되며, 식(6-9)의 과정을 거쳐 얻어진 로봇의 구동력  $F_{art}(P_r(t_i))$ 은 로봇에 입력되고, 다음의 로봇 구동력은 다음 샘플링 시각  $t_{i+1}$ 에서 얻어진다.  $t_i$ 에서  $t_{i+1}$ 까지  $i$ 번째 샘플링 주기동안 로봇은  $t_i$ 에서의 인공전위계에 의한 힘  $F_{art}(P_r(t_i))$  뿐만 아니라 관성력의 영향하에서 운동하게된다. 또한 로봇의 동작은 운동 가속도  $\|\ddot{P}_r(t)\|$ 의 제한과 운동 속도  $\|\dot{P}_r(t)\|$ 의 제한과 같은 구동력의 물리적 제한 조건의 영향을 받는다. 관성력, 가속도 및 속도 제한을 고려하여 인공 전위계에 의한 힘  $F_{art}(P_r(t_i))$ 로부터 로봇의 구동력을 구하는 과정은 다음과 같다.

관성력  $m\|\ddot{P}_r(t)\|$ 와 인공 전위계에 의한 힘  $F_{art}(P_r(t_i))$ 를 합성한 합성력  $F_{comb}(t)$ 는 식 (10)과 같으며,  $F_{comb}(t)$ 에 의한 가속도는 식 (11)과 같다.

$$F_{comb}(t) = m \ddot{P}_r(t_i) + F_{art}(P_r(t_i)), t \in (t_i, t_{i+1}] \quad (10)$$

$$\begin{aligned} \ddot{P}_r(t) &= \frac{F_{comb}(t)}{m} \\ &= \ddot{P}_r(t_i) + \frac{F_{art}(P_r(t_i))}{m}, t \in (t_i, t_{i+1}] \end{aligned} \quad (11)$$

가속도의 제한을  $a_{r,max}$ 라 한다면  $\ddot{P}_r(t)$ 는 다음 부등식 (12)을 만족해야한다. 가속도 제한에 관한 부등식 (12)을 만족시키기 위해  $F_{art}(P_r(t_i))$ 는 다음 식 (13)의  $F_{acc}(P_r(t_i))$ 와 같이 되어야 한다.

$$\| \ddot{P}_r(t) \| = \left\| \ddot{P}_r(t_i) + \frac{F_{art}(P_r(t_i))}{m} \right\| \leq a_{r,max}, t \in (t_i, t_{i+1}] \quad (12)$$

$$\begin{aligned} F_{acc}(P_r(t_i)) &= \max \left\{ k \cdot F_{art}(P_r(t_i)) \mid 0 \leq k \leq 1, \right. \\ &\left. \left\| \ddot{P}_r(t_i) + \frac{k \cdot F_{art}(P_r(t_i))}{m} \right\| \leq a_{r,max} \right\}, t \in (t_i, t_{i+1}] \end{aligned} \quad (13)$$

식 (13)에서,  $F_{art}(P_r(t_i))$ 는  $F_{comb}(t)$ 에 의한 가속도가 너무 커서 가속도 제한  $a_{r,max}$ 를 만족하지 못할 경우 비례 상수  $k$ 를 갖는  $F_{acc}(P_r(t_i))$ 로 비례 축소된 값이다. 위의  $F_{acc}(P_r(t_i))$ 에 의해 로봇은 다음 식 (14)의 속력으로 운동한다.

$$\dot{P}_r(t) = \dot{P}_r(t_i) + (t - t_i) \cdot a_{acc}(t_i), \quad t \in (t_i, t_{i+1}] \quad (14)$$

여기서

$$a_{acc}(t_i) = \frac{\ddot{P}_r(t_i) + \frac{F_{acc}(P_r(t_i))}{m}}{m} \quad (15)$$

이다. 이제 속도 제한  $v_{r,max}$ 를 두면  $\dot{P}_r(t)$ 는 부등식 (16)을 만족하도록 조절되어진다.

$$\begin{aligned} \|\dot{P}_r(t)\| &= \\ \|\dot{P}_r(t_i) + (t - t_i) \cdot a_{acc}(t_i)\| &\leq v_{r,max}, \quad t \in (t_i, t_{i+1}] \end{aligned} \quad (16)$$

따라서, 만일 시각  $t \geq t_v$  ( $t_v \in (t_i, t_{i+1}]$ )에서  $\|\dot{P}_r(t)\| > v_{r,max}$ 라면,  $\dot{P}_r(t)$ 는 시각  $t_v \in (t_i, t_{i+1}]$ 에 대하여 식 (17)과 같이  $\dot{P}_r(t_v)$ 로 제한되어져야 한다.

$$\dot{P}_r(t) = \begin{cases} (\dot{x}_r(t), \dot{y}_r(t)) \\ \dot{P}_r(t_i) + (t - t_i) \cdot a_{acc}(t_i), & t_i < t < t_v \\ \dot{P}_r(t_i) + (t_v - t_i) \cdot a_{acc}(t_i), & t_v < t < t_{i+1} \end{cases} \quad (17)$$

여기서,  $t_i$ 는

$$\|\dot{P}_r(t_i) + (t_v - t_i) \cdot a_{acc}(t_i)\| = v_{r,max} \quad (18)$$

를 만족한다. 따라서, 가속도 제한을 위한 식 (14)와 속도 제한을 위한 (18)을 동시에 만족시키는 로봇의 가속도  $a_{drive}(t)$ 는 다음 식 (19)와 같이 구해진다.

$$a_{drive}(t) = \begin{cases} a_{acc}(t_i), & t_i < t \leq t_v \\ 0, & t_v < t \leq t_{i+1} \end{cases} \quad (19)$$

여기서,  $\|\dot{P}_r(t_i) + (t_v - t_i) \cdot a_{acc}(t_i)\| = v_{r,max}$ 이다. 결과적으로 로봇의 구동력  $F_{drive}(t)$ 는 식 (19)의 가속도에 의해서 식 (20)과 같이 결정된다.

$$F_{drive}(t) = \begin{cases} F_{acc}(t), & t_i < t \leq t_v \\ -m \ddot{P}_r(t_i), & t_v < t \leq t_{i+1} \end{cases} \quad (20)$$

여기서,  $\|\dot{P}_r(t_i) + (t_v - t_i) \cdot a_{acc}(t_i)\| = v_{r,max}$ 이다. 로봇은 식 (20)의 구동력에 의해  $t = t_{i+1}$ 에서 식 (21)과 같은  $P_r(t_{i+1})$ 의 위치에 도달한다.

$$\begin{aligned} P_r(t_{i+1}) &= (x_r(t_{i+1}), y_r(t_{i+1})) \\ &= (x_r(t_i) + \int_{t=t_i}^{t=t_{i+1}} \dot{x}_r(\tau) d\tau, \\ &\quad y_r(t_i) + \int_{t=t_i}^{t=t_{i+1}} \dot{y}_r(\tau) d\tau) \end{aligned} \quad (21)$$

시각  $t = t_{i+1}$ 에 로봇이 목표점에 도달하였는지의 여부는 다음 식 (22)에 의하여 결정한다.

$$\begin{aligned} \|P_r(t_k) - P_{r,g}\| &\leq \epsilon_d, \\ \text{for all } k &= (i+1) - N, \dots, i, i+1 \end{aligned} \quad (22)$$

이 부등식 (22)가 만족되면 (N+1)회 이상 로봇이 목표점으로부터  $\epsilon_d$  이내의 거리를 유지하는 결과가 되므로, 로봇이 목표점에 도달한 것으로 간주한다. Fig. 1에 알고리즘의 흐름도를 표현하였다.

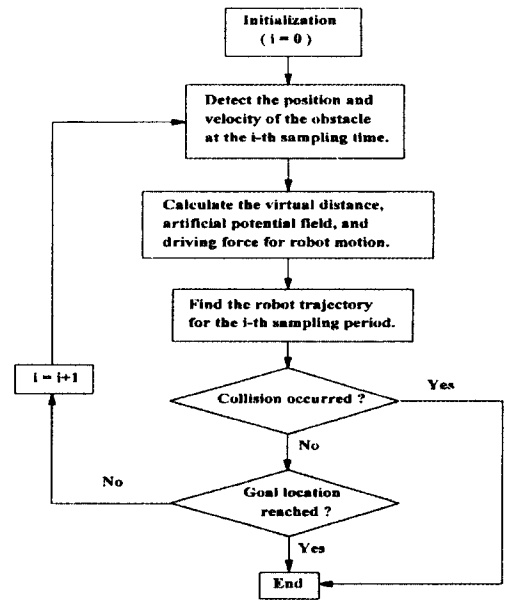


Fig. 1. Algorithm for moving obstacle avoidance

## 5. 시뮬레이션 및 토의

제안된 방법을 3개의 이동 장애물에 공존하는 환경에서 변수  $\alpha$ 와  $\beta$ 를 세 가지로 변화시켜 충돌 회피 동작을 계획하고 로봇의 충돌 회피 궤적을 비교한다.

### 5.1 시뮬레이션 조건

본 모의실험에서는 장애물이 이동 속도가 시간에 따라 변화하면서 정해지지 않은 경로를 따라 이동하도록 설정했다. 장애물의 동작 조건은 모든 경우에서 동일하며  $\eta$ ,  $\zeta$ 와  $\epsilon_{vd}$  값도 동일하다. 단, 파라미터  $\alpha$ 와  $\beta$  값은

Table 1과 같이 선정하였다.

$$P_{r,s} = (10, 80)[\text{cm}] \quad P_{r,g} = (180, 70)[\text{cm}],$$

$$m = 0.1 \text{ Kg}, \quad r_o = 2 \text{ cm}, \quad \alpha_{r,\text{max}} = 500\text{cm/sec}^2,$$

$$\Delta t_i = 0.1 \text{ sec} \quad (i=0, 1, \dots)$$

$$\eta = 10^4, \quad \zeta = 2, \quad \varepsilon_{vd} = 40\text{cm}$$

Table 1 Parameter values changed in the cases 1 through 3.

parameter	$\alpha$	$\beta$
경우 1	90.0	90.0
경우 2	500.0	90.0
경우 3	90.0	150.0

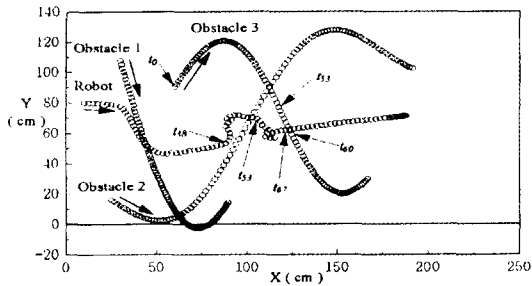


Fig. 1 Collision avoidance motion for the case 1

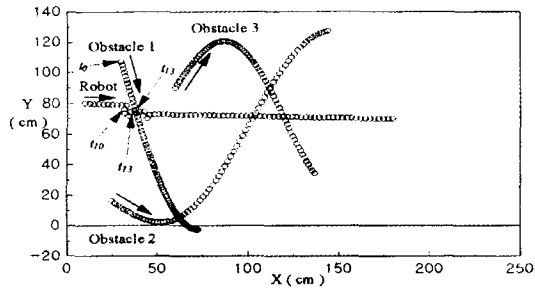


Fig. 2 Collision avoidance motion for the case 2

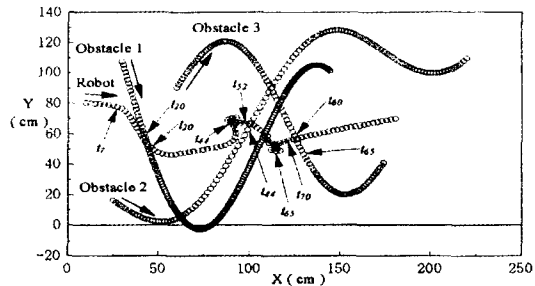


Fig. 3 Collision avoidance motion for the case 3

## 5. 2 시뮬레이션 결과

Fig. 2~5에서 보는바와 같이 로봇은 시간에 따라 속

도가 변화하는 세 개의 장애물을 회피한다. 경우 1에서는 파라미터  $\alpha$ 가 90부터 500까지 증가함에 따라 가상 거리는 약 500/90의 비율로 실제 거리 보다 길어진다. 따라서 로봇은 장애물과 아주 가까운 위치까지 이동하더라도 회피 동작을 시작하지 않는다. Fig. 3에서 로봇은 장애물 1과  $t=t_{14}$ 에서 충돌한다.  $\beta$ 가 90에서 150까지 증가함에 따라 가상 거리는 약 90/150의 비율로 실제 거리 보다 짧아진다. 따라서 로봇은 장애물로부터 멀리 떨어진 위치에서부터 회피 동작을 시작한다.

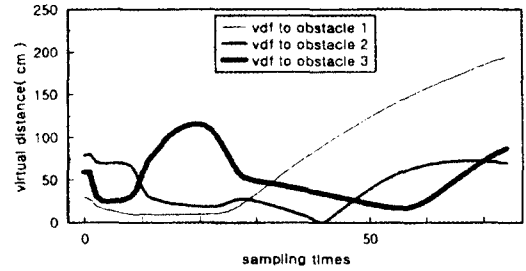


Fig. 4 Virtual distances for the case 1

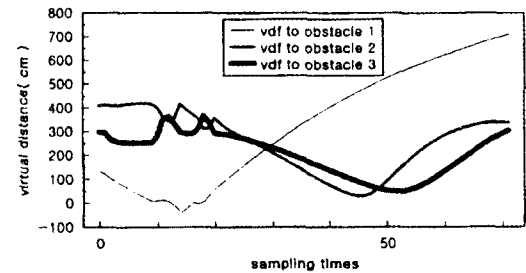


Fig. 5 Virtual distances for the case 2

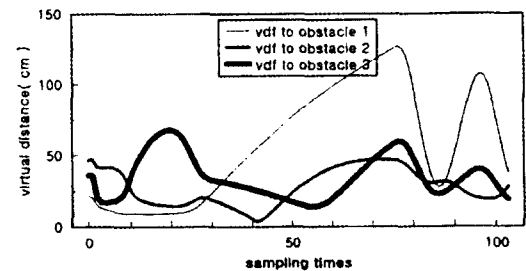


Fig. 6 Virtual distances for the case 3

Fig. 4에서 보듯이 로봇은  $t=t_8$ 부터 장애물 1에 대한 회피 동작을 시작한다. 또한 로봇의 궤적은 경우 1에서보다 신속하게 변화한다. 식 (7)에서와 같이 가상 거리는 인공 전위계 함수에서 거리 값으로 사용된다. 그러므로 로봇의 궤적은 장애물과의 실제 거리를 대신하는 가상

거리의 변화에 반응하여 변화한다.

Fig. 4~6는 각각 경우 1 부터 3에서의 가상 거리의 변화를 나타낸다. 경우 2에서는 로봇과 장애물 1의 가상 거리가 14번째 샘플링 시각부터 음수로 변화하여 장애물 1과 충돌하게 된다. 경우 1에서는 장애물 1이 로봇에 접근함에 따라 실제 거리는 0보다 크지만, 가상 거리가 0에 근접한 수치까지 변화하기 때문에 로봇은 충돌을 방지하기 위해 제적을 변경한다. 경우 1의  $\alpha$ 와  $\beta$ 는 가상 거리가 장애물의 운동성을 반영하도록 적절한 값으로 선정된 경우이다.

로봇의 충돌 회피 동작 계획을 위해서는  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ ,  $\zeta$ , 그리고  $\epsilon_{vd}$  값을 3.2절과 4.1절에서의 설명 및 경우 1에서 4가지의 결과를 고려하여 적절하게 선정하여야 한다. 로봇과 장애물의 각각 다른 상황에 따라 변수들의 값도 달라야 하며, 이 값의 선택은 몇 차례의 시행착오를 거친다. 인공 전위계 방법을 이용하는 경우, 로봇이 인공 전위계의 부분 최소점으로 인해 좁은 통로에서 진동하거나 목표점을 찾지 못하는 문제가 발생되지만, 이동 장애물 회피의 경우 로봇과 장애물이 이동하기 때문에 시간이 경과함에 따라 부분 최소점이 소멸하여 이로 인한 문제 발생 빈도가 적어진다.

## 6. 결론

본 연구에서는 로봇이 실시간에 이동 장애물을 피하기 위한 새로운 방법을 제안하였다. 충돌의 관점에서의 로봇과 장애물의 상태를 묘사한 충돌 회피 가능성으로서 가상 거리 함수를 유도하였으며, 이 값을 변수로 하여 구성된 인공 전위계로부터 충돌 회피를 위한 로봇의 구동력을 구하였다. 본 연구에서 제안한 방법을 실시간에 적용하기 위해서는 매 샘플링 시각마다 장애물의 위치 및 속도의 검출이 필요하다[12]. 로봇과 장애물의 위치와 속도를 검출하기 어렵거나 많은 시간이 소요되는 경우에는 적용하기 어렵다. 따라서 로봇의 작업 영역이 넓지 않아서 카메라에 의한 영상 신호를 분석하여 로봇과 장애물들의 위치와 속도를 알아낼 수 있는 경우에 적용이 가능하다[13]. 또한 여러대의 이동 로봇이 공동 작업 영역에서 이동하는 경우, 각각의 로봇들은 자신의 위치와 속도 정보를 다른 로봇에 전달할 수 있으므로, 이 경우 제안된 방법은 여러대 로봇의 무충돌 동작 조정에 이용될 수 있다[14,15].

충돌 회피 가능성과 가상 거리 함수는 로봇과 장애물의 운동성을 변수로 하여 결정되었으므로, 제안된 방법은 이동 장애물 회피에 적합하다. 모의실험을 통하여 한 개 뿐 아니라 여러개의 이동 장애물이 있는 경우에도 적용됨을 보였다. 제안한 방법을 다양한 경로와 제적을 갖는 여러대의 이동 장애물이 존재하는 환경 하에서 실제 로봇의 동작 계획에 적용하는 연구가 필요하다.

## 참 고 문 헌

- [1] N. C. Griswold and J. Eem, "Control for mobile robots in the presence of moving objects," IEEE Trans. on Robotics and Automation, vol. 6, no. 2, pp. 263-268, April, 1990.
- [2] Q. Zhu, "Hidden markov model for dynamic obstacle avoidance of mobile robot navigation," IEEE Trans. on Robotics and Automation, vol. 7, no. 3, pp 30-397, June, 1991.
- [3] R. Sharma, "Locally efficient path planning in an uncertain, dynamic environment using a probabilistic model," IEEE Trans. on Robotics and Automation, vol. 8, no. 1, pp. 105-110, Feb. 1992.
- [4] K. Fujimura and J. Samet, "A hierarchical strategy for path planning among moving obstacles," IEEE Trans. on Robotics and Automation, vol. 8, no. 1, pp. 61-69, Feb. 1989.
- [5] C. L. Shin, T. T. Lee and W. A. Gruver, "A unified approach for robot motion planning with moving polyhedral obstacles," IEEE Trans. Syst., Man, Cybern., vol. 20, no. 4, pp. 903-915, July/Aug., 1990.
- [6] J. Borenstein and Y. Koren, "Real-time obstacle avoidance for fast mobile robots," IEEE Trans. Syst., Man, Cybern., vol. 19, no. 5, pp. 1179-1187.
- [7] J. Borenstein and Y. Koren, "The vector field histogram-fast obstacle avoidance for mobile robots," IEEE Trans. Robotics and Automation, vol. 7, no. 3, pp. 278-288, 1991.
- [8] O. Khatib, "Real-time obstacle avoidance for manipulators and mobile robots," The Int. J. Robotics Research, vol. 5, no. 1, Spring, 1986.
- [9] B. H. Krogh, "A generalized potential field approach to obstacle avoidance control," SME Conf. Proc. Robotics Research : The Next Five Years and Beyond, 1984.
- [10] Y. K. Hwang and N. Ahuja, "A potential field approach to path planning," IEEE Trans. Robotics and Automation, vol. 8, no. 1, pp. 23-32, Feb., 1992.
- [11] E. Rimon and D. E. Koditschek, "Exact robot navigation using artificial potential functions," IEEE trans. on Robotics and Automation, vol. 8, no. 5, pp. 501-518, Oct., 1992.
- [12] T. Aoki, T. oka, T. Suzuki and S. Okima, "Acquisition of optimal action selection to avoid moving obstacles in autonomous mobile robot," Proc. 1996 IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp. 2055-2060, Minneapolis, Minnesota, April, 1996.
- [13] Kan-Han Tan and M. Anthony Lewis, "Virtual structures for high-precision cooperative mobile robot control," in Proc. 1996 Int. Conf. on Intelligence Robots and Systems, pp. 132-139, Osaka, Japan, Nov., 1996.
- [14] Y. Arai, S. Suzuki, S. Kotosaka, H. Asama, H. Kaetsu and I. Endo, "Collision avoidance among multiple autonomous mobile robots using LOCISS," Proc. 1996 IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp. 2091-2096, Minneapolis, Minnesota, April, 1996.
- [15] R. Kurazume, S. Hirose, S. Nagata and N. Sashida, "Study on cooperative positioning system," Proc. 1996 IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp. 1421-1426, Minneapolis, Minnesota, April, 1996.