

충돌 회피 가능도를 이용한 로봇의 이동 장애물 회피

Moving Obstacle Avoidance of a Robot Using Avoidability Measure

고 낙 용, 이 범 희
(Nak Yong Ko and Beom Hee Lee)

Abstract : This paper presents a new solution approach to moving obstacle avoidance problem of a 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 three state variables: the distance from the obstacle to the robot, outward speed of the obstacle relative to the robot, and outward speed of the robot relative to the obstacle. By keeping the virtual distance above some positive limit value, the robot avoids the obstacle. In terms of the VDF, an artificial potential 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 a moving obstacle in real time. Since the algorithm considers the mobility of the obstacle and robot as well as the distance, it is effective for moving obstacle avoidance. Some simulation studies show the effectiveness of the proposed approach.

Keywords : avoidability measure, virtual distance function, moving obstacle avoidance, artificial potential field

I. 서론

로봇의 이동 장애물 회피 문제는 로봇이 이동 장애물과 충돌하지 않으면서 주어진 시작점에서 목표점까지 이동하도록 동작 계획하는 문제이다. 로봇의 작업 공간 내에는 다른 로봇, 작업 대상물, 각종 기기, 그리고 작업자들이 위치해있다. 로봇은 주어진 작업을 수행하면서 이러한 장애물들과 충돌하지 않아야 한다. 이러한 장애물들은 그 위치와 형상이 고정되어 있는 고정 장애물, 시간에 따라 위치와 방향이 변화하는 이동 장애물, 그리고 위치와 방향뿐 아니라 형상이 변화하는 시변 장애물 (time-varying obstacle)[1]로 구분할 수 있다. 본 논문에서는 2차원 평면에서 이동 장애물의 위치와 속도 정보가 매 샘플링 시간(sampling time)마다 주어질 때 이동 로봇(mobile robot)이 이 장애물을 피하면서 시작점에서 목표점까지 이동하도록 동작 계획하는 로봇의 실시간 이동 장애물 회피 문제에 대한 해결 방법을 제시한다.

이러한 실시간 이동 장애물 회피 문제의 해결을 위한 가장 중요한 요소의 하나는 이동 장애물의 이동성을 동작 계획에 적절히 반영하기 위한 방법이다. 장애물의 이동성을 다루기 위한 방법의 하나는 장애물 운동을 확률적으로 모델링하는 것이다[2-4]. Griswold와 Eem은 장애물의 운동 속도와 방향을 랜덤 워크 프로세스(random walk process)로 모델링하고, 최적화 방법을 이용하여 장애물 회피를 위한 로봇의 가감속 방법을 제안하였다[2]. Zhu는 이동 장애물의 동작을 표현하고 예측하기 위해서 숨겨진 마코프 모델(hidden Markov model)을 이용하여, 확률론적인(stochastic) 충돌 회피 동작 제어 알고리즘을 제안하였다[3]. Sharma는 충돌 가능한 장애물이 로봇의 경로상에 나타나는 경우를 포아송 분포(Poisson distribution)로 모델링하여 이를 피하기 위한 로봇의 동작 계획 방법을 제안하였다[4].

장애물의 이동성을 표현하기 위한 다른 방법은 공간-시

간 공간(space-time space)을 이용하는 것이다[5-7]. 이 방법에서는 로봇의 형상 공간(configuration space)에 시간 차원을 추가하여 공간-시간 공간을 구성한다. 공간-시간 공간에서는 시변 장애물이 고정 장애물로 표현되므로, 이 고정 장애물을 피하기 위한 로봇의 경로만을 선택하면 시변 장애물을 피할 수 있게된다. 그러나 이 방법은 장애물의 시간에 따른 변화를 로봇 동작 계획 이전에 알고 있어야 하므로, 실시간 이동 장애물 회피에는 적합하지 않다.

이동 장애물 회피를 위해서 로봇의 경로를 고정시키고 속도를 조절하는 속도 조절에 의한 장애물 회피 방법[8-10]은 동작 계획상의 계산의 복잡성을 피할 수 있으나, 경로가 장애물의 운동에 무관하게 미리 결정되므로 속도 조절만으로 장애물을 피하지 못하는 경우도 발생한다. 로봇의 실시간 이동 장애물 회피를 위한 또 다른 방법은 인공 전위계를 이용한 방법이다[11-12]. Borenstein과 Koren은 장애물의 감지에 초음파 센서를 사용하기 위해 인공 전위계 방법을 응용한 가상 역장(VFF: Virtual Force Field)[11]과, 벡터장 히스토그램(VFF: Vector Field Histogram)[12] 방법을 제안하였다. 그런데 이 방법들은 장애물의 이동성에 대하여 고려하지 않아서 빠르게 움직이는 이동 장애물의 회피에는 적합하지 못하다.

본 연구에서는 실시간 이동 장애물 회피를 위하여 새로운 개념인 충돌 회피 가능도(AVM: Avoidability Measure)[1]와 가상 거리 함수(VDF: Virtual Distance Function) 개념을 도입한다. 충돌 회피 가능도는 로봇이 장애물을 회피할 수 있는 가능성의 크기를 나타낸다. 로봇이 이동 장애물로부터 멀리 떨어져 있을수록, 이동 장애물이 로봇으로부터 상대적으로 멀어지는 방향으로 운동할수록, 그리고 로봇이 장애물로부터 상대적으로 멀어지는 방향으로 운동할수록, 로봇이 장애물을 피할 수 있는 가능성이 커진다. 따라서 로봇과 장애물 사이의 거리, 장애물의 로봇에 대한 상대 속도, 그리고 로봇의 장애물에 대한 상대 속도를 변수로 하여 충돌 회피 가능도를 정의하고, 충돌 회피 가능도의 하나로서 가상 거리 함수를 도입한다. 로봇은 이동 장애물과의 가상 거리를 여유값 이상 유지하여 이동 장애물을 피한다.

접수일자 : 1995. 12. 27., 수정완료 : 1997. 1. 20.

고낙용 : 조선대학교 제어계측공학과

이범희 : 서울대학교 전기공학부, ERC-ACI, ASRI

* 이 논문은 1993년도 조선대학교 학술 연구비의 지원을 받아 연구되었음.

로봇과 장애물 사이의 가상 거리와 상대 위치에 따른 로봇의 회피 동작을 결정하기 위해 인공 전위계를 이용한다. 제안된 방법은 장애물의 이동성을 고려하였으므로 기존의 많은 방법들과 달리 로봇이 이동 장애물을 피하기에 적합한 방법이다. 그리고, 기존의 방법은 특정한 문제에만 적용 가능한 경우가 많았으나, 본 연구에서는 충돌 회피 가능성과 가상 거리 함수를 이용하여 좀더 분석적인 방법으로 일반적인 이동 장애물 회피 문제에 대한 해결 방법을 제시하였으므로, 이 방법을 적용할 수 있는 문제 범위가 넓어진다.

본 논문은 II장에서 로봇의 이동 장애물 회피 문제를 수학적으로 표현한다. 이 문제를 해결하기 위해 III장에서는 장애물과 로봇 사이의 거리와 상대 속도를 변수로 하는 충돌 회피 가능성을 정의하고, 충돌 회피 가능도의 하나로써 가상 거리 함수를 유도한다. IV장에서는 가상 거리를 주어진 여유 값 이상 유지하여 이동 장애물을 피하기 위한 방법으로서, 가상 거리를 변수로 하는 인공 전위계를 구성하여 로봇의 구동력을 구하는 방법을 제시한다. V장에서는 여러 가지 경우에 이 방법을 적용하여 로봇이 이동 장애물을 회피하는 모의 실험을 하고 그 결과에 대하여 검토한다. 마지막으로 VI 장에서 결론을 내린다.

II. 이동 장애물 회피 문제 구성

로봇의 이동 장애물 회피 문제를 수학적으로 구성하고 그 해결 방법을 구하기 위하여 다음과 같은 표기법을 사용한다.

- $P=(x, y)$ 2 차원 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
- $t_i (i=0, \dots)$ i 번째 샘플링 시간

이상의 표기법에 의해서 로봇의 이동 장애물 회피 문제는 다음과 같이 수학적으로 구성된다.

2 차원 평면에서 이동 장애물의 위치 $P_o(t)$ 와 속도 $\dot{P}_o(t)$ 가 매 샘플링 시간 $t_i (i=0, \dots)$ 마다 주어질 때, 이동 로봇이 이를 피하며 주어진 시작점 $P_{r,s}$ 에서 목표점 $P_{r,g}$ 까지 이동하도록 시간 $t(t \geq t_0)$ 에서의 로봇의 위치 $P_r(t)$ 를 결정한다.

여기에서 로봇은 점 로봇(point robot), 장애물은 원으로 가정한다.

III. 충돌 회피 가능성도와 가상 거리 함수

고정 장애물의 회피를 위해서는 로봇과 장애물의 위치, 그리고 그들 사이의 거리만을 고려하면 된다. 그러나 이동 장애물 회피를 위해서는 장애물과 로봇의 상대적인 이동성까지 고려하여야 충돌을 피할 수 있다. 장애물과 로봇의 상대적인 이동성을 고려하기 위하여 충돌 회피 가능성을 정의한다.

1. 충돌 회피 가능성도

로봇과 장애물 사이의 충돌은 그들 사이의 거리에 의해서 나타낼 수 있다. 이동 장애물의 경우 장애물의 로봇에 대한 거리와 장애물과 로봇의 운동 방향 및 상대 속도에 의해 로봇과 장애물 사이의 향후 충돌 가능성을 예측할 수 있다. 따라서 시간 t 에서 로봇과 장애물 사이의 충돌과 관련

한 상태 변수를 로봇과 장애물 사이의 거리, 장애물의 로봇에 대한 외향 속도(outward speed), 그리고 로봇의 장애물에 대한 외향 속도로 설정한다. 이 세 상태 변수의 변화에 따라 로봇이 이동 장애물과의 충돌을 피할 수 있는 가능성이 달라진다. 로봇이 이동 장애물을 피할 수 있는 가능성을 나타내는 지수로서 충돌 회피 가능성도(AVM: Avoidability Measure)를 다음과 같이 정의한다.

정의 1 : 충돌 회피 가능성도

시간 t 에서 충돌 회피 가능성도는 로봇과 장애물 사이의 거리 $d_{o,r}(t)$, 장애물의 로봇에 대한 외향 속도 $v_{o,r}(t)$, 그리고 로봇의 장애물에 대한 외향 속도 $v_{r,o}(t)$ 에 관한 함수로서 다음의 조건을 만족시킨다.

- (조건 1) 로봇과 장애물 사이의 거리 $d_{o,r}(t)$ 가 클수록 충돌 회피 가능성도가 크다.
- (조건 2) 장애물의 로봇에 대한 외향 속도 $v_{o,r}(t)$ 가 클수록 충돌 회피 가능성도가 크다.
- (조건 3) 로봇의 장애물에 대한 외향 속도 $v_{r,o}(t)$ 가 클수록 충돌 회피 가능성도가 크다.

여기에서 로봇과 장애물 사이의 거리 $d_{o,r}(t)$, 장애물의 로봇에 대한 외향 속도 $v_{o,r}(t)$, 그리고 로봇의 장애물에 대한 외향 속도 $v_{r,o}(t)$ 는

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

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

$$v_{r,o}(t) = \dot{P}_r(t) \cdot \frac{(P_r(t) - P_o(t))}{\| P_r(t) - P_o(t) \|} \tag{3}$$

으로 정의한다.

여기에서 $v_{o,r}(t)$ 는 장애물 속력을 로봇으로부터 장애물 방향으로의 단위 벡터와 내적인 값이다. 즉, 장애물의 속력에서 장애물이 로봇으로부터 멀어지는 방향으로의 속도 성분이다. 이 값이 양수이면 장애물이 로봇으로부터 멀어지는 방향으로 이동하는 경우이고, 음수이면 장애물이 로봇을 향해서 이동하는 경우이다. 그리고 장애물이 로봇으로부터 멀어지는 방향으로 빠르게 운동할수록 커지고, 장애물이 로봇과 가까워지는 방향으로 빨리 접근할수록 작아진다.

그리고 $v_{r,o}(t)$ 는 로봇 속력을 장애물로부터 로봇 방향으로의 단위 벡터와 내적인 값이다. 즉, 로봇의 속력에서 로봇이 장애물로부터 멀어지는 방향으로의 속도 성분이다. 이 값이 양수이면 로봇이 장애물로부터 멀어지는 방향으로 이동하는 경우이고, 음수이면 로봇이 장애물을 향해서 이동하는 경우이다. 그리고 로봇이 장애물로부터 멀어지는 방향으로 빠르게 운동할수록 커지고, 로봇이 장애물과 가까워지는 방향으로 빨리 접근할수록 작아진다. 결과적으로 장애물의 외향 속도 $v_{o,r}(t)$ 는 장애물의 로봇에 대한 운동성을 나타내는 변수이고, 로봇의 외향 속도 $v_{r,o}(t)$ 는 로봇의 장애물에 대한 운동성을 나타내는 변수이다.

위의 충돌 회피 가능성도에 관한 정의에 의해, 로봇의 장애물 회피 동작 계획 문제는 충돌 회피 가능성을 충돌 회피가 보장되는 최소값 이상 유지하도록 동작 계획하는 문제가 된다. 이러한 충돌 회피 가능성도의 하나로써 가상 거리 함수를 제안한다.

2. 가상 거리 함수

정의 1의 충돌 회피 가능성도로서의 세 가지 조건을 만족

시키는 함수는 매우 많다. 충돌 회피 가능도를 이용하여 이동 장애물 회피를 위한 로봇의 구동력을 수치적인 방법으로 구하기 위해, 충돌 회피 가능도의 하나로써 가상 거리 함수를 다음 (4)와 같이 제안한다.

$$vd_{o,r}(d_{o,r}(t), v_{o,r}(t), v_{r,o}(t)) = \frac{\alpha + v_{r,o}(t)}{\beta - v_{o,r}(t)} \cdot d_{o,r}(t) \quad (4)$$

여기에서 α 와 β 는 다음 (5)를 만족시키는 상수이다.

$$\alpha > \max \{ |v_{r,o}(t)| \} > 0, \quad \beta > \max \{ |v_{o,r}(t)| \} > 0, \quad (\alpha, \beta \in \mathbf{R}) \quad (5)$$

(4)에서 $vd_{o,r}(d_{o,r}(t), v_{o,r}(t), v_{r,o}(t))$ 는 $d_{o,r}(t)$, $v_{o,r}(t)$, 그리고 $v_{r,o}(t)$ 의 함수이다. 편의상 앞으로 $vd_{o,r}(d_{o,r}(t), v_{o,r}(t), v_{r,o}(t))$ 를 $vd_{o,r}(t)$ 로 줄여서 표기한다. (4)에서 $d_{o,r}(t)$ 가 증가하면 $vd_{o,r}(t)$ 가 커지고, $v_{o,r}(t)$ 가 증가하면 $vd_{o,r}(t)$ 가 커지며, $v_{r,o}(t)$ 가 증가하면 $vd_{o,r}(t)$ 도 커진다. 따라서 가상 거리 함수 $vd_{o,r}(t)$ 는 충돌 회피 가능도로서의 세 가지 조건을 모두 만족시킴을 알 수 있다.

(4)에서 β 가 증가하면 $v_{o,r}(t)$ 의 변화에 따른 $vd_{o,r}(t)$ 의 변화가 작아진다. 즉, 로봇과 장애물 사이의 거리 변화와 로봇의 외향 속도의 변화가 장애물의 외향 속도의 변화보다 가상 거리에 더 큰 영향을 미치게 된다. 따라서 로봇의 충돌 회피 경로와 궤적은 장애물의 운동성보다 로봇과 장애물 사이의 거리의 변화, 그리고 로봇의 운동성에 따라 더 민감하게 변화한다. 반면 β 가 작아지면 로봇은 장애물의 운동에 따라 너무 민감하게 경로와 궤적이 변화하게 된다. 마찬가지로 α 가 증가하면 로봇의 충돌 회피 경로와 궤적은 로봇의 운동성보다 로봇과 장애물 사이의 거리의 변화 그리고 장애물의 운동성에 따라 더 민감하게 변화한다. 그리고 α 가 작아지면 로봇은 로봇의 운동성에 따라 민감하게 경로와 궤적이 변화하게 된다.

만일 장애물의 외향 속도가 $v_{o,r}(t) = 0$ 이고, 로봇의 외향 속도가 $v_{r,o}(t) = 0$ 인 경우, 즉 장애물의 직선 $\overline{P_o(t)P_r(t)}$ 방향 속도 성분이 0이고, 로봇의 직선 $\overline{P_o(t)P_r(t)}$ 방향 속도 성분이 0이면, $vd_{o,r}(t) = (\alpha/\beta)d_{o,r}(t)$ 가 되어, 가상 거리는 실제 거리에 비례한 값을 가지며, 그 비례 상수는 α/β 가 된다. 만일 $\alpha = \beta$ 이고, $\alpha \gg \max \{ |v_{r,o}(t)| \} > 0$, $\beta \gg \max \{ |v_{o,r}(t)| \} > 0$ 이면, $v_{o,r}(t)$ 와 $v_{r,o}(t)$ 가 가상 거리 $vd_{o,r}(t)$ 에 영향을 미치지 못하고, $vd_{o,r}(t) \cong d_{o,r}(t)$ 가 되어 장애물과 로봇의 운동성을 고려하지 못하게 된다.

가상 거리 $vd_{o,r}(t)$ 가 일정한 값 이하가 되었을 때부터 로봇이 장애물 회피 동작을 시작한다고 가정하자. 이 경우, $\alpha < \beta$ 이면 로봇은 장애물로부터 실제로 먼 거리에 떨어져 있을 때부터 회피 동작을 시작하고, $\alpha > \beta$ 이면 로봇은 장애물에 근접하여야 회피 동작을 시작하게 된다. 따라서 α 와 β 는 이상에서 고찰한 사항들을 고려하여 각각의 문제에 대하여 적절한 값으로 선정되어야 한다.

α 와 β 가 위의 (5)의 조건을 만족시키는 경우, $vd_{o,r}(t) > 0$ 이면 $d_{o,r}(t) > 0$ 가 된다. 따라서 충돌 회피를 위해 가상 거리가 만족시켜야 할 조건은 다음 (6)과 같은 부등식으로 표현된다.

$$vd_{o,r}(t) > 0, \quad t \geq t_0 \quad (6)$$

따라서 이동 장애물 회피 동작 계획 문제는 (6)의 조건을 만족시키도록 $P_r(t)$ 를 결정하는 문제가 된다.

IV. 이동 장애물 회피 방법

위의 (6)조건을 만족시켜 로봇과 이동 장애물 사이의 충돌을 피하기 위해서 본 연구에서는 인공 전위계를 이용하였다.

1. 가상 거리에 의한 인공 전위계

인공 전위계는 로봇과 장애물 사이에는 척력을 발생시키고 로봇과 목표점 사이에는 인력을 발생시키는 가상의 역장(force field)이다[13]. 로봇을 이 역장에서 발생하는 힘에 따라 이동하게 하여 장애물과의 충돌을 피하게 한다. 목적하는 바에 따라 여러 가지의 인공 전위계 함수가 제안되었다[13-15]. 이들의 경우 인공 전위계에 장애물의 이동성이 고려되지 못하여 있으므로, 본 연구에서는 가상 거리 함수를 도입하여 Khatib[13]가 제안한 인공 전위계를 이동 장애물 회피에 적용할 수 있게 개선한다.

시각 t 에 $P_o(t)$ 에 위치한 장애물과 로봇 운동의 목표점 $P_{r,g}$ 에 의해 로봇의 위치 $P_r(t)$ 에 다음 (7)과 같은 인공 전위계를 형성시킨다.

$$U_{art}(P_r(t), P_o(t), P_{r,g}) = U_o(P_r(t), P_o(t)) + U_g(P_r(t), P_{r,g}) \quad (7)$$

$$U_o(P_r(t), P_o(t)) = \begin{cases} \frac{1}{2} \eta \left(\frac{1}{vd_{o,r}(t)} - \frac{1}{\epsilon_{vd}} \right)^2, & \text{if } vd_{o,r}(t) \leq \epsilon_{vd} \\ 0, & \text{if } vd_{o,r}(t) > \epsilon_{vd}, (\epsilon_{vd} > 0) \end{cases} \quad (8)$$

$$U_g(P_r(t), P_{r,g}) = \frac{1}{2} \zeta \| P_r(t) - P_{r,g} \|^2 \quad (9)$$

여기에서 $U_o(P_r(t), P_o(t))$ 는 $P_r(t)$ 에 위치한 로봇을 장애물로부터 밀어내는 척력을 발생시키는 인공 전위계이고, $U_g(P_r(t), P_{r,g})$ 는 $P_r(t)$ 에 위치한 로봇을 목표점으로 끌어들이는 인력을 발생시키는 인공 전위계이다. (8)에서 ϵ_{vd} 는 $U_o(P_r(t), P_o(t))$ 가 영향을 미치는 장애물로부터의 가상 거리 범위(전위계 영향력 한계 가상 거리)이다. 즉, 장애물로부터 가상 거리가 ϵ_{vd} 이상이 되는 범위에서는 $U_o(P_r(t), P_o(t))$ 가 0이어서, $U_o(P_r(t), P_o(t))$ 는 로봇의 동작에 영향을 미치지 않는다. ϵ_{vd} 가 클수록 $U_o(P_r(t), P_o(t))$ 가 더 넓은 영역에 영향을 미치게 되어, 로봇이 장애물로부터 더 먼 거리에서부터 장애물 회피 동작을 시작한다. η 와 ζ 는 각각 $U_o(P_r(t), P_o(t))$ 와 $U_g(P_r(t), P_{r,g})$ 의 계수(coefficient)이다. η 가 커지면 장애물에 의한 척력이 커지고, ζ 가 커지면 목표점에 의한 인력이 커진다.

인공 전위계에 의해 $P_r(t)$ 에 위치한 로봇에 발생하는 힘은 다음 (10)과 같이 인공 전위계의 $P_r(t)$ 에서의 그래디언트(gradient)로부터 구해진다.

$$\begin{aligned} F_{art}(P_r(t)) &= -\text{grad}(U_{art}(P_r(t), P_o(t), P_{r,g})) \Big|_{P_r(t)} \\ &= -\text{grad}(U_o(P_r(t), P_o(t))) \Big|_{P_r(t)} \\ &\quad - \text{grad}(U_g(P_r(t), P_{r,g})) \Big|_{P_r(t)} \\ &= F_o(P_r(t)) + F_g(P_r(t)) \end{aligned} \quad (10)$$

장애물로부터의 척력 $F_o(P_r(t))$ 는 로봇이 장애물에 접근할수록 장애물로부터 로봇을 밀어내는 방향으로 커지고, 목표점으로서의 인력 $F_g(P_r(t))$ 는 로봇이 목표점에 접근할수록 작아진다. 따라서 인공 전위계에 의해서 발생하는 힘 $F_{art}(P_r(t))$ 는 로봇이 장애물을 피하면서 목표점까지 이동하도록 한다.

2. 이동 장애물 회피 알고리즘

이상의 가상 거리에 기초한 인공 전위계에서 발생하는 힘에 의해 로봇은 이동 장애물과의 충돌을 피하며 목표점까지 이동한다. 매 샘플링 시각마다 얻어진 장애물의 위치와 속도 정보로부터 인공 전위계가 구성되며, 이를 이용하여 로봇의 구동력이 계산되어지고, 이 값이 로봇에 입력되어 다음 샘플링 시각까지 로봇이 이동한다.

로봇이 $P_r(t)$ 에 위치해 있을 경우, 로봇에 가해지는 인공 전위계에 의한 힘은 (10)에서 구해진 $F_{art}(P_r(t))$ 이다. 그런데 로봇은 관성력의 영향을 받아서 운동하며, 또한 운동 가속도와 운동 속도에 제한이 있다. 따라서 (10)에 의해 구해진 힘과 관성력에 의해 로봇이 운동할 때 이러한 운동 가속도와 운동 속도 제한을 만족시키지 못하는 경우, $F_{art}(P_r(t))$ 를 감소시켜서 로봇의 구동력을 구해야한다. 이상의 관성력, 가속도 제한, 그리고 속도 제한을 고려하여, 인공 전위계에 의한 힘 $F_{art}(P_r(t))$ 로부터 로봇의 구동력을 구하는 과정은 다음과 같다.

i 번째 샘플링 시각 t_i 에서의 인공 전위계에 의한 힘은 $F_{art}(P_r(t_i))$ 이고, 관성력은 $m\ddot{P}_r(t_i)$ 이다. 로봇이 인공 전위계에 의한 힘 $F_{art}(P_r(t_i))$ 과 관성력 $m\ddot{P}_r(t_i)$ 만의 영향을 받아 운동한다면, t_i 부터 t_{i+1} 사이에 로봇은 다음 (11)의 합성력 $F_{comb}(t)$ 에 의해서 운동한다.

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

합성력 $F_{comb}(t)$ 에 의해서 로봇에 발생하는 가속도는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \ddot{P}_r(t) &= \frac{F_{comb}(t)}{m} \\ &= \ddot{P}_r(t_i) + \frac{F_{art}(P_r(t_i))}{m}, \quad t \in (t_i, t_{i+1}] \end{aligned} \quad (12)$$

그런데, 로봇이 운동할 수 있는 가속도 크기의 최대값을 $a_{r,max}$ 라 하면, $\ddot{P}_r(t)$ 는 다음 부등(13)을 만족시켜야한다.

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

따라서, 가속도 제한에 관한 부등식 (13)을 만족시키기 위해 $F_{art}(P_r(t_i))$ 는 다음 (14)와 같이 $F_{acc}(t)$ 가 되어야한다.

$$\begin{aligned} F_{acc}(t) & \\ &= \max \left\{ k \cdot F_{art}(P_r(t_i)) \mid 0 \leq k \leq 1, \right. \\ & \left. \left\| \ddot{P}_r(t_i) + \frac{k \cdot F_{art}(P_r(t_i))}{m} \right\| \leq a_{r,max} \right\}, \\ & t \in (t_i, t_{i+1}] \end{aligned} \quad (14)$$

위 (14)에 의하면, $F_{comb}(t)$ 에 의한 가속도가 너무 커서 (13)의 조건이 만족되지 않는 경우, $F_{art}(P_r(t_i))$ 를 비례

축소(scale down)하여 $F_{acc}(t)$ 를 구한다. 여기에서 k 는 로봇의 가속도가 최대값 $a_{r,max}$ 를 넘지 않도록 $F_{art}(P_r(t_i))$ 를 비례 축소하기 위한 비례 상수이다. 위의 $F_{acc}(t)$ 에 의해 로봇은 다음 (15)의 속력으로 운동한다.

$$\dot{P}_r(t) = \dot{P}_r(t_i) + (t-t_i) \cdot a_{acc}(t_i), \quad t \in (t_i, t_{i+1}] \quad (15)$$

where

$$a_{acc}(t_i) = \ddot{P}_r(t_i) + \frac{F_{acc}(P_r(t_i))}{m} \quad (16)$$

그런데, 로봇이 운동할 수 있는 속도의 최대값을 $v_{r,max}$ 라하면, $\dot{P}_r(t)$ 는 다음 부등식 (17)을 만족시켜야한다.

$$\begin{aligned} \|\dot{P}_r(t)\| & \\ &= \left\| \dot{P}_r(t_i) + (t-t_i) \cdot a_{acc}(t_i) \right\| \leq v_{r,max}, \quad t \in (t_i, t_{i+1}] \end{aligned} \quad (17)$$

따라서, 만일 시각 $t \geq t_v$ ($t_v \in (t_i, t_{i+1}]$)에서 $\|\dot{P}_r(t)\| > v_{r,max}$ 라면, $\dot{P}_r(t)$ 를 속도 제한 조건 (17)을 만족하도록 다음 (18)과 같이 제한하여야한다.

$$\begin{aligned} \dot{P}_r(t) &= (x_r(t), y_r(t)) \\ &= \begin{cases} \dot{P}_r(t_i) + (t-t_i) \cdot a_{acc}(t_i), & t_i < t \leq t_v \\ \dot{P}_r(t_i) + (t_v-t_i) \cdot a_{acc}(t_i), & t_v < t \leq t_{i+1} \end{cases} \\ \text{where, } t_v & \text{ satisfies} \end{aligned} \quad (18)$$

$$\left\| \dot{P}_r(t_i) + (t_v-t_i) \cdot a_{acc}(t_i) \right\| = v_{r,max} \quad (19)$$

따라서, 가속도 제한을 만족시키기 위한 (14)와 속도 제한을 만족시키기 위한 (18)을 동시에 만족시키는 로봇의 가속도 $a_{drive}(t)$ 는 다음 (20)과 같이 구해진다.

$$a_{drive}(t) = \begin{cases} a_{acc}(t_i), & t_i < t \leq t_v \\ 0, & t_v < t \leq t_{i+1} \end{cases} \quad (20)$$

where

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

위 (20)은 로봇이 이동 장애물을 피하면서, 가속도 제한과 속도 제한 조건을 만족시키도록 구해진 로봇 가속도이다. 결과적으로, 로봇의 구동력은 관성력 $m\ddot{P}_r(t_i)$ 의 영향을 받아 운동하는 로봇이 (20)과 같은 가속력을 가지고 운동함으로써, 가속도 제한 조건과 속도 제한 조건을 만족시키면서 이동 장애물을 피하도록 결정되어야한다. 그러므로, 로봇의 구동력 $F_{drive}(t)$ 는 (20)과 (16)으로부터 다음 (21)과 같이 구해진다.

$$F_{drive}(t) = \begin{cases} F_{acc}(t), & t_i < t \leq t_v \\ -m\ddot{P}_r(t_i), & t_v < t \leq t_{i+1} \end{cases} \quad (21)$$

where

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

그리고 로봇이 (21)의 구동력에 의해 t_i 에서 t_{i+1} 까지 이동하는 경우, 시각 $t = t_{i+1}$ 에서의 로봇 위치 $P_r(t_{i+1})$ 은 (18)의 로봇 속력을 적분하여, (22)와 같이 구해진다.

$$\begin{aligned} P_r(t_{i+1}) &= (x_r(t_{i+1}), y_r(t_{i+1})) \\ &= (x_r(t_i) + \int_{t=t_i}^{t=t_{i+1}} \dot{x}_r(\tau) d\tau, \\ & y_r(t_i) + \int_{t=t_i}^{t=t_{i+1}} \dot{y}_r(\tau) d\tau) \end{aligned} \quad (22)$$

매 샘플링 시각마다, (21)의 로봇 구동력을 구하여 로봇에 입력하여 로봇이 이동 장애물을 피하게 한다. 이상의 과정을 로봇이 목표점에 도달할 때까지 매 샘플링 시각마다 반복하면 다음의 [이동 장애물 회피 알고리즘]이 된다.

[이동 장애물 회피 알고리즘]

단계 0(초기화): $i=0$ 로 초기화한다.

단계 1(위치와 속도 검출): $t=t_i$ 에서 장애물의 위치와 속도를 검출한다.

단계 2(가상 거리 계산): 로봇과 장애물 사이의 가상 거리 $vd_{o,r}(t_i)$ 를 (4)에 의해 계산한다.

단계 3(인공 전위계 구성): 인공 전위계 $U_{art}(P_r(t_i), P_o(t_i), P_{r,g})$ 를 (7)-(9)에 의해서 구성한다.

단계 4(로봇 구동력 계산): 충돌 회피를 위한 로봇의 구동력 $F_{drive}(t)$ 를 (21)에 의해 계산한다.

단계 5(충돌 발생 감시): 구동력 $F_{drive}(t)$ 에 의해 로봇이 다음 샘플링 시각 $t=t_{i+1}$ 까지 이동하면서 장애물과 충돌하는지 검사한다. 만일 충돌이 발생하면 정지한다.

단계 6(이동 완료 검사): 로봇이 $F_{drive}(t)$ 에 의해 이동하여, 시각 $t=t_{i+1}$ 에 로봇의 목표점 $P_{r,g}$ 에 도착했는지 검사한다.

- 1) 목표점에 도착했다면 동작 계획을 끝낸다.
- 2) 목표점에 도착하지 못하였다면 $k-i+1$ 로 하여 단계 1로 되돌아간다.

시각 $t=t_{i+1}$ 에 로봇이 목표점에 도달하였는지의 여부는 다음 (23)에 의하여 결정한다.

$$\|P_r(t_k) - P_{r,g}\| \leq \epsilon_d, \quad \text{for all } k=(i+1)-N, \dots, i, i+1 \quad (23)$$

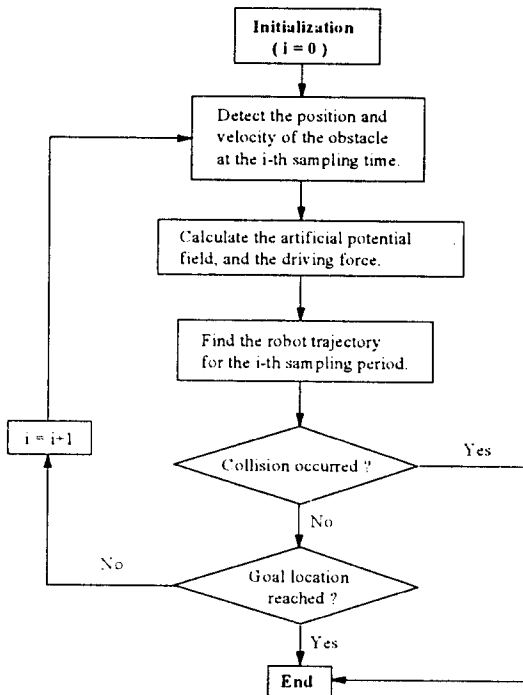


그림 1. 이동 장애물 회피 알고리즘.
Fig. 1. Algorithm for moving obstacle avoidance.

이 부등식 (23)이 만족되면 $(N+1)$ 회 이상 로봇이 목표점으로부터 ϵ_d 이내의 거리를 유지하는 결과가 되므로, 로

봇이 목표점에 도달한 것으로 간주한다. 여기에서 ϵ_d 는 로봇의 이동 목표 위치의 허용 오차를 고려하고, N 은 로봇 운동의 오버슈트를 고려하여 결정한다. 이상의 [이동 장애물 회피 알고리즘]을 그림 1에 흐름도로 나타내었다.

V. 시뮬레이션 및 토의

시뮬레이션을 통하여 제안된 이동 장애물 회피 방법의 실제 적용 가능성을 검증하고, 그 성능과 특성을 관찰한다. 본 연구에서는 크게 3가지의 경우에 대하여 로봇의 충돌 회피 동작을 시뮬레이션한다. 먼저 경우 1, 2, 그리고 3에서는 장애물이 하나인 경우에 대하여 장애물의 속도에 따른 로봇의 충돌 회피 궤적의 변화를 관찰한다. 경우 4,5, 그리고 6에서는 비직선 운동을 하는 장애물이 1개, 2개, 3개 있는 경우의 로봇의 충돌 회피 궤적을 관찰한다. 경우 7부터 경우 11에서는 장애물이 3개인 경우에 대하여 α, β, η , 그리고 ϵ_{vd} 의 값들을 변화시켜서 이 값들의 변화가 로봇의 충돌 회피 궤적에 미치는 영향을 관찰한다.

1. 시뮬레이션 조건

경우 1, 2, 3에서는 하나의 장애물이 등속 직선 운동하는 경우의 로봇의 충돌 회피 궤적을 관찰한다. 여기에서는 장애물의 속력을 제외한 나머지 조건들은 동일하다. 경우 1,2,3에 공통인 조건들은 다음 표 1, 2와 같다.

표 1. 경우 1, 2, 3에서의 파라미터 값들.
Table 1. Parameter values for the cases 1, 2, and 3.

Parameter	α	β	η	ζ	ϵ_{vd}
Value	90.0	90.0	10,000	2.0	10.0 cm

표 2. 경우 1, 2, 3에서의 조건들.
Table 2. Conditions for the cases 1, 2, and 3.

$P_{r,s}$	(0,2)[cm]	$P_o(t_0)$	(55,10)[cm]
$P_{r,g}$	(80,-40)[cm]	$a_{r,max}$	500cm/sec ²
m	0.1 Kg	$v_{r,max}$	65cm/sec
r_o	2cm	Δt	0.1sec

경우 1, 2, 3에서 장애물은 직선 경로를 등속으로 운동한다. 장애물의 속력이 달라지는 경우 이를 피하기 위한 로봇의 경로와 궤적이 달라진다. 세 가지의 경우에서 장애물 속력은 다음 표 3과 같다.

표 3. 경우 1, 2, 3에서의 장애물 속력.
Table 3. Velocity of the obstacle for the cases 1, 2, and 3.

Cases	Velocity, $\dot{P}_o(t)$
case 1	(-10, -25)[cm/sec]
case 2	(-7, -18)[cm/sec]
case 3	(-6, -15)[cm/sec]

경우 4, 5, 6에서는 각각 비직선 운동을 하는 장애물이 1개, 2개, 3개인 경우에 대한 로봇 궤적을 구한다. 이 경우들에서의 파라미터 값들과 시뮬레이션 조건들은 다음 표 4, 5와 같다.

표 4. 경우 4, 5, 6에서의 파라미터 값들.
Table 4. Parameter values for the cases 4, 5, and 6.

Parameter	α	β	η	ζ	ϵ_{vd}
Value	90.0	90.0	10,000	2.0	40.0 cm

표 5. 경우 4, 5, 6에서의 조건들.
Table 5. Conditions for the cases 4, 5, and 6.

$P_{r,s}$	(10,80)[cm]	$a_{r,max}$	500cm/sec ²
$P_{r,g}$	(180,70)[cm]	$v_{r,max}$	65cm/sec
m	0.1 Kg	Δt	0.1sec
r_o	4cm		

경우 7부터 11에서는 경우 6과 동일한 조건에서 파라미터 α , β , η , 그리고 ϵ_{vd} 의 값을 변화시켜서, 파라미터 값의 변화에 따른 충돌 회피 궤적의 변화를 분석한다. 따라서 이 경우들에서의 조건은 표 5와 동일하고, 파라미터들은 표 4의 값에서 각각 다음 표 6과 같이 변화한다.

표 6. 경우 7 부터 11에서 변화된 파라미터 값들.
Table 6. Parameter values changed in the cases 7 through 11.

Cases	case 7	case 8	case 9	case 10	case 11	
Parameter	α	β	α	β	ϵ_{vd}	η
Value	500.0	150.0	10 ⁸	10 ⁸	5.0cm	50,000

2. 시뮬레이션 결과

각각의 경우에 대한 시뮬레이션 결과를 그림 2부터 12에 보였다. 여기에서 편의상 로봇을 점이 아닌 원으로 표시하였다. 대신 장애물과 로봇의 반지름을 실제 장애물 반지름의 반으로 표시하였다.

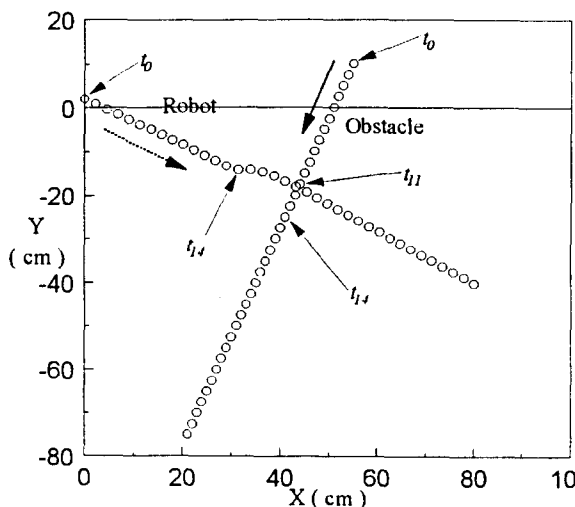


그림 2. 경우 1 에 대한 로봇의 이동 장애물 회피 동작.
Fig. 2. Collision-free robot motion for the case 1.

그림 2, 3, 4는 각각 경우 1, 경우 2, 경우 3에 대한 시뮬레이션 결과이다. 경우 1에서는 장애물이 빠르게 이동하여

시 로봇이 장애물이 지나간 후에 t_{14} 이후부터 회피 동작을 시작하여, 장애물의 운동 방향 뒤쪽에서 장애물 경로를 통과한다. 장애물의 속도가 느려지면서 경우 2에서는 로봇이 장애물의 앞으로 우회하여 회피 동작을 하기 위해 t_{14} 부터 t_{29} 까지 장애물의 이동 방향으로 이동한다. 그러나 장애물을 앞서서 우회하지 못하고, t_{29} 이후에는 장애물이 지나간 후에 장애물의 경로를 통과한다. 경우 3에서는 장애물이 경우 2에서 보다 느리게 운동하므로, 로봇이 t_{15} 에서부터 회피 동작을 시작하여 장애물이 이동하는 방향의 앞쪽을 가로질러 장애물을 피한다. 경우 1, 경우 2, 경우 3에서 알 수 있듯이 장애물의 속도에 따라서 로봇이 장애물이 지나간 후에 장애물 운동 방향의 뒤쪽에서 장애물의 궤적을 통과하거나, 장애물의 앞쪽에서 장애물을 앞질러 피하게된다.

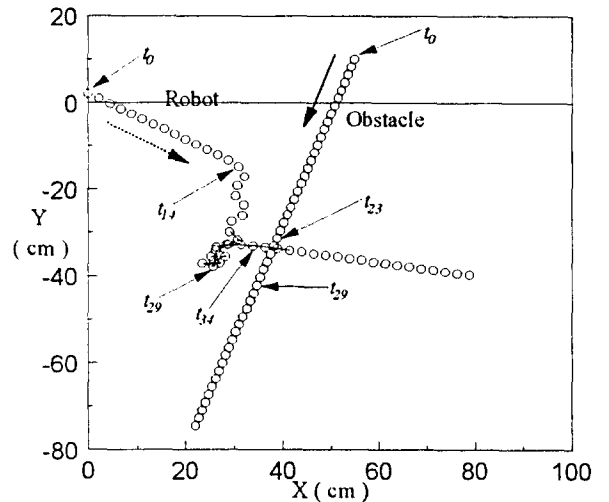


그림 3. 경우 2에 대한 로봇의 이동 장애물 회피 동작.
Fig. 3. Collision-free robot motion for the case 2.

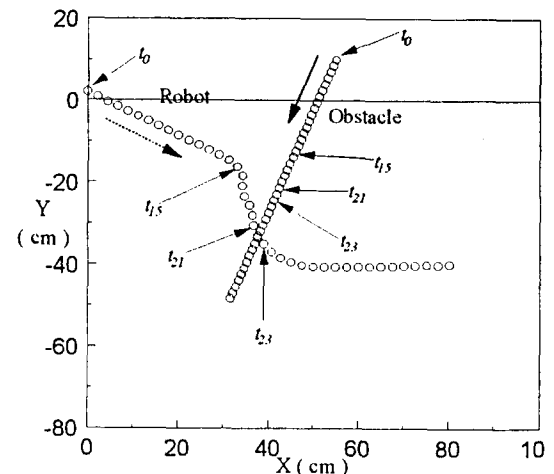


그림 4. 경우 3에 대한 로봇의 이동 장애물 회피 동작.
Fig. 4. Collision-free robot motion for the case 3.

경우 4, 경우 5, 경우 6에서는 장애물의 경로가 직선이 아니고 속도가 등속도가 아닌 경우의 장애물 회피 동작의 예를 보여준다. 경우 4는 하나의 장애물을 피하는 경우이고, 경우 5에서는 2개의 장애물을 피하며, 경우 6에서는 3개의 장애물을 피한다. 그림 5에서와 같이, 경우 4에서는 t_8 부터 장애물 1을 피하기 위한 회피 동작을 시작하여 장애물의 앞쪽을 우회하여 t_{22} 에서 장애물의 궤적을 벗어난다. 그림 6

에서와 같이, 경우 5에서도 장애물 1에 대한 회피 동작은 경우 4에서와 동일하다. 따라서 경우 4에서와 동일하게 t_{37} 까지 로봇이 이동한 후, t_{38} 부터 장애물 2를 피하는 동작을 시작한다. 장애물 2의 회피 동작에서는, 장애물 2가 지나간 후에 장애물 2의 궤적을 통과한다. 그림 7에서와 같이, 경우 6에서의 장애물 1과 2에 대한 회피 동작은 경우 5와 동일하다. 따라서 t_{53} 까지의 로봇의 궤적은 경우 5에서와 동일하다. 그리고 장애물 3을 피하기 위한 동작은 t_{54} 부터 시작되어, 장애물 3이 지나간 후에 t_{68} 에서 로봇이 장애물 3의 궤적을 통과한다.

경우 7부터 11에서는 parameter α , β , η , 그리고 ϵ_{vd} 의 변화에 따른 로봇의 충돌 회피 궤적의 변화를 관찰한다. 경우 7에서는 경우 6에서 α 값을 변화시켜서 $\alpha=500.0$ 로 하였다. α 값이 커지는 경우, III. 2절에서 설명한 바와 같이, 가상 거리가 로봇 속도의 영향을 덜 받게되며, $\alpha > \beta$ 이면 가상 거리가 실제 거리보다 더 커져서 로봇이 장애물에게 가까이 다가가서야 회피 동작을 시작한다. 따라서 그림 8에서와 같이 t_{10} 에서야 로봇이 회피 동작을 시작하게되어, 로봇이 장애물을 피하지 못하고 t_{13} 부터 장애물 1과 충돌하여, 충돌 회피에 실패한다.

경우 8에서는 경우 6에서 β 값을 변화시켜 $\beta=150.0$ 로 하였다. β 값이 커지는 경우, III. 2절에서 설명한 바와 같이, 가상 거리가 장애물 속도의 영향을 덜 받게되며, $\alpha < \beta$ 이면 가상 거리가 실제 거리보다 더 작아져서 로봇은 장애물에서 멀리 떨어져서부터 회피 동작을 시작한다. 따라서 그림 9에서와 같이, 경우 6의 결과와 달리 t_7 에서부터 로봇이 장애물 1에 의한 인공 전위계의 영향을 받아서 회피 동작을 시작한다. 그리고 가상 거리가 작아지면, 가상 거리의 크기의 변화에 따른 장애물에 의한 척력의 변화가 커지므로, 경우 6에 비해서 장애물 2와 장애물 3의 회피 동작에서 오버슈트(overshoot)가 커진다.

경우 9에서는 경우 6의 α 와 β 의 값을 변화시켜, α 와 β 의 값을 매우 크게 $\alpha=\beta=10^8$ 로 하였다. 이 경우 가상 거리는 로봇과 장애물의 상대 속도의 영향을 거의 받지 않게 되어, III. 2절에서의 설명과 같이 가상 거리는 실제 거리와 같아진다. 따라서, 로봇이나 장애물의 운동성을 고려하지 못하여, 고정 장애물 회피를 위한 인공 전위계 방법을 이동 장애물 회피에 적용한 결과가 된다. 그러므로 그림 10에서와 같이, 장애물이 로봇을 향해 가까이 다가오더라도 미리 회피 동작을 시작하지 못하여 장애물 1의 회피 동작을 t_9 에서 시작하게 된다. 그리고, t_{60} 에서 부터는 로봇이 장애물 3의 경로를 이미 빠져나왔으며 장애물이 로봇으로부터 멀어지는 방향으로 운동하고 있어서 충돌 가능성이 없음에도 불구하고, 로봇이 장애물과의 충돌 가능성과 관계없이 불필요한 우회 동작을 한다.

경우 9의 결과를 경우 6의 결과와 비교하면, 이동 장애물 회피에 있어서의 충돌 회피 가능도의 역할을 알 수 있다. 즉, 충돌 회피 가능도를 도입하면 이동 장애물과 로봇의 운동성을 고려한 회피 동작이 이루어지므로, 로봇이 장애물에게 다가오는 경우에는 미리 회피 동작을 시작할 수 있고, 장애물이 로봇으로부터 멀어지는 방향으로 운동하는 경우에는 로봇과 장애물 사이의 거리가 가깝더라도 우회 동작을 하지 않는다.

경우 10에서는 경우 6에서 전위계 영향력 한계 가상 거리 ϵ_{vd} 를 $\epsilon_{vd}=5.0$ cm로 감소시켰다. 이 경우에는 경우 6에 비해서 로봇이 장애물에게 가까이 도달하여야 척력을 받게

되므로, 로봇이 장애물에게 가까이 도달해서야 충돌 회피 동작을 시작한다. 따라서, 그림 11에서와 같이, t_9 부터 장애물 1에 대한 회피 동작이 시작된다. 그리고 장애물 3의 회피 동작에서도 장애물에게 가까이 다가가서야 t_{56} 부터 회피 동작을 시작하여, t_{56} 부터 4차례의 진동을 한 후에, 장애물 3이 지나간 후 t_{73} 부터 장애물 이동 방향의 뒤쪽에서 장애물 3의 궤적을 통과한다.

경우 11에서는 장애물로부터 척력을 발생시키는 인공 전위계 값의 계수 η 를 $\eta=50,000$ 으로 증가 시켰다. 따라서 IV. 1절에서 설명한 바와 같이 장애물로부터의 척력이 커져서 회피 동작이 커지고 회피 동작의 변화가 커진다. 그림 12에서와 같이 장애물 1의 회피 동작이 다른 경우들에서보다 빠르게 t_6 부터 시작되고, 장애물 2와 장애물 3의 회피 동작이 경우 6에 비해서 급격한 변화를 보인다.

이상의 경우 7부터 11에서의 결과에서 알 수 있듯이, 로봇의 충돌 회피 경로와 궤적은 α , β , η , ζ , 그리고 ϵ_{vd} 값에 따라서 달라진다. 이 값들을 적절하게 주지 못하는 경우 로봇의 이동 궤적이 급격히 변하며 과도한 우회 동작을 하거나, 장애물을 미리 피할 수 있음에도 불구하고 장애물이 지나가기를 기다리는 경우, 불필요한 진동을 하는 경우, 그리고 장애물과의 충돌을 피하지 못하는 경우가 발생할 수 있다. 본 시뮬레이션에서는 α , β , η , ζ , 그리고 ϵ_{vd} 의 값들을 로봇이 장애물을 피하기에 적합한 값으로 몇 차례의 시행 착오를 거친 후에 결정하였다.

인공 전위계 방법을 이용하는 경우 로봇이 인공 전위계의 국소 최소점에 빠져서 더 이상 이동하지 못하여 목표점에 도달하지 못하는 문제와 좁은 통로에서 로봇이 진동하는 문제 등이 발생한다. 그런데 이동 장애물 회피의 경우, 로봇과 장애물이 이동하므로 부분 최소점이 한 순간에는 발생할 수 있으나, 시간이 지나서 장애물이 이동하면 부분 최소점이 소멸하는 경우가 많아지므로, 고정 장애물 회피에서 보다 오히려 부분 최소점으로 인한 문제 발생 빈도가 적어진다. 그리고 본 연구에서는 인공 전위계가 충돌 회피 가능도에 의해 결정되므로 로봇과 장애물의 상대적인 위치가 동일한 경우에도 로봇과 장애물의 상대 속도에 따라서 인공 전위계가 달라지고, 또한 인공 전위계가 시변하기 때문에 부분 최소점에 의한 문제 발생 빈도가 더욱 적어진다. 본 연구에서는 부분 최소점이 발생하는 경우 V-그래프 탐색 방법[16]을 이용하여 가상의 새로운 목표점을 설정하고, 이 점을 경유하도록 하여 부분 최소점에서 빠져나오도록 하였다. 본 시뮬레이션에서는 10회 이상 로봇이 목표점이 아닌 위치에서 반경 5.0cm 이내에서 빠져나오지 못하는 경우 부분 최소점에 빠진 것으로 판정하였다. 이러한 검출 방법을 사용하는 경우, 본 논문의 경우 1부터 11에서는 부분 최소점이 발생하지 않았다. 그러나 장애물의 갯수가 많아지고, 특히 고정 장애물이 많아지는 경우, 부분 최소점이 발생하여 이로 인해 로봇이 목표점에 도달하지 못할 수 있으므로, 부분 최소점을 제거하기 위한 다른 인공 전위계 방법을 이용하여야한다[15,17].

제한된 충돌 회피 가능도를 이용한 이동 장애물 회피 방법은 인공 전위계의 그래디언트로부터 로봇 구동력을 계산하므로 검색(Search)에 의한 방법보다 계산량이 적어서 실시간 이동 장애물 회피에 적절하다. 본 연구에서는 133MHz의 clock속도를 가진 Pentium을 CPU로 갖고 16Mbyte의 RAM을 가진 IBM 호환 PC에서, Borland C++ 3.1을 사용하여 시뮬레이션 하였다. 3개의 장애물을 피하는 경우, IV. 2절의 [이동 장애물 회피 알고리즘]에서 단계 2부터 단

계 6까지의 계산에 소요된 시간은 약 55msec 였다. 본 시뮬레이션에서는 샘플링 주기 Δt 를 100msec 로 하였다. 따라서 한 샘플링 시간 내에 본 알고리즘의 수행에 필요한 계산을 충분히 할 수 있으므로, 장애물의 위치와 속도 검출에 소요되는 시간이 실시간 적용 가능성 여부를 결정한다.

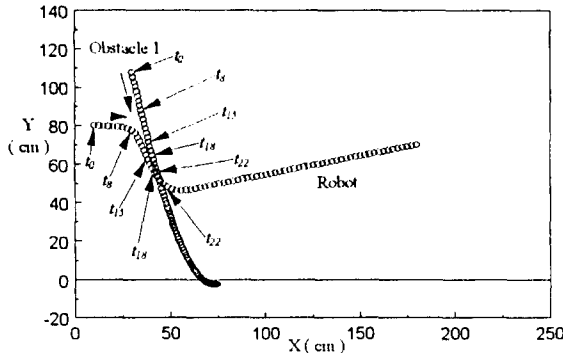


그림 5. 경우 4에 대한 로봇의 이동 장애물 회피 동작.
Fig. 5. Collision-free robot motion for the case 4.

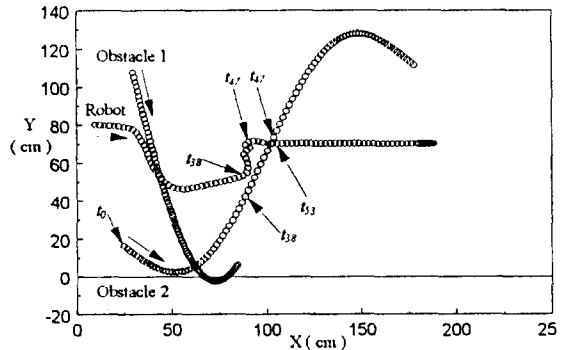


그림 6. 경우 5에 대한 로봇의 이동 장애물 회피 동작.
Fig. 6. Collision-free robot motion for the case 5.

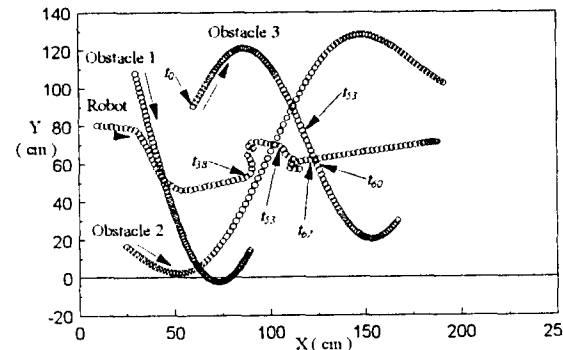


그림 7. 경우 6에 대한 로봇의 이동 장애물 회피 동작.
Fig. 7. Collision-free robot motion for the case 6.

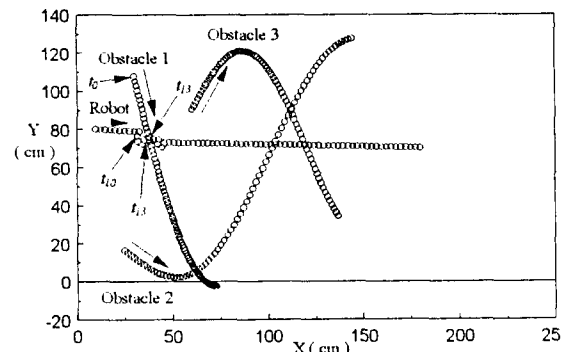


그림 8. 경우 7에 대한 로봇의 이동 장애물 회피 동작.
Fig. 8. Collision-free robot motion for the case 7.

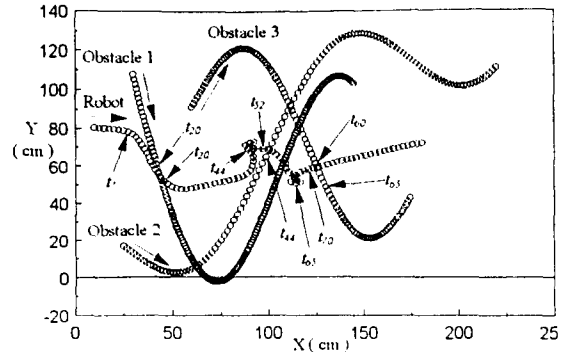


그림 9. 경우 8에 대한 로봇의 이동 장애물 회피 동작.
Fig. 9. Collision-free robot motion for the case 8.

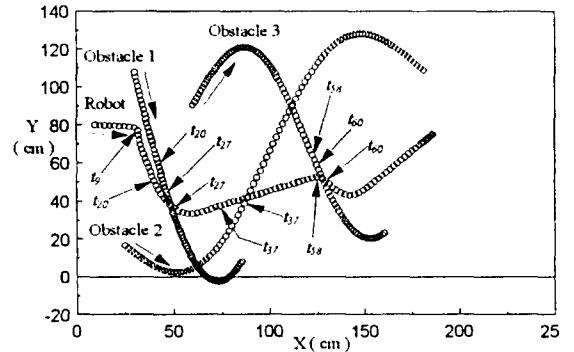


그림 10. 경우 9에 대한 로봇의 이동 장애물 회피 동작.
Fig. 10. Collision-free robot motion for the case 9.

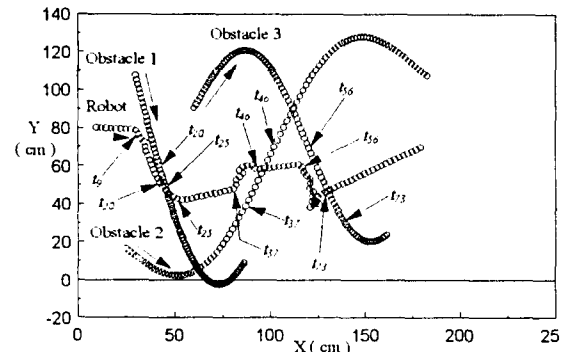


그림 11. 경우 10에 대한 로봇의 이동 장애물 회피 동작.
Fig. 11. Collision-free robot motion for the case 10.

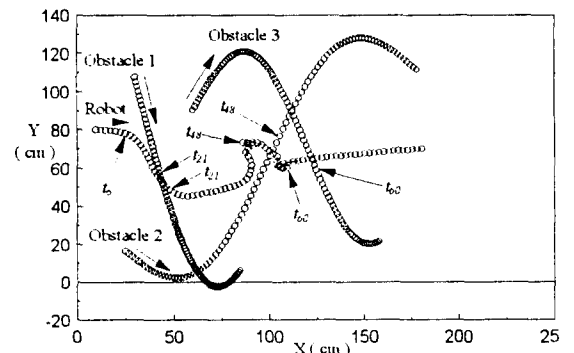


그림 12. 경우 11에 대한 로봇의 이동 장애물 회피 동작.
Fig. 12. Collision-free robot motion for the case 11.

VI. 결론

본 연구에서는 로봇이 실시간에 이동 장애물을 피하기 위한 새로운 방법을 제안하였다. 이 방법에서는 보통의 고정 장애물 회피 방법과 달리, 이동 장애물 회피를 위하여 로봇의 장애물에 대한 상대 속도, 장애물의 로봇에 대한 상대 속도, 그리고 로봇과 장애물 사이의 거리를 변수로 하는 충돌 회피 가능성 개념을 도입하였다. 그리고 충돌 회피 가능성의 하나로서 가상 거리 함수를 유도하였다. 이 가상 거리를 변수로 하는 인공 전위계를 이용하여 충돌 회피를 위한 로봇의 구동력을 구하였다.

충돌 회피 가능성과 가상 거리 함수는 로봇과 장애물의 이동성을 변수로 하여 결정되었으므로, 제안된 방법은 이동 장애물 회피에 적합하다. 여러 경우의 시뮬레이션을 통하여 제안된 방법이 한 개뿐 아니라 여러개의 이동 장애물이 있는 경우에도 적용됨을 보였다. 그리고 가상 거리 함수와 인공 전위계를 구성하는 파라미터 값들을 변화시켜서 로봇의 충돌 회피 경로를 구하여, 파라미터 값의 변화에 따른 로봇의 충돌 회피 궤적 변화를 관찰하고 파라미터 값 선택시의 고려 사항들을 분석하였다.

본 연구에서 제안한 방법은 장애물의 위치와 속도에 관한 실시간(real-time) 정보를 필요로 한다[18]. 로봇과 장애물의 위치와 속도를 검출하기 어려운 경우, 그리고 위치와 속도 검출에 긴 시간이 소요되는 경우에는 적용하기 어렵다. 따라서 로봇의 작업 영역이 넓지 않아서 카메라에 의한 영상 신호를 분석하여 로봇과 장애물들의 위치와 속도를 알아낼 수 있는 경우 등에 적용 가능하다. 또한 여러 대의 이동 로봇이 공동 작업 영역에서 이동하는 경우[19,20], 각각의 로봇들은 자신의 위치와 속도 정보를 다른 로봇에 전달할 수 있으므로, 이 경우 제안된 방법은 여러대 로봇의 무충돌 동작 조정에 이용될 수 있다.

참고문헌

- [1] 고낙용, "관측 시간 개념을 이용한 로봇 매니플레이터의 시변 장애물 회피 동작 계획," 서울대학교 박사학위 논문, 1993. 8.
- [2] 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.
- [3] Q. Zhu, "Hidden markov model for dynamic obstacle avoidance of mobile robot navigation," *IEEE Trans. Robotics and Automation*, vol. 7, no. 3, pp. 390-397, June, 1991.
- [4] R. Sharma, "Locally efficient path planning in an uncertain, dynamic environment using a probabilistic model," *IEEE Trans. Robotics and Automation*, vol. 8, no. 1, pp. 105-110, Feb., 1992.
- [5] K. Fujimura and H. Samet, "A hierarchical strategy for path planning among moving obstacles," *IEEE Trans. on Robotics and Automation*, vol. 5, no. 1, pp. 61-69, Feb, 1989.
- [6] M. Erdmann and T. Lozano-Pérez, "On multiple moving objects," in *Proc. 1986 IEEE Int. Conf. Robotics Automat.*, pp. 1419-1424, 1986.
- [7] 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.
- [8] B. H. Lee and C. S. G. Lee, "Collision-free motion planning of two robots," *IEEE Trans. Syst., Man, Cybern.*, vol. 17, no. 1, pp. 21-32, Jan./Feb., 1987.
- [9] K. Kant and S. W. Zucker, "Toward efficient trajectory planning: The path-velocity decomposition," *The Int. J. Robotics Research*, vol. 5, no. 3, pp. 72-89, Fall, 1986.
- [10] K. J. Kyriakopoulos and G. N. Saridis, "Collision avoidance of mobile robots in non-stationary environments," *Proc. 1991 IEEE Int. Conf. Robotics and Automation*, pp. 904-909, April, 1991.
- [11] J. Borenstein and Y. Koren, "Real-time obstacle avoidance for fast mobile robots," *IEEE Trans. Systems, Man, and Cybernetics*, vol. 19, no. 5, pp. 1179-1187, 1989.
- [12] 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.
- [13] O. Khatib, "Real-time obstacle avoidance for manipulators and mobile robots," *The Int. J. Robotics Research*, vol. 5, no. 1, Spring, 1986.
- [14] 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.
- [15] R. Volpe and P. Khosla, "Manipulator control with superquadric artificial potential functions: Theory and experiments," *IEEE Trans. on System, Man, and Cybernetics*, vol. 20, no. 6, pp. 1423-1436, Nov./Dec., 1990.
- [16] T. Lozano-Pérez and M. A. Wesley, "An algorithm for planning collision-free paths among polyhedral obstacles," *Communications of ACM* vol. 22, no. 10, pp. 560-570, October, 1979.
- [17] J. O. Kim and K. Khosla, "Real-time obstacle avoidance using harmonic potential functions," *IEEE Trans. on Robotics and Automation*, vol. 8, no. 3, pp. 338-349, June, 1992.
- [18] T. Aoki, T. Oka, T. Suzuki and S. Okuma, "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.
- [19] Y. Arai, S. Suzuki, S. Kotosaka, H. Asama, H. Kaetsu and I. Endo, "Collision avoidance among multiple autonomous mobile robots using LOCIS," *Proc. 1996 IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, pp. 2091-2096, Minneapolis, Minnesota, April, 1996.
- [20] R. Kurazume, S. Hirose, S. Nagata and N. Sa-

shida, "Study on cooperative positioning system,"
*Proc. 1996 IEEE Int. Conf. on Robotics and
 Automation*, pp. 1421-1426, Minneapolis, Minnesota,
 April, 1996.



고 낙 용

1985년 서울대 제어계측공학과 졸업.
 1987년 동대학원 석사. 1993년 동대학
 원 박사. 1991년 ~ 1992년 (주) 삼성
 전관 생산 기술 연구소 주임 연구원.
 1992년 ~ 현재 조선대학교 제어계측
 공학과 교수. 주관심 분야는 로봇틱스

및 자동화, 자동 제어, 이동 로봇 자율 주행.



이 범 회

1978년 서울대 전자공학과 졸업. 1980년
 동대학원 석사. 1985년 미국 Univ. of
 Michigan, Dept. Computer, Information
 and Control Eng. 졸업(공학 박사). 1985
 년 ~ 1987년 미국 Purdue Univ. Assis-
 tant Professor. 1987년 ~ 현재 서울대학

교 전기공학부 교수. 1995년 ~ 현재 서울특별시 중소기업
 창업보육센터 소장. 주관심 분야는 다중 로봇의 힘 제어, 신
 경 회로망 및 퍼지 응용 제어, 유연 자동화 시스템, 산업용
 로봇 제어기 개발, 다중 로봇의 충돌 회피, 로봇 제어용 전문
 가 시스템, 특수 작업용 로봇 시스템.