論文 한국정밀공학회지 제14권 제1호 (1997년 1월)
Journal of the Korean Society of Precision Engineering Vol. 14. No.1. JANUARY. 1997.

움직이는 장애물이 있을때 이동 로봇의 충돌 회피 알고리즘

김 선 욱*, 권 대 갑*, 차 영 엽**

A Collision Avoidance Algorithm of a Mobile Robot in the Presence of Moving Obstacle

S. W. Kim*, D. G. Gweon*, Y. Y. Cha**

ABSTRACT

For the use of a mobile robot in dynamic environment, a collision-avoidance algorithm with moving obstacle is necessary. In this paper, a collision-avoidance algorithm of a mobile robot is presented, when a mobile robot detects the collision with moving obstacle on the navigational path. Using reported positions of moving obstacle with sensors, the mobile robot predicts the next position of moving obstacle with possibility of collision. The velocity of moving obstacle is modeled as random walk process with Gaussian distribution. The optimal collision-avoidance path in which turning motion of the mobile robot is considered is generated with relative velocity between the mobile robot and moving obstacle. For the safety of collision-avoidance path, attractive potential with the safety factor is suggested. The simulation results using this algorithm show the mobile robot avoids collision with moving obstacle in many cases.

Key Words : Collision Avoidance(충돌회피), Mobile Robot(이동로봇), Path Generation(경로생성), Moving Obstacle(이동 장애물)

1. 서 론

현재 이용되고 있는 이동 로봇은 전자기 유도선이나 반사 테이프등의 궤도를 따라 운행하고 있는 Guidance System과 소프트웨어적으로 이동 경로를 계획하여 주행할 수 있는 Non-Guidance System이 있다. Guidance System은 경로 설치와 변경이 까다로와 유연한 이용이 불편하기 때문에 Non-Guidance System에 관한 연구가 더욱 더 활발히 진행되고 있다. 구동 방식에 따라 두 바퀴의 속도 차이를 이용하여 방향 전환을 하는 차동형과 별도의 조향 바퀴를 가지고 있는 조향형이 있는데, 최근에는 추가의 자유도를 주어 더욱 유연한 동작을 할 수 있는 구동 방식도 개발되고 있다.

Non-Guidance System은 주위상황을 파악하여 경로

* 한국과학기술원 기계공학과
** 원광대학교 공과대학 기계공학부

를 소프트웨어적으로 설계하여야 하는데, 이러한 경로 계획에는 환경에 대한 정보를 미리 알고 경로를 계획하는 대국적 경로 계획과 각종 센서를 이용하여 미지의 장애물 사이에서 경로를 찾아가는 소국적 경로 계획이 있다. 이러한 경로 계획은 주로 움직이는 장애물이 없을 경우에 이용되고 있는데, 좀 더 유연한 이용을 위해서는 움직이는 장애물에 대처하는 연구가 필요하다.

움직이는 장애물과 이동 로봇이 충돌을 회피하는 경로에 관한 연구에서, Kant 와 Zucker[1]는 움직이지 않는 장애물을 피해서 목적지까지 도달하는 경로를 계획하고 움직이는 장애물이 이 경로를 지날때 움직이는 장애물이 경로에 처음 도달하여 경로를 완전히 벗어나는 시간의 차를 이용하여 이동 로봇의 속도를 결정하고, 여기에 Geometric Approach를 이용하여 움직이는 장애물과의 충돌을 회피하고자 하였다. Griswold[2]는 Kant와 Zucker의 방법에서 일정하다고 할 수 없는 움직이는 장애물의 속도와 방향을 확률적으로 나타내어 움직이는 장애물이 이동 로봇의 경로를 지나갈 때에 충돌 가능성이 있는 공간을 확률적으로 나타내고 이 확률적 공간을 이동 로봇이 지나지 않도록 이동 로봇의 속도를 결정하였다. 위의 두 방법은 모두 경로를 바꾸지 않고 계획된 경로내에서만 속도를 줄이거나 높여서 움직이는 장애물과의 충돌을 회피하는 방법을 이용하였다. Fujimura 와 Samet[3]는 CSG Tree에 시간을 첨가시켜 CSG Tree를 Bintree로 바꾸어서 이동 로봇이 이동할 수 있는 공간들을 Bintree로 만들고, 이를 충돌이 일어나지 않는 공간을 찾아 이동하는 방법에 이용하여 움직이는 장애물과의 충돌을 회피하는 현실적인 알고리즘을 만들었다. Kyriakopoulos 와 Saridis[4,5]는 거리를 추정하여 움직이는 장애물과의 충돌을 예측하는 거리 함수를 만들고 이 거리 함수를 이용하여 충돌을 회피하는 방법을 제시했다. Fiorini 와 Shiller[6]는 처음으로, 움직이는 물체와 이동 로봇간의 상대 속도를 이용하여, 충돌이 일어나지 않게하는 이동 로봇의 속도벡터가 놓일 수 있는 경계를 제시하였다.

본 연구에서는 움직이는 장애물과 이동 로봇간의 상대 속도를 이용하여 충돌 회피 경로를 찾아내는 방법과 Attractive 포텐셜[7]을 이용하는 방법을 제시한다. 앞서 Fiorini 와 Shiller 는 움직이는 장애물의 속도를 일정하다고 가정하고, 이동 로봇의 속도도 일정하다고 가정한 상태에서 이동 로봇이 움직이는 장애물과의 충돌을 회피해 이동할 수 있는 이동 로봇의 속도 벡터의 영역을 제시하였다. 그러나, 이들은 가장 적절한 이동 로봇의 이동 방향을 제시하지 않았고, 초기 상황에서만 알고리즘을 이용하기 때문에 움직이는 장애물의 상황이 변할때 대응할 수 있는 방법을 제시하지 않았다. 또한, 조향을 고려한 현실적인 충돌 회피 방법에 대하여도 제시하지 않았다. 본 논문에서는 이를 보완하기 위해 움직이는 장애물의 확률적 위치추정을 이용하여 움직이는 장애물이 관측값과 일정한 양의 랜덤한 오차를 갖는 속도로 이동할 때에도 상대 속도를 이용하여 가장 적절한 충돌 회피 경로를 찾을 수 있도록 하고, 이동 로봇의 조향을 고려한 곡선 경로를 생성하며, 움직이는 장애물의 일정한 속도변화를 갖고 곡선으로 움직일 경우에 따른 충돌 회피 경로를 Attractive 포텐셜을 이용해 안정성을 고려한 현실적인 최적의 충돌 회피 경로를 제시하고 이를 모의실험하여 타당성을 보인다.

2. 이동 로봇과 움직이는 장애물간의 충돌 예측

이동 로봇은 센서에서 얻은 데이터들을 이용해서 움직이는 장애물의 속도와 위치를 계산하게 되는데[8], 움직이는 장애물과의 충돌을 예측하려면, 예측하려고 하는 순간 이전의 데이터를 이용하여 움직이는 장애물의 속도와 위치를 추정해야만 한다. 본 연구에서는 움직이는 장애물의 충돌이 일어났을 때의 위치를 추정하기 위해 움직이는 장애물의 속도가 Gaussian 확률 분포를 갖는 Random Walk를 한다고 가정을 한다. 이러한 가정은 예측하려는 장애물의 속도가 예측 이전에 관찰된 장애물의 속도와 높은 상관관계를 가지고 있다고 생각할 수 있고, 특히, 물리적 운동 현상에 잘 맞는다.

2.1 움직이는 장애물의 위치 추정

앞에서의 가정을 통해서 i+1번째 스텝에서 관측될 움직이는 장애물의 속도를 i번째 스텝에서 관측한 속도를 이용하여 다음과 같이 추정할 수 있다.

$$V_O(i+1) = V_O(i) + e_{vo}(i) \qquad (1)$$
$$e_{vo}(i+1) \sim N(0, {\sigma_{vo}}^2)$$

여기에서 $e_{vo}(i+1)$은 i+1번째 스텝에서의 속도를 그 i번째 스텝에서 관측된 속도로 추정할 때 나타날 수 있는 오차이다. 앞에서 장애물의 속도가 Random Walk 라고 가정하였으므로 $e_{vo}(i+1)$은 평균이 0이고 분산이 ${\sigma_{vo}}^2$이 되는 Random Error가 된다. 즉,

$$\sigma_{vo}^{\ 2} = \frac{1}{M-1}\sum_{n=i-M+1}^{i} e_{vo}^{\ 2} \quad (M>1)$$

$$e_{vo}(n) = Vo(n) - Vo(n-1)$$

식(1)을 이용하여 움직이는 장애물의 i+1번째 스텝에서의 위치를 추정하면,

$$Po(i+1) = Po(i) + Vo(i+1)Ts \qquad (2)$$
$$= Po(i) + Vo(i)Ts + e_{vo}(i+1)Ts$$

계속해서, 이동 로봇이 N번째 스텝 이후의 움직이는 장애물의 위치까지 추정한다고 가정하면, 움직이는 장애물의 i+N번째 스텝에서의 위치, 즉, N · Ts후의 위치는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$Po(i+N) = Po(i) + Vo(i)NTs + Ts\sum_{n=1}^{N} e_{vo}(i+n) \quad (3)$$

여기서, Ts는 Sampling Time 이고,

$$\sum_{n=1}^{N} [e_{vo}(i+n)] = 0 \quad (n=1,...,N)$$

이므로, 장애물의 추정위치는

$$\hat{Po}(i+N) = Po(i) + Vo(i)NTs$$

이다. 이때, $Ts\sum_{n=1}^{N} e_{vo}(i+n)$의 분산은 $Po(i+N)$

의 분산이 된다. 따라서, $Po(i+N)$ 는 다음과 같이 나타내진다.

$$Po(i+N) \sim N(\hat{Po}(i+N),\ \sigma_{po}^{\ 2}) \qquad (4)$$
$$\sigma_{po}^{\ 2} = Ts^2 N\ \sigma_{vo}^{\ 2}$$

$Po(i+N)$가 위처럼 정규 분포 함수를 나타내므로 r을 다음과 같이 정의하면 $Po(i+N)$는 $\hat{Po}(i+N)$를 중심으로 하고 반경이 r인 원 안에 존재할 확률이 99%이상이 되게 된다.

$$r = 3\sqrt{\sigma_{po_x}^{\ 2} + \sigma_{po_y}^{\ 2}} \qquad (5)$$

이와 같은 계산에 의해서 움직이는 장애물이 Random Walk를 한다고 가정하면 $Po(i+N)$ 이 $\hat{Po}(i+N)$를 중심으로 하고 반경이 r인 원 안에 존재한다고 추정할 수 있고, 이를 이용해서 충돌이 일어날 때 그 충돌 위치를 추정할 수가 있다.

2.2 확률적 충돌 위치의 추정

움직이는 장애물과 이동 로봇과의 충돌은 움직이는 장애물과 이동 로봇과의 거리를 지속적으로 관측하고, 통계적으로 추정한 움직이는 장애물의 N · Ts후의 위치와 그 때의 계획된 경로에 의해 이동 로봇의 위치 사이의 거리를 계산하여서 알 수가 있다. 계산된 움직이는 장애물의 중심 위치와 이동 로봇의 중심 위치 사이의 거리를 움직이는 장애물의 반경 (Ro)과 이동 로봇의 반경 (R),그리고, 앞 절에서 계산한 움직이는 장애물의 중심의 확률적 분포 반경(r)의 합과의 크기와 비교함으로써 충돌의 가능성이 있는가를 확인할 수 있다.

그림1에서, 움직이는 장애물과 이동 로봇 사이의 거리를 $D(i)$라고 하면, $D(i)$와 N번째 스텝후의 추정거리 $\hat{D}(i+N)$ 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$D(i) = |P(i) - Po(i)|$$
$$\hat{D}(i+N) = |P(i=N) - \hat{Po}(i+N)| \qquad (6)$$

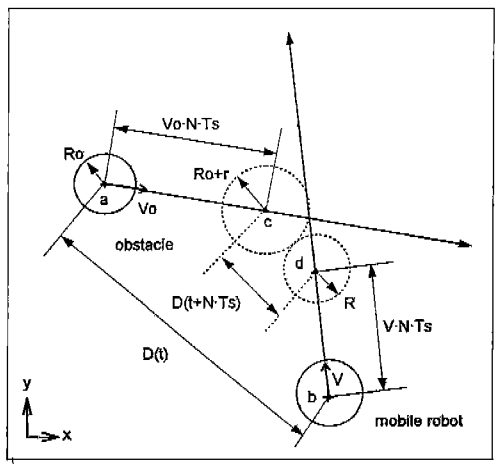


Fig. 1 Collision of mobile robot and moving obstacle

따라서, 다음과 같이 움직이는 장애물의 추정위치와 계산된 이동 로봇의 위치 사이의 거리가 $(Ro+R+r)$ 보다 작게 되면, 즉,

$$\hat{D}(i+N) < (Ro+R+r) \qquad (7)$$

이면, 충돌의 가능성이 발견이 되고, 충돌을 회피 할 수 있는 알고리즘이 필요하게 된다.

3. 상대 속도를 이용한 충돌 회피 알고리즘

3.1 상대 속도를 이용한 충돌 회피

식(6)에서의 이동 로봇과 움직이는 장애물 사이의 거리를 이용하여 충돌의 가능성을 알아보았을 때, 충돌이 일어날 수 있는 가능성이 발견된 순간, 즉, 식(7) 처럼 된 순간의 이동 로봇의 위치를 원점으로 하고, 이동 로봇의 전진 방향을 Y축으로 하는 좌표계에서 충돌이 일어나는 순간의 움직이는 장애물의 추정 위치를 (X_o,Y_o)라고 한다. 경로 계획에서 얻어진 이동 로봇의 이동 목표지점을 (X_g,Y_g) 라고 하고, 이 목표지점까지 이동 로봇은 최적의 속도 V로 이동하고 있다고 가정한다. (X_o,Y_o)에서의 움직이는 물체의 속도는 충돌을 예측한 순간의 속도 Vo로 추정된다.

그림2에서, 이동 로봇이 N · Ts의 시간동안 갈 수 있는 위치를 (X_t,Y_t)라고 하고 이 위치들의 궤적을 Pt 라고 한다. 이때, 만일 이동 로봇이 조향할 때의 줄어드는 속도를 고려하지 않는다면, 이 Pt는 원의 궤적의 일부로 나타나게 된다. 이동 로봇이 조향할 때에 줄어드는 속도를 고려하면, 조향 각도의 크기에 따라 그만큼 이동할 수 있는 직선거리가 줄어들게 되므로 Pt는 타원의 일부와 같은 모양을 하게 되는데, 이는 조향 방법에 따라 다르게 나타난다. 그림3에서 Pt(a)는 조향을 고려하지 않았을 경우에 원호로 나타나는 Pt의 모양을 나타내고, Pt(b)는 조향을 고려한 경우에 나타나는 Pt의 모양을 나타내고 있다. 이처럼 Pt가 정해지면, 이동 로봇이 갈 수 있는 경로는 원점에서 (X_t,Y_t)를 거쳐 (X_g,Y_g)로 가는 경로가 된다.

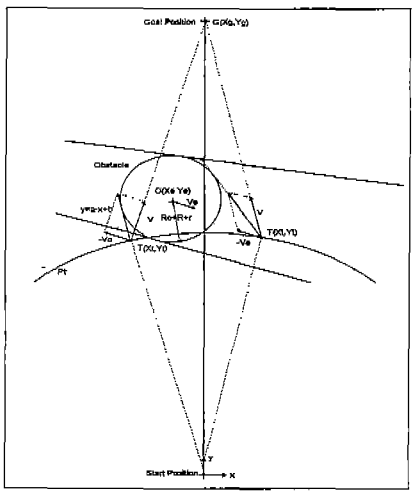


Fig. 2 Collision avoidance path using the relative velocity

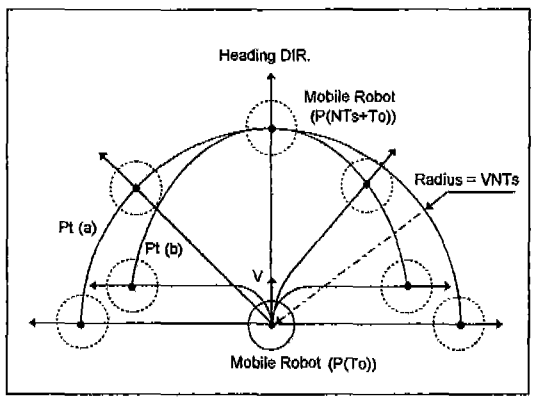


Fig. 3 Pt shape

이동 경로가 움직이는 장애물과의 충돌을 회피 할 수 있으려면, (X_t,Y_t)에서 이동 로봇과 움직이는 장애물과의 상대 속도의 방향이 (X_o,Y_o)를 중심으로 하고 반경이 $(Ro+R+r)$인 원에 접촉하지 않으면 되는데, 이러한 영역은 그림4에서 보듯이 (X_t,Y_t)에서 원에 그은 두 접선의 방정식이 만드는 원을 포함하는 두 기울기 사이의 영역(CC)을 벗어나면 된다. 이러한 조건을 만족하면, 다음으로 최적의 방향은 결국, 상대 속도의 방향중에 다음의 경로의 직선거리 DP가 최소가 되는, 즉, 최단 경로가 되는 방향이 되어야 한다.

$$DP = \sqrt{X_t^2+Y_t^2} + \sqrt{(X_g-X_t)^2+(Y_g-Y_t)^2} \qquad (8)$$

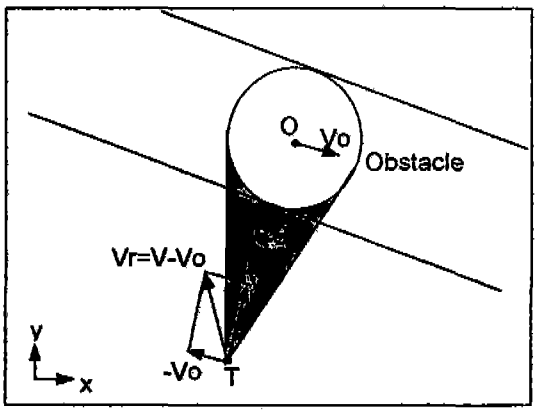


Fig. 4 Collision avoidance range

이러한 최단 경로의 방향은 결국, 접선의 방정식의 기울기와 상대 속도의 방향이 같을 때 나타나고, 이러한 방향은 그림2에서 보면 이동 로봇의 좌우로 두가지의 방향이 나타나게 된다. 이 두가지 방향중에서 *DP*가 작은 쪽의 경로를 이용하여 충돌을 회피하게 된다. 보통 움직이는 장애물의 속도와 이동 방향, 그리고, 충돌이 일어날 때의 위치에 따라 Pt위에서 이동 경로가 결정이 된다. 예를 들어 좌에서 우로 장애물이 이동하고 있을때에는 움직이는 장애물의 속도가 클수록 좌측의 경로가 선택되고 속도가 작을수록 우측의 경로가 선택이 된다. 수식적으로 이를 정리하면, 먼저 움직이는 장애물과 이동 로봇과의 상대 속도의 방향은 다음과 같이 나타난다.

$$
\begin{aligned}
&|\vec{V}| = V \quad \angle\vec{V} = \tan^{-1}((Y_g - Y_t)/(X_g - X_t)) = \phi \\
&|\vec{Vo}| = Vo \quad \angle\vec{Vo} = \theta \\
&|\vec{V} - \vec{Vo}| = \sqrt{V^2 - Vo^2 - 2VVo\cos(\phi + \theta)} \qquad (9) \\
&\angle(\vec{V} - \vec{Vo}) = \tan^{-1}\left(\frac{(V\sin\phi - Vo\sin\theta)}{(V\cos\phi - Vo\cos\theta)}\right)
\end{aligned}
$$

또, Pt상의 임의의 점 (X_t,Y_t)에서 (X_o,Y_o)를 중심으로 하고 반경이 $(Ro+R+r)$인 원에 그은 접선의 방정식의 기울기는 다음의 두 방정식의 해가 하나만 존재하는 a를 구하면 된다.

$$
\begin{cases} y = ax + b \\ (x - X_o)^2 + (y - Y_o)^2 = (Ro + R + r)^2 \end{cases} \qquad (10)
$$

이때,

$$
a = \frac{-(X_o - X_t)(Y_o - Y_t) \pm \sqrt{(Ro+R+r)^2((X_o - X_t)^2 + (Y_o - Y_t)^2 - (Ro+R+r)^2)}}{(Ro+R+r)^2 - (X_o - X_t)^2}
$$

따라서, a와 $\tan(\angle(\vec{V} - \vec{V}_o)$가 같게 되는 (X_t,Y_t)를 찾으면 된다.

$$
a = \tan(\angle(\vec{V} - \vec{V}_o)) \qquad (11)
$$

움직이는 장애물의 속도가 너무 빠르거나 움직이는 장애물이 너무 크면 식(11)을 만족하는 (X_t,Y_t)가 존재하지 않을 수도 있는데, 이는 이동 로봇이 움직이는 장애물과의 충돌을 예측하는 거리가 움직이는 장애물의 속도나 크기에 비해 짧기 때문이다. 이럴 경우에는, 예측할 수 있는 거리를 이동 로봇이 활동하는 주변에 나타날 수 있는 움직이는 장애물들의 대략적인 속도와 크기에 맞추어야 한다. 충돌 예측 거리는 움직이는 장애물을 관측하는 센서에 의해 결정되게 되는데, 센서의 성능에 따라 부득이하게 예측 거리를 작게 할 경우에는 움직이는 장애물의 속도와 크기를 고려하여 최적의 안전지역으로 대피할 수 있는 알고리즘을 만들어서 안전지역으로 대피한 후에, 다시 움직이는 장애물과의 충돌을 회피하면서 목표지점으로 이동할 수 있는 경로를 찾아야 한다.

3.2 조향을 고려한 곡선 경로의 생성

별도의 조향 바퀴가 없이 두개의 구동 바퀴만을 가지고 있는 이동 로봇은 두 바퀴의 속도의 차를 이용하여 조향을 하게 된다. 계획된 경로를 최적의 속도 V로 이동할 때에는 두 바퀴의 속도가 모두 V가 된다. 조향을 위해서 두 바퀴의 속도 차이를 만드는 방법은 한쪽 바퀴의 속도를 높이거나 한쪽 바퀴의 속도를 줄이는 방법, 또, 한쪽 바퀴의 속도를 줄이고 한쪽 바퀴의 속도를 높이는 방법이 있다. 이때, V가 최적의 속도라고 하면, 어느 한쪽 바퀴의 속도를 높이는 것은 모터의 최대 속도를 넘을 경우가 발생하게 된다. 따라서, 한쪽 바퀴의 속도를 줄여서 조향을 하는 것이 합리적이라고 생각할 수 있다. 그림5는 속도의 가감속에 주로 이용되는 사다리꼴 모양의 속도 가감속을 나타내고 있다. 가속도와 감속도를 일정하게 놓고, 원하는 속도차 만큼 가감속구간과 등속구간의 시간을 적절하게 조절하면 원하는 속도차를 가지고 원하는 각도만큼의 조향을 할 수 있게 된다.

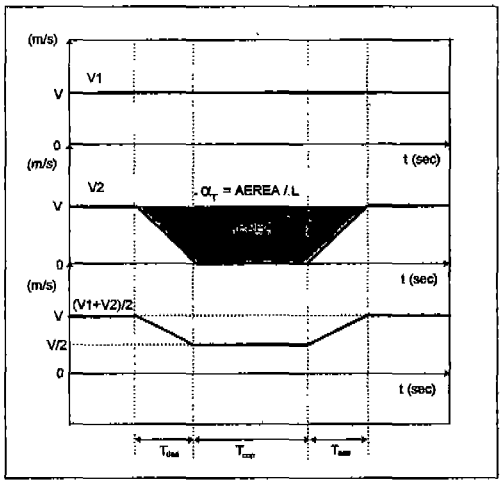


Fig. 5 Turning velocity of mobile robot

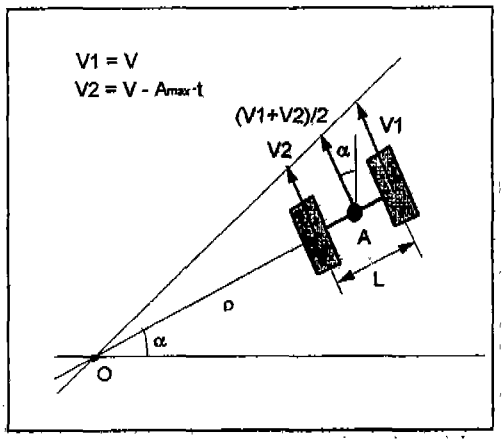


Fig. 6 Relation between turningangle and wheel velocities

미끄러짐 없이 조향을 할 수 있는 이동 로봇의 최대 가속도를 A_{max}라고 하고, 이 가속도로 한쪽 바퀴의 속도를 T_{dec}동안 감속시킬 때, 감속 구간에서의 조향각 (α_{dec})과 감속 시간과는 그림6에서 다음과 같은 관계를 가진다.

$$\rho = \frac{L(V_1+V_2)/2}{(V_1-V_2)} = \frac{L(V-A_{\max}t/2)}{A_{\max}t}$$

$$\frac{d\alpha_{dec}}{dt} = \omega = \frac{(V-A_{\max}t/2)}{\rho} = \frac{A_{\max}t}{L}$$

$$\alpha_{dec} = \int_0^{T1} \frac{A_{\max}t}{L}dt = \frac{A_{\max}T_{dec}^2}{2L} \qquad (12)$$

(이때, $A_{\max}T_{dec} < 2V$)

또, 감속후의 속도차를 유지 하면서 양쪽 바퀴 모두 T_{con} 동안 등속으로 운동하는 등속 구간에서의 조향각 (α_{con})은 다음과 같이 나타나게 된다.

$$\frac{d\alpha_{con}}{dt} = \frac{(V-A_{\max}T_{dec}/2)}{\rho} = \frac{A_{\max}T_{dec}}{L} \qquad (13)$$

$$\alpha_{con} = \int_0^{T_{con}} \frac{A_{\max}T_{dec}}{L}dt = \frac{A_{\max}T_{dec}T_{con}}{L}$$

그림7에서 A에서 B구간은 감속구간, B에서 C구간은 등속 구간으로 나타나고, C에서 D구간은 A에서 B구간에서 감속시킨 V_2를 다시 가속도 A_{max}로 V가 되도록 가속시킨다. 이때,C에서 D구간에서 조향되는 조향각 (α_{con})은 가속 구간에도 감속 구간의 조향각 (α_{dec})과 같은 크기가 된다. 따라서, 전체 구간에서 얻어지는 조향각 (α_T)은 다음과 같다.

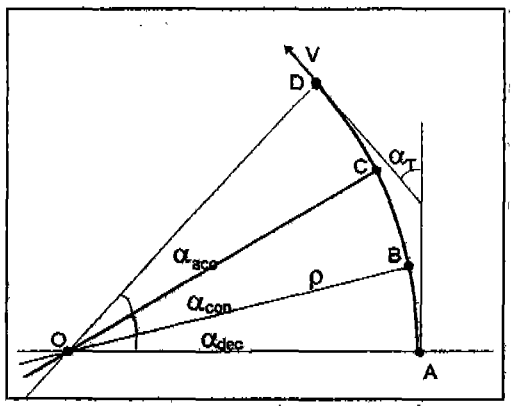


Fig. 7 Turning method of mobile robot

$$\alpha_T = 2\alpha_{dec} + \alpha_{con} = \frac{A_{\max}T_{dec}(T_{dec}+T_{con})}{L} \qquad (14)$$

이처럼 조향각과 가감속 시간과의 관계를 알아보았는데, 이를 고려해서 앞절의 충돌 회피 경로를 다시 생각하면 그림8에서 처럼 (X_t,Y_t)의 궤적 Pt가 나타나고 있음을 알 수가 있다. (X_t,Y_t)에서 목표지점 (X_g,Y_g)로 조향을 할 때에도 같은 방법으로 조향을 하게 된다.

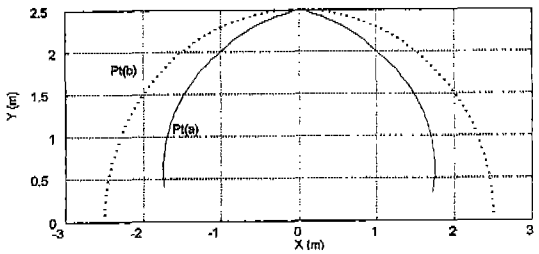


Fig. 8 Pt shape considering the turning

3.3 Attractive 포텐셜을 이용한 충돌 회피 알고리즘

움직이는 장애물과의 충돌을 회피할 때에 앞절에서 처럼 최단의 경로를 선택하는 방법도 있지만, 움직이는 장애물의 상황 변화에 보다 안정적으로 대처하기 위해서는 attractive 포텐셜을 이용해서 안정도를 높이는 것도 좋은 방법이다. 움직이는 장애물과의 충돌 회피에서 안정도는 이동 로봇이 움직이는 장애물과의 충돌을 피해나갈때, 충돌을 회피 할 수 있는 여유 정도로 나타낼 수 있다. 이는 앞에서의 접선의 방정식의 기울기 (a)의 각도와 이동 로봇과 움직이는 장애물의 상대 속도의 방향각 $(\angle(\bar{V}-\bar{V}_o))$의 차이를 이용해서 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$S = \tan^{-1} a - \angle(\bar{V}-\bar{V}_o) \qquad (15)$$

충돌 회피 경로의 길이 DP에 따른 충돌 회피 경로를 생각해 보면, 당연히 DP는 작을수록 충돌 회피에 유리하다. 그러나, 이 값은 다른 값들보다 매우 큰 값을 가지게 되므로 DP에 곱해지는 K_{dp}의 값은 다른 상수들보다 작은 값을 가져야 한다. 또한, 조향각 (α_T)에 따른 충돌 회피 경로를 생각해 볼때, 작은 조향각을 가지고 있을때에는 조향에 걸리는 시간이 줄어들어서 속도의 감속 시간이 줄어들게 되므로 조향각이 큰 경우보다 유리한 충돌 회피 경로가 된다. 따라서, 다음과 같이 attractive 포텐셜을 정의하고, Pt상의 점들에 대해서 우선, 앞에서와 같은 방법으로 충돌이 일어나지 않는 (X_t,Y_t)에 대해서 즉, 이동 로봇과 움직이는 장애물과의 상대 속도의 방향이 (X_o,Y_o)를 중심으로 하고 반경이 $(Ro+R+r)$인 원에 접촉하지 않는 (X_t,Y_t)에서 E가 가장 큰 값을 갖는 (X_t,Y_t)를 찾아 그 방향으로 충돌 회피 경로를 형성한다.

$$E = K_s S - K_{dp} DP - K_\alpha \alpha_T \qquad (16)$$

이때, 각 변수들의 계수들 K_s, K_{dp}, K_α 들은 모의 실험을 통해 적절한 값으로 결정한다.

3.4 연속 탐색을 통한 충돌 회피

움직이는 장애물이 직선으로만 이동한다고 가정하면, 한번의 충돌 회피로 충돌이 일어나지 않는 경로를 따라서 이동한다. 그러나, 움직이는 장애물이 일정한 곡선으로 이동할 때에는 충돌 회피 알고리즘은 곡선에 대해서 그림 9처럼 관측된 움직이는 장애물의 위치에 의해 생성되는 직선 궤적을 따라 움직이는 장애물이 이동한다고 생각하고 충돌 여부와 충돌 회피 경로를 설정하게 된다. 이에 따라서, 일정한 곡선 경로에 대해서 충돌 회피 경로를 생성하려면 연속적인 탐색을 통해 충돌을 회피할 수 있는 경로를 찾아내어 충돌을 회피하면서 이동할 수 있도록 해야 한다. 충돌 회피 알고리즘에서 곡선 경로를 움직이는 장애물의 위치와 속도를 감지하는 센서의 샘플링 시간 동안 같은 하나의 직선 경로로 이동 경로를 예측하게 되고 다음 센서의 샘플링 시간 동안에는 또다른 하나의 직선 경

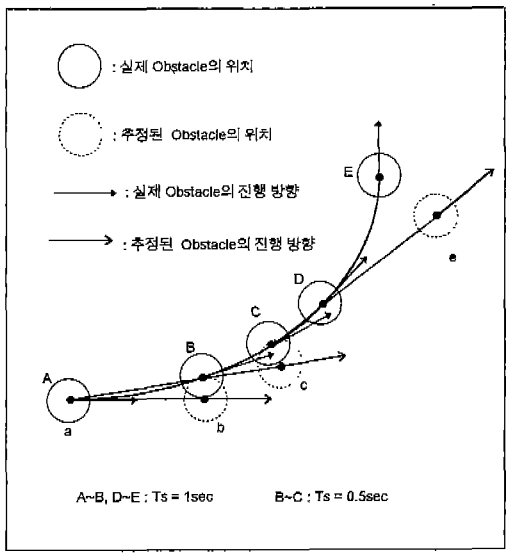


Fig. 9 Collidion estimation at circular path of moving obstacle

로로 움직이는 장애물이 이동할 것이라고 예측한다. 즉, 움직이는 장애물의 곡선 경로는 연속 탐색에 의해서 센서의 샘플링 시간 동안의 짧은 직선의 경로로 나타나게 된다. 따라서, 센서의 샘플링 시간이 짧으면, 움직이는 장애물의 곡선 경로에 대해서도 충분히 충돌 회피를 할 수가 있다. 그러나, 시간에 따라 아주 급격히 변하는 곡선 경로를 따라 움직이는 장애물이 이동할 경우에는 여러번의 탐색에도 불구하고 충돌을 일으킬 경우가 발생하게 된다. 그림9에서 A,B,C,D,E는 움직이는 장애물이 곡선 경로로 움직일 때, 움직이는 장애물의 실제 위치를 나타내고, a,b,c,e는 움직이는 장애물의 추정된 위치를 나타낸다. A-B에서는 완만한 곡선이므로 실제 움직이는 장애물의 위치 B와 추정된 위치 b의 거리가 작게 나타나고, B-C에서는 샘플링 시간이 작기 때문에 C와 c의 거리가 작게 나타난다. 그러나, D-E에서 처럼 급격히 움직이는 장애물의 이동 방향이 바뀌고 샘플링 시간도 클 때는 실제 움직이는 장애물의 위치 E와 추정된 위치 e의 거리가 크게 나타나게 되어 추정된 위치를 이용해서 움직이는 장애물과 충돌을 회피하는 경로를 찾아 이동 로봇이 이동할 경우에도 충돌이 발생할 수 있게 된다.

4. 모의 실험 및 결과

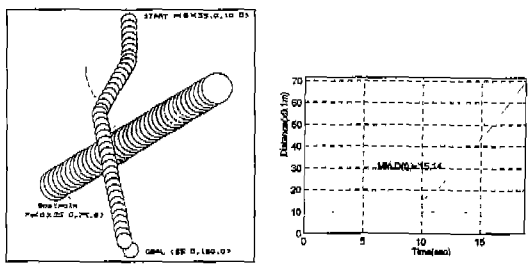
본 연구에서 이동 로봇의 경로는 여러가지 소국적 경로 계획에 의해 이동 목표점이 주어지고, 이 이동 목표점까지는 직선 경로로 그리고 최적의 속도로 이동한다고 가정한다. 이동 로봇은 미끄러짐 없이 이동한다고 가정하고, 조향할 때에도 미끄러짐이 발생하지 않는 속도차를 가지고 조향을 한다고 가정한다. 이동 로봇의 좌우 바퀴축간의 거리(L)는 0.5m라 하고, 한쪽 바퀴의 최적의 선속도(V)는 0.5m/sec라고 가정한다. 한쪽 바퀴의 미끄러짐없는 최고 선가속도(A_{max})는 $1m/sec^2$이라고 가정한다.

앞장에서의 충돌 회피 알고리즘을 모의 실험하기 위해서 이동 로봇의 속도는 일정하게 V라고 하고, 이때, 처음 충돌의 가능성이 발견된 지점에서 경로 계획에서 얻어진 목표지점, (X_g ,Y_g)까지는 직선 경로라고 단순화시켰다. 움직이는 장애물에 대해서는 반경이 0.7m라고 대략적으로 가정하였다. 또한, 이동 로봇의 움직이는 장애물의 위치와 속도를 알아내는 센서의 샘플링 간격은 0.5초로 가정하였다. 그리고, 이동 로봇이 예측하는 거리는 전방의 2.5m(N = 10)반경의 반원으로 한다. 이동 로봇의 속도는 0.5m/s를 최적 속도로 하여 이동하고 있다고 가정한다.

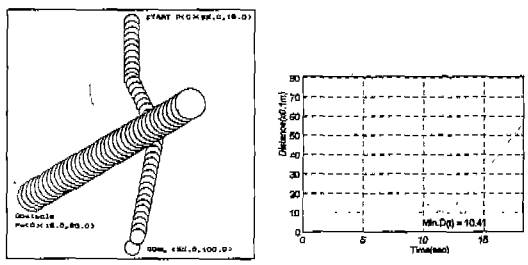
다음의 모의 실험 결과를 나타낸 그림들에서 충돌 회피가 성공적으로 이루어졌는가를 알아 보는 것은 이동 로봇과 움직이는 장애물의 반경의 합이 이동 로봇과 움직이는 장애물과의 최소거리 보다 큰 가를 알아보면 되는데 이동 로봇과 움직이는 장애물의 반경의 합이 1m가 되므로 이들의 최소 거리가 1m보다 작으면 충돌이 일어났다고 할 수 있다. 모의 실험 결과는 10cm단위로 표시되기 때문에 Min.D(t)가 10보다 작으면 안되는데, 모의 실험 결과는 모두 10보다 조금 큰 값들을 나타내고 있다.

그림10에서는 움직이는 장애물이 직선운동을 하고 그 속도가 0.3m/s일때, 이동 로봇이 움직이는 장애물을 피해 이동해 가는 것을 보여준다. 이때, 이동 로봇이 인식하는 움직이는 장애물의 속도는 움직이는 장애물의 실제 속도에 10퍼센트의 랜덤 에러를 더한 속도가 된다. (a)에서는 (b)보다 초기의 움직이는 장애물의 위치가 왼쪽으로 나타나있기 때문에 충돌이 발견되는 순간의 움직이는 장애물의 위치가 (a)는 왼쪽으로 (b)는 오른쪽으로 치우치게 되어서, 같은 속도로 움직이는 장애물이 이동하고 있다고 하더라도 (a)는 움직이는 장애물의 오른쪽으로 (b)는 왼쪽으로 충돌 회피 경로를 설정하는 것을 알 수 있다.

앞에서 기술한 것과 같이 움직이는 장애물이 곡선 경로를 따라 이동할 경우에는 직선 경로와 달리 한번의 충돌



(a) N=6



(b) N=14

Fig. 10 Simulation result for which obstacle moves along straight line

회피 경로 설정으로는 충돌을 회피하기가 힘들기 때문에 여러번의 탐색에 의해 충돌 회피 경로를 바꾸어 줄 수 있어야 한다. 그림11은 3번의 탐색에 의해서 움직이는 장애물의 속도가 다음과 같이 시간에 따른 변화를 갖고 이동할 경우에 결정되는 충돌 회피 경로를 보여주고 있다.

$$Vo_x = 0.5(1-0.05t)\cos(-\pi(1-0.2t)/6) \qquad (17)$$
$$Vo_y = 0.5\sin(-\pi(1+0.1t)/6)$$

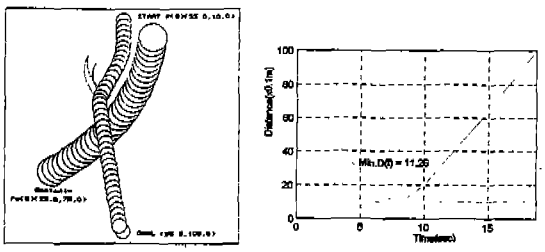
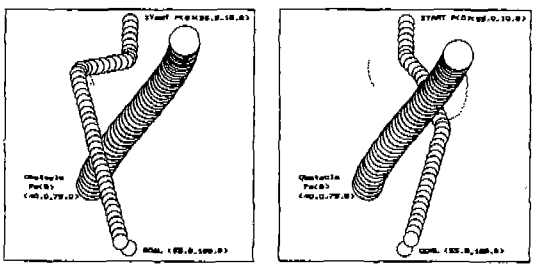
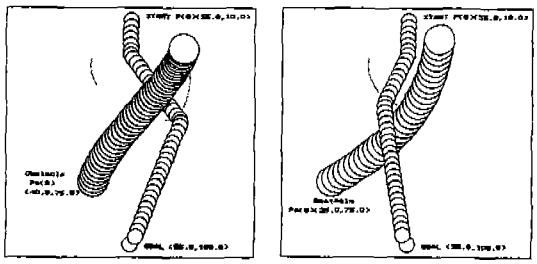


Fig. 11 Simulation result for which obstacle moves along circular path



(a) $K_s = 1,\ K_{dp} = 0,\ K_\alpha = 0$ (b) $K_s = 0,\ K_{dp} = 1,\ K_\alpha = 0$



(c) $K_s = 0,\ K_{dp} = 0,\ K_\alpha = 1$ (d) $K_s = 10,\ K_{dp} = 0.1,\ K_\alpha = 1$

Fig. 12 Simulation results using attractive potential for avoid the moving obstacle along the circular path

그림12는 K_s, K_{dp}, K_α 가 각각 일정한 값 ($K_s = 10$, $K_{dp} = 0.1$, $K_\alpha = 1$) 을 갖고, 식(17)과 같은 속도로 움직이는 장애물이 이동하는 경우에 대해서 attractive 포텐셜을 이용해서 안정도를 고려해준 경우의 충돌 회피 경로를 보여주고 있다. 그림11의 모의 실험결과는 3번의 충돌 회피 경로를 생성한 후에야 충돌을 피해서 목표지점에 도달할 수 있었지만 attractive 포텐셜을 이용했을 경우에는 1번의 충돌 회피 경로만을 생성하고 목표지점에 도달할 수 있음을 보여주고 있다. 이 결과에서 attractive 포텐셜을 이용한 경우가 움직이는 장애물이 곡선 경로를 따라 이동할 때, 가장 빠른 경로를 선택할 경우보다 더 유연하게 충돌 회피 경로를 만들어낼 수 있음을 보여준다.

5. 결 론

본 연구에서는 이동 로봇이 계획된 경로를 따라 목표지점까지 이동하다가 움직이는 장애물이 발견되었을때, 움직이는 장애물과의 충돌의 가능성을 확률적으로 예측하였다. 이때, 충돌의 가능성이 발견되었을 경우, 움직이는 장애물의 속도의 크기와 방향에 따라 이를 회피해 나가는 최적의 경로를 상대 속도를 이용하여 설정하고, 이를 모의 실험을 통해 나타내었다. 모의 실험 결과를 통해서 알 수 있듯이 움직이는 장애물의 속도의 크기와 방향에 따라 적합한 회피 경로를 찾아 이동 로봇이 충돌을 회피해 이동하는 것을 보여주었다.

참 고 문 헌

1. K. Kant and S. W. Zuker. "Toward Efficient Trajectary Planning: The Path-Velocity Decomposition." The International Journal of Robotic Research, 53) : 72-89, Fall 1986.
2. N. C. Griswold. "Control for Mobile Robots in the Presence of Moving Objects." IEEE Transaction on Robotics and Automation, 62) : 263-268, April 1990.
3. K. Fujimura and H. Samet. "A Hierachical Strategy for Path Planning Among Moving Obstacles." IEEE Transaction on Robotics and Automation, 51) : 61-69, February 1989.

4. K. J. Kyriakopoulos and G. N. Saridis. "Distance Estimation and Collision Prediction On-line Robotic Motion Planning." Automatica, 282) : 389-394, 1992.
5. K. J. Kyriakopoulos and G. N. Saridis. "An Integrated Collision Prediction and Avoidance Schem for Mobile Robots in Non-stationary Enviroments." Automatica, 292) : 309-322, 1993.
6. P. Fiorini and Z. Shiller. "Motion Planning in Dynamic Environments Using the Relative Velocity Paradigm." Proceedings-IEEE Int. Conference on Robotics and Automation v.1 : 560-566, 1993.
7. Y. Y. Cha and D. G. Gweon, "Local path planning of a free ranging mobile robot using the directional weighting method", Mechatronics, Vol. 6, No. 1, pp. 53-80, 1996.
8. Y. Y. Cha and D. G. Gweon, "A calibration and range-data extraction algorithm of an omnidirectional laser range finder for free ranging mobile robot", Mechatronics, Vol. 6, No. 6, pp.665-689, 1996.