

다중 이동 로봇의 중앙 감시에 의한 충돌 회피 동작조정 방법

論 文

52D-4-5

Method for Collision Avoidance Motion Coordination of Multiple Mobile Robots Using Central Observation

高 樂 裕* · 徐 銅 辰**
(Nak Yong Ko · Dong-Jin Seo)

Abstract - This paper presents a new method driving multiple robots to their goal position without collision. Each robot adjusts its motion based on the information on the goal location, velocity, and position of the robot and the velocity and position of the other robots. To consider the movement of the robots in a work area, we adopt the concept of avoidability measure. The avoidability measure figures the degree of how easily a robot can avoid other robots considering the following factors: the distance from the robot to the other robots, velocity of the robot and the other robots. To implement the concept in moving robot avoidance, relative distance between the robots is derived. Our method combines the relative distance with an artificial potential field method. The proposed method is simulated for several cases. The results show that the proposed method steers robots to open space anticipating the approach of other robots. In contrast, the usual potential field method sometimes fails preventing collision or causes hasty motion, because it initiates avoidance motion later than the proposed method. The proposed method can be used to move robots in a robot soccer team to their appropriate position without collision as fast as possible.

Key Words : relative distance, avoidability measure, multiple robots, motion coordination, artificial potential field

1. 서 론

최근 2 대 이상의 이동 로봇이 공동 작업 공간 내에서 동시에 작업하는 경우가 많아지고 있다[1-7]. 로봇들은 하나의 로봇으로 조작하기 어려운 큰 물체를 팀을 이루어 조작하거나, 각자의 일을 독립적으로 수행하기도 한다. 이런 경우에 로봇이 공동 작업 공간내의 다른 로봇의 움직임을 고려하여 효과적으로 동작하는 동작 조정이 필요하게 된다. 비록 작업 공간내의 로봇들이 독립적인 작업을 수행한다 할지라도, 최소한 이동 중에 로봇들간의 충돌 회피를 위한 동작 조정이 요구된다. 이러한 관점에서, 본 논문에서는 다중 이동 로봇들간의 충돌을 막으면서 이들을 목표 위치까지 이동시키기 위한 방법을 제안한다. 각각의 로봇들은 자신의 현재 위치, 속도, 목표 위치와 함께 다른 로봇들의 현재 위치와 속도 정보에 의해 자신의 동작을 조정한다. 본 연구에서는 온라인 동작 조정 방법을 제안하며, 각 로봇의 동작 조정을 위하여 다른 로봇의 시작 위치, 목표 위치 정보, 그리고 궤적에 관한 정보는 필요로 하지 않는다. 만일 다른 로봇의 시작 위치, 목표 위치 정보, 그리고 궤적에 관한 정보를 알고 있는 경우에는 실시간 동작 조정이 필요치 않으므로 제안된 방법을 사용하지 않고도 로봇의 동작을 미리 계획할 수 있게 된다.

다중 로봇의 동작 조정 문제는 크게 두 가지로 나누어질 수 있다. 첫번째는 여러대의 로봇들이 서로 충돌을 피하면서 각각의 작업을 수행하는 것이다. 이것은 "수동적 동작 조정"이라고 할 수 있다. 또 다른 하나는 여러대의 로봇이 주어진 하나의 공동 작업 목표를 달성하기 위해 팀을 이루어 협력하여 동작하는 것이다. 이것은 "능동적 동작 조정"이라고 할 수 있다. 이러한 관점에서 본 논문에서는 수동적 동작 조정 방법을 제안한다. 수동적 동작 조정의 예로는 로봇 축구에서의 로봇들의 동작을 들 수 있다[4,6]. 게임 상태의 변화에 따라, 각각의 로봇은 다른 로봇들을 피하면서 가능한 한 빨리 자신에게 적합한 위치로 이동한다.

충돌 회피 동작 조정에서 충돌 회피를 위해서는 기존의 장애물 회피 방법들이 이용될 수 있다. 그러나 인공 전위계 방법[8,9,10]과 같은 방향 명령 방식이나 폭률 기반 방법[11,12,13]과 같은 속도 공간 명령 방식[12]들은 대부분 고정 장애물 회피에 적합한 방식들이어서 이동하는 여러대 로봇들의 충돌 회피 동작 조정방법으로는 적합하지 않다. 로봇들이 공동 작업 영역에서 충돌을 피하며 동작하려면 각각의 로봇들은 다른 로봇들의 이동성을 고려하여 동작을 계획하여야 한다. 본 논문에서는 로봇의 이동성을 고려하기 위해, 충돌회피가능도(AVM: Avoidability Measure) 개념을 사용하였다[14]. 충돌회피가능도는 로봇들 사이의 상대 속도를 고려하여 예측된 로봇들의 충돌 회피 가능 정도를 나타낸다. 충돌 회피가능도의 하나로써 물리학의 도플러 효과를 이용하여 유도된 가상거리 개념이 로봇의 이동 장애물 회피를 위해 제안된 바 있다[14]. 그러나, 이동 장애물 회피를 위해 사용되는 가상 거리는 다중로봇의 충돌 회피 동작 조정에는 적합하지 못하다.

* 正 會 員 : 朝鮮大 情報 · 制御計測工學科 教授 · 工學博士

** 正 會 員 : 朝鮮大 大學院 制御計測工學科

接受日字 : 2002年 9月 25日

最終完了 : 2003年 2月 17日

따라서 본 논문에서는 충돌 회피 가능도의 하나로서 상대거리(RD:Relative Distance)를 제안하고 이를 인공 전위계 방법과 결합한 동작 조정 방법을 제안한다.

본 논문에서 제안된 방법의 효율성을 분석하기 위해 모의 실험을 하였다. 모의 실험에서는 실제 거리를 사용하는 기존의 인공 전위계 방법에 의한 동작조정 결과를 본 연구에서 제안한 방법의 결과와 비교한다. 그리고 로봇들의 충돌 회피 동작에 우선 순위를 주는 경우와 우선 순위가 없이 모든 로봇들이 다른 로봇들의 움직임을 고려하여 동작을 조정하는 경우를 비교한다. 로봇의 동작에 우선 순위를 배정하면 높은 우선 순위를 가진 로봇들은 낮은 우선 순위를 갖는 로봇과의 충돌에 대한 고려 없이 그들의 동작을 계획한다. 낮은 우선 순위를 갖는 로봇들은 높은 우선 순위를 갖는 로봇들을 피하며 이동한다. 즉, 충돌 회피는 낮은 우선 순위의 로봇이 높은 우선 순위의 로봇들을 피함으로써 이루어진다. 작업 성격에 따라 다양한 우선 순위를 배당하여 작업 목적을 달성할 수 있으므로 여러 대 로봇이 작업하는 경우 동작 우선 순위에 대한 고려 및 이에 대한 모의 실험과 결과 검토가 필요하다. 모의 실험 결과를 분석하기 위해서는 동작 조정 방법의 효율 및 성능을 비교하기 위한 비교 기준이 필요하다. 본 연구에서는 간단한 형태의 비교 기준으로서 이동 시간 효율, 이동 공간 효율, 그리고 충돌 회피 여유도를 정의하여 로봇 이동 동작의 성능을 비교한다.

기존의 여러 대 로봇의 충돌 회피 동작 조정에 관한 방법들은 대부분 로봇들의 이동성을 고려하지 못하고 로봇들이 일정한 룰에 의하여 회피 동작을 하도록한다. Wong[15]은 로봇 축구 시스템에서 로봇이 다른 로봇을 피하면서 목표 방향 및 위치로 이동하기 위한 방법을 제안하였다. 이 방법은 제어하려는 로봇과 다른 로봇, 그리고 목표 위치 사이의 위치 관계를 6 가지로 분류하여 각각의 경우에 대하여 퍼지 룰을 적용하여 로봇의 회전 운동장을 구하였다. 이 방법은 본 연구에서 제안된 방법에 비해서 적용이 간단한 반면, 다른 로봇의 이동을 고려하지 않아서 상대 로봇이 이동하는 경우 충돌 회피가 보장되지 않는다. Jongusuk[16]은 여러대 로봇들이 충돌을 피하면서 일정한 방향으로 이동하기 위한 방법을 제안하였다. 이 방법은 로봇들이 서로 일정한 위험 거리 이내에 접근하면 우선 순위가 낮은 로봇이 회피 동작을 한다. 이 방법도 로봇들의 운동성을 고려하지 않아서 로봇들이 서로 접근하는 경우에도 일정한 거리 이내로 접근하지 않으면 회피 동작이 일어나지 않는다. 그리고 일정한 룰에 따라 우선 순위가 낮은 로봇이 회피 동작을 하므로 동일한 로봇끼리도 한번에 충돌 회피가 이루어지지 않고 여러 번의 충돌 감지와 회피 과정을 거친 후에 충돌을 피하게 되어 충돌 회피 과정에 진동이 발생한다. 또한 반드시 동작 우선 순위가 있어야 하므로 서로 협동하여 충돌을 피할 수 있는 방법은 없다. 이에 비해 본 연구에서 제시한 방법은 로봇들 사이의 운동성을 고려하여 다른 로봇이 이동하더라도 충돌 회피가 보장되며, 로봇들이 서로 접근하는 경우 미리 회피 동작을 시작하여 좀더 부드럽게 회피 동작이 일어난다. 또한 로봇들 사이의 동작 우선 순위 부여 여부를 작업 성격에 따라 마음대로 선택할 수 있는 장점이 있다.

본 논문은 2 장에서 충돌 회피 동작 조정 문제 해결에 필요한 표기법을 설명하고 로봇 이동 동작의 성능 및 효율성

비교 기준을 제시한다. 3장에서는, 충돌 회피 가능도를 설명하고, 상대 거리를 유도한다. 4장에서는, 상대 거리를 기반으로 인공 전위계를 적용한 충돌 회피 동작 조정 방법을 설명한다. 5장에서, 컴퓨터 모의실험을 통해 제안된 방법의 효율성, 다른 방법과의 비교 결과 및 응용 가능성을 보여준다. 마지막으로 6 장에서 결론을 맺는다.

2. 문제구성

여러대 로봇의 충돌 회피 동작조정 문제를 풀기 위해 다음과 같은 표기법을 사용한다.

$p_j(t)$	시간 t 에서 로봇 j 의 위치
$P_{sj} = (x_{sj}, y_{sj})$	로봇 j 의 이동 시작 위치
$P_{gj} = (x_{gj}, y_{gj})$	로봇 j 의 이동 목표 위치
r_j	로봇 j 의 반경
$t_i (i=1,2,\dots)$	i 번째 샘플링 시간(Sample Time)

위에 사용된 표기법을 사용하면, N 대 이동 로봇의 충돌 회피 동작조정 문제가 다음과 같이 표현된다.

[충돌 회피 동작조정 문제]

N 대의 로봇들이 충돌하지 않으면서 시작 위치 $P_{sj}, j=1,2,\dots,N$ 에서부터 목표 위치 $P_{gj}, j=1,2,\dots,N$ 까지 효율적으로 이동하도록 동작을 계획하고 제어한다. 로봇 j 는 자신의 목표 위치 P_{gj} , 현재 속도 $p_j(t)$, 현재 위치 $p_j(t)$ 와 함께 다른 로봇들의 현재 속도 $p_k(t) (k \neq j, k=1,2,\dots,N)$ 와 위치 정보 $p_k(t) (k \neq j, k=1,2,\dots,N)$ 를 바탕으로 동작을 조정한다. 로봇 j 는 평면상에서 반지름이 r_j 인 원으로 가정한다.

일반적으로 이동 로봇 동작의 효율성은 각 로봇의 전체 이동 시간(motion time)과 전체 경로 길이(path length)를 통하여 알 수 있다. 그리고 충돌 회피 동작 조정 문제에서는, 충돌 회피에 관한 효율을 고려하기 위해서 전체 이동 시간과 전체 경로 길이 외에 다음의 3 가지 평가 기준을 추가로 정의한다.

[동작 효율성 기준]

- (1) 공간 효율(Spatial Efficiency: SE) : 로봇의 이동 시작 위치에서부터 회피 보장 조건이 만족되는 위치까지의 이동 궤적의 길이를 공간 효율이라고 한다.
- (2) 시간 효율(Time Efficiency: TE) : 로봇의 이동 시간으로부터 회피 보장 조건이 만족되는 위치까지 이동한 순간까지의 경과시간을 시간 효율이라고 한다.
- (3) 충돌 회피 여유도: 로봇이 시작 위치에서 목표 위치까지 이동할 때, 다른 로봇들과의 거리들 중 최소거리를 충돌 회피 여유도라 한다.

공간 효율과 시간 효율은 얼마나 빠르게 로봇들이 충돌을 피할 수 있는 위치로 이동할 수 있는지를 나타낸다. 로봇은 가능하면 짧은 거리로 빠르게 이동하는 동시에 다른 로봇들과 충분한 여유 공간을 가지고 이동하는 것이 바람직하므로 충돌 회피 여유도를 고려하여야한다.

위의 동작 효율성 기준에서 각 로봇의 충돌 회피 보장 조

건은 다음과 같다.

[회피 보장 조건]

시각 t 에 $p_j(t)$ 와 P_{gj} 를 잇는 선분이 $p_k(t)$ ($k \neq j$, $k=1,2,\dots,N$)와 P_{gk} ($k \neq j$, $k=1,2,\dots,N$)를 잇는 $N-1$ 개의 선분들과 교차하지 않으면, 시각 t 에 로봇 j 는 충돌 회피 보장조건을 만족시키는 상태에 있다.

위의 회피 보장 조건은 그림 1에서와 같이 로봇들이 현재 위치에서 목표 위치까지 직선 이동을 하더라도 다른 로봇들과 충돌이 일어나지 않는 상태를 의미한다. 충돌 회피 보장 조건이 만족된 이후에 로봇은 가장 빠른 속도로 목표 위치로 직진하여 최단 거리로 이동할 수 있게 된다. 이상과 같이 동작 조정의 효율성 기준을 정의하고 충돌 회피 가능성과 상대 거리를 이용하여 문제를 해결한 후 모의 실험을 수행하여, 그 결과를 위에서 정의한 기준에 의하여 분석한다.

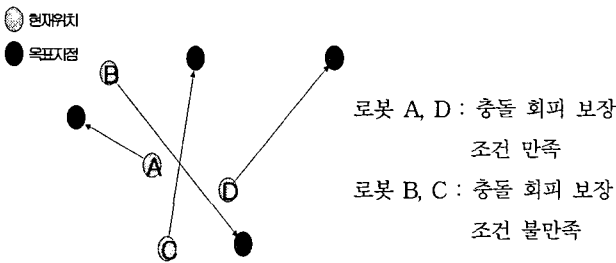


그림 1 충돌 회피 보장 조건
Fig. 1 Condition for collision avoidance

3. 충돌회피가능도와 상대거리

정지된 물체 환경에서의 충돌회피 동작을 위해서는, 단지 로봇과 물체의 위치만을 고려하면 충분하다. 반면, 여러대 로봇의 충돌 회피 동작 조정을 위해서는 로봇들의 상대적인 위치 및 이동성이 고려되어야 한다. 동작 조정에서 로봇의 이동성을 고려하기 위해서, 충돌회피 가능도의 개념을 이용한다.

3.1 충돌 회피 가능도(Avoidability Measure: AVM)

로봇들 사이의 거리는 이들 사이의 충돌 감지를 위해 사용될 수 있다. 또한 각 로봇들이 이동하고 있으므로 그들 사이의 상대 속도에 따라 충돌 가능성이 달라진다. 따라서 이동 로봇들간의 충돌 회피 가능도를 로봇들 사이의 거리와 상대 속도에 의해 다음과 같이 정의한다.

[충돌 회피 가능도]

시각 t 에 로봇 j 와 로봇 k 의 충돌 회피 가능도는 로봇 j 와 로봇 k 사이의 거리 $d_{jk}(t)$, 로봇 j 의 로봇 k 에 대한 외향속도(outward speed) $v_{jk}(t)$, 로봇 k 의 로봇 j 에 대한 외향속도 $v_{kj}(t)$ 들에 관한 함수로서 다음 조건을 만족시킨다.

(조건 1) 거리 $d_{jk}(t)$ 가 증가하면 충돌 회피 가능도는 증가한다.

(조건 2) 외향속도 $v_{jk}(t)$ 가 증가하면 충돌 회피 가능도는 증가한다.

(조건 3) 외향속도 $v_{kj}(t)$ 가 증가하면 충돌 회피 가능도는 증가한다.

여기에서 로봇 j 와 로봇 k 사이의 거리 $d_{jk}(t)$ 와 로봇 j 의 로봇 k 에 대한 외향속도 $v_{jk}(t)$ 는 식(1), (2)와 같다.

$$d_{jk}(t) = \|p_j(t) - p_k(t)\| - (r_j + r_k) \tag{1}$$

$$v_{jk}(t) = \dot{p}_j(t) \cdot \frac{p_j(t) - p_k(t)}{\|p_j(t) - p_k(t)\|} \tag{2}$$

여기에서 로봇 j 의 로봇 k 에 대한 외향속도 $v_{jk}(t)$ 는 로봇 j 의 속도를 로봇 k 에서 로봇 j 방향으로의 단위 벡터와 내적인 값이다. 즉, 이 값이 증가하면 로봇 j 는 로봇 k 로부터 멀어지는 방향으로 이동하며, 만일 로봇 j 가 로봇 k 로 접근하면 이 값은 음수가 된다. 말하자면, 외향속도 $v_{jk}(t)$ 는 로봇 k 에 대한 로봇 j 의 상대적인 접근 동작 상태를 반영한다. 그림 1에 외향속도를 설명하였다. 충돌 회피가능도에 의하면, 충돌 회피 동작 조정 문제는 충돌회피가 보장되는 한계 값 이상 충돌 회피 가능도를 유지하면서 로봇을 이동시키는 문제가 된다. 따라서 구체적인 충돌 회피 가능도의 하나로서 다음과 같이 상대거리를 제안한다.

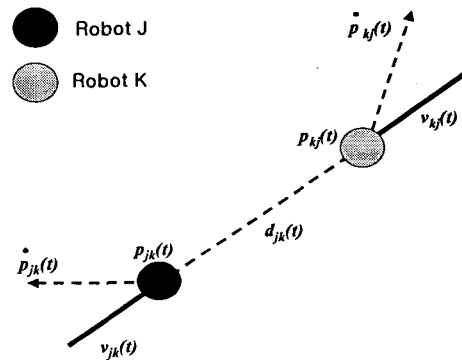


그림 2 로봇의 외향 속도
Fig. 2 Outward speed of robots

3.2 상대거리(Relative Distance:RD)

충돌회피 가능도로서의 조건을 만족하는 함수들은 무수히 많다. 수치적인 방법으로 충돌 회피 동작 조정에 필요한 로봇 구동력을 계산하기 위해, 충돌 회피가능도의 하나로서 상대거리를 다음과 같이 정의한다.

$$rd_{jk}(d_{jk}(t), v_{jk}(t), v_{kj}(t)) = \frac{\sqrt{\{\alpha + v_{jk}(t)\}^2 + \{\beta + v_{kj}(t)\}^2}}{\sqrt{\alpha^2 + \beta^2}} \cdot d_{jk}(t) \tag{3}$$

여기에서

$$\alpha > \max \{ |v_{jk}(t)| \} > 0, \beta > \max \{ |v_{kj}(t)| \} > 0, (\alpha, \beta \in \mathbb{R}) \tag{4}$$

표기의 편의를 위해 $rd_{jk}(d_{jk}(t), v_{jk}(t), v_{kj}(t))$ 를 $rd_{jk}(t)$ 로 줄여서 사용하기로 한다. $d_{jk}(t)$, $v_{jk}(t)$, 또는 $v_{kj}(t)$ 가 증가하면

$rd_{jk}(t)$ 값도 증가하게 되어 상대거리는 충돌회피 가능성으로서의 조건들을 만족시킨다. 로봇이 서로 접근하여 $rd_{jk}(t)$ 값이 감소함에 따라 충돌 회피를 위한 척력을 증가시키면, 보다 빨리 충돌을 피하게 할 수 있다.

식(3)에서, α 가 증가하면, $v_{jk}(t)$ 의 $rd_{jk}(t)$ 에 대한 영향이 줄어들고, $v_{kj}(t)$ 의 $rd_{jk}(t)$ 에 대한 영향은 더욱 줄어든다. 마찬가지로 β 가 증가하면, $v_{kj}(t)$ 의 $rd_{jk}(t)$ 에 대한 영향이 줄어들고, $v_{jk}(t)$ 의 $rd_{jk}(t)$ 에 대한 영향은 더욱 줄어든다. 즉, α 와 β 가 증가하면, 상대거리는 외향속도의 영향을 덜 받게 되어, 상대거리에 기반한 충돌 회피 방법에서는 외향속도 $v_{jk}(t)$ 나 $v_{kj}(t)$ 보다는 실제 거리 값 $d_{jk}(t)$ 의 변화에 민감하게 충돌 회피 경로가 변화한다. 만일 α 와 β 가 $|v_{jk}(t)|$ 와 $|v_{kj}(t)|$ 에 비해 매우 크면, $rd_{jk}(t) \cong d_{jk}(t)$ 가 되어 외향속도 $v_{jk}(t)$ 와 $v_{kj}(t)$ 가 $rd_{jk}(t)$ 에 거의 영향을 미치지 못한다.

반대로 α 와 β 가 작아지면 로봇들의 동작이 상대 속도의 변화에 따라 민감하게 변하며, 회피 동작을 일찍 시작하게 되어 서로 멀리 떨어져 안전하게 이동한다. 즉, 충돌 회피 여유도가 커진다. 그러나, α 또는 β 가 너무 작으면 로봇 동작이 외향 속도의 변화에 대해 너무 민감하게 변화하여, 불필요한 우회 동작을 하고 로봇의 궤적에 진동이 발생할 수 있다. 또한 $v_{jk}(t) = v_{kj}(t) = 0$ 이면, 즉 로봇 j 와 로봇 k 가 선분 $\overline{p_j(t) p_k(t)}$ 방향으로 움직임이 없거나 정지 상태이면, $rd_{jk}(t) = d_{jk}(t)$ 가 된다.

$\alpha \neq \beta$ 이면, $v_{jk}(t)$ 와 $v_{kj}(t)$ 의 $rd_{jk}(t)$ 에 대한 영향력이 서로 달라진다. 식 (3)에서 $\alpha < \beta$ 로 하면 로봇 k 의 이동성이 로봇 j 의 이동성보다 더 크게 상대거리에 영향을 미치고, 반대로 $\alpha > \beta$ 이면 로봇 j 의 이동성이 로봇 k 의 이동성보다 더 크게 상대거리에 영향을 미친다. 즉 α 와 β 값을 서로 다른 값으로 하여 로봇 j 와 로봇 k 의 이동성이 상대거리에 미치는 영향을 달리할 수 있다. 그러나, α 와 β 를 달리하는 것은 위에서와 같이 로봇 j 와 로봇 k 의 운동성에 대한 고려 정도를 달리하기 위해서보다도, 로봇 j 와 로봇 k 의 속도 특성을 고려하기 위해서 필요하다. 즉, 로봇 j 와 로봇 k 의 속도 성능이 다른 경우에 이를 고려해주기 위함이다. 만일 항상 $\alpha = \beta$ 로 하면, $|v_{jk}(t)| > |v_{kj}(t)|$ 인 경우, $\beta > \max\{|v_{kj}(t)|\} > 0$ 은 만족되지만 $\alpha > \max\{|v_{jk}(t)|\} > 0$ 를 만족시키지 못하여 $\alpha + v_{jk}(t) < 0$ 이 될 수도 있게 된다. 또한 $\alpha > \max\{|v_{jk}(t)|\} > 0$, $\beta > \max\{|v_{kj}(t)|\} > 0$ 는 만족되더라도 α, β 값들이 너무 작으면 로봇 궤적이 불필요하게 상대 속도에 민감하게 변하게 된다. 즉, 로봇 j 가 로봇 k 보다 빠르게 이동하는 특성을 가지는 경우 이런 일이 발생할 수 있으므로, 이런 경우에는 $\alpha = \beta$ 로 하는 것보다 $\alpha > \beta$ 로 하여야 적절하다. 하지만 α 와 β 의 크기 차이가 너무 크면 $v_{jk}(t)$ 는 물론 $v_{kj}(t)$ 도 $rd_{jk}(t)$ 에 영향을 별로 미치지 못하므로 $\alpha > \max\{|v_{jk}(t)|\} > 0$, $\beta > \max\{|v_{kj}(t)|\} > 0$ 를 만족시키는 범위 내에서 충분한 충돌 회피 여유도가 보장되도록 하며 α 와 β 의 크기를 비슷하게 유지하는 것이 바람직하다고 할 수 있다.

로봇의 이동 장애물 회피를 위해 기존에 제안된 가상거리 함수(virtual distance function: VDF)의 경우 제어하려는 로봇과 상대방 로봇의 이동성에 대한 고려 정도를 달리하기 위해서 또는 속도 성능이 달라서 α 와 β 값을 서로 달리하면 가상 거리가 실제 거리에 대해 α/β 의 비율로 증가하거나 감소한다[14]. 이에 반해 상대 거리의 경우 α 와 β 값을 서로 달리하더라도 상대 거리가 실제 거리에 비해서 균일하게 비례 증가하거나 비례 감소하지는 않는다.

이상의 α 와 β 에 관한 고찰로부터, α 와 β 는 충돌 회피 여유도, 외향 속도에 대한 회피 동작의 민감성, 각 로봇들의 속도 성능을 고려하여 결정하여야 한다. $rd_{jk}(t)$ 를 (3)과 같이 정의하면, $d_{jk}(t) > 0$ 이 되기 위한 필요 충분 조건은 $rd_{jk}(t) > 0$ 이 된다. 따라서 로봇 j 가 다른 로봇 k 와 충돌하지 않기 위해서는 다음 조건 (5)를 만족해야 한다.

$$rd_{jk}(t) > 0, \quad t \geq t_0 \quad (j \neq k) \quad (5)$$

그러므로, $rd_{jk}(t)$ 를 이용하면, 충돌 회피 동작조정 문제는 $j = 1, 2, \dots, N, k = 1, 2, \dots, N$ 에 대하여 식 (5)의 조건을 만족하도록 로봇을 P_{sj} 에서 P_{gj} 까지 제어하는 문제로 변환된다.

4. 상대거리를 이용한 인공전위계

상대 거리를 일정한 거리 이상 유지하여 충돌을 피하면서 목표 위치로 로봇을 유도하기 위해서 본 논문에서는 인공 전위계 방법을 사용하였다. 인공 전위계는 장애물은 로봇에 척력을 발생시키고 목표 위치는 로봇에 인력을 발생시키는 가상의 역장(force field)이다. 여러 대의 이동 로봇이 공동 작업 영역에서 작업하는 경우, 각각의 로봇은 다른 로봇들을 장애물로 간주하게 된다. 그런데 기존의 인공 전위계는 로봇의 이동성을 고려하지 못하므로, 상대거리를 적용하여 인공 전위계에서 로봇의 이동성을 고려하도록 한다. 따라서 로봇 j 의 구동을 위한 인공전위계는 다음과 같다.

$$U_{art}(p_j(t), p_k(t), P_{gj}) = U_k(p_j(t), p_k(t)) + U_g(p_j(t), P_{gj}) \quad (6)$$

여기에서

$$U_k(p_j(t), p_k(t)) = \begin{cases} \frac{1}{2} \eta \left(\frac{1}{rd_{jk}(t)} - \frac{1}{\epsilon_{rd}} \right), & \text{if } rd_{jk}(t) \leq \epsilon_{rd} \\ 0, & \text{if } rd_{jk}(t) > \epsilon_{rd} (\epsilon_{rd} > 0) \end{cases} \quad (7)$$

$$U_g(p_j(t), P_{gj}) = \frac{1}{2} \xi \|p_j(t) - P_{gj}\|^2 \quad (8)$$

$U_k(p_j(t), p_k(t))$ 는 $p_k(t)$ 에 위치한 로봇 k 에 의해 $p_j(t)$ 에 위치한 로봇 j 에 척력을 발생시키는 인공전위계이다. $U_g(p_j(t), P_{gj})$ 는 $p_j(t)$ 에 위치한 로봇 j 에 P_{gj} 방향으로 인력을 발생시키는 인공전위계이다. 식 (7)에서 ϵ_{rd} 는 로봇 k 에 의해 척력이 발생하는 상대 거리의 범위이다. ϵ_{rd} 가 커지면 $U_k(p_j(t), p_k(t))$ 가 좀 더 넓은 영역에 영향을

미치게 되어, 로봇 j 가 로봇 k 로부터 좀 더 먼 곳에서부터 회피 동작을 시작한다. η 와 ζ 는 각각 척력과 인력을 발생시키는 인공 전위계의 크기를 결정하는 상수 계수이다. 이러한 인공 전위계에 의하여 로봇 j 에 다음과 같은 구동력이 발생된다.

$$F_{arr}(p_j(t), p_k(t), P_{gj}) = -\nabla U_{arr}(p_j(t), p_k(t), P_{gj}) \\ = -\nabla U_k(p_j(t), p_k(t)) - \nabla U_g(p_j(t), P_{gj}) \quad (9) \\ = F_k(p_j(t), p_k(t)) + F_g(p_j(t), P_{gj})$$

편의상 앞으로 $F_{arr}(p_j(t), p_k(t), P_{gj})$ 를 $F_{arr}(p_j(t))$ 로 줄여서 표기한다. 로봇 k 로부터의 척력 $F_k(p_j(t), p_k(t))$ 은 로봇 j 와 로봇 k 가 서로 가까워지는 방향으로 이동하거나, 로봇 j 와 로봇 k 사이의 거리가 가까워지면 증가한다. 그리고 P_{gj} 로의 인력인 $F_g(p_j(t), P_{gj})$ 는 로봇이 P_{gj} 에 가까이 갈수록 작아진다. 따라서 $F_{arr}(p_j(t))$ 에 의해 로봇 j 는 로봇 k 를 피하면서 목표 위치 P_{gj} 까지 이동하게된다. 경우에 따라서 $F_{arr}(p_j(t))$ 가 로봇의 운동 능력을 벗어나는 경우 $F_{arr}(p_j(t))$ 의 크기를 비례 축소하여 로봇을 이동시킨다.

5. 모의실험결과

제안된 방법은 모의실험에 의해서 테스트되었다. 다음의 세 가지 경우에 대한 모의실험을 통하여 그 효율성과 적용성을 고찰하였다.

- (1) 파라미터 α 와 β 를 변화시켜서, 이들이 로봇의 동작조정 성능에 미치는 영향을 관찰한다.
- (2) 실제거리에 기초를 둔 기존의 인공전위계방식과 제안된 방식에 의한 모의실험 결과를 비교한다.
- (3) 로봇의 동작에 우선순위를 부여하여, 우선 순위가 없는 경우와 비교한다.

5.1 α 와 β 가 로봇의 동작에 미치는 영향

5.1.1 두 로봇의 속도조건이 같을 때 α 와 β 가 로봇의 동작에 미치는 영향

작업 영역에서 로봇 1과 로봇 2가 이동한다. α 와 β 가 로봇의 충돌 회피 성능에 미치는 영향을 명확히 보이기 위해서 로봇 1은 α 와 β 값을 같게 설정하고 로봇 2는 α 와 β 값을 각각 다른 값으로 하여 2번의 실험을 진행한다. 2 회의 실험에서의 로봇 동작 조정을 위해 사용된 파라미터 값과 로봇들의 이동 시작 위치와 목표 위치는 각각 표 1 및 표 2와 같다.

표 1 경우 1과 경우 2에서의 로봇들의 파라미터 값
Table 1 Parameter value of the robots for the cases 1 and 2

parameters		α	β	η	ϵ_{rd}	ζ
case 1	Robot1	100	100	250000	100	0.005
	Robot2	100	200	250000	100	0.005
case 2	Robot1	100	100	250000	100	0.005
	Robot2	100	50	250000	100	0.005

표 2 경우 1과 경우 2에서의 로봇들의 시작 위치와 목표 위치
Table 2 Starting position and goal position of the robots for the cases 1 and 2

robot	starting position	goal position
robot 1	(200, 50)	(200, 350)
robot 2	(50, 200)	(350, 200)

경우 1과 2에서 동작 조정에 의한 로봇들의 이동 경로는 그림 3과 그림 4와 같다. 이들 두 경우에 각 로봇들이 충돌 회피를 시작한 위치는 표 3과 같다.

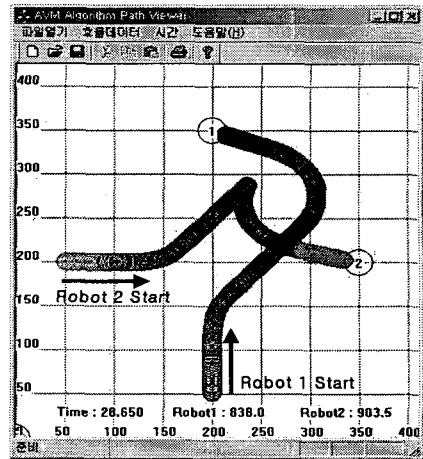


그림 3 경우 1에 대한 로봇 이동 경로
Fig. 3 Robot path for the case 1

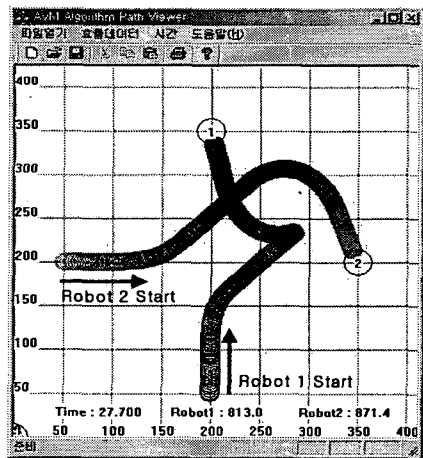


그림 4 경우 2에 대한 로봇 이동 경로
Fig. 4 Robot path for the case 2

표 3 경우 1과 경우 2에서 로봇이 충돌 회피 동작을 시작하는 위치

Table 3 Starting location of avoidance motion for the cases 1 and 2

cases		case 1	case 2
starting location	Robot1	(200.0, 64.81)	(200.0, 64.81)
	Robot2	(92.30, 200.0)	(59.11, 200.0)

경우 1에서는 로봇 2의 파라미터 $\beta=200$ 을 제외하면 모두 $\alpha=\beta=100$ 로 하였다. 이 경우 로봇 2의 β 값이 로봇 1의 β 값보다 크므로, 로봇 2의 동작은 로봇 1 및 로봇 2의 상대 속도의 영향을 작게 받는다. 따라서 그림 3과 표 3에 보인 바와 같이 로봇 1이 로봇 2보다 먼저 충돌 회피 동작을 시작하여 로봇 2보다 먼저 우회 회피 동작을 한다. 로봇 2는 로봇 1보다 늦게 회피 동작을 시작하여 로봇 1이 우회 회피 동작을 하는 도중 위치 (235, 290)에서 경로를 바꾸어 로봇 1이 지나간 뒤에 목표 방향으로 이동한다.

반면 경우 2에서는 로봇 2의 파라미터를 $\beta=50$ 으로 줄인다. 따라서 로봇 2가 로봇 1에 비해서 상대 속도의 영향을 더 받아서, 그림 4와 표 3에서와 같이 로봇 1보다 먼저 회피 동작을 시작한다. 그러므로 경우 1과 반대로 로봇 2가 로봇 1보다 먼저 우회 회피 동작을 하고, 로봇 1은 도중에 경로를 바꾸어 로봇 2가 지나간 뒤에 목표 방향으로 이동한다.

5.12 두 로봇의 속도조건이 다를 때 α 와 β 가 로봇의 동작에 미치는 영향

여기에서는 로봇 1과 로봇 2의 속도 성능에 차이가 있는 경우, 파라미터 α 와 β 값을 $\alpha=\beta$ 로 하였을 때와 $\alpha \neq \beta$ 하였을 때를 비교한다. 경우 3에서는 로봇의 속도 성능에 관계없이 $\alpha=\beta=100$ 으로 한다. 경우 4에서는 로봇의 속도 성능에 따라 α 와 β 값을 달라한다. 로봇 1은 $\zeta=0.01$ 이고 로봇 2는 $\zeta=0.005$ 이어서 로봇 1의 목표 방향 인력이 로봇 2의 2배가 된다. 따라서 로봇 1이 로봇 2보다 속도가 빠르게 이동하므로 로봇 2에 대한 파라미터는 $\alpha < \beta$ 로 할 수 있다. 경우 3과 4에서의 각 로봇의 동작 조정을 위한 파라미터 값은 표 4와 같고, 로봇들의 시작 위치와 목표 위치는 표 5와 같다.

표 4 경우 3과 경우 4에서의 로봇들의 파라미터 값
Table 4 Parameter value of the robots for the cases 3 and 4

cases \ parameters		α	β	η	ϵ_{rd}	ζ
case 3	Robot1	100	100	250000	100	0.01
	Robot2	100	100	250000	100	0.005
case 4	Robot1	100	100	250000	100	0.01
	Robot2	50	100	250000	100	0.005

표 5 경우 3과 4에서의 로봇들의 시작 위치와 목표 위치
Table 5 Starting position and goal position of the robots for the cases 3 and 4

robot	starting position	goal position
robot 1	(150, 50)	(200, 350)
robot 2	(100, 300)	(350, 50)

경우 3과 4에서 로봇의 이동 경로는 그림 5와 그림 6에 나타낸다. 그리고 각 경우에서 로봇이 충돌 회피 동작을 시작하는 위치와 동작 효율은 표 6과 표 7에 각각 나타낸다. 표 7에서 \checkmark 표시는 2가지 경우에 대한 효율 비교에서 우수한 효율임을 나타낸다.

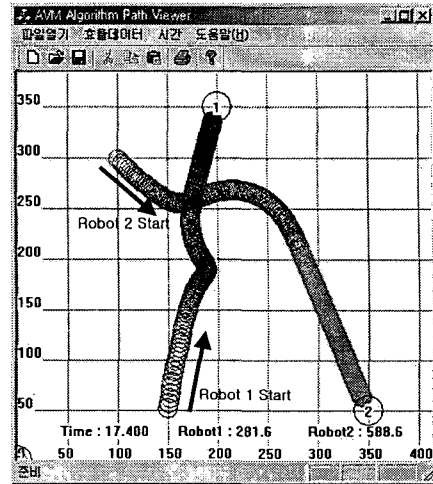


그림 5 경우 3에 대한 모의 실험에서의 로봇의 이동 경로
Fig. 5 Robot path for the simulation case 3

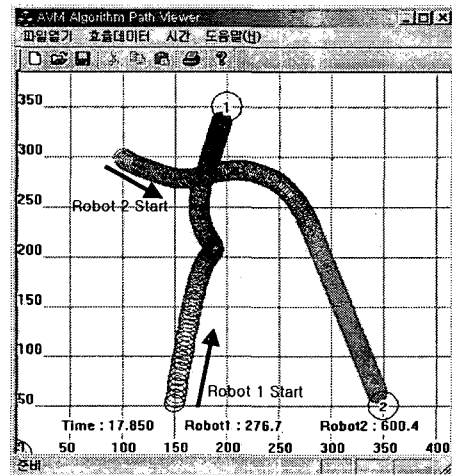


그림 6 경우 4에 대한 모의 실험에서의 로봇의 이동 경로
Fig. 6 Robot path for the simulation case 4

표 6 경우 3과 경우 4에서 로봇이 충돌 회피 동작을 시작하는 위치

Table 6 Starting location of avoidance motion for the cases 3 and 4

cases		case 1	case 2
starting location	Robot1	(152.11, 62.61)	(152.11, 62.61)
	Robot2	(105.29, 294.73)	(103.12, 296.89)

경우 4에서 로봇 2의 동작 조정에 사용한 파라미터 값은 $\alpha=50, \beta=100$ 으로 하여, 자신(로봇 2)이 상대방 로봇(로봇 1)보다 느리게 이동함을 반영하게 하였다. 이 경우 로봇 2는 경우 3에 비해서 상대 거리의 영향을 많이 받게 된다. 따라서 표 6에 보인 바와 같이 경우 3에서 보다 경우 4에서 로봇 2가 좀더 이르게 회피 동작을 시작하여, 로봇 2의 궤적이 좀더 높은 위치에서 크게 우회한다. 이에 따라 로봇 2의 전체 경로 길이가 길어지고 전체 이동 시간도 길어진다.

로봇 1과 로봇 2의 동작 조정에서 로봇 2가 충분히 우회 동작을 하므로 로봇 1은 충돌 회피를 위한 우회 동작이 작아지고, 전체 경로 길이와 전체 이동 시간이 짧아진다. 그리고 로봇 2가 충돌 회피 동작을 좀더 이르게 시작하게 되어 경우 4에서 충돌 회피 여유도가 커져서, 좀더 안전하게 이동한다.

표 7 경우 3과 4의 동작 효율 비교

Table 7 Comparison of motion efficiency for the cases 3 and 4

cases		robot	robot1	robot2
case 3	Spatial efficiency		85.34	121.06
	Time efficiency		2.65	2.65
	전체 경로 길이		281.64	✓588.57
	전체 이동 시간		9.35	✓17.35
	충돌 회피 여유도		46.29	46.29
case 4	Spatial efficiency		88.39	123.85
	Time efficiency		2.80	2.80
	전체 경로 길이		✓276.70	600.38
	전체 이동 시간		✓9.25	17.8
	충돌 회피 여유도		✓47.75	✓47.75

표 8 경우 5와 6에서 사용된 파라미터의 값

Table 8 The parameter value used in the cases 5 and 6

parameters		α	β	η	ϵ_{rd}	ζ
case 5	Robot 1	실제거리		250000	100	0.005
	Robot 2					
	Robot 3					
	Robot 4					
	Robot 5					
case 6	Robot 1	180	120	250000	100	0.005
	Robot 2	150	150			
	Robot 3	100	200			
	Robot 4	200	130			
	Robot 5	160	100			

표 9 경우 5와 6에서 로봇의 동작 시작 위치와 목표 위치

Table 9 Starting position and goal position of the robots in cases 5 and 6

Robot	starting position	goal position
Robot 1	(100, 50)	(900, 400)
Robot 2	(900, 50)	(100, 400)
Robot 3	(500, 400)	(500, 50)
Robot 4	(100, 400)	(900, 50)
Robot 5	(900, 400)	(100, 50)

5.2 실제 거리에 의한 인공 전위계를 사용한 경우와의 비교

경우 5와 6에서는 5대의 로봇을 이용한다. 경우 5는 실제 거리에 의한 인공 전위계를 사용하고, 경우 6는 상대거리를 이용한다. 경우 5와 6에서 사용한 파라미터 값들은 표 8에, 5대 로봇의 이동 시작 위치와 목표 위치는 표 9에 나타난다. 로봇 1과 로봇 5의 목표 위치는 각기 상대 로봇의 시작 위치

이다. 또한 로봇 2와 4의 목표 위치는 각기 상대 로봇의 시작 위치이다. 즉, 각 로봇들이 서로 상대 로봇을 향하여 이동하며 상대 로봇과 위치를 바꾼다. 각각의 로봇은 본 논문에서 제안한 방법에 의해서 동작 우선순위를 갖지 않고 서로를 피하면서 목표 위치로 이동한다.

경우 5와 6에서의 로봇의 이동 궤적은 그림 7 및 그림 8과 같으며, 동작 효율은 표 10과 같다.

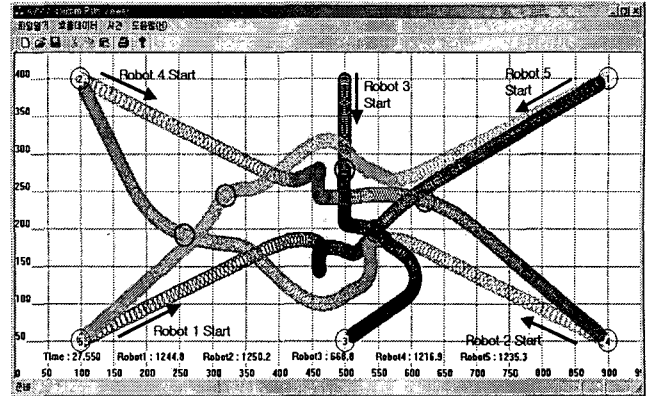


그림 7 실제 거리를 사용하는 경우의 로봇 이동 궤적(경우 5)
Fig. 7 Robot motion trajectories in case of using real distance(case 5)

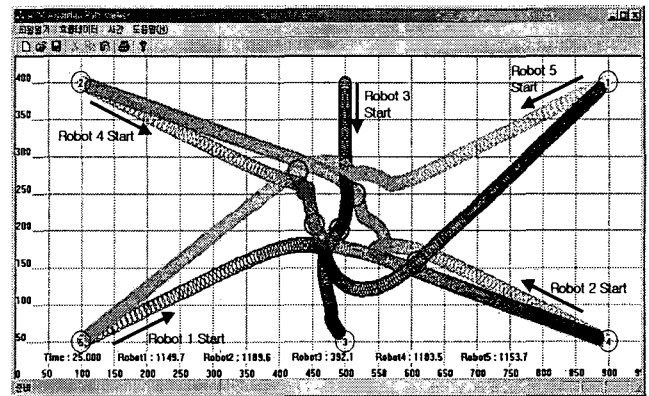


그림 8 상대 거리를 사용하는 경우 로봇 이동 궤적(경우 6)
Fig. 8 Robot motion trajectories in case of using relative distance(case 6)

경우 5와 경우 6에서 모든 로봇의 이동 경로가 서로 큰 차이를 보인다. 본 연구에서 제안한 상대 거리를 사용하는 경우 5대의 모든 로봇이 좀더 부드럽고 짧은 경로로 목표 위치로 이동한다. 로봇 2, 로봇 3, 그리고 로봇 4의 경우에는 이들의 우회 방향이 반대가 된다. 로봇의 동작 효율을 보인 표 10에서 성능이 우수한 부분의 데이터에 ✓ 표시를 하였다. 상대 거리를 이용하는 경우가 전체 경로 길이와 전체 이동 시간의 측면에서 성능이 매우 우수하게 나타난다. 충돌 회피 보장 조건이 만족되기까지의 성능을 나타내는 공간 효율과 시간 효율은 로봇 3을 제외하면 모두 상대 거리를 이용하는 방법이 우수하다. 로봇 3의 경우는 그림과 표에서 알 수 있듯이 충돌 회피 보장 조건이 만족되기까지 소요된 시간과 이동 거리는 상대 거리를 이용한 방법이 오히려 길게 나타나지

만, 전체 이동 거리와 이동 시간은 상대 거리를 이용하는 방법이 우수하다. 로봇 5 대가 이동하는 복잡한 환경에서는 상대 거리를 이용하는 방법이 모든 면에서 매우 우수한 성능을 보임을 알 수 있다.

표 10 실제 거리와 상대 거리를 사용하는 경우의 동작 효율 비교

Table 10 Comparison of motion efficiency for the cases of using real distance and relative distance.

cases \ robot		robot1	robot2	robot3	robot4	robot5
case 5	Spatial efficiency	629.076	806.62	✓60.81	679.98	739.403
	Time efficiency	10.7	12.3	✓2.15	10.7	12.3
	전체 경로 길이	1244.83	1250.19	668.78	1216.92	1235.26
	전체 이동 시간	27.19	26.09	21.25	25.69	27.49
	충돌 회피 여유도	37.20	40.64	39.95	37.20	39.39
case 6	Spatial efficiency	✓585.49	✓521.168	174.97	✓477.7	✓558.125
	Time efficiency	✓7.65	✓8.1	6.1	✓7.65	✓8.1
	전체 경로 길이	✓1149.68	✓1189.56	✓392.113	✓1183.5	✓1153.73
	전체 이동 시간	✓23.55	✓24.85	✓13.3	✓24.95	✓24.19
	충돌 회피 여유도	✓42.83	✓41.83	✓40.14	✓40.14	✓40.63

5.3 로봇에 동작 우선순위를 부여하는 경우의 모의실험

때때로, 공동 작업 영역에서 이동하는 여러 대의 로봇들 중 특정한 로봇은 작업을 수행하기 위해 정해진 경로를 따라 이동해야만 하거나, 다른 로봇들보다 작업을 빠르게 수행해야 하는 경우가 있다. 이 경우, 특정 로봇들은 다른 로봇의 이동에 관계없이 자신의 작업을 수행하고, 다른 로봇들이 이들 특정 로봇들을 피함으로써 전체적으로 충돌을 피하면서 모든 로봇이 자신의 목표 위치에 도달할 수 있다. 이러한 작업은 로봇 동작에 우선 순위를 부여함으로써 실현 가능하다. 그래서 경우 7에서는 로봇에 우선순위를 부여하여 제안한 방식에 의해 동작을 조정한다. 경우 8에서는 우선 순위를 두지 않고 동작을 조정하여 두 경우의 로봇 동작을 비교한다. 5대의 로봇이 공동 작업 영역에서 이동하며, 더 높은 번호의 로봇이 더 높은 우선순위를 갖는다. 그러므로, 로봇 5는 가장 높은 우선순위를 갖고, 로봇 1은 가장 낮은 우선순위를 갖는다. 각 로봇의 이동 시작 위치와 목표 위치, 그리고 파라미터 값은 표 11과 표 12에 나타낸다.

표 11 경우 7과 8에서 로봇들의 이동 시작 위치와 목표 위치

Table 11 Starting position and goal position of the robots for the cases 7 and 8

Robot	starting position	goal position
Robot 1	(100, 50)	(900, 400)
Robot 2	(400, 100)	(100, 400)
Robot 3	(100, 380)	(700, 120)
Robot 4	(800, 350)	(100, 80)
Robot 5	(800, 100)	(400, 380)

표 12 경우 7과 8에서의 파라미터 값

Table 12 Parameter value for the cases 7 and 8

cases \ parameters	α	β	η	ϵ_{rd}	ζ
case 7 and 8	100	100	250000	100	0.005

그림 9와 10은 경우7과 8에서의 로봇의 이동 궤적을 보여 준다. 각 경우에서의 로봇 동작의 효율은 표 13에 나타냈다.

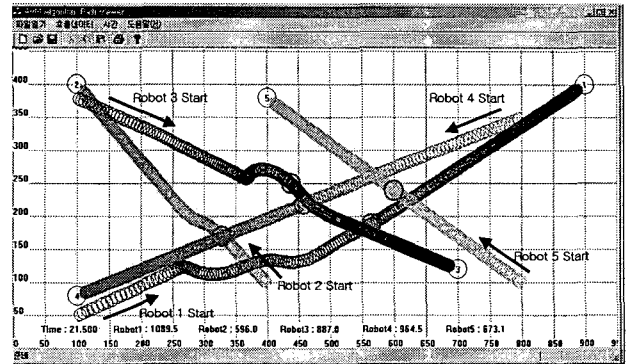


그림 9 동작 우선 순위를 부여한 경우의 로봇 이동 궤적
Fig. 9 Robot motion trajectories in case with motion priority

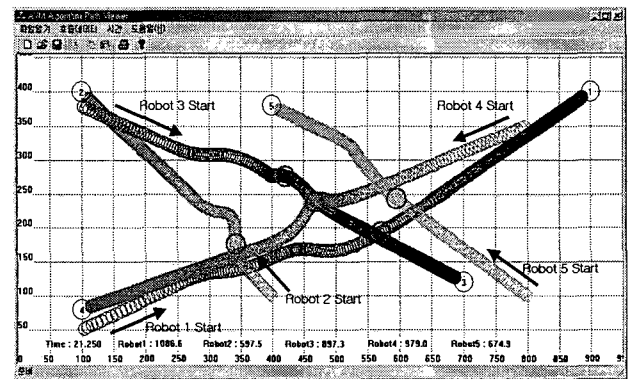


그림 10 동작 우선 순위가 없는 경우의 로봇 이동 궤적
Fig. 10 Robot motion trajectories in case with no motion priority

표 13 경우 7과 8에서의 동작 효율

Table 13 Motion efficiency for the cases 7 and 8

cases \ robot	robot1	robot2	robot3	robot4	robot5	
case 7	Spatial efficiency	✓491.522	83.3551	377.968	✓355.201	✓222.629
	Time efficiency	5.35	1.5	5.35	✓3.35	✓3.45
	전체 경로 길이	1089.53	✓596.002	✓886.957	✓964.49	✓673.1
	전체 이동 시간	21.45	✓16.9	✓20.1	✓19.3	✓17.2
case 8	Spatial efficiency	495.952	✓72.048	✓364.181	357.69	229.123
	Time efficiency	✓5.2	✓1.45	✓5.2	4.3	3.65
	전체 경로 길이	✓1086.61	597.522	897.291	979.039	674.859
	전체 이동 시간	✓21.2	17.1	20.45	20.6	17.5

표 13의 ✓표시를 살펴보면 동작 우선 순위가 주어지면, 전반적으로 우선 순위가 높은 로봇들의 동작 성능은 우수해 지지만, 우선 순위가 낮은 로봇들의 성능은 떨어짐을 확인할 수 있다. 동작 우선 순위가 주어지면, 우선 순위가 높은 로봇 5와 로봇 4는 우선 순위가 주어지지 않은 경우에 비해서 모든 효율이 우수해진다. 반면 우선 순위가 낮은 로봇 1은 충돌 회피 보장 조건이 만족되기까지의 이동 경로에서만 성능이 우수하고, 시간 효율, 전체 경로 길이, 전체 이동 시간에서의 성능이 나빠진다. 이것은 다른 로봇들이 로봇 1을 피하기 위한 동작을 하지 않고 로봇 1이 다른 로봇들을 피해야하기 때문이다. 그러므로, 우선 순위가 가장 낮은 로봇 1은 큰 우회 동작을 하게되어 목적지까지의 이동 경로의 길이는 더 길어지고, 목적지까지 이동시간도 길어지며, 충돌 회피가 보장되기까지의 경과시간도 더 길어진다. 5대의 모든 로봇이 목적지까지 도달하기까지의 경과시간은 우선 순위가 없는 경우에는 21.2초(로봇 1), 우선 순위가 있는 경우에는 21.45초(로봇 1)로 나타나서 우선 순위가 없는 경우에 더 빨리 전체 로봇의 이동이 완료된다.

6. 결 론

본 논문에서는 공동 작업 영역에서 이동하는 여러 대 로봇을 서로 충돌하지 않으면서 목표위치까지 이동시키는 방법을 제안하였다. 이 방법의 특징은 다음과 같다.

- (1) 이 방법은 상대 거리를 이용하므로 로봇들의 이동성을 고려하여 충돌회피 동작 조정을 한다. 따라서 로봇들이 멀리 떨어져있더라도, 이들이 서로 접근하는 방향으로 이동하는 경우 미리부터 충돌 회피 동작을 시작하게 한다. 반대로 로봇이 가까이 있더라도 서로 멀어지는 방향으로 이동하고 있다면 충돌 회피를 고려하지 않게 한다. 이에 반해 실제 거리를 사용하는 방법에서는 회피 동작이 필요한 경우에도 제안된 방법보다 더 늦게 회피동작이 시작된다. 그래서 때때로 로봇이 다른 로봇과 충돌하거나, 다른 로봇을 피하기 위해 급격한 회피 동작을 하기도 한다.
- (2) 모의 실험 결과에서 알 수 있는 바와 같이, 이 방법을 사용하면 기존의 인공 전위계를 이용한 방법에 비해서 로봇의 이동 시간과 이동 거리등의 효율이 좋아질 뿐더러, 좀더 안전하게 로봇들이 서로 멀리 떨어져서 이동한다.
- (3) 여러 대 로봇의 동작 우선 순위에 차이를 두는 경우, 전체적으로는 이동 시간과 거리가 줄어들지 않으며 동작 우선 순위가 낮은 로봇의 성능은 떨어지지만, 동작 우선 순위가 높은 로봇의 성능이 좋아지므로, 작업 성격에 따라서 동작 우선 순위를 부여하여야 하는 경우에도 제안된 방법의 적용이 가능하다.
- (4) 여러대 로봇의 속도 특성이 다를 경우 로봇의 파라미터 α 와 β 를 조절하여 이동 성능을 향상 시킬 수 있다. 일반적으로 속력이 큰 로봇에 대응되는 값은 크게하고, 속력이 작은 로봇에 대응하는 값은 작게하여 로봇의 이동성이 충분히 상대 거리에 영향을 미칠 수 있게하고, 충분한 충돌 회피 여유도를 가질 수 있게 하는 것이 로봇 이동 성능을 좋게한다.

이 방식을 적용하기 위해서는, 로봇은 작업 영역내의 다른 로봇들의 위치와 속도를 알아야 한다. 이를 위한 방법들에는 각각의 로봇들이 독자의 센서를 이용하여 다른 로봇들의 속도와 위치를 감지하거나, 다른 로봇으로부터 이에 관한 정보를 받거나, 또는 중앙 감시 시스템에 의해 감지하여 각각의 로봇에 이 정보를 전달해주는 방법등이 있다. 간단한 예의 하나는 로봇 축구 시스템에서와 같이 여러대 로봇의 이동을 카메라 영상 처리에 의해 감지하여 이들의 위치와 속도를 알아내는 방법이 있다. 본 연구에서 제시한 방법은 개별 로봇 시스템 내에서 처리되어 로봇을 직접 구동시키거나(분산 처리)[17-21], 중앙 처리 장치에서 처리되어 작업 영역내의 로봇에 구동 명령을 전달하여 로봇을 구동시키는 데 이용될 수 있다(중앙 집중 처리)[20,21].

감사의 글

이 논문은 1999년도 조선대학교 학술연구비의 지원을 받아 연구되었음.

참 고 문 헌

- [1] R. Alur, A. Das, J. Esposito, R. Fierro, Y. Hur, G. Grudic, V. Kumar, I. Lee, J. P. Ostrowski, G. Pappas, J. Southall, J. Spletzer, and C. Taylor, "A framework and architecture for multirobot coordination," *Experimental Robotics VII*, D. Rus and S. Singh (eds.), Springer, LNCIS 271, pp.303-312, 2001.
- [2] Rachid Alami, Frederic Robert, Felix Ingrand, and Sho'ji Suzuki, "Multi-robot Cooperation through Incremental Plan-Merging," *IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA'95)*, Nagoya (Japan), pp.2573-2579, 21-27 May 1995
- [3] R. Simmons, T. Smith, M. B. Dias, D. Goldberg, D. Hershberger, A. Stentz, and R. Zlot, "A Layered Architecture for Coordination of Mobile Robots," In *Multi-Robot Systems From Swarms to Intelligent Automata*, A. Schultz and L. Parker (eds.), Kluwer, 2002.
- [4] Tews A. and Wyeth G.F., "Multi-Robot Coordination in the Robot Soccer Environment," *Proceedings of the Australian Conference on Robotics and Automation*, pp. 90-95, Brisbane, March 30-April 1 1999.
- [5] A. Saffiotti, N.B. Zumel, and E.H. Ruspini, "Multi-Robot Team Coordination using Desirabilities," *Proc. of the 6th Intl. Conf. on Intelligent Autonomous Systems(IAS)*, pp. 107-114. Venice, Italy, 2000.
- [6] F.C.A. Groen, J. Roodhart, M. Spaan, R. Donkervoort, and N. Vlassis, "A distributed world model for robot soccer that supports the development of team skills," In *Proc. 13th Belgian-Dutch Conf. on Artificial Intelligence*, Ben Krose, Maarten de Rijke, Guus

Schreiber, and Maarten van Someren, editors, pp. 389-396, Amsterdam, The Netherlands, October 2001.

[7] T. Balch and R. Arkin, "Behavior-based formation control for multi-robot teams," *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, Vol.14, No.6, pp.926-939, 1998.

[8] O. Khatib, "Real-time obstacle avoidance for manipulators and mobile robots," *The Int. J. Robotics Research*, vol. 5. no. 1, PP.90-98, Spring, 1986.

[9] Boernstein, J. and Koren, Y., "The vector field histogram-fast obstacle avoidance for mobile robots," *IEEE Transaction on Robotics Automation*, Vol.7, No.3, pp.278-288, June, 1991.

[10] Borenstein, J. and Koren Y. "Obstacle Avoidance with Ultrasonic Sensors," *IEEE Journal of Robotics*, Vol.4, No.2, pp.213-218, 1988

[11] R. G. Simmons, "The Curvature-Velocity Method for Local Obstacle Avoidance," In *1996 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp.3375-3382, Minneapolis MN, April 1996.

[12] Ko, Nak Yong and Simmons, R. G., "The Lane-curvature Method for Local Obstacle Avoidance," *International Conference in Intelligent Robots and Systems(IROS 1998)*, pp.1615-1621, Victoria, B.C, Canada, Oct. 13-17, 1998.

[13] A. Kelly, "An intelligent predictive control approach to the high speed cross country autonomous navigation problem," Tech Report CMU-CS-TR-95-33, School of Computer Science, Carnegie Mellon University, 1995.

[14] Ko, Nak Yong and Bum Hee Lee, "Avoidability Measure in Moving Obstacle Avoidance Problem and Its Use for Robot Motion Planning," *International Conference in Intelligent Robots and Systems(IROS 1996)*, pp 1296-1303, 1996

[15] C-C Wong, M-F Chou, C-P Hwang, C-H Tsai, and S-R Shyu, "A method for obstacle avoidance and shooting action of the robot soccer," in *Proceedings of the 2001 IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, Seoul, Korea, May 21-26, 2001, pp.3778-3782.

[16] Jurachart Jongusuk and Tsutomu Mita, "Tracking control of multiple mobile robots: A case study of inter-robot collision-free problem," in *Proceedings of the 2001 IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, Seoul, Korea, May 21-26, 2001, pp.2885-2890.

[17] Matatic, M., "Distributed approaches to behavior control," In *Proc. SPIE Sensor Fusion V*, pp 373-382, 1992.

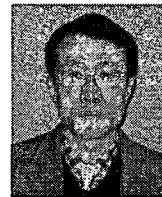
[18] Donald B., Gariepy L., and Rus D, "Distributed manipulation of multiple objects using ropes," in *Proc. IEEE Int. Conf. Robotics and Automation*, pp.450-457, 2000.

[19] Arkin, R. C., "Cooperation without communication: multiagent schema-based robot navigation," *Journal of Robotic Systems*, Vol.9, No.3, pp.351-364, 1992.

[20] Stentz, A. and Dias M. B., "A Free Market Architecture for Coordinating Multiple Robots," Technical report, CMU-RI-TR-99-42, Robotics Institute, Carnegie Mellon University, 1999.

[21] M.B. Dias and A. Stentz, "A Market Approach to Multirobot Coordination," Technical report CMU-RI-TR-01-26, Robotics Institute, Carnegie Mellon University, August, 2001.

저 자 소 개



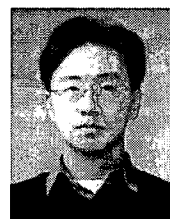
고 낙 용 (高樂溶)

1961년 3월 13일생. 1985 서울대 공대 제어계측공학과 졸업(학사). 1987 서울대학교 대학원 제어계측공학과 졸업(석사) 1993 동 대학원 제어계측공학과 졸업(박사). 1997~1998 미국 Carnegie Mellon Univ. Visiting research scientist, 1992~

현재 조선대학교 정보제어계측공학부 교수

Tel : 062) 230-7108, Fax : 062) 224-1987

E-mail : nyko@mail.chosun.ac.kr



서 동 진 (徐銅辰)

1974년 12월 22일생. 2000년 조선대 공대 제어계측공학과 졸업(학사). 2002년 조선대학교 대학원 제어계측공학과 졸업(석사) 현재 동 대학원 제어계측공학과 박사과정

Tel : 062) 230-7766, Fax : 062) 224-1987

E-mail : commidi@nownuri.net