

스웜 시스템의 그룹 행동을 위한 조직화된 단일 연합법

Systematic Singular Association for Group Behaviors of a Swarm System

정하민* · 김동현**

Hahmin Jung* and Dong Hun Kim**

* 경남대학교 첨단공학과

** 경남대학교 전기공학과

요 약

본 논문은 다수의 에이전트가 있는 스웜 시스템에서 효과적인 그룹행동을 다루는 연구를 한 내용이다. 많은 에이전트들이 그룹 행동을 할 때 효율적인 연합 행동을 할 수 있도록 인공 포텐셜 함수(Artificial Potential Function, 이하 APF)를 사용하였다. 제안된 연구에서는 균일한 에이전트간의 포메이션 형성, 신속한 목표물 이동, 그리고 에이전트간의 충돌 회피를 만족시키는 동적 연합(Dynamic Association, 이하 DA)알고리즘을 소개 한다. 동적 연합을 바탕으로 조직화된 단일 연합법(Systematic Singular Association, 이하 SSA)을 제안하였다. 제안된 계획에서는 장애물과 목표물 사이에도 직선시야(Line Of Sight, 이하 LOS)를 고려했다. 제안된 SSA 규칙과의 비교를 위해, 에이전트 간의 LOS만 고려하는 근거리 에이전트 선택 단일연합(Singular Association, 이하 SA)과 다(多) 연결 에이전트 선택 SA 알고리즘을 사용하였다. 비교의 결과로 제안된 방법에서 두개의 중요한 장점을 확인했다. 첫째, SSA규칙은 동료 에이전트를 잃을 가능성이 상당히 낮고 빠른 에이전트들의 빠른 이동을 만족시킨다. 둘째, 장애물과 목표물 사이의 LOS고려로 인해서 SSA규칙의 간소화는 특히 그룹 이동 시 유리하다. 제안된 알고리즘의 효율성을 자세히 보여주기 위하여 다른 알고리즘과의 비교 시뮬레이션을 제공한다.

키워드 : 스웜 시스템, 포메이션 제어, 그룹행동, 포텐셜 함수, 연합법

Abstract

In this paper, we present a framework for managing group behaviors in multi-agent swarm systems. The framework explores the benefits by dynamic associations with the proposed artificial potential functions to realize complex swarming behaviors. A key development is the introduction of a set of flocking by dynamic association (DA) algorithms that effectively deal with a host of swarming issues such as cooperation for fast migration to a target, flexible and agile formation, and inter-agent collision avoidance. In particular, the DA algorithms employ a so-called systematic singular association (SSA) rule for fast migration to a target and compact formation through inter-agent interaction. The resulting algorithms enjoy two important interrelated benefits. First, the SSA rule greatly reduces time-consuming for migration and satisfies low possibility that agents may be lost. Secondly, the SSA is advantageous for practical implementations, since it considers for agents even the case that a target is blocked by obstacles. Extensive simulation presents to illustrate the viability and effectiveness of the proposed framework.

Key Words : Swarm System, Formation, Group Behavior, Potential Functions, Line Of Sight

1. 서 론

최근 10년간 스웜 시스템에서 그룹행동을 관리하여 스웜 로봇(다수의 자율로봇과 반자율 로봇)이 포메이션을 이루며 협동적으로 이동할 수 있는지에 대해서 많은 관심이 있어 왔다. 공학자들은 자연 속에서 곤충, 새, 물고기 또는 포유류등의 그룹 행동을 모방하여 개발하려고 노력을 하였다. 스웜 연구의 결과는 잘 알려지지 않은 군대와 민간인을 위한 비행선, 위성 포메이션, 그리고 큰 연합을 이루는 모바일

센서와 장치 네트워크들에 영향을 줄 수 있다. 일반적인 복잡한 환경에서 실질적으로 스웜시스템이 동작할 수 있도록 하는 기반을 제공하는 많은 수의 기술들이 개발되었다 [1-4], [9-13]. 이 논문은 연합법을 처음 종합적으로 다룬 연구 [6],[7] 에서의 결과를 참고하였고, 스웜 시스템에서의 그룹 행동을 효과적으로 만들기 위해 기초를 제공한 본 저자들의 연구 논문[5]의 확장된 연구이다.

스웜 시스템에서 에이전트들의 효과적인 이동을 위해서 본질적으로 고려해야 하는 것들이 있다. 첫째, 에이전트 대 에이전트 그리고 에이전트와 장애물 사이에 충돌이 없어야 한다. 둘째, 스웜 시스템은 포메이션을 이루거나 군집형태로 이동해야 한다. 마지막으로 추가적인 요구들에 대해서 최적화가 필요하다. 개개의 에이전트의 위치에 따라서, 본 저자들은 논문[5]에서 에이전트의 이동, 장애물과의 충돌을 피하

접수일자 : 2009년 1월 29일

완료일자 : 2009년 5월 14일

본 연구는 2008학년도 경남대학교 학술연구 장려금 지원으로 이루어졌음.

는 문제를 해결하기 위해 APF를 기반으로 하는 방법을 제시 하였다. 이 방법의 사용은 그룹 단위의 이동시 장애물과의 충돌을 피할 수 있을 뿐만 아니라, 무리 짓기 행동을 효과적으로 하게 해준다. 전체적 논문의 틀은 APF를 기반으로 각 에이전트의 LOS를 사용하여 무리 짓기, 장애물 회피, 에이전트간의 충돌회피와 같은 그룹 행동 제어를 연구하는 것이다.

논문[5]에서, 저자들은 생각 할 수 있는 여러 상황에서 지역 최소 문제점 해결과 장애물 충돌을 피하기 위한 설계 가이드라인을 제공하였다. 저자들은 포텐셜 함수를 기반으로 하는 스웸 시스템의 자기 조직화를 위해서 스웸 시스템의 자기 조직화 과정 중 생길 수 있는 좋지 않은 상황들에 대하여 피할 수 있는 설계 기법들을 제시하였다. 논문[5]에서, 각 에이전트는 자기 조직화를 위하여 즉, 성공적인 그룹 행동을 위해 모든 에이전트의 위치 정보를 사용하였다. 그러나 그러한 경로 계획법은 전체 연결된 모든 에이전트들 사이의 과도한 정보협력을 필요하기 때문에 많은 시간 소비와 복잡한 통신 환경에 의해 따라오는 많은 데이터 수집을 가져왔다. 게다가 스웸 시스템에서 많은 에이전트들로 구성되면 될수록 더욱더 위치 정보를 교류하며 얻는 것이 힘들어진다.

본 논문에서는 논문[2-3],[5-13]에서 사용되어진 전통적인 알고리즘과 다르게, 더욱 간단하고 효과적이며 모든 이웃의 에이전트들에 의존하지 않고, 적은 수의 이웃 에이전트와 연합을 유지하며 그룹 행동을 할 수 있는 알고리즘을 제안한다. 이 알고리즘에 의해 각 에이전트의 연합은 에이전트 시야에서 장애물을 고려하며 그 에이전트의 이웃들에 의해서 자기 조직화가 되어진다. 제안된 알고리즘의 특징은 효과적인 그룹을 다루기 위해서 각 에이전트는 DA를 한다. 논문[5],[9-13]에서 전통적으로 사용되어진 방법은 장애물에 의해 가려지는 시야를 무시하고, 서로가 모두 상대방의 위치를 알고 있다고 가정한다. DA 알고리즘은 장애물을 고려하여 센서 범위에서 보여지는 근처의 에이전트들의 정보만을 사용한다. 즉, LOS안에서 이웃하는 에이전트들만의 정보를 이용한다. 장애물에 의해서 가려진 에이전트와 거리 센서 범위 밖의 에이전트는 그룹 행동을 위해 고려하지 않는다. 에이전트들 사이의 연결을 간단하게 하기 위해서 단일 연합법(singular association, 이하 SA)으로 불려지는 규칙을 이 논문에서는 사용하였다. 다시 말해서 각 에이전트들은 동적인 연결을 위해서 한 에이전트는 다른 에이전트 하나 만을 제안된 근거에 의해서 선택한다. 동적 연합을 바탕으로 조직화된 단일 연합법 (Systematic Singular Association, 이하 SSA)을 제안하였다. 제안된 계획에서는 장애물과 목표물 사이에도 LOS를 고려한다. 제안된 SSA 규칙과의 비교를 위해, 에이전트 간의 LOS만 고려하는 근거 에이전트 선택 SA 와 다(多) 연결 에이전트 선택 SA 알고리즘을 사용하였다. 비교의 결과로 제안된 방법에서 두 개의 중요한 장점을 확인했다. 첫째, SSA규칙은 동료 에이전트를 잃을 가능성이 상당히 낮고 빠른 에이전트들의 빠른 이동을 만족시킨다. 둘째, 장애물과 목표물 사이의 LOS고려로 인해서 SSA규칙의 간소화는 특히 그룹 이동시 유리하다. 제안된 알고리즘의 효율성을 자세히 보여주기 위하여 다른 알고리즘과의 비교 시뮬레이션을 제공한다.

2. 인공 포텐셜 함수 (APFs) 설계

2장에서는 그룹 이동, 장애물 회피, 그리고 그룹 포메이

션을 가지는 자기 조직화된 스웸 시스템을 만들기 위해 APFs를 이용한다. 본 논문에서 에이전트들이 목표물로 이동하는 것은 논문[10]의 포메이션 제어와는 다르다. 즉 목표물을 향해서 이동 할 때 그룹을 만들어서 무리를 이루어 움직일 뿐이지 특별하게 정형화된 포메이션을 만드는 것은 아니다. 또한 분산된 시스템의 잘 구성화된 노드와 같이 다개체 에이전트를 하나의 시스템으로 사용하는 것이지 포메이션을 위한 제어가 아니다.

2.1 그룹 이동과 장애물 회피를 위한 APFs 설계

본 논문에서는 문제를 간소화하기 위해서 2차원의 평면을 고려하였다. 그리고 장애물들은 다른 반경들을 가지는 원 모양으로 가정 하였다. 게다가, 각 에이전트는 앞을 바라보는 이웃한 에이전트들과 주변의 장애물을 발견하기 위한 센서(주변을 확인 후 거리 파악)들만을 사용한다.

논문[5]에서 저자는 에이전트들과 목표물과 거리 벡터를 다음과 같이 고려했다[5].

$$\psi_i^g = \mathbf{P}_i - \mathbf{P}_{goal} \quad (1)$$

식(1)에서 \mathbf{P}_i 와 \mathbf{P}_{goal} 은 각각 에이전트와 목표물의 위치이다. 즉, 각 에이전트는 움직이는 환경 안에서 다른 에이전트들의 현재 위치를 기반으로 자신의 위치를 제어한다는 말이다.

그룹 이동을 위한 APF는 다음의 수식과 같다.

$$U_i^g = c_g (1 - e^{-\frac{\|\psi_i^g\|^2}{l_g^2}}) \quad (2)$$

위 수식에서 c_g 와 l_g 는 그룹 이동의 포텐셜을 결정지어 주는 파라미터들이다. (2)식의 오른쪽 부분의 첫 번째 항의 c_g 는 $\psi_i^g = 0$ 일 때 U_i^g 를 0으로 만들기 위해 사용한다. 대응하는 힘의 표현은 식(2)에서 음의 벡터미분에 의해서 얻어진다.

$$F_i^g = -\nabla U_i^g = -\frac{2c_g \psi_i^g}{l_g^2} e^{-\frac{\|\psi_i^g\|^2}{l_g^2}} \quad (3)$$

에이전트들과 장애물들 사이의 거리 벡터들은 다음의 수식처럼 정의 한다.

$$\psi_j^o = \mathbf{P}_i - \mathbf{O}_j \quad (4)$$

식(4)에서 \mathbf{O}_j 는 에이전트 i 의 이웃하는 장애물 j 의 위치이다.

충돌범위의 장애물들과 에이전트는 단순하게 포텐셜 함수의 음의 벡터미분인 밀어내는 힘에 의해서 피해진다. 장애물 회피를 위한 APF는 아래와 같다.

$$U_i^o = \sum_{j \in N_{oi}} \{c_o e^{-\frac{\|\psi_j^o\|^2}{l_o^2}}\} \quad (5)$$

식(5)에서 c_o 와 l_o 는 장애물 회피를 위한 포텐셜 함수의 파라미터들이다. N_{oi} 는 에이전트 i 근처에 있는 장애물들을 의미한다. 식(4)에 대응하는 힘은 식(5)의 음의 벡터 미분에 의해서 얻어진다.

$$F_i^o = -\nabla U_i^o = \sum_{j \in N_{oi}} \left\{ \frac{2c_o \psi_j^o}{l_o^2} e^{-\frac{\|w_j^o\|^2}{l_o^2}} \right\}. \quad (6)$$

2.1 이동수단을 위한 전체의 APFs 설계

전통적인 방법에서 그룹 이동과 장애물 회피를 위한 포텐셜은 다음처럼 더하는 구조를 가진다.

$$U_i^{og} = U_i^o + U_i^g = \sum_{j \in N_{oi}} \left\{ c_o e^{-\frac{\|w_j^o\|^2}{l_o^2}} \right\} - c_g e^{-\frac{\|w_i^g\|^2}{l_g^2}} + c_g. \quad (7)$$

식(7)에 대응하는 힘은 다음과 같이 표현한다.

$$F_i^{og} = -\nabla U_i^o - \nabla U_i^g = \sum_{j \in N_{oi}} \left\{ \frac{2c_o \psi_j^o}{l_o^2} e^{-\frac{\|w_j^o\|^2}{l_o^2}} \right\} - \frac{2c_g \psi_i^g}{l_g^2} e^{-\frac{\|w_i^g\|^2}{l_g^2}}. \quad (8)$$

만약 각 에이전트가 식(8)의 함수를 사용한다면, 장애물 사이의 좁은 틈을 통과 못하는 문제점과 장애물근처의 목표물에 도달하지 못하는 문제점[8]을 가진다. 이와 같은 이유 때문에, 저자는 이와 같은 지역 최소화 문제들을 극복하기 위해 다음과 같은 포텐셜 함수 구조를 제안하였다[5]. 전체 포텐셜은 그룹 이동과 장애물 회피를 위한 포텐셜 함수의 곱하기와 더하는 구조를 가진다.

$$U_i^{ogg} = \frac{1}{c_g} U_i^o \cdot U_i^g + U_i^g = \sum_{j \in N_{oi}} \left\{ c_o e^{-\frac{\|w_j^o\|^2}{l_o^2}} \right\} (1 - e^{-\frac{\|w_i^g\|^2}{l_g^2}}) - c_g e^{-\frac{\|w_i^g\|^2}{l_g^2}} + c_g. \quad (9)$$

식(9)에 대응하는 힘은 다음과 같이 표현한다.

$$F_i^{ogg} = -\nabla U_i^{ogg} = \sum_{j \in N_{oi}} \left\{ \frac{2c_o \psi_j^o}{l_o^2} e^{-\frac{\|w_j^o\|^2}{l_o^2}} \right\} (1 - e^{-\frac{\|w_i^g\|^2}{l_g^2}}) + \sum_{j \in N_{oi}} \left\{ c_o e^{-\frac{\|w_j^o\|^2}{l_o^2}} \right\} \left(-\frac{2\psi_i^g}{l_g^2} e^{-\frac{\|w_i^g\|^2}{l_g^2}} \right) - \frac{2c_g \psi_i^g}{l_g^2} e^{-\frac{\|w_i^g\|^2}{l_g^2}}. \quad (10)$$

저자의 논문[5]에서 식(8)과(10)을 비교 분석하는 결과를 제안 하였으며, 식(10)의 힘이 장애물 사이의 좁은 틈을 통과 못하는 문제점과 장애물근처의 목표물에 도달하지 못하는 문제점[8]을 해결하였음을 보여준다. 다음은 그룹 포메이션을 위한 APFs를 고려한다.

2.3 그룹 포메이션을 위한 APF 설계

그룹 포메이션 행동은 이웃 에이전트와의 유기적인 그룹 이주를 위해 필요하다. N 개의 에이전트들로 구성된 스웜 시스템을 고려 할 때, 에이전트들 사이의 거리 위치 벡터들은 다음과 같이 정의 한다.

$$\psi_k^f = \mathbf{P}_i - \mathbf{P}_k. \quad (11)$$

에이전트들은 APFs를 기반으로 그들 사이의 끌어당기는 힘과 밀어내는 힘을 통해서 일정한 거리를 유지하며 모이게 된다. 그룹 포메이션을 위한 각 에이전트의 포텐셜 함수는 다음과 같이 구성 한다.

$$U_i^f = \sum_{k \in N_{fi}} \left\{ c_r e^{-\frac{\|w_k^f\|^2}{l_r^2}} - c_a e^{-\frac{\|w_k^f\|^2}{l_a^2}} + c'_a \|\psi_k^f\|^2 + c_f \right\}. \quad (12)$$

식(12)에서 N_{fi} 는 에이전트 i 의 이웃한 에이전트들을 정의 한다. c_r , c_a , l_r , 와 l_a 는 각각 밀어내는 힘과 당기는 힘과 관련된 파라미터들이다. c'_a 는 보조적으로 끌어당기는 힘이다.

$$c_f = -c_r e^{-\frac{c_f}{l_r^2}} + c_a e^{-\frac{c_f}{l_a^2}} - c'_a c'_f. \quad (13)$$

식(13)에서 $c'_f = \frac{l_r^2 l_a^2}{l_r^2 - l_a^2} \ln \frac{c_a c'_a l_r^2}{c_r l_a^2}$ 이고, 포텐셜 함수의 최소값이 0이 되도록 하기 위해서 사용한다. $U_i^f(k)$ 가 최소인 점에서 두 에이전트 사이의 거리는 $d^f = \sqrt{c'_f}$ 이다. 식(12)를 음의 벡터 미분을 하면 다음과 같은 힘의 식이 얻어진다.

$$F_i^f = -\nabla U_i^f = \sum_{k \in N_{fi}} \left\{ \frac{2c_r \psi_k^f}{l_r^2} e^{-\frac{\|w_k^f\|^2}{l_r^2}} - \frac{2c_a \psi_k^f}{l_a^2} e^{-\frac{\|w_k^f\|^2}{l_a^2}} - 2c'_a \psi_k^f \right\}. \quad (14)$$

위의 포텐셜 함수와 힘에 대한 증명은 본 저자가 제안한 논문[5]의 제안 3을 참조하자.

본 연구에서는 본 저자가 연구했던 논문[5]을 기초로 하여 여기에 새로운 조직화 방법을 제시한 후 위의 서론에서 언급했던 기존의 문제점을 없애려고 한다. 논문[5]연구에서는 실링 카메라 기반의 중앙 집중식 위치 정보를 기본으로 하였었다. 따라서, 본 연구에서는 이전 연구의 문제점을 해결하기 위하여 각각의 에이전트는 각각의 위치 정보 시스템을 갖는다. 이렇게 하기 위해서는 장애물의 시야에 의해 상쇄되는 영역을 고려해야 한다. 각각의 에이전트는 장애물에 가려 목표물을 보지 못하는 LOS 개념을 넣어서 각각의 에이전트에 대해 조직화적인 규칙을 고려해 에이전트간에 LOS만을 고려한 기존의 알고리즘에서 발전시켜서 목표물에 대한 LOS도 고려한다. 이러한 방법은 실제로 에이전트가 목표물을 볼 때 로봇이 장애물과 직선상에 있어 목표물을 보지 못하는 상황도 고려하는 것이다. 결론적으로, 각각의 에이전트는 LOS에 의해 환경인식을 하고, 논문[5]에서 제시된 APF를 바탕으로 에이전트-에이전트, 로봇-목표물, 로봇-장애물 사이에 포텐셜 필드를 형성하여 로봇의 움직임을 형상화하고, LOS를 적용하여 각각의 로봇에 대해서 제어 하는 것이다.

3. LOS를 바탕으로 한 동적 연합(DA)

본 장에서는 전체 그룹 행동을 위해 에이전트들이 갖는 유기적인 연합법을 고려한다. 장애물이 없는 경우에는 에이전트 사이에서 쉽게 조밀한 포메이션을 얻을 수 있다. 하지만 장애물이 존재 할 경우 상황은 달라진다. 따라서 저자는 LOS 기반의 효과적인 포메이션을 얻기 위해 각 에이전트의 연합 알고리즘을 제안한다. 이 연합법은 A라는 에이전트와 그 이웃한 B라는 에이전트들과의 연합이 있을 때, B라는 에이전트들의 연합법과 그룹이 변화되면 A라는 에이전트도 영향을 받는다는 것이다.

LOS DA 규칙을 정의 하면 다음과 같다.

LOS DA: $S_k \triangleq \{P_i | \sqrt{(x_1^i - x_1^k)^2 + (x_2^i - x_2^k)^2} \leq R\}$: 에이전트 k 의 센서범위(R) 안에 에이전트들이 있다, I_k 스

$\{P_j | P_j \subset S_k, \overline{P_k P_j} \text{ intersects with nearby obstacles}\}$: I_k 는 에이전트 k 의 센서범위 안에서 장애물에 의해 보이지 않는 에이전트들을 나타낸다, $N_k = S_k - I_k$: k 에이전트가 센서 범위 내에서 인식할 수 있는 에이전트들을 나타낸다.

LOS DA 스위치 알고리즘은 자신을 기준으로 LOS 안에 있는 이웃한 에이전트들과 함께 연합을 할 때 사용되어 진다. 즉, 에이전트와 LOS DA 에이전트의 연결선은 센서 범위 내에서 어떤 장애물들과 가려지지 않고 인식할 수 있는 것을 의미 한다.

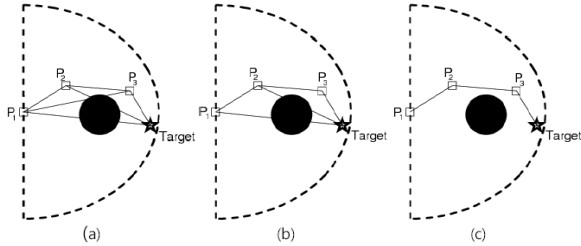


그림 1. LOS에 의한 DA, (a) LOS가 고려되지 않은 경우, (b) 에이전트 사이의 LOS만 고려된 경우, (c) 에이전트와 목표물 사이의 LOS가 고려된 경우.

Fig. 1. Dynamic association by line of sight, (a) no consideration of LOS, (b) consideration of LOS between agents, (c) consideration of LOS between an agent and a target.

3.1 다중 연합(PA)

그림 1은 LOS 의 예이다. 그림 1. (a)는 스위치 시스템의 그룹 제어에서 일반적으로 사용되는 가정으로 LOS가 고려되지 않음을 보여준다. 그림 1. (a)에서 모든 에이전트들은 에이전트들 사이의 상호 작용을 관리하는 여러 개의 연합(Plural Association, 이하 PA)으로 전체 에이전트의 연합으로 연결되어 있다. 모든 이웃 에이전트들과 함께 연관된 효과에 의해 에이전트 P_1 은 장애물 안으로 끌려 당겨 질 수 있는 것을 볼 수 있다. PA에 의한 그룹 포메이션에 대한 전체 이동, 그룹 포메이션, 장애물 회피에 대한 포텐셜 에너지는 다음과 같다.

$$U_i^{oggf} = \frac{1}{c_g} U_i^o \cdot U_i^g + U_i^g + U_i^f = \sum_{j \in N_{oi}} \{c_o e^{-\frac{\|w_j^o\|^2}{l_o^2}}\} \cdot (-e^{-\frac{\|w_j^g\|^2}{l_g^2}} + 1) - c_g e^{-\frac{\|w_i^g\|^2}{l_g^2}} + c_g + \sum_{k \in N_{fi}} \{c_f e^{-\frac{\|w_k^f\|^2}{l_f^2}} - c_a e^{-\frac{\|w_k^f\|^2}{l_a^2}} + c'_a \|w_k^f\|^2 + c_f\}. \quad (15)$$

이에 대응되는 힘은 식(16)으로 표현한다.

$$F_i^{oggf} = -\nabla U_i^{oggf} = \sum_{j \in N_{oi}} \left\{ \frac{2c_o w_j^o}{l_o^2} e^{-\frac{\|w_j^o\|^2}{l_o^2}} \right\} (-e^{-\frac{\|w_j^g\|^2}{l_g^2}} + 1) + \sum_{j \in N_{oi}} \left\{ c_o e^{-\frac{\|w_j^o\|^2}{l_o^2}} \right\} \left(-\frac{2w_j^g}{l_g} e^{-\frac{\|w_j^g\|^2}{l_g^2}} \right) - \frac{2c_g w_i^g}{l_g} e^{-\frac{\|w_i^g\|^2}{l_g^2}} + \sum_{k \in N_{fi}} \left\{ \frac{2c_f w_k^f}{l_f} e^{-\frac{\|w_k^f\|^2}{l_f^2}} - \frac{2c_a w_k^f}{l_a} e^{-\frac{\|w_k^f\|^2}{l_a^2}} - 2c'_a w_k^f \right\}. \quad (16)$$

그룹 포메이션, 이동, 장애물 회피를 표현하는 제안된 APFs에서 충돌 문제의 분석을 위해서는 논문[5]를 참조한다. 논문[5]는 포텐셜 함수를 기반으로 그룹 포메이션을 위한 APFs에서 사용한 포메이션이 지역 최소화와 충돌문제를 가능한 해결 할 수 있다는 것을 보여주었다. 포메이션을 위한 APFs의사용은 많은 융통성을 가진다. 스위치의 특성을 유지하면서 각 에이전트들은 그룹 이동을 한다. 즉 자연에서 자기 조직화가 된 각 에이전트가 논문[10]에서처럼 동적 포메이션을 갖는 일종의 무리가 된다는 것을 의미한다

3.2 에이전트들 사이에서 LOS를 고려한 단일 연합(LOS^A)

자연 속에서 무리 짓는 생물로부터 무리 짓기 행동방식을 관찰해 보면 무리 행동에서 어떤 에이전트는 가장 쉬운 방법으로 오직 하나의 이웃한 에이전트를 따른 다는 것이다. 그러한 방법들은 포메이션을 만들기 위한 것이기도 하고 최적의 경로를 찾는 것 일수도 있다. 이러한 관찰을 바탕으로 우리는 에이전트들 사이의 상호관계를 유지하는 SA를 소개하려고 한다. SA규칙에서, 어떤 에이전트는 동적 환경에서 자신의 이웃한 오직 하나의 적절하게 선택된 에이전트와 연합한다. 그림 1. (b)에서, 에이전트들 사이의 LOS는 LOS^A 로 표시한다. LOS DA규칙을 적용했을 때 에이전트 P_1 이 장애물로 이동하는 모습이 줄어드는 것을 볼 수 있다. 비록 LOS DA 규칙이 장애물로 이동하는 것을 줄여주지만, 목표물과 P_1 사이 에 장애물이 있다면 에이전트는 여전히 장애물로 끌려 당겨 질 수 있다. 그러므로 알고리즘의 향상이 필요 하다. SA규칙에서 에이전트는 단지 볼 수 있는 에이전트와 관계가 되므로 포메이션을 위해 포텐셜 함수 구성시 모든 인근 에이전트 위치 정보를 필요로 하지 않는다. 따라서 식(14)에서의 그룹 포메이션에서 summation(더하기) 기호는 의미가 없다. 따라서 힘은 다음과 같이 얻어진다.

$$F_i^{oggf} = -\nabla U_i^{oggf} = \sum_{j \in N_{oi}} \left\{ \frac{2c_o w_j^o}{l_o} e^{-\frac{\|w_j^o\|^2}{l_o^2}} \right\} (-e^{-\frac{\|w_j^g\|^2}{l_g^2}} + 1) + \sum_{j \in N_{oi}} \left\{ c_o e^{-\frac{\|w_j^o\|^2}{l_o^2}} \right\} \left(-\frac{2w_j^g}{l_g} e^{-\frac{\|w_j^g\|^2}{l_g^2}} \right) - \frac{2c_g w_i^g}{l_g} e^{-\frac{\|w_i^g\|^2}{l_g^2}} + \left\{ \frac{2c_f w_k^f}{l_f} e^{-\frac{\|w_k^f\|^2}{l_f^2}} - \frac{2c_a w_k^f}{l_a} e^{-\frac{\|w_k^f\|^2}{l_a^2}} - 2c'_a w_k^f \right\}. \quad (17)$$

3.3 에이전트들 사이와, 에이전트와 목표물 사이의 LOS를 고려한 단일 연합 (LOS^{AT})

그림 1. (c)에서 에이전트들 사이의 LOS와 장애물과 목표물을 위한 LOS는 LOS^{AT} 로 표시한다. 결과로서 에이전트 P_1 이 그림에서 묘사된 장애물에 다가가는 가능성은 없어지고 P_1 은 하나의 연결선으로 단지 P_2 와 연결 되어 지는 것을 볼 수 있다.

리더 에이전트일때 힘은 식(10)으로 표현되고, 그 외의 에이전트들의 포텐셜 함수는 (18)식과 같다. 여기서, 리더 에이전트는 목표물을 볼 수 있으며, 목표물과 가장 가까운 위치에 있는 에이전트이다.

$$U_i^{of} = U_i^o + U_i^f = \sum_{j \in N_{oi}} \left\{ c_o e^{-\frac{\|w_j^o\|^2}{l_o^2}} \right\} + c_e e^{-\frac{\|w_i^f\|^2}{l_f^2}} - c_a e^{-\frac{\|w_i^f\|^2}{l_a^2}} + c'_a \|w_k^f\|^2 + c_f. \quad (18)$$

식(18)에 대응하는 힘은 다음과 같다.

$$F_i^{of} = -\nabla U_i^{of} = \sum_{j \in N_a} \left\{ \frac{2c_a \Psi_j^o}{l_o^2} e^{-\frac{\|w_j^o\|^2}{l_o^2}} \right\} + \frac{2c_r \Psi_k^f}{l_r^2} e^{-\frac{\|w_k^f\|^2}{l_r^2}} - \frac{2c_a \Psi_k^f}{l_a^2} e^{-\frac{\|w_k^f\|^2}{l_a^2}} - 2c'_d \Psi_k^f. \quad (19)$$

4. LOS기반의 연합을 사용한 에이전트들의 그룹 행동

SA 규칙에서, 각 에이전트는 LOS에있는 이웃한 에이전트 하나가 선택된다. 이번 장에서 우리는 다른 기준에서 고려되어 질 수 있는 SA 알고리즘들을 소개한다. 설명의 편의를 위해, 임의로 설정된 그림 2.를 사용한다.

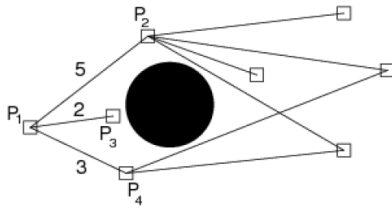


그림 2. 가장 근처의 이웃 에이전트를 따르는 SA의 예와 가장 연결가능성이 높은 이웃 에이전트를 보여주는 SA의 예. Fig. 2. Example of SA with nearest neighbor and SA with most connected neighbor.

이 예제에서 P_1 은 P_2, P_3, P_4 의 DA LOS 규칙에 의해서 세계의 이웃에이전트를 가지고 있다. 표 1.은 에이전트 이 고려할 수 있는 이웃 에이전트들에 관한 정보(P_1 에서의 거리와 연결되는 가능성의 수)를 보여준다.

4.1 가장 최소거리 이웃 에이전트와의 단일 연합법 (NSA)

자연 속에서 볼 수 있는 스웜 시스템에서 우리는 어떤 에이전트는 가장 근처의 에이전트들을 향해 이동하는 것을 볼 수 있다. 이 관찰로 가장 가까운 에이전트와 함께 하나의 연합을 하는 것을 알 수 있다. $d_{i,k}$ 는 에이전트 i 와 근처에 있는 에이전트 k 사이의 거리이다. k 는 에이전트 i 가 볼 수 있는 모든 에이전트들의 수이다. 이에 해당하는 거리 벡터는 $\vec{D}_i = [d_{i,1}, d_{i,2}, \dots, d_{i,k}]^T$ 와 같이 표현되고 최소거리 이웃 에이전트 선택(Nearest Neighbor SA, 이하 NSA) 알고리즘은 다음처럼 표현 한다.

- 1 단계 : 각 에이전트를 거리의 크기를 가중치 기반으로 아래의 식처럼 계산하자.

$$\vec{W}_{di} = \left[\frac{1}{d_{i,1}}, \frac{1}{d_{i,2}}, \dots, \frac{1}{d_{i,k}} \right]^T. \quad (20)$$

- 2 단계 : 식(20)에서 가장 큰 크기를 갖는 이웃 에이전트를 선택하자.
- 3 단계 : 식(17)의 Ψ_k^f 에 사용한다.

그림 2의 NSA 알고리즘에서 P_1 은 P_3 를 선택하는 것을 알 수 있다. 그러나 분명히 P_3 는 장애물에 매우 가깝고 다른 에이전트를 볼 수 없어서 고립된다. 만약 에이전트 P_1 이 P_3 에 연결이 된다면, 분명히 장애물에 둘러 쌓여서 목표물

쪽으로 빠르게 이동할 수 없다. 그러므로 거리 정보만을 사용하는 SA는 그 한계가 있다.

또 다른 방법으로 논문[14],[15]에서 모바일 로봇들의 길 찾기를 위하여 로드맵 방법이 제안되었다. 전역 위치 탐색 정보는 이정표와 그들 사이의 연결정보에 의해서 구성되는 로드맵에 의해서 나타내어진다. 이상적으로 P^* 를 찾는 알고리즘은 주어진 가장 짧은 거리로 여행을 할 때 어떤 로드맵에서 어떤 에이전트가 최적인지 결정 할 때 사용 한다[16]. 하지만 본 연구에서 이용할 수 있는 정보는 전역(global)위치 탐색 정보가 아니라 지역(local)위치 탐색 정보이다.

4.2 다(多) 연결 이웃 에이전트와의 단일 연합법 (MCSA)

각 에이전트는 자신의 이웃들과의 연결가능성에 대한 정보를 공유 할 수 있다고 가정하자. 즉, 에이전트 사이에 서로 무선 통신이 존재한다고 가정한다. DA LOS규칙을 기반으로, 어떤 에이전트가 장애물에 다가갈 때 대부분 장애물에 의해 가려져서 더 많은 연결가능성을 잃는 것을 알 수 있다. 어떤 에이전트는 장애물 근처를 이동 할 때에 장애물근처의 에이전트가 가지는 연결 가능한 정보를 보고 연결이 적다는 것을 알게 되면 장애물에서 멀어 지게 되고 장애물에 부딪히는 상황에서 벗어 날수 있다. 더 자세히 설명하면 그림 2에서 에이전트 P_3 가 0의 연결가능성 값을 가질 때 P_2 는 가장 높은 4로서 연결가능성 값을 갖는다. 그래서 에이전트 P_1 은 P_2 를 선택함으로써 해서 장애물을 만났을 때 빠져나가게 된다. 이러한 내용을 바탕으로, 우리는 에이전트 사이의 관계에서 가장 연결가능성이 높은 이웃 에이전트를 찾는 SA규칙 (Most Connected neighbor SA, 이하 MCSA)을 소개한다.

$\vec{C}_i = [c_{i,1}, c_{i,2}, \dots, c_{i,k}]^T$ 에서 $c_{i,k}$ 는 연결가능성이다. 즉, LOS를 고려하여 에이전트 i 가 이웃 에이전트 k 와의 연결 가능한 수를 표현한 것이다. MCSA알고리즘은 다음과 같다.

- 1 단계 : 에이전트를 위한 연결가능성은 다음과 같이 가중치 기반으로 계산한다.

$$\vec{W}_{ci} = \left[\frac{c_{i,1}}{\sum c_{i,k}}, \frac{c_{i,2}}{\sum c_{i,k}}, \dots, \frac{c_{i,k}}{\sum c_{i,k}} \right]^T. \quad (21)$$

- 2 단계 : 가장 높은 가중치를 가지는 이웃 에이전트를 (21)에서 선택한다.
- 3 단계 : 식(17)의 Ψ_k^f 에 사용한다.

표 1. 에이전트 P_1 을 위한 정보.

Table 1. Information table for agent P_1 .

Agent	Distance	Connectivity
P_2	5	4
P_3	2	0
P_4	3	2

앞서 설명한 것처럼, 연결가능성 정보사용은 거리기반 방법보다 더 좋은 이웃 에이전트 선택을 하게 해준다. 하지만 어떤 에이전트는 다른 에이전트들 보다 항상 매우 많은 연결가능성을 가질 수 있다. 예를 들면 이러한 잘못된 정보는 에이전트가 좁은 길을 통과할 때에도 생긴다.

NSA와 MCSA에서는 에이전트들 사이의 LOS만 고려하고 (LOS^A), 에이전트와 목표물과의 LOS(LOS^{AT})는 고려하고 있지 않다. 따라서 NSA와 MCSA에서는 목표물의 위

치를 미리 알고 있다고 가정한다. 위의 두 가지 알고리즘에서 LOS^A 만을 고려하는 이유는, 만약 목표물이 시야 밖에 있다면 모든 에이전트들은 길을 잃을 수 있기 때문이다. 따라서 SA는 목표물과의 LOS도 고려하는 것이 필요하다.

4.3 조직적인 단일 연합

가장 근처의 이웃 에이전트와 가장 연결가능성이 높은 이웃 에이전트를 찾는 SA에서, 심지어 모든 에이전트들은 목표물이 장애물에 가리워져도 볼 수 있다는 가정을 한다. 다른 말로는 모든 에이전트들은 항상 목표물의 위치를 안다는 것이다. 만약 목표물이 행동패턴을 가지고 움직인다면 위에서 설명된 두가지 SA는 쓸모가 없게 된다. 이제, 우리는 에이전트와 목표물 사이의 LOS 뿐만 아니라 에이전트들 사이의 LOS가 존재한다는 가정의 새로운 SA를 제안한다(LOS^{AT}). 그림 3은 제안하는 조직화된 SA의 예를 설명한다.(이하, SSA) 그림 3에서 P_1 은 목표물을 향해 이동하고, 목표물에서 가장 근처에 있기 때문에 리더 에이전트가 된다. P_2 는 리더 에이전트 P_1 을 보지 못하지만, 목표물은 볼 수 있다. 따라서 목표물을 향해 이동한다. P_3 는 목표물도 볼 수 있고, 리더 에이전트 P_1 도 볼 수 있기 때문에 리더 에이전트 P_1 을 향해 이동한다. P_5, P_7, P_9, P_{10} 도 같은 경우이다. 즉 그들은 무리 짓기 행동을 위해서 리더 에이전트 P_1 을 향해 이동한다. P_6 와 P_8 에이전트는 장애물에 가리워져서 목표물을 볼 수 없지만 리더 에이전트 P_1 을 볼 수 있고, 그 경우에는 P_6, P_8 에이전트가 리더 에이전트 P_1 으로 이동한다.

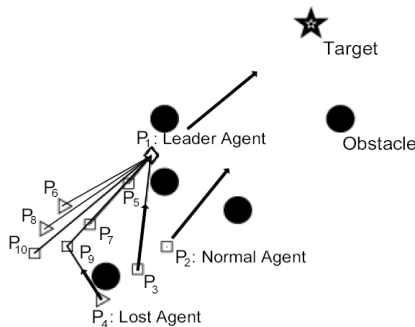


그림 3. 조직화된 단일 연합의 예;(삼각형: 로스트 에이전트, 사각형: 일반 에이전트, 다이아몬드: 리더 에이전트, 별: 목표물, 큰점: 장애물).

Fig. 3. Example of systematic singular association; (triangle: lost agent, square: normal agent, diamond: leader agent, star: target, closed circle: obstacle).

그림 4는 제안된 SSA의 행동 흐름도이다. 모든 에이전트들이 로스트 에이전트가 되었을 경우에는 전 스텝의 리더 에이전트가 목표물을 보기 전까지 가상의 리더가 된다. 가상의 리더 에이전트는 기억된 예전 스텝의 목표물을 향해서 이동한다. 가상의 리더 에이전트를 볼 수 있는 에이전트들은 가상의 리더 에이전트를 향해서 이동한다. 가상의 리더 에이전트는 실제의 리더 에이전트가 생길때까지 리더 에이전트처럼 행동 하다가, 에이전트들이 목표물을 보게 되면 실제의 리더 에이전트가 생기고, 가상의 에이전트는 없어진다. 이 같은 모델만 보더라도 LOS^{AT} 를 고려한 SSA는 앞에 나온 SA 보다 H/W 구현에 있어서 훨씬, 현실적이다. LOS^{AT} 를 고려하기 때문에 움직이는 목표물의 경우에도

SSA는 사용이 가능하다.

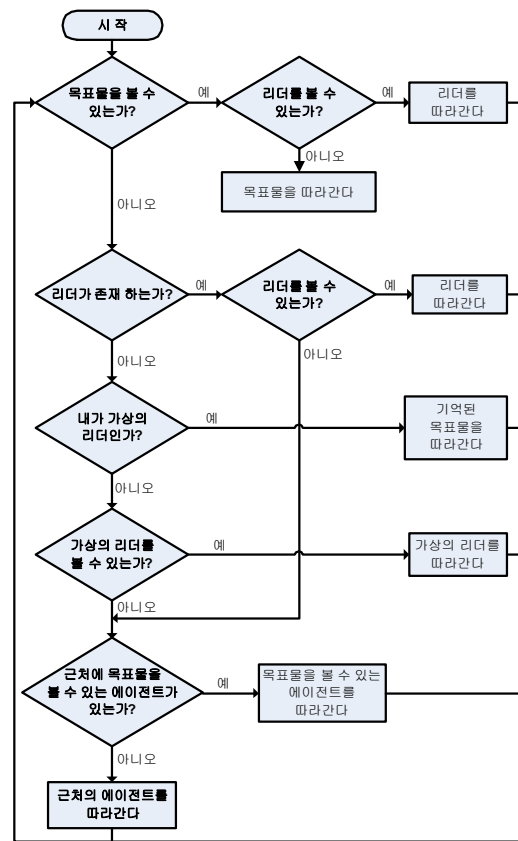


그림 4. 조직화된 단일 연합을 위한 행동 흐름도.

Fig. 4. Flowchart of systematic singular association.

5. 시뮬레이션

이번 장에서 시뮬레이션 결과들은 앞에서 논의된 PA, NSA, MCSA와 제안된 SSA와의 비교 결과들을 보여준다. 총 10개의 에이전트들이 시뮬레이션에서 사용 하였다. 모든 에이전트들의 초기 위치는 무작위로 설정 되었지만 시뮬레이션을 용이하게 하기 위해서 에이전트들은 모든 시뮬레이션에서 같은 초기값을 사용하였다. 디자인 파라미터들은 $l_o = 1/5, l_g = 2, l_a = 1/2, l_r = 1, c_o = 3, c_g = 1, c_a = 1/2, c_r = 1/3$ 로 설정하였다. 그림 5-8은 근거리 선택 에이전트 SA, 다(多) 연결 선택 에이전트 SA, LOS를 고려해서 설계된 PA, SSA에 의한 연합법들의 결과 스냅샷들이다. 스냅샷들은 아래의 시뮬레이션 스텝에 맞춰서 캡처 하였다 : 스텝 100, 200, 300, 400.

각 에이전트가 동적인 협력 관계에서 이웃 에이전트를 현명하게 선택하는 것은 스웸 행동에서 중요한 결과를 보여 준다. 만약 목표물이 시야 밖에 있다면 모든 에이전트들에게 길을 잃게 되기 때문에 그림 5-7에서 에이전트 사이의 $LOS(LOS^A)$ 가 선택된다. 다른 말로 하면 모든 에이전트들은 심지어 목표물이 장애물에 가리워져 시야 밖에 있더라도 목표물의 위치를 안다. 그림에서 에이전트들 사이의 선들은 연결된 에이전트의 거리 정보를 바탕으로 자신의 위치를 결정하는 것을 의미한다. 그림 6에서 각 에이전트는 에

이전트 사이에 통신을 하여 연결가능에 대한 정보를 공유한다. 에이전트가 장애물에 가까워 졌을 때 에이전트는 많은 연결가능성을 가지는 이웃 에이전트를 따라간다. 하지만 그림 5, 그림 6에서 스웸을 위한 포메이션은 조밀하지 않고 에이전트들은 400스텝 이내에 목표물에 도달하지 못한다. 그림 7에서 PA를 사용한 스웸 에이전트들은 좋은 포메이션의 결과를 보여주지만, 에이전트들이 400스텝 안에 근처에 도착하지 못한다. 그림 8에서 제안된 SSA는 에이전트들 사이의 LOS와 에이전트와 목표물 사이의 LOS를 고려한다 (LOS^{AT}). 즉, 두개의 위의 SA와 다르게, SSA에서는 장애물에 가려진 목표물의 상황도 고려한다. 그러한 경우, 가상의 리더 에이전트와 그림 4에서 보여준 조직적인 상호작용에 의해서 목표물로 이동할 수 있다. 조직적인 상호작용은 그림 8에서 보여지는 것처럼 빠른 이동을 만족한다. 수치적으로 각각의 알고리즘들을 비교해보았다.

$$P_c = \frac{\sum_{k=1}^n P_k}{n} \quad (22)$$

여기서 n 은 모든 에이전트의 수이고, P_c 는 모든 에이전트의 중심좌표이다. 표 2.는 중심좌표 P_c 가 목표물방향으로 $x = 13, y = 11$ 지역 범위를 벗어날때의 스텝수를 보여준다. 제안된 SSA에 의한 에이전트들은 표 2.에서도 보여지는 것처럼 다른 알고리즘과 비교하여 목표물을 향해 빠르게 이동한다.

표 2. 각 알고리즘의 속도 비교.

Table 2. Comparison of speed rate for each algorithm.

	NSA	MCSA	PA	SSA
steps	461	920	400	228

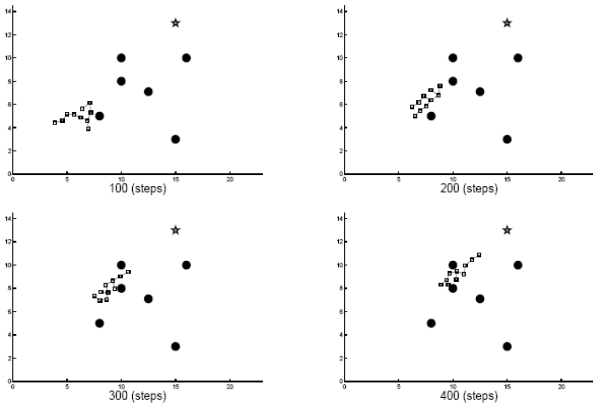


그림 5. 가장 근처의 이웃 에이전트를 찾는 SA; (사각형: 에이전트, 별: 목표물, 큰점: 장애물).
Fig. 5. SA with nearest neighbor; (triangle: agent, star: target, closed circle: obstacle).

6. 결 론

본 논문에서 저자는 다중 에이전트 스웸 시스템에서 그룹 행동을 관리 하기 위한 프레임 워크를 제안했다. 스웸 행동을 위해서 고안된 APF를 기반으로 동적 연합에 의해 에이전트의 자기 조직화를 이루었다. 논문의 주요점은 목표물로의 이동, 장애물 회피, 에이전트간의 충돌 방지, 스웸에

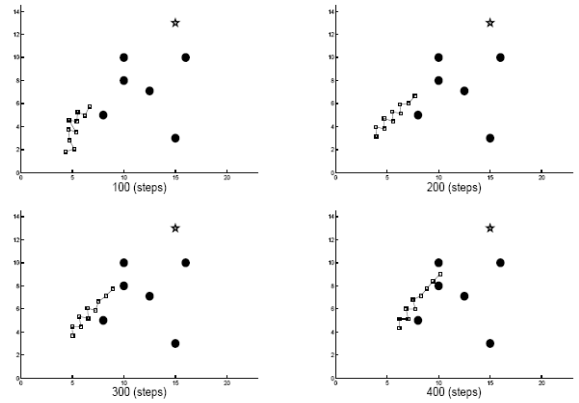


그림 6. 가장 연결가능성이 높은 이웃 에이전트를 찾는 SA; (사각형: 에이전트, 별: 목표물, 큰점: 장애물).
Fig. 6. SA with most connected neighbor; (triangle: agent, star: target, closed circle: obstacle).

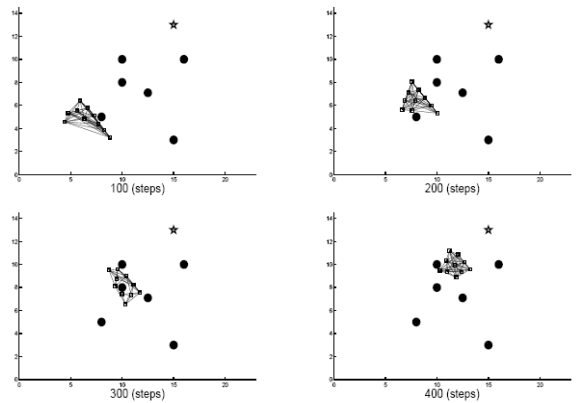


그림 7. 이웃 에이전트와 전체 연결되어진 SA ; (사각형: 에이전트, 별: 목표물, 큰점: 장애물).
Fig. 7. SA with fully connected neighbors; (triangle: agent, star: target, closed circle: obstacle).

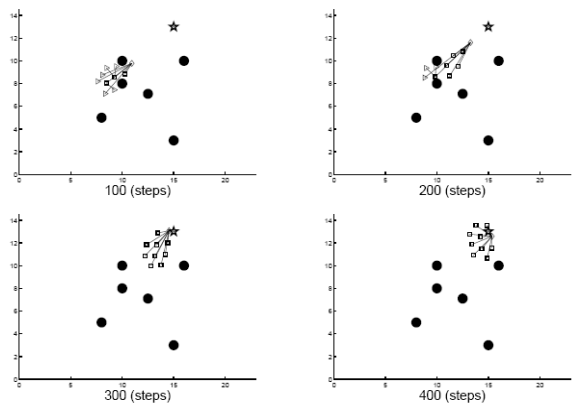


그림 8. SSA에 의한 연합; (다이아몬드: 리더 에이전트, 사각형: 일반 에이전트, 삼각형: 로스트 에이전트, 별: 목표물, 큰점: 장애물).
Fig. 8. Association by the SSA; (diamond : leader agent, square: normal agent, triangle: lost agent, star: target, closed circle: obstacle).

서 대두되는 조밀한 포메이션을 다루는 설정을 위한 DA를 소개하였고, 그룹의 최적 행동을 위한 연합법을 제안하였다. 결과로서 제안된 SSA는 두 가지 중요한 장점을 얻었다. 첫째, SSA규칙은 동료 에이전트를 잃을 가능성이 상당히 낮고 빠른 에이전트들의 빠른 이동을 만족시킨다. 둘째, 에이전트 혹은 목표물이 장애물에 가려지는 LOS^{AT} 를 기반으로 하므로, SSA는 스위프 시스템 H/W 구현에도 기존의 방법들 보다 더 현실적이라고 할 수 있다. 앞으로 추진되어야 할 연구는 제안된 규칙의 깊은 분석과 마이크로 로봇 기반의 실험이 필요하다.

참 고 문 헌

[1] P. Ogren, *Formations and Obstacle Avoidance in Mobile Robot Control*, Ph.D. thesis, Royal Institute of Technology, 2003.

[2] S. Waydo and R. M. Murray, "Vehicle motion planning using stream functions," *In Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Taipei, Taiwan, pp. 2484-2491, 2003.

[3] J. Sullivan, S. Waydo, and M. Campbell, "Using stream functions for complex behavior and path generation," *In Proceedings of the AIAA Guidance, Navigation and Control Conference*, Austin, Texas, 2003.

[4] M. Campbell, R. D'Andrea, D. Schneider, A. Chaudhry, S. Waydo, J. Sullivan, J. Veverka and A. Klovchko, "RoboFlag games using system based, hierarchical control," *In Proceedings of the American Control Conference*, Denver, Colorado, pp. 661-666, 2003.

[5] D. H. Kim, H. O. Wang, and S. Shin, "Decentralized control of autonomous swarm systems using artificial potential functions : Analytical Design Guidelines," *Int. Journal of Intelligent and Robotic Systems*, vol. 45, no. 4, pp. 369-394, 2006.

[6] G. Ye, H. O. Wang and K. Tanaka, "Coordinated motion control of swarms with dynamic connectivity in potential flows," *In Proceedings of the 16th International Federation of Automatic Control World Congress*, Prague, Czech Republic, 2005.

[7] G. Ye, H.O. Wang, K. Tanaka, Z. Guan, "Managing group behaviors in swarm systems by associations," *In Proceedings of the 25th American Control Conference*, Minneapolis, Minnesota, pp. 3537-3544, 2006.

[8] Y. Koren, and J. Borenstein, "Potential field methods and their inherent limitations for mobile robot navigation," *Proc. of the IEEE int. Conf. on Robotics & Automation*, pp. 1398-1404, 1991.

[9] V. Gazi, and K. M. Passino, "Stability analysis of social foraging swarms," *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, Part B, vol. 34, no. 1, pp. 539-557, 2004.

[10] T. Balch, and M. Hybinette, "Behavior-based coordination of large-scale robot formations," *Proc. Fourth Int. Conf. on Multi Agent Systems*, pp.

363-364, 2000.

[11] J. S. Baras, X. Tan, and P. Hovareshti, "Decentralized control of autonomous vehicles," *42nd IEEE Conference on Decision and Control*, Maui, Hawaii, pp. 1532-1537, 2003.

[12] S. S. Ge, and Y. J. Cui, "Dynamic motion planning for mobile robots using potential field method," *Autonomous Robots*, vol. 13, no. 3, pp. 207-222, 2002.

[13] W. Spears, D. Spears, J. Hamann, and R. Heil, "Distributed, physics-based control of swarms of vehicles," *Autonomous Robots*, vol. 17, no. 2-3, pp. 137-162, 2004.

[14] L. E. Kavraki and J. C. Latombe, "Probabilistic roadmaps for robot path planning, practical motion planning in robotics: current approaches and future directions," *Gupta K. and Pobil A. del (eds)*, John Wiley, pp. 33-53, 1998.

[15] S. Guang, S. Thomas and N. M. Amato, "A general framework for PRM motion Planning," *In Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Taipei, Taiwan, pp. 21-26, 2003.

[16] S. J. Russell and P. Norvig, *Artificial Intelligence A Modern Approach*, Prentice Hall, edition, 1995.

저 자 소 개



정하민(Hahmin Jung)

2009년 : 경남대학교 전기전자 공학부 (공학사)

2009년~현재 : 동 대학원 첨단공학과 석사 과정

관심분야 : 스위프 시스템, 지능제어&로봇, 디지털 신호처리, 영상처리



김동헌(Dong Hun KIM)

2001년 : 한양대학교 전기공학과(공학박사)

2001년~2003년 : 미국 듀크 대학교 연구원

2003년~2004년 : 미국 보스턴 대학교 연구원

2004년~2005년 : 일본 동경대학교 박사후 과정

2005년~현재 : 경남대학교 전기공학과 부교수

관심분야 : 스위프 시스템, 이동로봇 경로계획, 스위프 인텔리전스, 비선형 적응제어, 지능제어&로봇

Phone : 055-249-2629

Fax : 055-249-2839

E-mail : dhkim@kyungnam.ac.kr