

## 군집 시스템의 분업화 모델

이준용 | 김대은

연세대학교

### 요 약

본 논문에서는 개미 군집의 행동 생태를 모델로 하여 군집 시스템의 적응적 분업화, 전문화 특성을 살펴보고, 사물 통신 네트워크 분야로의 응용 가능성을 소개하고자 한다. 내·외적인 환경 변화에 대비하여 개미 군집이 어떻게 효율적인 관리와 전체 시스템의 운영 유지를 할 수 있는지는 시스템 관점의 분석 모델이 요구된다. 한 가능한 모델은 반응역(response threshold)과 일의 자극(task associated stimuli)의 관계로 적응적 반응함수를 사용하는 것이다. 본 논문에서는 적응적인 반응함수가 전체 군집의 효율성과 분업화 과정을 촉발시키는 형태로 발전하는 예제를 보여줄 것이다. 이러한 시스템 분석은 사물 통신 네트워크 분야 연구에 적용될 수 있고, 멀티 에이전트 시스템에서 효율적인 정보 전송 및 유지, 노드 부하의 균등화, 통신 가능한 스웸 로봇의 업무 분업화 등 다양한 분야로 응용 가능성이 있음을 제안한다.

### 1. 서 론

지금까지 통신 네트워크와 군집 에이전트 분야에서는 더욱 더 효율적인 환경을 만들기 위해 많은 연구가 이루어져 왔다. 본 논문에서는 개별적으로 수행되고 있는 이 두 분야의 연구를 서로 간의 융합과 교류를 통하여 각 세부 분야의 특징을 살펴보고, 실제 응용 가능성을 제시하고자 한다. 사물 통신 네트워크의 한 방식으로 이동가능한 단말기로서 로

봇을 사용할 수 있는데, 여기에는 로봇과 로봇의 통신과 협력 문제, 동적 네트워크 조직 구성 등 해결해야 할 문제가 많이 있다. 하나의 대안으로 분산적인 통신 노드별 상호 반응과 효율적인 관리를 하는 군집 지능(swarm intelligence) 기술을 소개하고자 한다. 특히 개미 군집의 일 분담 과정에 대한 생물학적인 모델을 통하여, 한 개체의 행동 패턴이 어떻게 군집 전체에 도움이 되는 협력 체제를 이룰 수 있는지에 대하여 살펴볼 것이다. 이러한 군집 지능을 기반으로 하는 정보 처리는 사물 통신 네트워크에서 효율성을 높이기 위한 협력 체제를 구축할 때 도움을 줄 수 있고, 다양한 응용 가능성이 있다.

### II. 생물학적 모델

군집 지능은 각 개체의 환경에 대한 단순한 반응이 군집 전체의 운영에 큰 영향을 주어 군집 전체적으로 지능적인 움직임 또는 행동이 나타나는 현상을 말하며, 각 개별적인 에이전트를 제어하는 중앙 집중식 관리 시스템과는 차별화되는 개념이다. 각 에이전트는 다른 에이전트와 부분적으로 상호 반응하고, 환경에 대한 반응도 단순한 형태로 주어지지만, 전체 에이전트 그룹은 체계화된 지능적인 형태로 효율적인 운영이 이루어지는 것을 말하며, 개미 군집의 먹이 탐색, 새끼의 비행, 물고기의 군집 유영 등의 많은 사례가 있다.

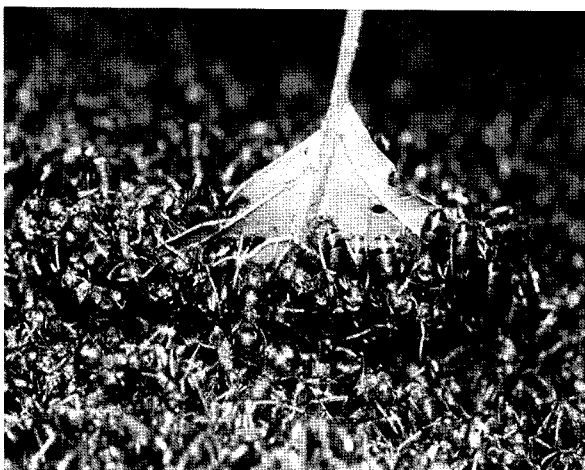
많은 종류의 군거성 곤충(social insect)들은 분업을 하며 집

단 체제를 유지하고 있다[1,2]. 분업을 통해서, 집단의 여러 가지 다른 일들을 전문화된 개체들이 동시에 수행할 수 있게 한다. 전문화되지 않은 개체들이 연속적으로 일을 수행하기보다 전문화된 개체들이 각자 배분된 일을 병렬적으로 일을 수행하는 것이 통상 더 능률이 높다[1,3]. 그리고, 어느 한 부분에서 문제가 생기면 여유가 있는 다른 개체들이 문제가 되는 일에 투입되면서 부족한 부분을 채워가며 전체적인 부분에서 탄력적으로 유지를 하는 경향이 있다. 그 중에서도 특히 개미 군집은 일 분담, 분업화 과정을 통해 집단 내의 일들을 체계적이고 효율적으로 유지하는 대표적인 집단이다[1,2,3]. 일반적으로 분업화에서 일 분담과정은 주어진 환경에 따라 변하게 되는데, 특히 내부의 동요나, 외부의 도전요인이 크게 영향을 미친다. 예를 들어, 음식의 유무, 포식자, 기후 변화, 집단의 크기, 개체의 숫자 등 여러 가지 요인이 있다. 따라서 다양한 환경 변화에 맞춰 이 두 과정을 수행하기 위해서는 각 개체 행동의 탄력성(elasticity)과 군집의 유연성(plasticity)이 반드시 필요하다[2]. 개미 군집 또한 이러한 유연성이 잘 관찰된다.

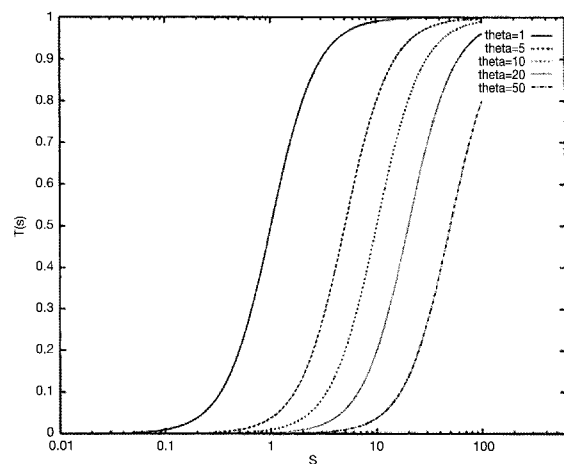
생물학자 Wilson은 군집내에서 주집단(major)과 부집단(minor)이 존재한다고 정의하였다[4]. 개미 집단에 적용해보면 병정개미는 주를 이루고 일개미가 부를 이룬다. 평상시에는 일개미와 병정개미는 자신의 분업을 충실히 한다. 병정개미와 같은 주 부류는 음식 저장, 외부 공격으로부터 방어 등의 업무를 맡고 있다. 만약 내·외부의 영향으로 일개

미의 비율이 줄어들 경우, 병정개미는 자신의 업무를 중단하고 대신 일개미의 일을 대신해 준다. 결과적으로 전체적으로 협력을 이루는 형태로 업무의 효율성을 가져오고, 특정 개체의 업무의 과중함을 경감하는 효과가 있다.

Wilson의 일의 분업화 모델[4]은 Bonabeau가 정의한 일(labor)과 연관된 자극(task-associated stimuli), 그리고 그에 반응하는 척도를 뜻하는 반응역(response thresholds)에 근거를 두고 있다[2,5, 6,7,8]. 각 개체들은 모든 일 각각에 대한 반응역을 갖고 있다. 일과 연관된 자극이 그들의 반응역을 넘어서는 단계가 되면 각 개체들은 그 업무를 수행하게 된다. 또한 각 업무는 우선 순위가 정해져 있다. 낮은 반응역을 갖고 있는 개체는 낮은 단계의 자극에 일을 수행하게 되지만, 반대로 높은 반응역을 갖고 있는 개체는 같은 수준의 자극에 반응하지 않는다. 또 다른 현상은 일에 대한 낮은 자극이 주어진 상태에서 낮은 반응역을 갖고 있는 개체들이 다른 일을 수행하고 있으면, 자극의 강도는 더욱 강해지고, 이것은 높은 반응역을 갖고 있는 개체들 중 일을 하지 않는 개체가 업무를 시작하게 만든다[9]. 개미 군집에서 작업 가능한 일개미가 부족할 경우 더 강한 자극이 생성되고 높은 반응역을 갖고 있는 병정개미가 작업을 대신하게 만들어 분업을 시작하게 된다[4]. 반대로, 자극에 의해 개체들이 반응하여 일을 수행하게 되면, 일 수요가 줄어들게 되고 자극의 강도 또한 낮아지게 된다.



(그림 1) 개미 군집의 협동  
(사진: (c) Britannica www.britannica.com)

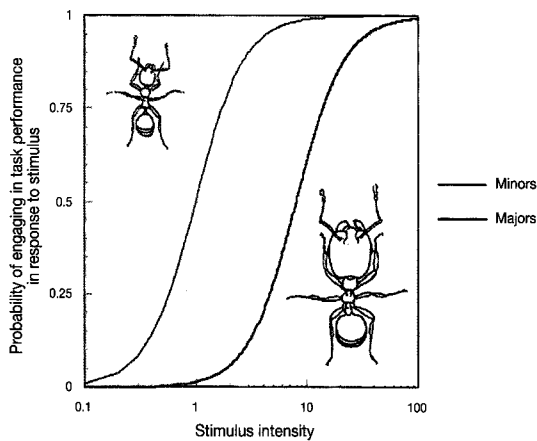


(그림 2) 여러 가지 반응역에 따른 반응 함수  
(n=2, =1,5,10,20,50) (reprinted from [9])

이러한 반응역들은 환경에 따라 변한다고 볼 수 있다. 내·외부의 영향으로 수시로 변하는 이런 반응역들을 이용하여 반응함수를 semi-log형태의 수식으로 모델할 수 있는데, 그 예는 다음과 같다.

$$T_{\theta}(s) = \frac{s^n}{s^n + \theta^n} \quad (1)$$

Eq. (1)에서  $s$ 는 특정한 일에 대한 자극의 강도를 뜻한다. 예를 들어, 일의 빈번성, 개체에 의해 인식되는 신호의 양 등이다.  $n$ 은 반응 함수의 특징을 결정하고, 반응역  $\theta$ 는 특정한 일을 수행하게 하는 자극에 반응하는 개체의 내재적인 경향을 나타낸다. 예를 들어  $s < \theta$  인 상황에서는 개체가 반응할 확률은 낮고,  $s > \theta$  에서는 높아지게 된다. (그림 2)는  $n=2$  이 주어졌을 때,  $s$ 의 변화에 따른 반응함수의 변화를 반응역  $\theta$  별로 구분해서 나타낸 것이다. (그림 2)를 통하여 반응역  $\theta$ 의 의미를 알 수 있다.  $s \ll \theta$ 의 경우 작업을 수행할 확률은 0에 가까워지고  $s \gg \theta$  은 1에 가까워진다. 또한,  $s = \theta$  일 경우의 확률은 정확히 1/2이 된다. 그리고  $\theta$  값이 낮을수록 함수는 그림에서 왼쪽으로 이동하고, 이것은 곧 낮은 단계의 자극에 쉽게 반응함을 뜻한다.



(그림 3) 두 부류의 개미의 반응 함수 차이 (reprinted from [9])

(그림 3)은 반응역이 어떻게 영향을 주는지를 알아보는 Wilson의 실험을 이해하는데 도움을 준다[4,9]. 병정개미 (major)와 일개미 (minor)의 반응함수를 나타낸 것으로 병정

개미가 더 높은 반응역을 갖고 도표상 오른쪽에 위치해 있는 것을 알 수 있다. 앞에서 언급했듯이, 일개미의 부족으로 일을 요구하는 자극이 점점 강해지고 그 자극이 병정개미의 반응역을 초과할 때 탄력적으로 일개미의 업무를 대신하게 됨을 보여준다. 때로는 위에 주어진 식 (1)과는 다른 반응 함수 모델도 가능할 수 있다.

개미 집단을 포함한 대다수 군집 곤충에서 보이는 또 하나의 특징은 전문화(specialization)이다[9,10]. 각 개체는 높은 반응성을 보이는 일이 있는가 하면 반대로 낮은 반응성을 갖는 일이 있다. 비슷한 의미로 어떤 한가지 일을 같은 부류 내에서 몇몇 개체들은 빠른 반응을 보이는가 하면 나머지 개체들은 느린 반응을 보인다. 이 현상을 설명하는 것이 전문화과정이다. 각 개체들은 주어진 일을 하면서 일에 대한 반응성이 점점 높아지게 된다. 즉 자극에 대한 반응역이 점차 낮아지는 것이다. 일을 계속 진행할수록 개체는 그 일에 전문성을 갖게 되고 이것은 곧 반응성에 영향을 미치는 것이다. 다시 말하면, 전문화 과정은 적응적인 모델로 설명이 가능하다. 특정 자극이 반복적으로 주어지고 해당 업무가 수행이 되는 경우, 해당 반응역이 감소하고, 그렇지 않은 경우는 원래의 반응역으로 점차 회복하는 모델을 세울 수도 있다. 이런 전문화과정은 집단 내의 여러 종류의 일을 분업하는데 효율적인 배분을 위한 중요한 정보가 된다[10].

### III. 사물 지능 통신과 로봇

사물 지능 통신(Machine to Machine, M2M)의 한 갈래로 로봇과 로봇 사이의 통신을 들 수 있다. 다른 사물 통신과의 차이는 로봇 개체는 자체 내의 에너지를 통해 이동할 수 있으며, 때에 따라서는 환경의 변화 또는 특정 센서 정보에 반응하여 행동할 수 있다는 것이다. 센서(sensor), 작동기(operation)와 더불어 이동성(mobility)이라는 여러 가지 로봇 특징은 사물 지능 통신의 폭을 더 넓힐 수 있다. 하나의 통신 노드 역할을 하는 로봇은 주어진 환경 정보를 모니터링하고, 사용자 또는 수요자, 관리자에게 해당 정보를 통신 네트워크를 이용하여 전송할 수 있다.

많은 센서 네트워크에서의 문제점으로 각 단말기의 전원

공급 문제를 들 수 있는데, 로봇은 자신의 몸체를 능동적으로 움직여 전원을 충전하는 것이 가능하다. 또한 한 장소에서 환경 정보를 관찰하는 것이 아니라, 로봇 자신의 이동성을 이용하여 다른 위치에서의 센서 정보를 전송할 수 있다. 센서 정보에 따라 로봇은 작동기를 통하여 특정 시스템을 조작, 제어도 할 수 있다. 그러나, 로봇은 센서 외에 작동기와 이동성을 가능하게 하는 모터 시스템을 필요로 하기 때문에 비용, 크기 등에서 제약점을 갖을 수 있다.

로봇 통신에서 요구되는 특성 중 하나는 사물 지능 통신에서의 노드 이동성이고, 이에 따른 통신 네트워크의 적응적 모델이 필요하다. 하나의 노드 또는 여러 개의 노드가 공간적으로 이동할 때, 통신 네트워크에서 기존 전송 선로는 유효하지 않을 수도 있고, 최적의 경로를 보장하기도 어려워진다. 따라서 통신 네트워크 환경의 변화에 따른 네트워크 토폴로지, 전송 경로 등은 적응적인 변화가 요구될 수 있다. 이동성이 있는 로봇과 로봇의 통신에서는 동적인 네트워크 상황들이 끊임없이 나타날 수 있고, 효율성 있는 네트워크 관리 시스템이 요구된다. 한편으로는 효율성 있는 네트워크 유지를 위해서 최적의 로봇의 움직임도 역으로 추정할 수 있을 것이다.

로봇과 로봇의 통신 네트워크 외에 소수의 로봇과 다수의 고정 단말기가 있는 사물 통신 네트워크 환경을 고려할 수 있다. 홈 네트워크의 경우, 많은 사물 노드가 고정된 위치에 있고, 로봇 형태의 소수 통신 노드가 이동성을 갖고 주변 사물 통신 정보를 끊임없이 수집하여 해당 정보를 네트워크에 전송하는 것을 생각할 수 있다. 이러한 사물 네트워크 통신은 더 많은 환경 정보를 제공할 수 있는 이점을 갖고 있다.

#### IV. 사물 통신에서의 분업화

이제부터는 지금까지 살펴 본 개미 집단의 분업화에 대한 생물학적 특징을 적용하여 다중 에이전트 시스템에서 개체의 상태 변화가 어떻게 협력 체제를 이룰 수 있는지 알아보고, 통신 네트워크 상에서 에이전트 또는 로봇에 어떻게 적용될 수 있는지에 대해서 논의한다.

각 개체의 반응함수는 환경에 따른 적응적 모델을 갖고 있

는데 이는 항상성(homeostasis) 모델과 흡사하다. 한 개체의 유연성 있는, 자극에 대한 반응은 전체적인 군집 시스템에서 효율적인 관리와 운용을 유도하고 있다[9]. 이와 같은 적응성은 많은 개체가 작용하는 시스템에서 유효하게 사용될 수 있다. 가령, 수 많은 노드가 연결된 통신 네트워크에서 부분적인 지역적인 연결 네트워크에서 위와 같은 개체 적응 모델은 노드 간의 협력 관계를 유도할 수 있다. 예로, 한 노드가 부하가 많은 경우, 이웃 노드의 협력으로 해당 부하를 줄이는 방식을 고려할 수 있다. 특정 업무에 대한 부하는 방정식 (1)에서 자극의 강도  $s$ 로 표현될 것이다. 이웃 노드는 시간이 지남에 따라 많은 부하 양에 따라 해당 업무를 수행하도록 유도될 수 있다. 결과적으로 같은 종류의 부하는 이웃 노드와 공동으로 해결해나가는 방식으로 전개가 된다. 또 다른 예로는 하나의 전송 선로에 문제가 발생하는 경우, 관련 패킷 전송 노드는 점차 반응역을 증가함으로써, 더 이상 문제가 있는 전송 선로에 패킷을 보내지 않고, 대신에 다른 연결 가능한 전송 선로를 찾는 방법을 사용할 수 있다.

많은 스위치 로봇이 주어진 경우, 로봇 개별적으로는 단순한 임무가 주어진 경우, 그 중 해당 구역 청소를 한다고 가정하면, 해당 지역이 깨끗해지면, 그 지역에서의 반응역이 높아져, 더 이상 청소 임무는 적응적으로 없앨 수 있다. 그러면, 다른 임무로의 전이가 쉽게 이루어질 수 있다. 특히 다양한 임무가 주어질때 각각의 에이전트는 여러 업무 중에서 선택적인 업무를 반응역에 따라 하게 될 것이다. 여러 로봇이 협력을 해서 일을 완수해야 하는 경우에도 적응적인 반응 함수를 이용하여 문제 해결을 할 수 있다. 가령 무거운 물건을 여러 로봇이 협력하여 이동하는 경우, 각 개체 로봇은 주어진 반응역과 자극에 의해 반응을 하는데, 적극적으로 물건을 이동하려고 시도하는 로봇의 수가 어느 수준이 되기까지는 남은 일의 양에 비례해서 해당 자극의 강도를 계속 증가시키는 방법을 사용할 수 있다. 충분한 수의 로봇이 협력할 때에는 남은 일의 양이 감소하기 때문에 해당 자극의 강도가 감소하고, 다른 업무를 하는 로봇이 그 일에 참여할 필요가 없게 된다. 이 경우에도 반응역과 자극의 강도에 의해 주어진 일을 수행하도록 하는데, 군집 지능 (swarm intelligence)의 효과는 환경 또는 다른 에이전트와의 상호 작용에 의해 나타난다. 특히 이러한 시스템의 특징을 이용하면, Ad-hoc과 같이 지역적인 통신 방식에 의한 사물 통신

또는, 단순하고 모듈화된 형태의 정보 통신 네트워크에서 전체적인 군집 형태의 지능성과 협력성을 유도할 수 있을 것으로 본다.

통신 네트워크에서 하나의 노드에서 다른 목적 노드로 패킷을 빠른 시간 내에 전송해야 한다고 할때, 수신자가 일정 시간 이상을 기다리지 않도록 정확한 정보를 신속하게 보내야 한다. 이러한 업무는 통신 네트워크 에이전트는 해당 요구에 응답하여 전송을 시작하고, 만일 패킷 전달에 실패한 경우 다른 에이전트에게 더 많은 요구로 돌아올 수 있다. 결과적으로 다른 에이전트의 반응역은 낮아지고, 해당 반응역이 높아진다. 그 에이전트는 시간이 지남에 따라 전문화 경향을 가질 수 있다. 만일 다른 업무가 많아지면, 해당 반응역은 계속 변동할 수 있다. 각 에이전트 개체는 이러한 유연성을 갖고 다양한 요구에 능동적이고 유기적으로 대처하면서 환경 변화에 적응적인 시스템을 유지할 수 있다.

센서 네트워크에 대한 연구에서도 개미군집의 모델을 적용하여 연구하는 것이 도움이 될 것이다. 무수히 많은 센서 노드가 무선 통신으로 연결이 되어 있을 때, 해당 센서들이 하나의 네트워크로 조직화 되고, 유기적으로 운용할 수 있는지의 연구가 필요하다. 네트워크에서 한 조직으로서 효율적으로 시스템을 운영하기 위해서는 센서노드와 주변 환경과의 밀접한 연결, 노드간의 상호 작용, 업무 분담 등을 유연하게 수행하는 것이 하나의 큰 과제인데, 개미집단에서 각 개체가 전문화와 분업화 과정을 통하여 전체 군집의 기능을 유지하는 모델이 좋은 예가 될 수 있을 것이다. 센서노드는 주변환경의 정보를 수집·처리할 수도 있고, 통신 상에서 주변 센서 노드로 패킷을 전송하고 연결해주는 라우터 역할을 할 수 있다. 어느 환경에서든 센서 노드가 유연성(plasticity)을 갖고 해야 할 일을 변경해가면 전체 네트워크의 유지 및 효율을 높일 수 있을 것이다. 이런 환경에서 이동성이 있는 센서 사이에서 전송되는 패킷의 충돌 및 상호 간섭의 최소화, 정보 전송 기술이 연구되어 해당 기술이 구현될 필요가 있다.

멀티 홉이 요구되는 지역적인 통신 방법이 사용되는 경우 위와 같은 각 개체별 적응적인 반응 함수를 이용하여 군집 지능의 효과를 볼 수 있는데, 결과적으로 전체 시스템의 효율을 향상시킬 수 있다. 실제 통신 네트워크에서 라우팅 문제를 적응적인 군집 지능을 이용하여 해결한 사례가 있다

[11]. 네트워크 내에서 통신 지연, 통신 패킷의 상실, 통신 노드 또는 통신 링크의 고장 등 제반 문제를 처리할 수 있는 위험 관리 (fault-tolerance) 문제, 이런 경우 통신 시스템을 재구성(recon-figuration) 하는 문제, 문제되는 통신 노드를 식별하고 표시함(marking)과 동시에, 데이터 흐름의 경로를 재설정해야 하는 문제가 있다. 전체적인 시스템에서 유기적으로 조율, 협력하는 과정을 통해 다양한 제어 경로의 실시간 추적과 관리가 요구되기도 한다. 위에서 언급한 군집 지능 기술은 이러한 사물 통신 네트워크 문제에 대한 부분적인 해결 방안으로 제안될 수 있다.

## V. 결 론

본 논문에서는 개미 군집의 생태 행동을 모델로 하여 군집 시스템의 분업화 과정을 사물 통신 네트워크 분야에 접목시키는 방향을 살펴보았다. 각 개체 행동에 있어 유연성과 탄력성을 갖춘 개미 군집은 분업화, 전문화 과정을 통하여 전체 군집의 행동을 조율하며 내·외적인 환경변화에 적응하는 시스템을 보여준다. 각 개체는 주어진 다양한 업무에 대하여 적응적인 반응역과 반응 함수를 사용하여 효율적인 분업화 과정을 이룰 수 있다. 이를 모델로 하여 사물 통신 네트워크, 스웸 로봇 등 다중 에이전트 시스템에 군집 지능 응용이 가능할 것으로 본다.

사물 지능 통신의 한 갈래로서, 로봇과 로봇의 통신은 이동성과 작동성의 특징 때문에, 앞으로 많은 분야로의 응용 가능성이 있을 것으로 보인다. 아직까지 통신 네트워크와 로봇의 상호 연결, 그리고 해당 제어 시스템에 대한 연구는 거의 진행되어 오지 않았는데, 통신 네트워크를 이용하여 어떻게 개인 로봇 또는 에이전트 시스템의 능력을 향상시킬 수 있는가, 그리고, 집단 로봇의 행동을 어떻게 관리 유지하고 군집 지능적인 성격을 부여할 것인가에 대한 연구는 아직도 연구해야 할 주제이다. 또 다른 주제로 이동가능한 단말기에 대한 적응성 있는 사물 통신 네트워크의 구성과 조직을 어떻게 구현하는가에 대한 연구도 미비한 편이다. 본 논문에서 언급된 적응적인 군집 지능 모델은 해당 목표를 얻기 위한 하나의 기술로 제안될 수 있다.

Acknowledgments

이 논문은 2010년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국과학재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2010-0000460)

참 고 문 헌

[1] Oster, G. F. "Modeling Social Insect Populations. I. Ergonomics of Foraging and Population Growth in Bumblebees." *Am. Nat* 110(1976): 215-245

[2] Robinson, G. E. "Regulation of Vision of Labor in Insect Societies." *Annu. Rev. Entomol.* 37(1992): 637-665

[3] Jeanne, R. L. "The Evolution of the Organization of Work in Social Insects" *Monit. Zool. Ital.* 20(1986):119-133

[4] Wilson, E. O. "The Relation Between Caste Ratios and Division of Labour in the Ant Genus Pheidole (Hymenoptera:Formicidae)." *Behav. Ecol. Sociobiol.* 16(1984):89-98

[5] Robinson, G. E. "Modulation of Alarm Pheromone Perception in the Honey Bee: Evidence for Division of Labour Based on Hormonally Regulated Response Thresholds." *J. Comp. Physiol. A* 160(1987): 613-619

[6] Bonabeau, E., G. Theraulaz, and J.-L. Deneubourg. "Quantitative Study of the Fixed Threshold Model for the Regulation of Division of Labour in Insect Societies." *Proceedings Roy. Soc. London B* 263 (1996): 1565-1569

[7] Bonabeau, E., G. Theraulaz, and J.-L. Deneubourg. "Fixed Response Thresholds and the Regulation of Division of Labour in Insect Societies." *Bull. Math. Biol.* 60 (1998): 753-807

[8] Bonabeau, E., A. Sobkowski, G. Theraulaz, and J.-L. Deneubourg. "Adaptive Task Allocation Inspired by a Model of Division of Labor in Social Insects." In *Bio-Computation and Emergent Computing*, edited by D.

Lundh, B. Olsson, and A. Narayanan, 36-45. Singapore: World Scientific, 1997

[9] Bonabeau E., M. Dorigo, G. Theraulaz. "Swarm Intelligence from natural to artificial systems" *Oxford University Press* (1999): 109-147

[10] Murciano, A., J. del R. Millan, and J. Zamora. "Specialization in Multi-Agent Systems Through Learning." *Biol. Cybern.* 76 (1997): 375-382

[11] Schoonderwoerd, R., O. Holland, J. Bruten, and L. Rothkrantz, "Ant-Based Load Balancing in Telecommunications Networks", *Adapt. Behav.* 5 (1996): 169-207

약 력



2010년 연세대학교 전기전자공학부 학사  
관심분야: 바이오로보틱스, 인공지능

이 준 용



1989년 서울대학교 컴퓨터공학과 학사  
1993년 The University of Michigan, Ann Arbor, USA 석사  
2002년 The University of Edinburgh, UK, 박사  
2002년 Max Planck Institute for Human Cognitive & Brain Sciences, Cognitive Robotics, Research Scientist  
2006년 The University of Leicester, Neurobiology Lab, Research Associate  
2007년 ~ 현재 연세대학교 전기전자공학과 조교수  
관심분야: 바이오로보틱스, 인공지능, 인공생명, 신경과학, 인지과학

김 대 은

