군집 현상과 제어

과학 기술의 발달로 다수의 로봇이나 비행체 등을 운영하게 되면서 하나의 시스템을 운용할 때는 나타나지 않던 새로운 동역학적 특성들이 나타나게 되었다. 생물 및 생태학에서는 이미 오래전부터 이러한 군집 현상과 그 현상의 이면에 있는 목적 등이 연구의 대상이 되었고 그것에서 새로운 교훈을 얻고자 하였다. 서로 상호 작용을 하는 다수의 부시스템로 구성된 다개체 시스템의 출현으로 인해 그것의 공학적 분석을 위해 새로운 시스템 이론적 해석과 그에 따른 제어 문제들이 주목을 받고 있다. 다개체 시스템이 특정한 목적을 달성하기 위하여 개별 부시스템이 달성해야 할 세부 제어 문제 정의 및 제어 알고리즘에 대한 연구가 활발히 주목을 받고 있다. 본 기고에서는 자연과 공학에 나타나는 다개체 시스템이 보이는 군집 현상의 사례들과 주요 연구 문제를 소개한다.

■ 김정수
(서울과학기술대학교 전기정보공학과)

Ⅰ. 서론

정보 통신 기술이 발달함에 따라 다수개의 로봇이나 비행기 센서 등이 서로 정보를 교환하여 상호 작용하며 다개체 시스템(Multi-Agent Systems, MAS)으로 동작하는 사례가 늘어나고 있다. 다개체 시스템은 그것을 구성하는 부시스템 (예를 들어, 로봇이나 비행기 한 대)이 하나 일 때 보다 나은 성능을 보이거나 하나일 때는 보이는 않는 새로운 역할을 수행하는 경우가 생기고 있다. 이와 같은 상황은 자연계에서는 이미 잘 알려져 있다. 예를 들어, 새나 물고기들은 무리를 지어 군집 이동함으로서 개별적으로 이동하는 경우에 비해 종 보존과 포식자에 대한 생존 확률을 높이고 이동시 목표지점에 도착하는 정확도도 높인다는 것이 알려져 있다. 이러한 다개체 군집 시스템이 주목을 받으면서 시스템이 하나일 때는 나타나지 않던 새로운 제어 문제와 시스템 운용의 문제 등이 대두되고 있다. 여기서 제어 문제의 핵심은 전체 다개체 시스템이 달성해야 할 특정한 목적을 위해서 그것을 이루는 개별 개체가 전체 시스템 안에서 그것이 사용 가능한 정보를 이용하여 나름의 제어 문제를 정의하고 그것을 달성해야 한다는 것이다. 따라서 다개체 군집 시스템에 나타나는 동역학적 특징을 파악하고 그것을 위한 새로운 시스템 및 제어 이론적인 문제 정의와 해석에 대한 연구가 요구되고 있다. 본 기고에서는 자연에서 나타나는 군집 현상과 그것을 통해 얻을 수 있는 특이점을 소개하고 최근 시스템 및 제어 이론 분야에서의 주목받는 다개체 시스템에 나타나는 군집 현상에 대한 연구 주제들에 대해 간략히 소개한다.

Ⅱ. 자연계 및 사회 현상에 나타나는 군집 현상 사례

2.1. 물고기 군집 이동 (Fish School and Birds Flocking)

물고기들은 떼를 지어 다니는 것으로 잘 알려져 있다. 생물 및 생태학자들의 연구에 따르면 물고기들의 이러한 군집 행동 양상에는 특별한 이유가 있는데 가장 큰 이유는 큰 무리를 만들어 포식자에게 포식자 보다 큰 존재로 보이게 하여 그들에게 먹히는 것을 피하기 위함이다. 또한 무리를 이룬 군집 움직임을 통해 포식자가 군집에 속한 물고기 하나를 노리기 힘들게 하기 위해서이다. 또한 최근의 연구 결과에 따르면 이러한 군집 움직임이 이동에 필요한 개별 물고기의 에너지 소비를 줄여 주며 떼를 지어 이동함을 통해 먹이감 발견 가능성도 높이고 종 보존에도 도움이 된다고 한다. 이러한 군집 움직임은 시스템 및 제어 이론의 동기화(synchronziation)로 설명할 수 있다. 즉 물고기가 특정한 대형으로 같은 속도와 가속도(synchronizaed rate and speed)

로 이동을 하면 앞서 설명한 이유들로 인해 생존 확률이 높아진다는 것이다[1]. 또한 흥미로운 최근의 보고에 따르면 물고기들은 적으로 부터의 공격 위협에 많이 노출되어 그 위협이 증가할수록 주변 동료들의 움직임에 더욱 주의를 기울여 동료들의 움직임을 자신의 동특성 변화에 반영하는 주기도 더욱 증가시켜 동기화된 군집 형성 및 이동을 더욱 강화한다[2]. 이러한 현상은 자연에 흔히 발견되는데 새들의 이동, 얼룩말이나 코끼리의 무리 생활 등도 모두 이러한 관점에서 설명할 수 있다. 자연은 이미 군집 현상을 만들어서 개별 생물체라면 가질 수 없는 특별한 장점을 얻고 있는 것이다.

이러한 현상을 수학적 관점에서 모델링하여 해석하고자 하는 노력이 있었는데 가장 유명한 것이 Vicsek 모델과 Cucker-Smale 모델이다. 본 기고에서는 Cucker-Smale 모델이 조금 더 일반적이므로 간단히 소개하고자 한다. 개별 개체의 속도나 진행 방향을 나타내는 $v_i(t)$ 는 다음과 같은 관계를 보인다.

$$v_i(t+1) - v_i(t) = \sum_{j=1}^{N} a_{ij}\left(v_j(t) - v_i(t)\right).$$

여기서 N 은 군집을 이루는 가정된 개체의 수이며 a_{ij} 는 개별 개체들이 어떻게 서로에게 영향을 주는지 나타내며 다음과 같은 함수로 표현된다.

$$a_{ij} = \eta\left(\left\|x_i - x_j\right\|^2\right).$$

여기서 함수 $\eta(\cdot)$는 다음과 같이 정의된다.

$$\eta(y) = \frac{K}{\left(\sigma^2 + y\right)^{\beta}}.$$

여기서 $K, \sigma > 0, \beta > 0$는 상수이다. 간략히 설명하면 개별 개체들은 주변 개체들의 움직임에 영향을 받으며 주기적으로 그 움직임을 고려하여 자신의 동특성을 조절한다. a_{ij} 의 정의에서 보듯이 거리가 멀어지는 개체의 영향력은 줄어들게 된다. Vicsek 모델의 경우에는 다음 시간의 $v_i(t)$ 를 주변 개체들의 가중치 평균으로 결정한다는 측면에서는 Cucker-Smale 모델과 비슷하지만 주변 개체를 불연속적인 과정을 통해 정의한다는 면에서 차이를 보인다. Cucker-Smale과 Vicsek 모델 등을 통해 실제 자연 환경의 생물체 군집 동특성을 반영하는 $v_i(t)$ 가 수렴하는 파라미터 및 초기값의 조건 등에 대한 연구가 주요 관심사이다.

2.2. Dictyostelium의 cAMP 진동 동기화

생물체의 체내에서 일어나는 생명 현상에서도 분자나 세포와 같은 작은 단위의 개체가 여럿 모여서 네트워크를 이루어 동기화(synchronization) 현상을 만들어 생명 현상 유지에 중요한 역할을 하는 사례를 발견할 수 있다. 생명 현상은 그것을 이루는 수많은 생화학 네트워크로 이루어져 있으며 이론적인 연구를 위해 생화학 네트워크는 미분 방정식으로 모델링이 가능하고 그 상태변수는 주로 단백질의 농도나 생화학 분자의 농도이다. 체내 시계(circadian clock)와 심장박동 조율세포(Pace Maker

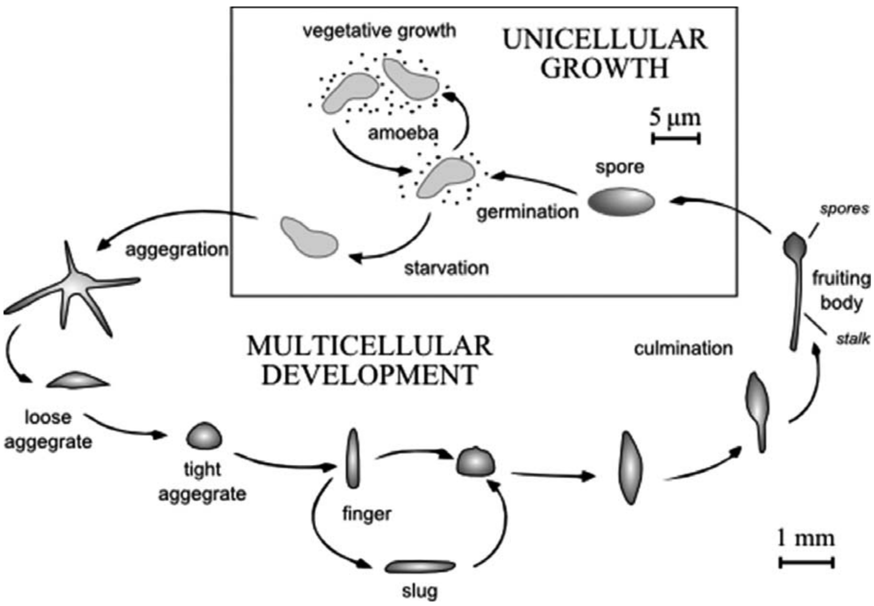

그림 1. Dictyostelium discoideum의 생명 주기 (그림 출처: http: //en.wikipedia.org/wiki/Dictyostelium_discoideum).

Cell)와 같은 생명 현상에도 동기화 현상은 자주 발견되며 아주 중요한 역할을 한다는 것이 관찰되었지만 아직도 그러한 현상들을 만드는 원리와 동역학적 특성 등에 대한 이유들이 완전히 규명되지 않았다. 따라서 생명 공학적 접근 뿐 만 아니라 시스템 이론적인 접근법을 통해서도 그 현상 뒤에 숨은 비밀을 밝혀내고자 하는 많은 연구들이 진행되고 있다.

이 단락에서는 그 중에서도 특별히 그림 1에 소개된 Dictyostelium의 생명 주기의 한 과정에서 발견되는 cAMP(adenosine 3', 5' cyclic monophosphate) 신호의 동기화 현상을 소개한다[3-5]. Dictyostelium은 흙에 사는 아메바의 일종이다.

Dictyostelium의 동기화 현상이 과학자들에게 주목을 끄는 이유는 크게 두 가지이다. 첫 번째는 Dictyostelium 생명 과정의 일부는 단핵 세포(prokaryotes)로 활동하고 다른 어떤 기간은 진핵세포(eukaryotes)의 형태를 취하기 때문에 Dictyostelium의 일생을 통해 단핵 세포에서 진핵 세포로의 진화 과정을 연구할 수 있다. 둘째는 진핵 세포를 형성한 후에 세포 이동을 관찰할 수 있어서 세포의 이주(migration) 또는 이동성(mobility) 연구에 적합하기 때문에 많은 관심을 받고 있다. 세포의 이주 및 이동성이 중요한 이유는 암을 포함한 사람 인체에 발병하는 병의 발전 과정을 연구하는 기초를 제공하기 때문이다. 이러한 Dictyostelium의 동특성에서는 흥미있는 군집 현상이 발견된다. 단핵 세포인 상태에서 만약 충분한 영양분이 공급되지 않으면 Dictyostelium은 서로 모여 다세포 이동체(slug)를 형성한다. 이 과정에서 Dictyostelium들은 서로에게 신호를 주기 위해 cAMP 신호(일종의 진동 신호)를 생성한다. 에너지 부족 환경이 되면 Dictyostelium들은 서로 모이기 위하여 cAMP 신호를 생성하고 받은 신호를 다른 Dictyostelium들에게 전달하기도 한다. 그 결과로 Dictyostelium 세포는 cAMP 신호가 강한 곳으로 움직이며(즉 cAMP신호에 대한 주화성, chemotaxis) 이러한 과정을 거쳐 여러 Dictyostelium들은 하나의 큰 다세포 이동체를 형성한다. 이 과정에서 하나의 Dictyostelium가 분비하는 cAMP 농도는 진동 현상을 보이며 여러 Dictyostelium가 분비하는 cAMP 농도는 결국 동기화(synchronization) 현상을 보인다. Dictyostelium들이 생존을 위해서 더 빨리 모일 목적으로 동기화라는 방법을 통해 더 강한 진동 신호를 만들기 위해 cAMP 신호의 동기화를 이룬다고 해석할 수 있다. 체내 시계 세포에서도 이러한 현상을 발견할 수 있다.

Dictyostelium의 cAMP 동기화는 생명 현상을 유지하기 위해 Dictyostelium들이 개별적인 진동 신호를 이용하는 것이 아니라 서로 상호 작용을 통해 동기화라는 군집 현상을 이용하는 좋은 사례이다.

2.3. 의견 수렴 동특성 (Opinion Dynamics)

수 많은 사람들의 상호 작용이 존재하는 인간 사회에도 이러한 군집 현상은 흔히 나타난다. 대표적인 예가 구성원들의 의견 변화 동특성이다. 즉 구성원 의견들 간에 의견 교환을 통한 상호 작용으로 인해 시간이 지남에 따라 구성원들 의견이 수렴하거나 발산하거나 몇 개의 다른 의견으로 수렴하는 양상을 보이는 것이다. 각 개인의 초기 의견과 상호 작용의 양상등에 따라

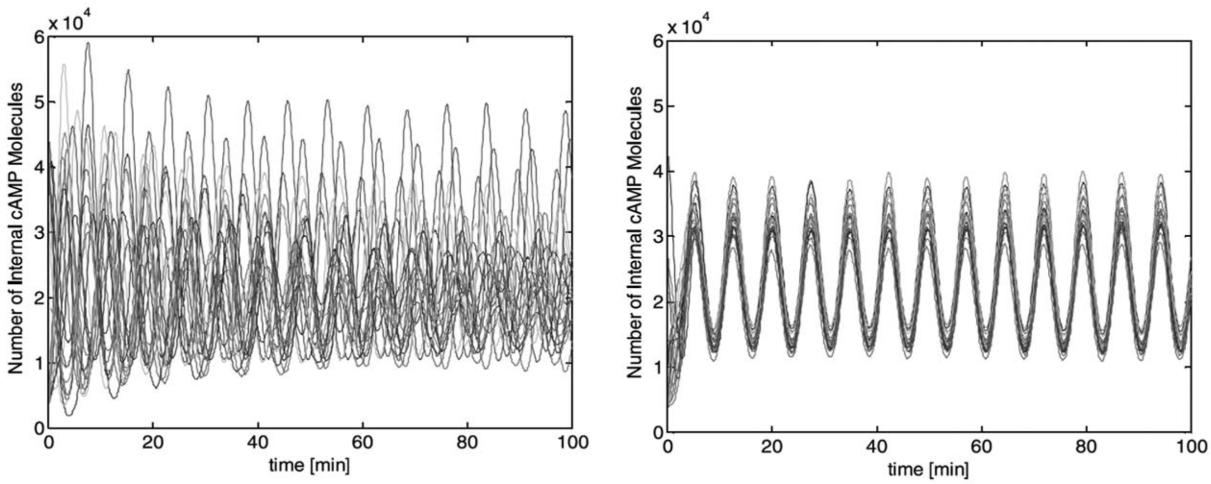

그림 2. cAMP oscillation and synchronization. 왼쪽 그림은 동기화가 일어나지 않을 때 Dictyostelium 세포별 파라메타 불확실성으로 인한 서로 다른 cAMP 진동 신호를 보임을 나타내는데 이는 주화성에 적절한 역할을 하지 못함을 예상할 수 있다. 오른쪽 그림은 동기화로 인해서 모든 아메바들이 강한 CAMP신호를 받아 빠르게 결합(aggregation)할 수 있음을 의미한다.(출처: 논문 [5]의 그림 5. 저작권자에게 사용 동의 구함.)

전체 의견 동특성의 최종 값이 다르게 나타나는 군집 현상의 일종이다.

이런 사회적 현상을 수학적으로 표현하고자 하는 것이 투표모델(voter model)과 의견 수렴 모델(opinion dynamics)이다[6,7]. 의견 수렴 모델은 구조적으로는 본인의 의견 수정을 할 때 본인의 의견과 타인의 의견을 적절히 조합한다는 관점에서 앞서 언급한 Cucker-Smale 모델과 유사하다. 의견 수렴 모델은 개념을 제안한 사람들의 이름을 따라 Hegselmann-Krause 모델이라고 흔히 언급되는데 본 기고에서는 간략하고 익숙한 표기를 위해 문헌 [8]에서 사용된 수학 표기를 따른다. 각 개인 의견의 동특성이 다음과 같이 나타난다고 가정을 한다.

$$\dot{x}_i = u_i, \quad i = 1, \cdots, N.$$

여기서 u_i 는 구성원들 사이의 의견 상호 작용을 나타내며 다음과 같이 나타난다.

$$u_i = \sum_{j:|x_j - x_i| \le d} \left(x_j(t) - x_i(t) \right)$$

여기서 d는 신뢰 수준(belief level)이라고 부른다. 이후에 소개할 상태 일치 문제(consensus problem)와 다른 중요한 사항은 의견을 듣고 실제 반영하는 상대를 정의할 때 $|x_j - x_i| \le d$ 을 사용한다는 점이다. 이 부등식은 의견 수렴 모델에서는 한 개인이 주변으로부터 받게 되는 의견을 모두 수용하는 것이 아니라 자신의 의견과 신뢰 수준 이하로 차이가 나는 의견만 수용하여 자신의 의견 수정에 사용함을 의미한다. 일반적으로 나와 전혀 다른 의견은 수용하지 않으려는 양상을 반영한 결과이다. 사회를 이루는 동적으로 변하는 각 개인의 의견이 어떻게 서로 상호 작용을 일으키며 수렴해 가는지를 수학적으로 보여주는 모델이다. 그림 3은 의견 수렴 모델에서 신뢰 수준에 따라 최종적으로 하나의 의견으로 수렴하는 경우와 두 개의 의견으로 수렴하는 경우가 있음을 보인다.

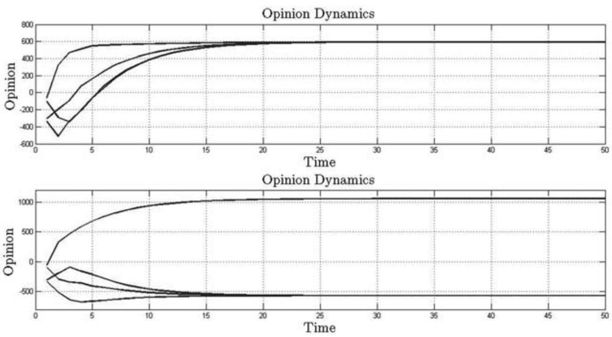

그림 3. 의견 수렴 모델의 수렴 의견 경향: 위의 패널은 상태 일치 문제의 결과와 비슷하게 구성원들의 의견이 하나로 수렴해 가는 것을 보인다. 아래 패널은 의견 수렴 모델의 특성을 나타내는 것으로 작은 신뢰 수준 d의 영향으로 네트워크가 끊어지게 되어 전체 의견이 하나가 아닌 둘로 수렴함을 보인다.

이러한 의견 수렴 모델은 공학의 대상이나 자연 현상이 아닌 사회 현상에서 나타나는 군집 현상의 좋은 예로서 시스템 및 제어 이론으로서 사회 현상을 해석해 볼 수 있음을 나타내며 아직도 풀이지 않은 많은 문제들이 있다[20].

Ⅲ. 군집 현상을 통한 특이점

이 장에서는 개별 개체의 동특성에서는 발견할 수 없으며 군집 동특성에서만 얻을 수 있는 특이 현상 두 개를 소개한다.

3.1. 주기 신호의 강인성 (Robustness of Oscillation)

시스템 및 제어 이론 또는 물리학에 나타나는 진동 모델들은 모델 파라미터에 따라서 진동의 존재성이 달라진다. 즉, 파라미터에 변화가 생기면 진동이 발산하거나 0으로 수렴하는 경우를 볼 수 있다. 그러나 군집 현상의 일종인 진동 신호의 동기화를 통해서 강인한 진동을 얻을 수 있다. 즉 진동 신호를 보이는 여러 개의 동일한 진동 시스템을 고려했을 때 이들 동특성에 파라미터의 변화를 인가하면 진동 현상이 사라지는 경우를 흔히 볼 수 있다. 이는 진동 시스템의 특성이 파라미터 변화에 취약함을 의미한다. 그러나 진동 시스템을 적절한 연결 함수(coupling function)를 설계하여 이들을 상호 작용하게 하여 이들 진동 시스템들이 동기화된 진동 신호를 보이도록 하면 그 동기화된 진동 신호는 파라미터 변화에 강인함을 보인다는 것이 보고되었다[5,9]. 앞 장에서 소개한 Dictyostelium의 cAMP 진동의 동기화 현상에서 이러한 사실을 확인할 수 있는데 그림 2의 왼쪽은 복수개의 연결되지 않은 진동 시스템의 해를 나타내는데 이러한 상황에서 파라미터 변화를 주면 진동의 크기와 주기에 심각한 변화가 생기고 어느 수준을 넘어서면 진동이 약해지며 결국 진동이 0으로 수렴하게 된다. 그러나 그림 2의 오른쪽과 같이 동기화된 진동 시스템은 파라미터 변화에 강인하게 동작한다. 여기서 강인하게 동작한다는 것은 파라미터 변화에도 강인하게 진동 신호가 유지됨을 의미한다[5,10]. 이러한 강인한 진동 신호는 동기화라는 군집 현상에서 발견할 수 있는 특이한 점이다.

3.2. 군집 동특성을 통한 에러 보정 기능 (The many-wrongs principle)

자연계에서 발견할 수 있는 동물이나 곤충들의 무리를 지어

행동하는 행동 양태의 장점은 앞에서 언급하였다. 앞에서 언급한 사실들은 공학적 관심 사항은 아닐 수 있다. 그러나 공학적으로도 주목할 만한 군집 행동을 통해 얻을 수 있는 또 다른 장점이 있는데 이른바 many-wrongs principle이라고 불리는 현상이다[11,12]. 이 법칙이 의미하는 것은 동물들이나 물고기들의 이동(navigation)이나 집단 행동에서 구성원들끼리의 군집 행동과 상호 작용으로 인해 목표 지점에 도달하는 정확도가 홀로 이동하는 경우보다 증가한다는 것이다. 반대로 목표 지점을 파악하는 오차를 집단 행동과 집단 구성원 간의 상호 작용으로 줄일 수 있다는 것이다. 예를 들어 동물 한 마리가 먼 곳에 존재하는 목표 지점으로 이동하는 것 보다는 여러 마리가 군집을 형성하여 집단으로 이동함으로 오차를 줄인다는 것이다. 심지어 집단의 크기가 클수록 더 높은 정확도를 얻을 수 있다는 것이 보고되었다[11]. 개체 개별 행동보다는 군집 현상을 통해 측정 오차를 줄일 수 있다는 것을 의미하므로 공학적으로도 주목할 만한 예이다.

이와 비슷한 현상은 오차를 포함하는 측정 신호의 참 값을 추정하는 문제와 관련하여 사실 공학의 신호 처리 분야에서 잘 알려진 개념이다. $x_i + n_i$로 표현되는 측정 신호에서 x_i는 실제 관심 있는 신호이고 n_i는 확률적 외란일 때 이 신호들을 여러 개 받아서 평균을 취하면 n_i의 효과가 줄어들게 된다. 수식으로도 간단히 설명할 수 있는데 다음과 같이 N개의 측정 신호의 평균을 고려하자.

$$\frac{1}{N}(x_1 + n_1 + x_2 + n_2 \cdots x_N + n_N)$$
$$= \frac{1}{N}(x_1 + x_2 \cdots x_N) + \frac{1}{N}(n_1 + n_2 \cdots + n_N)$$

만약 오차 신호가 정규 분포 (0,1)을 따르는 신호라면 N이 커짐에 따라 위의 수식에 마지막 항이 0에 가까워지므로 위의 합은 참 값에 가까워지게 된다. 이러한 개념은 평균 필터라는 이름으로 알려져 있다. 이와 같이 군집 현상을 통해서 개별 시스템 동특성으로 부터는 얻을 수 없는 또 다른 장점이 있음을 볼 수 있다.

Ⅳ. 멀티에이전트 시스템의 상태 일치 및 대형 제어

이 장에서는 시스템 및 제어 이런 분야에서 최근 많은 연구가 진행되고 있는 다개체 시스템(MAS, Multi-Agent Systems)의 협조 제어(cooperative control)에서 나타나는 일치 문제(consensus problem)에 대해서 소개한다. 상태 일치 문제가 주목 받는 이유는 자연계에 나타나는 많은 군집 현상을 표현하는 수학적 도구를 제공할 뿐만 아니라 다개체 시스템에서 달성하고자 하는 여러 군집 동특성(collective behavior)을 달성하는 제어 문제를 정의하는 수학적 기초를 제공하기 때문이다.

4.1. 멀티에이전트 시스템(MAS, Multi-Agent Systems)

협조 제어(Cooperative Control) 문제의 대상을 다개체 시스템(MAS, Multi-Agent System)이라 하고 다음과 같이 선형 또는 비선형 시불변 시스템으로 나타낸다.

$$\dot{x}_i = Ax_i + Bu_i, \quad x_i \in R^n, u_i \in R^m, y_i \in R^P \quad \text{(1a)}$$
$$y_i = Cx_i, \qquad i = 1, \cdots, N.$$

$$\dot{x}_i(t) = f(x_i(t), u_i(t)), \quad x_i \in R^n, u_i \in R^m, y_i \in R^P \quad \text{(1b)}$$
$$y_i(t) = h(x_i(t)), \qquad i = 1, \cdots, N.$$

연구 기간이 길지 않기 때문에 이러한 MAS를 위한 협조 제어의 목표에 대한 연구자들 간의 일치된 엄밀한 정의는 없지만 문헌 [13]에서는 다개체 시스템이 달성할 수 있는 군집 동특성으로 다음과 같은 개념들을 정의하였다.

Consensus(일치): 다음 조건이 만족할 때 MAS (1)은 점근적으로 일치를 이룬다고 부른다.

$$\lim_{t\to\infty} y_i(t) - y_j(t) = 0, \quad \forall i, j$$
$$\lim_{t\to\infty} \dot{y}_i(t) = 0, \quad \forall i$$

Randezvous (만남): 다음 조건이 만족할 때 MAS (1)은 점근적으로 만남을 이룬다고 부른다.

$$\lim_{t\to\infty} \|y_i(t) - y_j(t)\| = 0, \quad \forall i, j$$
$$\lim_{t\to\infty} \dot{y}_i(t) = 0, \quad \forall i$$

여기서 $\|\cdot\|$은 유크리디언 놈(Euclidian norm)을 나타낸다.

Flocking(무리): 다음 조건이 만족할 때 MAS (1)은 점근적으로 무리를 이룬다고 부른다.

$$\lim_{t\to\infty} \|y_i(t) - y_j(t)\| = 0, \quad \forall i, j$$
$$\lim_{t\to\infty} \|\dot{y}_i(t) - c(t)\| = 0, \quad \forall i$$

여기서 $c(t)$는 일반적으로 0이 아닌 시간의 함수이다.

Synchronization(동기화): 다음 조건이 만족할 때 MAS (1)은 점근적으로 동기화를 이룬다고 부른다.

$$\lim_{t\to\infty}\|y_i(t)-y_j(t)\|=0, \quad \forall i,j$$
$$\lim_{t\to\infty}\|\dot{y}_i(t)-c(t)\|=0, \quad \forall i$$

여기서 $c(t)$는 다음을 만족한다.

$$\int_t^{t+T_p} c(\eta)d\eta=0, \quad T_p>0.$$

4개의 정의가 개념적으로 완전히 서로 독립적이지는 않음을 주의하고 다개체 시스템이 달성할 수 있는 군집 동특성에 대한 연구의 제어 목적에 흔히 등장하는 개념들에 대한 수학적인 정의를 소개하고자 언급하였다.

4.2. 그래프 이론

다개체 시스템의 제어 문제에서는 개체 하나를 제어 하는 문제와 함께 개체들 간의 상호 작용을 수학적으로 나타내는 것이 중요한데 흔히 그래프 이론이 사용된다. 그중에서도 개체들의 연결을 나타내는 라프라시안 행렬은 다개체 시스템 연구에 아주 중요한 역할을 하며 또한 이후 논의를 위해서 간략히 소개한다.

다개체 시스템에서 개체(agent)들 간의 연결은 라프라시안 행렬 L로 표현할 수 있다. a_{ij}로 구성된 라플라시안 행렬(Laplacian matrix) L은 다음과 같이 정의된다.

$$L=\left[l_{ij}\right]\in\mathbb{R}^{N\times N}$$

$$l_{ij}=\begin{cases}-a_{ij} & \text{if} i=j\\ \sum_{k=1,i\neq k}^{N} a_{ik} & \text{if} i=j\end{cases}. \quad (2)$$

예를 들어 그림 1에 나타낸 개체들을 고려해보자. 그림 4(a)와 (b)는 모두 4개의 개체를 가진 MAS이다. 이 때 화살표는 개체간 정보 전달 방향을 뜻한다. 예를 들어 그림 4(a)의 1번 개체는 2번 개체와 3번 개체로부터 정보를 전달받으므로, 그림 4(a)의 라플라시안 행렬(L_1)의 1행은 2열과 3열의 값이 -1이 된다. 또한, 1번 개체에 정보를 전달해주는 개체가 2개이므로, 1행 1열의 값은 2가 된다. 2번 개체의 경우, 1번 개체로부터 정보를 전달받으므로, 2행의 1열의 값이 -1이 되며, 정보를 전달해주는 개체가 1번 개체뿐이므로, 2행 2열의 값은 1이 된다. 이러한 방식으로 3번 개체에 대해 3행을, 4번 개체에 대해 4행을 정리하면, 수식 (3)의 L_1과 같다. 4(b)번 그림에 대한 라플라시안 행렬은 L_2이다.

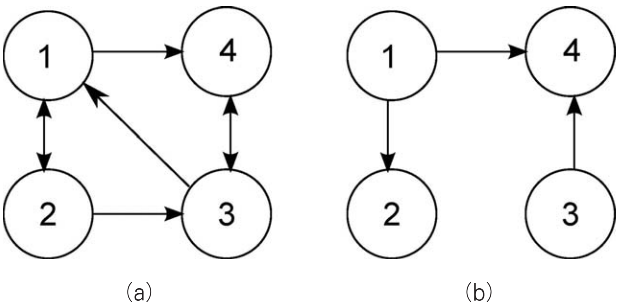

그림 4. 연결 상태 예. (a) 신장트리를 포함하는 경우, (b) 신장트리를 포함하지 않는 경우.

$$L_1=\begin{bmatrix}2&-1&-1&0\\-1&1&0&0\\0&-1&2&-1\\-1&0&-1&2\end{bmatrix}, \quad L_2=\begin{bmatrix}0&0&0&0\\-1&0&0&0\\0&0&0&0\\-1&0&-1&2\end{bmatrix} \quad (3)$$

또한, 신장 트리란 원래 연결 상태 그래프의 부분 그래프이면서 어떤 한 개체에서 나머지 모든 개체에 정보가 도달 가능(reachable)한 트리를 말한다. 라플라시안 행렬의 이러한 정의에 따라 다음과 같은 수식이 만족한다.

$$L1_N=0.$$

여기서 1_N은 모든 요소가 1이고 크기가 N인 벡터이다. 이 수식은 라플라시안이 0인 고윳값을 반드시 하나는 가지며 0이 아닌 나머지 고윳값들은 게쉬고린의 정리(Gershgorian theorem)에 의하여 모두 열린 우반 평면에 존재하게 된다.

4.3. 동종 다개체 시스템에서 일치 문제(Consensus of Homogeneous MAS)

동종 다개체 시스템은 다개체 시스템을 이루는 구성원들이 수학적으로 모두 동일한 경우를 의미한다. 실제에 존재하는 다개체 시스템에서는 모든 구성원들이 정확히 동일할 수는 없지만 수월한 이론 전개를 위해 흔히 사용하는 가정이다. 이러한 동종 다개체 시스템의 상태 일치(state consensus)를 달성하기 위해 다음과 같은 개별 개체의 입력 u_i를 가정한다.

$$u_i=K\sum_{j=1}^{N}a_{ij}\left(x_j-x_i\right), \quad 1=1,\cdots,N.$$

연구의 주된 관심은 여러 다른 상황에 따라 이득 K를 구하는 것인데 여기서 이득에 첨자가 없음에 주의한다. 일반적인 선형 제어 설계 조건과 비슷하게 동종 다개체 시스템의 상태 일치를 달성하기 위해 K가 달성해야 할 조건은 다음과 같이 표현된다.

$$\left|A+\lambda_i(L)BK\right|<1, \quad i=2,\cdots,N$$

여기서 $\lambda_i(L)$은 라프라시안 행렬 L의 고유치를 의미한다. 이 조건은 하나의 개별 개체에 대해서 강인한 제어 입력을 적절히 설계하면 전체 다개체 시스템이 상태 일치를 이룸을 의미한다 [14,15]. 앞서 언급한 것처럼 다개체 시스템 전체가 상태 일치라는 군집 동특성을 달성하기 위해서는 개별 개체가 강인 제어 문제를 해결해야 함을 의미하는 것이다. 상태 일치는 물리적으로 다개체 시스템을 구성하는 개별 개체의 속도, 방향, 가속도들이 시간이 지남에 따라 모두 같은 값이 됨을 나타낸다. 이와 같은 결과를 달성하는 과정에서 개별 개체들은 다른 개체들의 초기값을 모르고 다개체 시스템을 구성하는 개체들 전체의 정보를 아는 것이 아니며 자신과 상호 작용이 있는 개체들의 정보만을 이용한다는 사실에 주목해야 한다. 이러한 상태 일치 문제는 편대 제어 등의 좀 더 구체적이고 세부적인 목표를 가진 제어 문제로 확장할 수 있어 현재 제어 및 시스템 이론 분야에서 가장 주목 받는 주제이다.

4.4. 이종 다개체 시스템에서 일치 문제(Consensus of Heterogeneous MAS)

이종 다개체 시스템은 그것을 구성하는 개별 개체의 수학적 형태가 다른 경우에 해당한다. 이종 다개체 시스템을 위한 일치 문제는 동종의 경우 달리 내부 모델 법칙(internal model principle)에 의해서 달성 조건이 까다롭다. 동종의 경우는 모델이 모두 동일하므로 내부 모델을 이미 알고 있는 경우에 해당하지만 이종의 경우에는 상태 일치도 일종의 추종 문제(trcking problem)로 볼 수 있기 때문에 추종해야 하는 신호를 만드는 외부시스템의 모델을 알 수 없는 경우에 해당하기에 어려움이 존재한다. 현재까지 규명된 바에 의하면 일반적으로 이종 다개체 시스템의 상태 일치를 위해서는 최소한 동적 제어기가 필요하다[16,17].

이러한 다개체 시스템의 일치 문제는 비행기 및 로봇의 편대 제어 그리고 센서 네트워크 연구에 활발히 사용되고 있다.

Ⅴ. 요약

과학 기술이 발달하여 인류가 직면하는 시스템은 마치 물고기 떼와 같이 동일한 수많은 부시스템으로 이루어진 경우가 많다. 따라서 전통적인 단일 시스템에 대한 동특성 및 그를 위한 제어 연구보다 한발 더 나아가 시스템들 간의 상호 작용으로 전체 다개체 시스템에서 생기는 새로운 동특성을 연구하고 그것을 위한 새로운 제어 문제에 대한 지속적인 관심이 필요하다. 또한 다개체 시스템의 동특성에서 나타나는 새로운 동역학적 장점을 잘 파악하여 그것을 적극 활용하는 것에 대한 연구가 필요하다. 또한 본문에서 소개한 바와 같이 자연에서는 이미 군집 동특성을 통해 여러 유익한 결과들을 얻고 있으므로 이로부터 교훈을 얻어 공학에 적용하고자 하는 시도 유익하리라 생각된다[19].

참고문헌

[1] S. Camazine, J.-L. Deneubourg, N. R. Franks, J. Sneyd, G. Theraula, E. Bonabeau, *Self-Organization in Biological Systems: (Princeton Studies in Complexity)*, Princeton University Press, 2003.

[2] “Better Synchronization Helps Fish Deal With Predator Threat” http://www.sciencedaily.com/releases/2010/05/100525202309.htm

[3] M.T. Laub and W.F. Loomis. A Molecular network that produces spontaneous oscillations in excitable cells of Dictyostelium Molecular Biology of the Cell, 9, pp. 3521-3532, (1999).

[4] R. S. Williams, K. Boeckeler, R. Graf, A. Muller-Taubenberger, Z. Li, R. R. Isberg, D. Wessels, D. R. Soll, H. Alexander and S. Alexander. Towards a molecular understanding of human diseases using Dictyostelium discoideum. Trends Mol. Med.; 12:pp.415-42, (2006).

[5] Jongrae Kim, P. Heslop-Harrison, I. Postlethwaite1,2, D. G. Bates, Stochastic Noise and Synchronisation during Dictyostelium Aggregation Make cAMP Oscillations Robust, PLoS Computational Biology, 3(11), e218, (2007).

[6] P. L. Krapivsky, S. Redner, E. Ben-Naim, *A Kinetic View of Statistical Physics*, Cambridge University Press, 2010.

[7] Opinion Dynamics and Bounded Confidence Models, Analysis, and Simulation, R. Hegselmann, U. Krause, *Journal of Artificial Societies and Social Simulation* (JASSS) vol.5(3), 2002

[8] Y. Yang, D. V. Dimarogonas and X. Hu, “Opinion consensus of modified Hegselmann-Krause models,” 51st IEEE Conference on Decision and Control, Maui, Hawaii, pp. 100-105, December 2012.

[9] J.-S. Kim, N.V. Valeyev, I. Postlethwaite, P. Heslop-Harrison, K.-H. Cho, and D. Bates, “Analysis and extension of a biochemical network model using robust control theory,” *Int. J. Robust Nonlinear Control*, vol.20, pp.1017-1026, 2010.

[10] J. Kim, J. Yang, H. Shim, and J.-S. Kim, “Robustness of Synchronization in Heterogeneous Multi-Agent Systems,” To be

presented at ECC 2013.

[11]A. M. Simons, "Many wrongs: the advantage of group navigation," TRENDS in Ecology and Evolution vol.19 no.9 September 2004.

[12]E. A. Codling, J. W. Pitchford, and S. D. Simpson, Group Navigation and The "Many-Wrongs Principle" *In Models Of Animal Movement*, Ecology, 88(7), pp. 1864-1870, 2007

[13]U. Munz. Delay Robustness in Cooperative Control . PhD Thesis, Institute for Systems Theory and Automatic Control, University of Stuttgart, Germany, 2010

[14]J. Lee and J.-S. Kim, "Disc margins of the discrete-time LQR and its application to consensus problem," *Int. Journal of Systems Science*, vol. 43, no. 10, pp. 1891-1900, 2012.

[15]J. H. Seo, H. Shim, and J. Back, "Consensus of high-order linear systems using dynamic output feedback compensator: low gain approach," *Automatica*, vol. 45(11), pp. 2659-2664, 2009.

[16]H. Kim, H. Shim, and J. Seo, "Output consensus of heterogeneous uncertain linear multi-agent systems," *IEEE Trans. Autom. Control*, vol. 56, no. 1, pp. 200-206, 2011.

[17]P. Wieland, R. Sepulchre, and F. Allgower, "An internal model principle is necessary and sufficient for linear output synchronization," *Automatica*, vol. 47, pp. 1068-1074, 2011.

[18]Y. Cao, W. Yu, W. Ren, and G. Chen, "An overview of recent progress in the study of distributed multiagent coordination," *IEEE Trans. on Industrial Informatics, Special issue on Advances in Theories and Industrial Applications of Networked Control Systems*, vol. 9, no. 1, pp. 427-438, 2012.

[19]L. Conradt and T. J. Roper, "Consensus decision making in animals," *TRENDS in Ecology and Evolution*, vol.20(8), pp. 449-456, August 2005

[20]D. Acemoglu, G. Como, F. Fagnani, and A. Ozdaglar, "Opinion fluctuations and disagreement in social networks," *Mathematics of Operations Research*, vol. 38:1-27,2012

저 자 약 력

김 정 수

· 1998년 고려대학교 전기공학과 학사.
· 2000년, 2005년 동 대학원 석사, 박사.
· 2005년~2008년, 서울대학교 자동화기술공동연구소, 독일 Stuttgart대학, 영국 Leicester대학 박사 후 연구원.
· 현재 서울과학기술대학교 전기정보공학과 조교수.
· 관심 분야 : 비선형 제어, 모델예측제어, 최적화 응용, 멀티에이전트 시스템 등.