

이동 로봇의 군집 제어 리뷰

자연계에서 빈번히 목격되는 군집 현상과 그 효율성의 고찰에 기인하여, 최근 다중 이동 로봇의 협업에 대한 연구가 활발히 수행되고 있다. 그 중, 본 논문에서는 다중 이동 로봇의 군집 제어 방법론들을 설명하고, 그와 관련된 최신 결과들도 소개한다. 특히 군집 제어 문제를 해결하기 위한 대표적인 방식인 행동 기반 접근법, 가상 구조 접근법, 선도-추종 접근법, 그래프 이론 기반 접근법 위주로 소개한다.

■ 박봉석*, 김흥근
(*조선대학교 전자공학과, 서울대학교 전기정보공학부)

I. 서론

자연계에서는 생명체들이 군집 행동을 통해 많은 이득을 취한다는 것을 쉽게 알 수 있다[1], [2]. 예를 들어 새들은 V자 형태로 무리를 지어 이동함으로써 비행을 위한 에너지 소모를 최소로 줄이고, 벌들은 자신이 발견한 새로운 꽃을 옆의 동료들에게 춤을 추면서 알림으로써 효율적으로 먹이를 찾으며, 그림 1과 같이 물고기들은 무리 유영을 통해서 생존성을 극대화 시킨다. 이에 착안하여 최근 자율 이동 로봇들의 협업에 대한 연구가 대두되고 있다. 예를 들어, 다수의 자율 이동 로봇에 장착된 센서



그림 1. 물고기 무리 유영(출처 : Coral Reef Photos).

측정치를 이용하여 단일 로봇으로는 불가능했던 넓은 지역에 대한 감시, 정찰 등의 임무를 수행할 수 있으며, 신호 처리 및 정보 융합 기법을 적용하면 이중 혹은 동종의 저가 센서를 사용하더라도 고정밀 정보를 획득할 수 있다. 또한 일부 자율 이동 로봇의 고장 상황 하에서도 주어진 임무의 완수가 가능하므로 시스템의 신뢰도 및 생존성 향상이 우선시 되는 응용 분야에 적용 가능하다.

이동 로봇들의 협업과 관련된 가장 근본적이고 중요한 문제 중의 하나는 군집 제어(formation control)이다. 군집 제어란 쐐기(wedge) 나 체인(chain)과 같이 특정한 기하학적인 모양의 대형을 유지하기 위해 다수의 로봇들을 제어하는 것으로 정의된다[3]. 각각의 로봇은 온보드(on board) 센서를 장착하고 있으며, 계산 능력 및 통신 능력을 갖추고 있다. 따라서 중앙 집중형(centralized control)의 제어기보다는 분산 제어(distributed control) 방식으로 군집 제어 알고리즘이 설계되고 있다[4]. 자율 이동 로봇의 군집 제어 문제를 풀기 위해 많은 접근 방법들이 제시되었으나 대표적인 방식은 다음의 네가지를 들 수 있다. 첫째, 행동 기반 접근법(behavior-based method). 둘째, 가상 구조 접근법(virtual structure approach). 셋째, 선도-추종 접근법(leader-follower strategy). 넷째, 그래프 이론 기반 접근법(graph theory based method)이다. 본 논문에서는 이들 방식의 접근 방법에 대해 알아보고 장·단점 및 군집 제어의 연구 방향에 대해 다룬다.

II. 군집 제어 방법

1. 행동 기반 접근법

행동 기반 접근법에서 각각의 로봇들은 이동(move-to-goal), 장애물 회피(avoid-static-obstacle), 로봇 회피(avoid-robot) 및 대형 유지(maintain-formation)와 같은 기본적인 운동 도식(motor schema)들을 가지고 있다[5]. 각각의 도식들은 원하는 행동 반응을 나타내기 위한 벡터(vector)를 만들어 내며, 이득 값(gain value)을 통해 각각의 행동들의 상대적인 중요성을 나타낸다. 이러한 접근법을 기반으로 하여 로컬 센싱(local sensing)과 최소한의 통신을 이용한 군집 제어 알고리즘이 제시되었으며[6], 경로생성과 장애물 회피를 하기 위해 행동 기반 접근법 기반 군집 제어 알고리즘을 비선형 동적 시스템(nonlinear dynamical system)으로 모델링 하는 방법이 [7]에서 제시되었다.

행동 기반 접근법은 다양한 목적과 관계된 행동들을 가중치를 이용하여 동시에 통합시키기 때문에 다수의 임무가 부여되었을 때 제어 전략을 유도해 내기 쉬운 장점이 있다. 그러나 수학적 표현과 안정도 분석이 어렵기 때문에 군집을 이루는 로봇 전체의 안정성을 보장하기 어려운 단점이 있다.

2. 가상 구조 접근법

가상 구조 접근법에 대한 개념은 [8]에서 처음 제안되었다. 가상 구조 접근법은 그림 2와 같이 개별 로봇들이 가상 구조를 구성하기 위해 담당 지점을 유지하며 움직이는 방식이다. 이를 위해 먼저 원하는 형태의 가상 구조가 정의되고 가상 구조의 움직임은 각 로봇들이 움직여야 하는 경로로 변환한다. 마지막으로 변환된 로봇들의 경로를 정확히 추종하기 위한 개별적인 제어기를 설계한다. 리아프노프(Lyapunov) 안정도 이론을 바탕으로 한 군집 제어가 [9]에서 제시되었으며, 가상 구조의 모양이 시간에 따라 변화할 수 있도록 매개 변수를 이용한 기법이 [10], [11]에서 개발되었다.

가상 구조 접근법은 가상의 구조를 유지하며 움직이기 때문에 다른 접근법과 달리 선도 로봇을 선택할 필요가 없으며, 일부 로봇이 고장 등으로 인하여 임무를 수행하지 못하는 경우에도 전체 대형을 유지하는데 큰 문제점이 발생하지 않는 장점이 있다. 그러나 각각의 로봇들은 자신의 위치를 유지하기 위해 주변 로봇들과 통신을 해야 하며, 이는 로봇들이 통신을 위한 송수신기를 모두 탑재해야 한다는 문제점과 넓은 통신 대역폭이 필요하다는 단점을 내포한다. 또한 다른 로봇들과 상대적인 자신의 위치 정보를 측정하기 위해 전방위적인 측정 시스템이 요

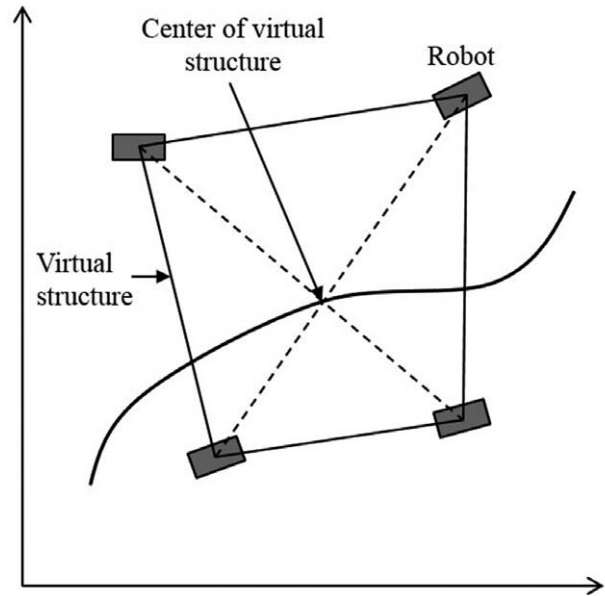


그림 2. 군집 좌표.

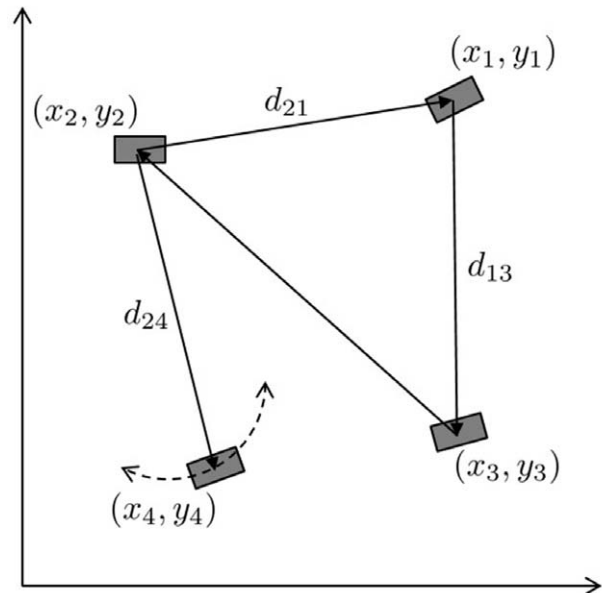


그림 3. 그래프 이론 기반 군집 모형.

구된다는 문제점도 있다.

3. 그래프 이론 기반 접근법

그래프 이론 기반 군집 제어 기법은 다수의 이동 로봇들 사이의 정보 교류를 그래프 이론[12]을 사용하여 모델링하는 것에 그 핵심을 두고 있다. 그림 3에서와 같이 4대의 로봇이 화살표 방향으로 위치 정보를 주고 받는다면, 이 상황을 노드 집합(node set)과 엣지 집합(edge set)으로 구성된 그래프로 모델링할 수 있

다. 즉, 4대의 로봇은 그래프의 노드에 해당하고, 각 화살표는 그래프의 엣지를 나타낸다. 가령 2번째 로봇(2번 노드)에서 1번째 로봇(1번 노드)으로 가는 화살표는 2번째 로봇의 위치 정보 (x_2, y_2) 가 1번째 로봇으로 전송되며, 1번째 로봇은 이 정보를 폐환 제어에 사용할 수 있다는 것을 나타낸다. 정보 교류를 묘사하는 그래프와 로봇의 대형을 묘사하는 상대 위치 벡터 d_{ij} 를 이용하여, 두 로봇 사이의 실제 상대 위치가 d_{ij} 로 수렴하도록 제어기를 설계하여 대형 제어를 이룰 수 있다.

그래프 이론 기반 군집 제어 기법은 크게 두 가지로 나뉜다. 먼저 상대 위치 기반 대형 제어 기법이 있으며, 이는 $\|(x_j, y_j) - (x_i, y_i) - d_{ij}\|$ 이 0으로 수렴하도록 제어기를 설계하는 것을 목적으로 한다 [13], [14]. 다른 하나는 상대 거리 기반 대형 제어 기법이며, $\|(x_j, y_j) - (x_i, y_i)\| - \|d_{ij}\|$ 을 0으로 수렴시키는 것을 목표로 한다 [15], [16]. 각 기법의 목표로부터 알 수 있듯이, 상대 위치 기반 기법은 원하는 대형을 이룰 수는 있지만 상대 위치 정보 $(x_j, y_j) - (x_i, y_i)$ 를 네트워크 통신을 통해 주고 받아야만 한다. 반면, 상대 거리 기반 기법은 상대 위치의 크기 $(\|(x_j, y_j) - (x_i, y_i)\|)$ 만 주고 받아도 되지만, 주어진 그래프가 단단하지(rigid) 않을 경우 원하는 대형을 이루지 못할 수도 있다. 즉, 그림 3에서 볼 수 있듯이, 4번째 로봇은 2번째 로봇과 $\|d_{24}\|$ 거리만 유지하면 되기 때문에, 2번째 로봇을 중심으로 하고 반지름이 $\|d_{24}\|$ 인 원 위의 어느 곳에 위치할 지 모른다는 단점이 있다.

4. 선도-추종 접근법

선도-추종 접근법은 선도 로봇을 따라 추종 로봇들이 일정한 거리와 각도를 유지함으로써 전체적인 대형을 이루는 방식이다. 그림 4에서 보듯이 추종 로봇은 선도 로봇과의 거리 r 와 각도 ψ 를 일정하게 유지하면서 따라가는데 제어의 목적이 있다. 선도-추종 접근법에 대한 기본 개념은 동일하지만 연구자에 따라 다르게 모델링 되어 제어기의 형태가 다양하다. 예를 들어 [17]에서는 로봇 사이의 거리 및 각도를 이용하여 군집 모델을 유도하였으나 [3]에서는 가상의 선도, 추종 로봇을 이용하여 모델링 함으로써 군집 제어 문제를 단일 로봇의 경로 추종 문제로 바꾸어 해결하였다. 또한 선도 로봇이 한대 인지 다수인지에 따라 제어 기법들이 조금씩 달라지기도 하였다.

이러한 선도-추종 접근법은 선도 로봇의 움직임을 기반으로 대형을 이루기 때문에 선도 로봇을 선출해야 하는 문제점이 있고 만일 선도 로봇이 고장이 날 경우 전체 군집 시스템이 마비되는 단점을 가지고 있다. 그러나 개념이 간단하여 이해하기 쉽

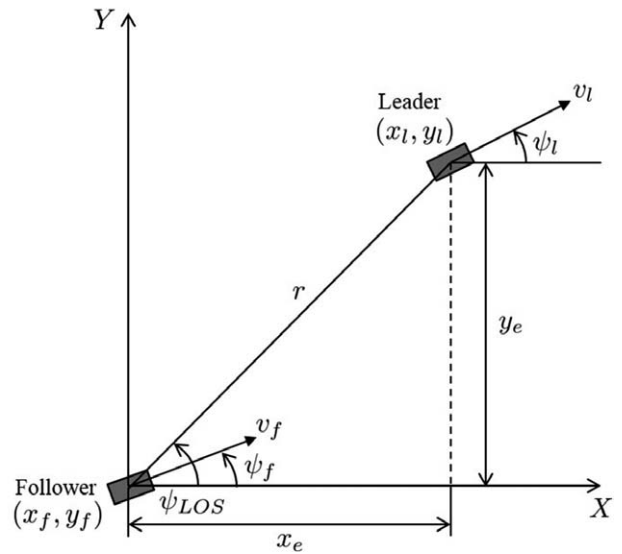


그림 4. 선도-추종 로봇 접근법 기반 군집 모델.

고 여러 대의 로봇을 다루는데 있어서도 확장성이 좋다. 또한 수학적 모델링이 가능하여 군집을 이루는 전체의 로봇에 대한 안정성을 보장할 수 있으며, 이웃 로봇간의 정보만을 요구하기 때문에 가상 구조 접근법에 비해 통신 대역이 줄어들어 장점이 가지고 있다. 따라서 지금까지 언급한 접근 방식 중에서 현재 많은 연구자들에 의해 가장 널리 쓰이고 있는 방법이다.

III. 군집 제어 연구 방향

단일 이동 로봇의 경우와 마찬가지로 군집 제어기 설계를 위한 연구들은 운동학(kinematics)에 기반을 두고 시작되었으며 [18], 이러한 운동학을 기반으로 로봇 군집의 실용성을 위해 여러 형태의 제어기들이 개발되어 오고 있다.

로봇들이 군집을 이루기 위해서는 서로간의 통신이 필수적이다. 만일 통신 상의 데이터 손실이나 노이즈 등이 발생할 경우 군집을 이루는데 문제점을 야기 할 수 있다. [19]에서는 이 문제를 해결하기 위해 추정 알고리즘을 이용하여 통신을 최소화 하고 있다. 군집 제어의 다른 큰 이슈로는 충돌 회피를 들 수 있다. 로봇들이 움직이면서 서로 부딪히거나 장애물들과 충돌하면 로봇에 손실이 발생하고 이는 로봇들이 무리를 지어 움직이면서 임무를 수행하는데 문제점을 야기한다. 따라서 충돌 회피와 관련된 많은 알고리즘들이 개발되었으나 초창기 연구의 대부분은 주행 제어와 충돌 회피 제어를 분리하여 진행하였다. 주행 제어와 충돌 회피 제어를 분리하는 경우 충돌 회피 시에는

군집 제어 기능을 수행하지 않으므로 충돌 회피 후 전체 대형을 유지하는데 어려움이 따를 수 있다. 이를 해결하고자 [20]에서는 충돌 회피 함수를 도입하여 제어기 설계 시 함께 고려함으로써 주행 및 충돌 회피가 동시에 가능한 제어기를 제시하였다. 이외에 군집의 형태가 시간에 따라 변화할 수 있고 제어 입력이 포화되었을 때를 고려한 연구들이 [21], [22]에서 제안되었고 [23]에서는 군집 오차(error)가 0으로 수렴하기 위한 시간을 줄이기 위해 이동 구간 제어(receding horizon control) 기법이 사용되었다.

그러나 이동 로봇은 모터와 같은 액추에이터(actuator)에 의해 움직이기 때문에 운동학 모델만 고려할 경우 액추에이터를 동작시키기 위한 제어기가 추가로 필요하게 되며, 두 개의 제어기를 유기적으로 동작시키기 위한 노력도 요구된다. 또한 이동 로봇의 비홀로노믹(nonholonomic) 특성 때문에 발생하는 제어기 설계의 어려움으로 인하여 이동 로봇의 진행 방향(heading direction)에 대한 제어는 고려되지 않았다. 이러한 문제점을 해결하기 위해 이동 로봇의 동역학(dynamics) 모델을 고려한 연구 [24]들이 시작되었으며, [25]에서 가상 방향(virtual orientation) 기법을 이용하여 군집 제어기를 설계함으로써 진행 방향에 대한 제어도 가능하게 하였다.

[26]에서 포텐셜(potential) 함수 및 리아프노프 함수를 이용하여 제어기를 설계함으로써 실시간으로 정지 또는 이동 중인 물체와의 충돌 회피 및 군집 제어가 가능한 제어기를 제시하였고 [27]에서는 관측기(observer)를 이용하여 제어기를 설계함으로써 자신의 속도 정보를 측정하는데 필요한 센서로 인해 발생하는 문제점을 해결하였다. [28]에서는 [27]에서 다루지 않은 모델 불확실성을 해결하기 위해 적응 관측기(adaptive observer)를 이용하였으며, 신경망 회로(neural network)를 이용하여 액추에이터에 대한 포화 현상을 보상하는 알고리즘을 제안하였다. 최근에는 외란(disturbance), 통신상의 손실 및 센서를 이용한 측정에서 발생할 수 있는 노이즈들에 대한 해결 방안으로 unscented 모델 예측 제어(model predictive control) 기법이 제안되었다 [29].

IV. 결론

본 논문에서는 기존에 연구된 군집 제어 방법 및 연구 진행 방향에 대해 알아보았다. 각각의 접근 방법들은 고유의 장단점이 있으며, 각 접근 방법에 대한 문제점을 해결하기 위해 본문에서 언급된 연구 결과들 외에도 많은 이론적, 실험적 연구들이 진행되었다. 그러나 아직 로봇의 군집 구현을 위해선 해결해야 할

문제들이 많기 때문에 앞으로도 다수의 로봇에 대한 협업 문제는 계속적으로 다루어질 것으로 예상된다.

참고문헌

- [1] P. B. S. Lissaman and C. A. Shollenberger, "Formation flight of birds," *Science*, vol. 168, no. 3934, pp. 1003-1005, May 1970.
- [2] S. H. Strogatz, *Sync: How order emerges from chaos in the universe, nature, and daily life*, Hyperion, 2003.
- [3] J. Shao, G. Xiao, and Z. Cai, "Leader-following formation control of multiple mobile vehicles," *IET Control Theory and Applications*, vol. 1, no. 2, pp. 545-552, Mar. 2007.
- [4] Y. Q. Chen and Z. Wang, "Formation control: A review and a new consideration," *IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp. 3181-3186, Aug. 2005.
- [5] T. Balch and R. C. Arkin, "Behavior-based formation control for multirobot team," *IEEE Trans. Robotics and Automation*, vol. 14, no. 6, pp. 926-939, Dec. 1998.
- [6] J. Fredslund and M. J. Mataric, "A general algorithm for robot formations using local sensing and minimal communication," *IEEE Trans. Robotics and Automation*, vol. 18, no. 5, pp. 837-846, Oct. 2002.
- [7] S. Monteiro and E. Bicho, "A dynamical systems approach to behavior-based formation control," *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 2606-2611, May 2002.
- [8] K. H. Tan and M. A. Lewis, "Virtual structures for high-precision cooperative mobile robotic control," *Proc. of the IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems*, Nov. 1996, pp. 132-139, Nov. 1996.
- [9] P. Ogren, M. Egerstedt, and X. Hu, "A control Lyapunov function approach to multiagent coordination," *IEEE Trans. Robotics and Automation*, vol. 18, no. 5, pp. 847-851, Oct. 2002.
- [10] K. D. Do and J. Pan, "Nonlinear formation control of unicycle-type mobile robots," *Robotics and Autonomous System.*, vol. 55, no. 3, pp. 191-204, Mar. 2007.
- [11] K. D. Do, "Formation tracking control of unicycle-type mobile robots with limited sensing ranges," *IEEE Trans. Control System Technology*, vol. 16, no. 3, pp. 527-538, May 2008.
- [12] C. D. Godsil and G. Royle, *Algebraic graph theory*, Graduate Texts in Mathematics, Springer, vol. 207, 2001.

- [13] 김홍근, 심형보, 백주훈, "일치 제어 알고리즘을 이용한 외 발형 이동 로봇들의 대형 안정화," 대한전기학회 하계학술대회 논문집, pp. 1615-1616, Jul. 2010.
- [14] H. Kim, H. Shim, J. Back, and J.-H. Seo, "Consensus of output-coupled linear multi-agent systems under fast switching network: Averaging approach," *Automatica*, vol. 49, no. 1, pp. 267-272, Jan. 2013.
- [15] 강성모, 박명철, 이병훈, 오광교, 안효성, "거리기반 편대 제어: 기초지식, 주요결과 및 이슈," 제어로봇시스템학회 논문지, 제19권, 제5호, pp. 398-409, May 2013.
- [16] K.-K. Oh and H.-S. Ahn, "Formation control of mobile agents based on inter-agent distance dynamics," *Automatica*, vol. 47, no. 10, pp. 2306-2312, Oct. 2011.
- [17] J. P. Desai, J. Ostrowski, and V. Kumar, "Modeling and control of formations of nonholonomic mobile robots," *IEEE Trans. Robotics and Automation*, vol. 17, no. 6, pp. 905-908, Dec. 2001.
- [18] A. K. Das, R. Fierro, V. Kumar, J. P. Ostrowski, J. Spletzer, and C. J. Taylor, "A vision-based formation control framework," *IEEE Trans. Robotics and Automation*, vol. 18, no. 5, pp. 813-825, Oct. 2002.
- [19] K. Choi, S. J. Yoo, J. B. Park, and Y. H. Choi, "Adaptive formation control in absence of leader's velocity information," *IET Control Theory and Applications*, vol. 4, no. 4, pp. 521-528, Apr. 2010.
- [20] S. Mastellone, D. M. Stipanovic, C. R. Graunke, K. A. Intlekofer, and M. W. Spong, "Formation control and collision avoidance for multi-agent non-holonomic systems: theory and experiments," *International Journal of Robotics Research*, vol. 27, no. 1, pp. 107-126, Jan. 2008.
- [21] D. Kotic, S. Adinandra, J. Caarls, and N. van de Wouw, "Saturated control of time-varying formations and trajectory tracking for unicycle multi-agent systems," *Proceedings of the IEEE Conference on Decision and Control*, Dec. 2010, pp. 4054-4059.
- [22] D. Kotic, J. Caarls, and H. Nijmeijer, "Collision-free motion coordination of unicycle multi-agent systems," *American Control Conference*, Jun. 2010, pp. 3186-3191.
- [23] J. Chen, D. Sun, J. Yang, and H. Chen, "Leader-follower formation control of multiple non-holonomic mobile robots incorporating a receding-horizon scheme," *International Journal of Robotics Research*, vol. 29, no. 6, pp. 727-747, May 2010.
- [24] M. Defoort, T. Floquet, A. Kokosy, and W. Perruquetti, "Sliding-mode formation control for cooperative autonomous mobile robots," *IEEE Trans. Industrial Electronics*, vol. 55, no. 11, pp. 3944-3953, Nov. 2008.
- [25] T. Dierks and S. Jagannathan, "Neural network control of mobile robot formations using RISE feedback," *IEEE Trans. System, Man, and Cybernetics, Part B: Cybernetics*, vol. 39, no. 2, pp. 332-347, Apr. 2009.
- [26] B. S. Park, J. B. Park, and Y. H. Choi, "Robust adaptive formation control and collision avoidance for electrically driven non-holonomic mobile robots," *IET Control Theory and Applications*, vol. 5, no. 3, pp. 514-522, Feb. 2011.
- [27] K. D. Do, "Output-feedback formation tracking control of unicycle-type mobile robots with limited sensing ranges," *Robotics and Autonomous Systems*, vol. 57, no. 1, pp. 34-47, Jan. 2009.
- [28] B. S. Park, J. B. Park, and Y. H. Choi, "Adaptive formation control of electrically driven nonholonomic mobile robots with limited information," *IEEE Trans. System, Man, and Cybernetics, Part B: Cybernetics*, vol. 41, no. 4, pp. 1061-1075, Aug. 2011.
- [29] M. Farrokhsiar and H. Najjaran, "An unscented model predictive control approach to the formation control of nonholonomic mobile robots," *Proceedings of the IEEE Conference on Robotics and Automation*, Minnesota, USA, pp. 1576-1582, May 2012.

저자약력



박봉석

- 2005년 연세대학교 전기전자공학과(공학사).
- 2008년 동 대학원 공학석사.
- 2011년 동 대학원 공학박사.
- 2012년~현재 조선대학교 전자공학과 조교수 재직중.
- 관심분야 : 비선형 적응 제어, 지능 제어, 이동 로봇, 무인 잠수정, 군집 제어.



김홍근

- 2005년 한양대 전기전자컴퓨터공학부 졸업.
- 2005년~2012년 서울대학교 전기컴퓨터공학부 석박사통합.
- 2012년~현재 서울대학교 전기컴퓨터공학부 박사 후 연구원.
- 관심분야 : 다개체 시스템, 출력제어.