

Formation Motion Control for Swarm Robots

라 병 호* · 김 성 호** · 주 영 훈†
(Byoung Ho La · Sung Ho Kim · Young Hoon Joo)

Abstract : In this paper, we propose the formation control algorithm for swarm robots. The proposed algorithm uses the artificial potential field(APF) to plan the global path of swarm robots and to control the formation movement. The navigation function generates a global APF for a leader robot to reach a given destination and an avoidance function generates a local APF for follow robots to avoid obstacles. Finally, some simulations show the validity of the proposed method.

Key Words : Swarm robot, Formation control, Formation algorithm, Obstacle avoidance

1. 서 론

군집 로봇 시스템이란 다수의 로봇의 협동제어를 통해 단일 로봇 이상의 성능을 내는 것을 목표로 하는 시스템이다. 이러한 군집 로봇 시스템은 단일 로봇이 하지 못하는 임무 수행을 팀을 이루어 조직적으로 실행 할 수 있을 뿐 만 아니라, 각자의 일을 독립적으로 수행함과 동시에 여러 장소에서 정보를 획득 할 수 있다[1]. 군집 지능 로봇 연구 분야는 그림 1과 같이 군집 행동 제어 기술, 군집 네트워킹 기술, 군집 상황인지 기술, 군집시스템 통합 기술로써 크게 4가지 분야로 나눌 수 있다. 군집 행동 제어 기술은 비정형 환경이나 시설물 등 개별 로봇을 통한 임무 수행의 한계가 있는 곳에서 다수의 로봇을 통한 인명구조, 재난 복구, 상황 인지 등의 작업과 관련된 기술이고, 군집 네트워킹 기술은 각 로봇들의 제어를 위한 상호간의 통신 네트워킹 기술이다. 군집 상황 인지 기술은 환경과 상황을 감지하여 해석함으로써 로봇이 임무 수행을 위한 최적의 대응방법과 군집 로봇의 핵심 기능인 대형 편성, 협조 제어 등에 필요한 기반을 제공하는 기술이고, 군집 시스템 통합 기술은 로봇을 종합관리하고, 통제·운영기술과 제어를 하기위한 통합 개발환경 및 시뮬레이션 도구를 포함하는 S/W기술이다.

본 논문에서, 군집 행동 제어 기술은 다수의 로봇이 협조 행동을 할 수 있도록 대형을 편성하고, 대형 편성 후 이동간에 장애물을 회피 할 수 있도록 하는 연구를 다룬다. 특히 군집 로봇 시스템에서 로봇의 효과적인 명령 수행을 위해 포메이션 이동 제어 방법을 제안한다. 군집 로봇의 포메이션 주행에서 가장 기본적인 과제는 주어진 환경에서 안전

한 주행과 포메이션 유지·변형에 관한 것이다. 주행에 관한 연구는 주어진 외부 환경에 대한 정보를 로봇들에게 알려주어야 하며, 주어진 정보에 대한 분석이 필요하다. 이를 위해 가장 많이 사용되고 있는 알고리즘중 하나가 potential field method이다[3][4].



그림 1 군집 지능 로봇의 분류
Fig. 1 Classification of intelligent swarm robot

이는 장애물과 로봇의 떨어진 거리에 따른 potential field를 가상으로 구성하여 그 정보에 기초하여 장애물을 회피하는 경로를 탐색하는 기법이다. 그리고 포메이션 유지·변형에 관한 연구는 어떻게 로봇들이 포메이션을 이루게 할 것이며, 특정 형태로 이루어진 포메이션을 어떻게 유지할 것인가가 중요하다. 서로 같은 특성을 갖는 각 로봇들이 포메이션에 이루게 하는 방법에 대한 최적의 제어기 설계가 필요하다. 또한, 로봇 간에 충돌을 피하면서 최적의 경로를 따라 이동할 수 있는 배치 및 이동 기술에 관한 연구 등이 있다.

군집 포메이션 형성 및 이동의 예로써, 무리를 지어 이동하는 새들의 이동 패턴을 볼 수 있다. 주로 V자 형태의 이동을 볼 수 있는데, 무리를 지어 V자 형태로 이동하면 개체

* 준 회원 : 군산대학교 제어로봇공학과 석사과정
** 정 회원 : 군산대학교 제어로봇공학과 교수
† 교신저자, 시니어회원 : 군산대학교 제어로봇공학과 교수
E-mail: yhjoo@kunsan.ac.kr
접수일자 : 2011년 7월 8일
최종완료 : 2011년 10월 15일

들이 서로 부딪히지 않고 편대 비행을 할 수 있고, 이동 방향의 상황 인지능력이 향상되어 장애물이나 위험 상황에 부딪혔을 때 보다 빠른 대처가 가능하다. 이러한 새들의 행동을 기반으로 군집 로봇 이동 제어 알고리즘에 대한 개발이 진행 되었다[6][7]. 본 논문은 비정형 환경에서 상황에 맞는 군집 로봇들의 대형 편성 및 행동 제어를 다룬다. 이것은 미지의 환경에서 형태를 이루어 주변 환경 및 정보를 수집하고, 감시, 정찰 및 수색 등의 임무 수행 시간 단축 하고, 환경의 변화나 로봇의 고장과 같은 내·외부의 변화가 존재하는 가변 상황에서도 실패 없는 임무수행을 하기위해서 필요한 요소 기술이다.

본 논문에서는 potential field method에서 개체 간에 서로 끌어당기는 힘(인력, attractive force)과 서로 밀어내려는 힘(척력, repulsive force)을 사용하여 군집 로봇의 리더가 되는 leader-robot을 위한 출발점에서 목표점까지 경로 계획을 한다. 계획된 로봇의 경로를 기준으로 하여 leader-robot을 추종하는 follower-robot들이 위치할 포메이션 좌표를 설정한다. 그리고 이동 중에 발생하는 로봇과 로봇간의 충돌, 로봇과 장애물간의 충돌회피를 하기위해 별도의 potential field method의 인력과 척력을 이용하여 회피한다. 이와 같이 본 논문에서는 leader-robot의 경로 계획을 위한 APF (artificial potential field)와 이동 중 로봇간 또는 장애물과의 충돌 회피를 위한 APF를 사용하여 군집 로봇의 이동간 대형 형성을 구현 한다. 마지막으로 모의실험을 통해서 알고리즘의 가능성을 검증한다.

2. 군집 이동 로봇의 포메이션 이동

군집 로봇의 포메이션 형성과 임무 수행을 위해서 군집을 이루는 로봇 팀의 디자인에 관한 연구가 진행되었다. 일반적으로 다중 군집 로봇 팀의 디자인은 unit center referenced, leader referenced, neighbor referenced와 같은 3가지 사항을 기반으로 한다. unit center referenced 는 각 로봇들의 평균 좌표에 있는 점을 중심으로 선정하고, 이 중심점을 기준으로 자신의 위치를 계산하는 방법이고, leader referenced 는 대형을 이루고 있는 하나의 로봇이 리더가 되어 다른 로봇들이 리더를 기준으로 하여 자신의 위치를 계산 하는 방법이다. 그리고 neighbor referenced는 각 로봇들이 자신과 이웃하고 있는 로봇을 기준으로 하여 자신의 위치를 계산 하는 방법이다[8].

본 논문에서는 leader-robot을 기준으로 follower-robot들의 위치를 계산하는 방법과 potential function을 이용하여 leader-robot의 장애물 회피와 이동 경로를 계획한다. 제안하는 제어 시스템은 그림 2와 같다. 계획된 경로 좌표를 이용하여 leader-robot을 기준으로 하는 follower-bot의 포메이션 형성을 위해 formation 형성 함수를 사용한다. 위 과정을 통해 follower-robot들이 정해진 좌표에 위치하게 된다. leader-robot과 follower-robot들 간에 충돌회피와 follower-robot들의 장애물 회피를 위해 Potential function을 적용한다. follower-robot들이 이동 간에 정해진 좌표에서 이탈하면, 위 과정을 되풀이 하여 정해진 위치로 다시 이동시킨다.

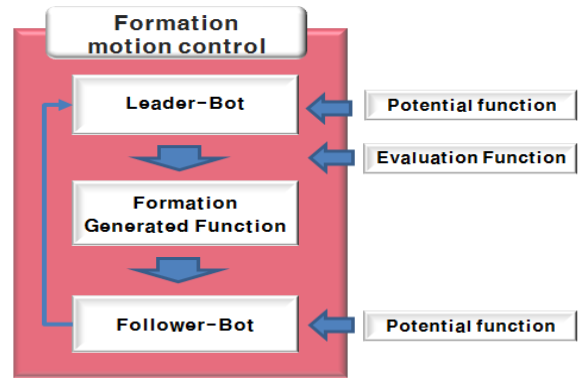


그림 2 군집로봇 포메이션 제어 시스템
Fig. 2 Formation control system for swarm robot

3. 군집로봇의 포메이션 형성

군집 이동 로봇의 포메이션 이동을 위한 최종 좌표 위치를 결정하기 위해 formation 형성 함수를 사용한다. 포메이션 형성 조건은 장애물이 포함되지 않은 2차원 맵이라 가정한다. 그림 3과 같이 leader-robot을 기준으로 하는 follower-robot이 위치할 자리의 좌표를 생성한다.

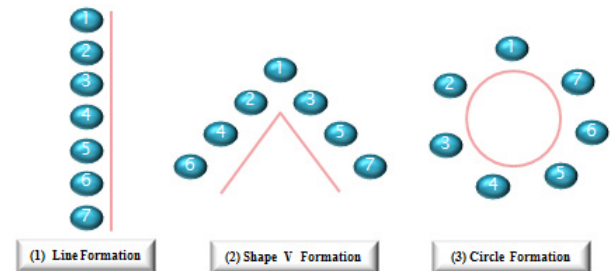


그림 3 군집 로봇 포메이션 이동 종류
Fig. 3 Swarm robot formation move

식 (1)은 leader-robot의 이동 경로 좌표에 따른 follower-robot이 위치할 포메이션 좌표를 결정하기 위한 과정을 나타낸다. V자 형태의 포메이션을 형성 할 경우 leader-robot을 기준으로 하는 RP(Right position)과 LP(Left position)에 위치할 follower-robot들의 위치 좌표를 구한 것이다.

$$\begin{aligned}
 & \text{Leader } P(x, y) \\
 & RP_i = [(x_i - d_{RP_i} \sin \theta), (y_i - d_{RP_i} \cos \theta)] \\
 & LP_i = [(x_i + d_{LP_i} \sin \theta), (y_i - d_{LP_i} \cos \theta)]
 \end{aligned} \tag{1}$$

여기서, $P(x, y)$ 는 leader-robot의 좌표를 나타내며, RP_i 와 LP_i 는 각각 오른쪽 포지션과 왼쪽 포지션에 위치할 follower-robot들의 위치, d_{RP_i} 와 d_{LP_i} 는 로봇들 사이의 거리, θ 는 그림 4에서 나타난 leader-robot를 기준으로 하는 follower-robot들의 포메이션 형성 각도를 나타낸다.

4. Potential Field를 이용한 군집 로봇의 경로 계획 및 장애물 회피

군집 로봇의 포메이션 이동을 위해 먼저 leader-robot을 목표 위치까지 이동시키기 위한 경로 계획과 follower-robot의 장애물 회피와 로봇간의 충돌 회피를 위한 포텐셜 필드가 필요하다. 포텐셜 필드의 개념은 목표 지점으로 이동하기 위해 이끌리는 인력과 장애물로부터 회피하기 위해 반발되는 척력으로 이루어진다. 즉 전체 포텐셜 함수는 인력 포텐셜 함수(attractive potential function)와 척력 포텐셜 함수(repulsive potential function)의 합으로 정의된다.

$$U_{tot}(q) = U_{att}(q) + U_{rep}(q) \quad (2)$$

여기서, U_{tot} 는 전체 포텐셜 함수, U_{att} 와 U_{rep} 는 각각 인력 포텐셜 함수와, 척력 포텐셜 함수를 의미한다. 그리고 $q=[x \ y]^T$ 는 로봇의 위치 좌표를 의미한다. 이 식을 힘 F에 대해 정리하면

$$F_{tot}(q) = F_{att}(q) + F_{rep}(q) \quad (3)$$

여기서 $F_{tot}(q) = -\nabla U_{tot}(q)$ 이고, $F_{att}(q)$ 는 leader-robot과 목표점의 인력을 나타내고, $F_{rep}(q)$ 는 장애물과의 척력을 나타낸다.

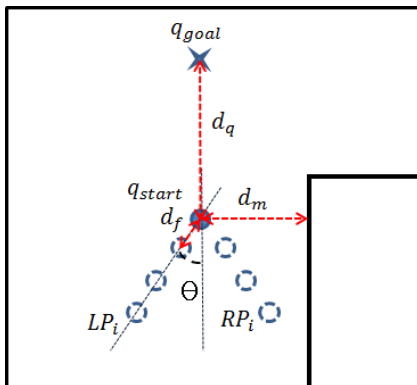


그림 4 군집 로봇의 포메이션
Fig. 4 Swarm robot formation

그림 4에서 q_{start} 와 q_{goal} 은 출발점과 목표점, d_q 는 출발점과 목표점과의 거리, RP_i 와 LP_i 는 follower-robot들이 위치할 포메이션 좌표이다. 먼저 경로 계획을 하기 위해 leader-robot에 대한 포텐셜 함수로 로봇과 목표와의 거리 d_q 을 이용한 인력과 leader-robot과 장애물과의 거리 d_m , leader-robot과 follower-robot들 사이의 거리 d_f 이용한 척력을 계산한다.

4.1 Potential function을 이용한 leader-robot의 경로계획

군집 로봇의 포메이션 이동을 위해 먼저 leader-robot의 경로 계획이 필요하다. leader-robot의 주행을 위해서 로봇

에게 주어진 외부 환경에 대한 정보를 알려주어야 한다. potential field method는 주어진 외부 환경 정보에 대해 인력과 척력을 발생시켜 시작점으로부터 목표점까지의 경로 계획을 시행 하였다.

$$U_{att} = K_q \sqrt{d_q^2 + R^2} \quad (4)$$

여기서, K_q 는 양의 상수 이득, d_q 는 목표점까지의 거리, R 은 가중치를 나타낸다. 이 포텐셜 함수에서 유도되는 힘은 다음과 같다.

$$F_{att}(q) = -\nabla U_{att}(q) = -K_q \frac{d}{\sqrt{d_q^2 + R^2}} \quad (5)$$

식 (5)는 목적점을 추종하도록 leader-robot에 작용하는 인력이다. 다음으로 leader-robot과 장애물과의 척력을 구한다.

$$U_{rep}(q) = \begin{cases} \frac{1}{2} K_q \left(\frac{1}{d_m} - \frac{1}{d_L} \right)^2, & d_m \leq d_L \\ 0, & d_m > d_L \end{cases} \quad (6)$$

여기서, d_m 은 leader-robot과 장애물과의 거리, d_L 은 로봇이 이동할 때 장애물의 영향을 받지 않는 최소 안전거리이다. 이 포텐셜 함수에서 유도되는 힘은 다음과 같다.

$$F_{rep}(q) = -\nabla U_{rep}(q) = \begin{cases} -K_q \left(\frac{1}{d_L} - \frac{1}{d_m} \right) \frac{1}{d_m^2}, & d_m \leq d_L \\ 0, & d_m > d_L \end{cases} \quad (7)$$

위 과정에서 유도된 인력과 척의 합 $F_{tot}(q)$ 값을 이용하여 leader-robot이 장애물의 영향을 받지 않는 출발점부터 목표점 까지 최소 거리 경로를 탐색하게 된다.

4.2 Potential Function을 이용한 follower-robot들 간의 충돌 회피와 장애물 회피

follower-robot들이 장애물을 회피하는 경로를 이동하는 leader-robot을 따라 이동을 하기 위해서는 로봇들 사이에 인력이 존재해야 한다. 그리고 로봇들 이동 간에 follower-robot들 사이에 충돌을 회피하기 위해 로봇들 사이에 척력도 존재해야 한다. 즉 leader-robot에 적용된 potential과 다르게 follower-robot들과 leader-robot 사이의 인력 포텐셜과 Follower-robot들 사이의 척력 포텐셜이 적용되어야 한다. 이에 따른 leader-robot과 follower-robot사이의 potential function은 다음과 같다.

$$U_{att} = K_{q_i} \sqrt{d_{f_i}^2 + R^2} \quad (8)$$

여기서 $q_i = [x_i, y_i]^T$ 로 이동 중인 follower-robot들의 현재 위치를 나타낸다. 이 포텐셜 함수에서 유도 되는 힘은 다음과 같다.

$$F_{att}(q_i) = -\nabla U_{tot}(q_i) = -K_{q_i} \frac{d}{\sqrt{d_{q_i}^2 + R^2}} \quad (9)$$

이것은 follower-robot들이 leader-robot을 추종하는 인력을 나타낸다. $F_{att}(q_i)$ 는 leader-robot과 follower-robot사이의 인력을 나타낸다.

$$U_{rep}(q_i) = \begin{cases} \frac{1}{2}k_{q_i} \left(\frac{1}{d_f} - \frac{1}{d_L} \right)^2, & d_f \leq d_L \\ 0, & d_f > d_L \end{cases} \quad (10)$$

여기서, d_f 는 follower-robot들 사이에 거리를 나타내고, d_L 은 로봇이 이동할 때 다른 로봇과 서로 영향을 받지 않는 최소 안전거리이다. 이 포텐셜 함수에서 유도되는 힘은 다음과 같다.

$$F_{rep}(q_i) = -\nabla U_{rep}(q_i) = \begin{cases} -k_{q_i} \left(\frac{1}{d_L} - \frac{1}{d_f} \right) \frac{1}{d_f^2}, & d_f \leq d_L \\ 0, & d_f > d_L \end{cases} \quad (11)$$

위 과정에서 유도된 인력과 척의 합 $F_{tot}(q_i)$ 값을 이용하여 follower-robot이 leader-robot을 따라 이동을 하면서, 로봇 서로 간에 충돌을 회피를 하면서 주행을 할 수 있다.

지금까지 과정을 통해서 로봇이 포메이션을 형성하고 leader-robot의 이동 경로에 따른 follower-robot의 이동 경로가 생성되었다. leader-robot의 경로대로 로봇이 움직이기 때문에 장애물과 follower-robot들이 충돌 하는 경우가 발생할 수 있다. 충돌 방지를 위해 follower-robot들과 장애물과의 거리를 이용하여 로봇의 회피를 할 것이다. 장애물의 좌표 $Ob(x_i, y_i)$ 와 현재 로봇의 위치 좌표 $RP(x_i, y_i)$ 와 $LP(x_i, y_i)$ 사이의 거리를 d_{LR-o} 라고 할 때

$$d_L - \min(d_{LR-o}) < 0 \quad (12)$$

이 경우 로봇과 장애물 사이가 좁아 충돌의 위험이 있어 회피를 위해 거리를 증가 시켜줘야 하기 때문에, θ 의 값을 감소시킨다. 여기서 d_L 은 follower-robot과 장애물이 영향을 받지 않는 최소 거리이다. 그리고

$$d_m - \min(d_{LR-o}) \geq 0 \quad (13)$$

이 경우 로봇과 장애물 사이에 충분한 거리가 확보 되어 있음으로 포메이션의 넓이를 크게 해주기 위해 θ 의 값을 증가 시켜 준다.

5. 시뮬레이션 및 결과 고찰

본 논문에서는 군집 로봇의 포메이션 이동 제어를 위해 편대 이동과 장애물 회피, 로봇간의 회피를 위한 제어기를 matlab을 이용하여 설계하였다.

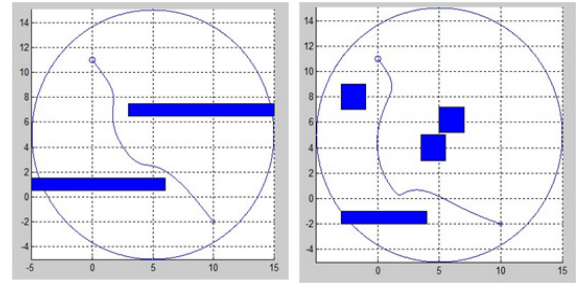


그림 5 leader-robot의 장애물 회피 이동 경로
Fig. 5 Obstacle avoidance of the leader-robot

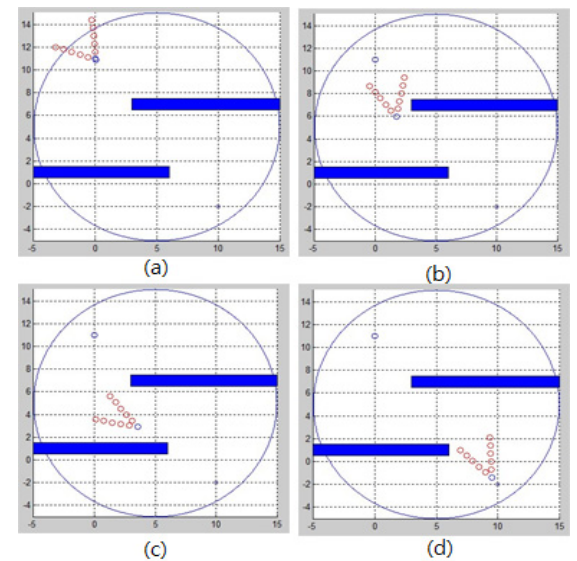


그림 6 Follower-robot들의 이동과 장애물회피
Fig. 6 Navigation and obstacle avoidance of the follower-robot

그림 5는 leader-robot이 장애물을 피해 시작점부터 목표점까지의 경로계획을 실행한 것이다. 그림 6은 leader-robot을 기준으로 생성된 follower-robot들의 좌표와 이동하면서 장애물을 회피하는 모습을 볼 수 있다. (b)는 좌측 로봇(leader-robot 기준)들이 회피 이동을 하여 장애물을 회피하고 (c)는 우측 로봇들이 장애물을 회피하는 모습을 볼 수 있고, 목표점에 수렴해 가는 모습(d)을 볼 수 있다.

6. 결 론

본 논문에서는 군집 로봇 포메이션 이동 제어를 위한 방법을 제안하였다. APF를 이용하여 leader-robot의 장애물 회피와 이동 경로를 계획하고, leader-robot을 기준으로 하는 follower-robot의 포메이션 형성을 위해 formation 형성 함수를 사용하였다. 그리고 leader-robot과 follower-robot들 간에 충돌회피와 follower-robot들의 장애물 회피를 위해 포텐셜 함수를 적용하였다. 마지막으로 제안한 방법을 시뮬레이션을 통하여 유용성을 검증 하였다.

참 고 문 헌

- [1] T. Balch and R. C. Arkin, "Behavior-based Formation Control for Multi-robot Teams," IEEE Trans. on Robotics and Automation, Vol. 14, No. 6, pp. 926- 939, 1998.
- [2] R. T. Lawton, and R. W. Beard, "A Decentralized Approach to Formation Maneuvers," IEEE Trans. on Robotics and Automation, Vol. 19, No. 6, pp. 933- 941, 2003.
- [3] R. Daily and D. M. Bevly, "Harmonic Potential Field Path Planning for High Speed Vehicles," American Control Conference, pp. 4609-4614, 2008.
- [4] J. Ren and K. A. McIsaac, "A Hybrid-Systems Approach to Potential Field Navigation for a Multi-Robot Team," Proc. of the IEEE Int. conf. Robot. Autom, pp. 3875-3880, Sep., 2003.
- [5] G. Beni, "From Swarm Intelligence to Swarm Robot", Swarm Robotics WS 2004, LNCS 3342, pp. 1-9, 2005.
- [6] S. Garnier, J. Gautrais and G. Theraulaz, "The Biological Principals of Swarm Intelligence", Swarm Intelligence, Springer New york, Vol. 1, No. 1, pp. 3- 31, 2007.
- [7] A. Howard, M. J. Mataric, and G. S. Sukhatme, "An incremental selfdeployment algorithm for mobile sensor networks", Autonomous Robots, Vol. 13, pp. 113-126, 2002.
- [8] D. M. Stipanovic, G. Inalhan, R. Teo, and C. J. Tomlin, "Decentralized Overlapping Control of a Formation of Unmanned Aerial Vehicles", IEEE Transactions on Robotics and Automation, Vol. 40, pp. 1285-1296, 2004.
- [9] J. Tan, B. Xi, W. Sheng and J. Xiao, "Modeling Multiple Robot Systems for Area Coverage and Cooperation," Proceedings of the 2004 IEEE International Conference on Robotics & Automation, Vol. 3, pp. 2568-2573, April, 2004.
- [10] M. R. Weinberg and J. R. Croxell, "An Implementation of Robot Formations Using Local Interactions", Proc. of The 22nd National Conf. on Artificial Intelligence (AAAI-07), pp. 1989-90, 2007.
- [11] R. Mead, J. B. Weinberg, and J. R. Croxell, "Reactive navigation in outdoor environments using potential fields," IEEE Trans. on Robotics and Automation, Vol. 2, pp. 1232-1237, 1998.

저 자 소 개



라 병 호 (羅炳鎬)

2010년 군산대학교 전자정보공학부 졸업, 2010년~현재 : 동 대학원 전자정보공학 석사과정. 관심분야는 지능형 로봇 제어. 군집 지능 로봇 등.



김 성 호 (金星鎬)

1984년 고려대학교 공과대학 학사졸업.
1986년 고려대학교 대학원 석사졸업.
1991년 고려대학교 대학원 박사졸업.
1988년~1990년 고려대 생산기술연구소 연구원. 1995년~1996년 Japan Hiroshima University Post-Doc. 1991년 군산대학교 제어로봇공학과 교수. 관심분야는 풍력발전, 인공 신경망, 퍼지, 센서 네트워크, 공장 자동화 및 오류검출.



주 영 훈 (周永焄)

1982년, 1984년, 1995년 연세대학교 전기공학과 졸업(공학사, 공학석사, 공학박사). 1986년~1995년 (주)삼성전자 자동화연구소 책임연구원. 1998년 2월~1999년 1월 미국 휴스턴대학 전기 및 컴퓨터공학과 박사후 과정, 1995년~현재까지 군산대학교 제어로봇시스템공학과 정교수. 현재 군산대학교 Post BK21 사업팀장. 2009년 한국지능시스템학회 회장, International Journal of Control, Automation, Systems (IJCAS) Editor. 관심분야는 지능형로봇, 인간-로봇 상호작용, 지능제어, 감정인식, 네트워크 기반 제어 기설계 등.

감사의 글

본 연구는 2011년도 교육과학기술부와 한국연구재단 지역혁신인력양성사업에 의해 수행된 연구 결과임.