

스프링 댐퍼 임피던스 특성을 이용한 네트워크 기반의 군집 로봇의 경로 제어 기법

Path Control Method of Networked Swarm Robot Systems using Spring Damper Impedance Features

김 성 욱, 김 동 성*
(Sung-Wook Kim and Dong-Sung Kim)

Abstract: This paper proposes networked swarm robotic systems with group based control scheme using spring damper impedance feature. The proposed algorithm is applied to keep system arrangement in unexpected situations based on the spring-damper impedance and fuzzy logic. Using the proposed scheme, each robot overcome collision problems efficiently. The structure of UBSR (UMPC Based Swarm Robot) system consists of user level, cognitive level, and executive level. This structure is designed to easily meet the different configuration requirements for other levels. Simulation results show an availability of the proposed method.

Keywords: networked swarm robot, spring damper impedance control, path control method

I. 서론

네트워크 기반 군집 로봇시스템은 다양한 임무수행을 위해 군사 및 발전소, 공장과 같은 산업환경에서 사용되어져 왔다[1,2]. 최근 들어 군집 로봇시스템의 운영을 위하여 자연계 생물의 운동형태 및 특징들을 접목하여 다양한 임무를 수행하는 연구들이 진행되었다[3-5]. 이들 연구들에서는 군집 로봇을 위한 다양한 기법이 제안되었으며, 주어진 작업들을 효율적으로 수행함과 동시에 로봇들의 소형화, 기동성 증가, 제작비용 감소 등과 같은 장점들을 제공할 수 있었다[1-15].

군집 로봇의 경로제어를 위해 포텐셜필드(potential field)를 계산하는 방법이 제안되었다[4-8]. 포텐셜필드를 사용한 연구들은 로봇들의 주변에 가상의 힘을 가정하여 대형 유지 및 목적지까지의 이동 경로를 산출할 수 있는 방법이다[9,10]. 그러나 포텐셜필드를 사용한 군집 로봇시스템은 로봇들의 증가에 따른 연산 복잡도가 증가되는 단점들이 있다. 이러한 포텐셜필드를 이용한 군집 로봇의 경로제어방법은 이동 영역에 대한 사전정보를 필요로 하며, 이로 인해 경로 제어 방법의 복잡도가 증가한다.

[18]에서는 차량 군집 주행을 위한 스프링 댐퍼 임피던스 특성을 이용한 제어 기법을 제안하였다. 이 기법은 주행 중의 차량의 거리와 속도의 정보를 이용하여 최적 거리를 유지하게 했다. 그러나 특정 경로가 없는 군집 로봇에는 차량을 위해 제안된 모델은 적용하기 어렵다.

본 논문에서는 스프링 댐퍼 임피던스 특성을 이용한 네트워크 기반 군집 로봇의 경로제어기법을 제안한다. 네트워크 기반의 군집 로봇은 임피던스 특성을 통해 주변 로봇의 거리와 속도의 정보로 대형 유지를 위한 군집 로봇의 경로제어를 할 수 있다. 이러한 군집 로봇의 경로제어기법은 임피던스 특성을 이용하여 로봇간의 최적 거리를 유지 시키며 충돌을

줄여 안정성 있는 대형을 형성할 수 있다.

군집 로봇의 경로제어는 장애물 발생시 군집 대형 유지가 중요하다. 군집 로봇은 장애물이 발생하게 되면 장애물에 충돌하거나 대형에서 이탈하게 된다. 장애물은 로봇에게 대형 유지와 장애물 회피라는 문제를 발생시킨다. 이러한 문제는 퍼지 제어를 이용하여 해결할 수 있다.

군집 로봇의 시스템 구축을 위해 네트워크 기반 시스템인 UBSR (UMPC Based Swarm Robot)을 설계 및 구현하였다. 이를 위해 UMPC (Ultra Mobile Personal Computer)를 포함하는 마스터 로봇과 슬레이브 로봇으로 전체 시스템을 구성하였다. 구현은 마스터 로봇을 중심으로 슬레이브 로봇의 이동 방법을 스프링 댐퍼 임피던스 제어하였다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 제 II 장에서는 군집 로봇의 이동을 위한 스프링 댐퍼 임피던스 특성을 이용한 이동 방법을 설계했으며, 그 특성에 대해 알아본다. 제 III 장에서는 퍼지 알고리즘을 통해 예기치 못한 상황에서 군집 로봇의 회피 전략 방법을 제안한다. 제 IV 장에서는 군집 로봇 이동 방법을 설계했으며, 2 바퀴 로봇의 이동 방법을 알아 본다. 제 V 장에서는 UBSR 시스템을 자세히 살펴 본다. 제 VI 장에서는 모의실험모델과 구현을 통해 전체 시스템을 평가했다. 마지막으로 제 VII 장은 본 논문의 결론을 담고 있다.

II. 스프링 댐퍼 임피던스를 이용한 군집 로봇의 제어 모델

본 논문에서는 군집 로봇이 삼각대형을 유지한다고 가정한다. 선두 집단이 삼각형을 유지할 경우, 후미 집단도 동일한 대형을 유지한다[11].

그림 1에서는 마스터 로봇을 중심으로 하여 슬레이브 로봇들이 삼각형을 형성하고 있다. 네트워크 기반 군집 로봇의 경로 제어는 전후방 로봇과 이들의 상호 관계로 계산 된다. 이러한 경우에는 각 로봇의 위치, 속도 측정에 있어서 잡음이나 모델링 오차에 의한 불확실성이 포함된다. 이를 해결하기 위해 본 논문에서는 스프링 댐퍼 임피던스 관계를 로봇 집단 전체 시스템의 안정화에 사용된다.

그림 2는 군집 로봇간의 대형 형성 방법을 보여준다. 대형

* 책임저자(Corresponding Author)

논문접수: 2009. 8. 17., 수정: 2009. 10. 21., 채택확정: 2009. 11. 26.

김성욱, 김동성: 금오공과대학교 전자공학부

(ukgaal53@kumoh.ac.kr/dskim@kumoh.ac.kr)

※ 본 연구는 산학협동재단의 2009년도 학술연구비 지원을 받아 연구되었음.

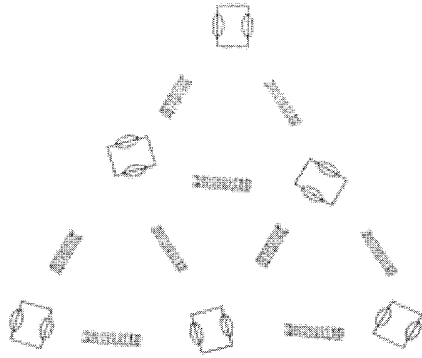


그림 1. 스프링 댐퍼 임피던스를 이용한 네트워크 기반 군집 로봇의 경로 예제.

Fig. 1. Example of path control with spring damper impedance.

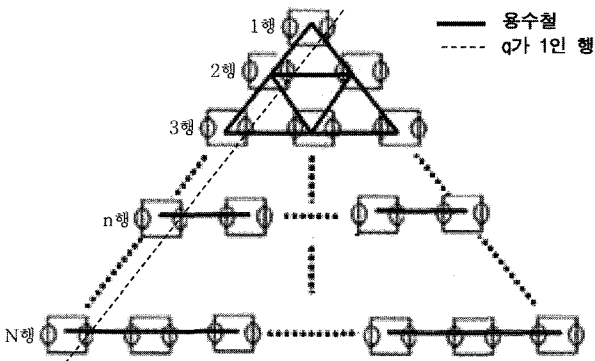


그림 2. 군집 로봇의 스프링 댐퍼 임피던스를 이용한 제어 모델 대형 모델.

Fig. 2. Model of spring damper impedance control.

은 1행의 마스터 로봇을 기준으로 하여 슬레이브 로봇들을 순차적으로 배열할 수 있다. 이때 배열 구성은 삼각형을 대형으로 한다.

군집 로봇은 N행과 N열로 구성할 수 있다. 이때, 그림 2와 같이 군집로봇의 n번째 행에 위치한 슬레이브 로봇 수는 n개로 구성된다. 군집 로봇의 각 로봇 질량은 m이며, 탄성 계수는 k, 댐핑 계수는 c이다. 군집 로봇은 스프링 댐퍼 임피던스 관계에 따라 인접한 로봇과 연동하여 집단 이동한다.

1. 소형 이동 로봇 시스템의 운동 방정식

네트워크 기반 군집 로봇의 경로제어는 마스터 로봇을 중심으로 하는 슬레이브 로봇들의 이동으로 정의할 수 있다. 시스템 운동 방정식은 슬레이브 로봇의 위치에 따라 스프링 댐퍼 임피던스를 이용한 식으로 표현한다. 슬레이브 로봇의 위치는 위에서 아래로, 왼쪽에서 오른쪽으로 오름차순으로 행과 열에 번호를 부여하여 기술한다. 이때, 상관관계는 외각에 위치하는 로봇과 내부에 위치하는 로봇으로 나누어 계산한다. 이는 외각에 존재하는 로봇의 상관관계가 내부에 있는 로봇의 상관관계와 다르기 때문이다. 표 1은 군집 로봇의 운동방정식 변수를 정의하였으며, 이를 이용해 행 내에 있는 슬레이브 로봇의 운동 방정식을 정리할 수 있다.

먼저, 대형을 이루는 임의의 행 내의 로봇의 같은 행에 있는 경로를 고려한 로봇의 이동을 생각해보자.

q=1, q=n 일 때 로봇들의 관계 식은 위 아래로 존재

표 1. 군집 로봇의 운동방정식 변수 정의.

Table 1. Definition of variables for motion equations.

변수	정의
P_{nq}	배열화된 로봇의 위치(x, y좌표 값)
\dot{P}_{nq}	n행 내에서 q번째 로봇의 속도(m/s)
d_{row_nq}	행 내에서의 로봇 사이의 유지 간격(m)
d_{cl_nq}	대형의 최외각 삼각형 좌변에 평행한 대각선상에 있는 로봇 사이의 유지 간격(m)
d_{cr_nq}	대형의 최외각 삼각형 우변에 평행한 대각선상에 있는 로봇 사이의 유지 간격(m)
N	로봇 행의 총수
m	로봇의 질량(kg)
k	용수철 상수(N/m)
c	댐핑 계수(kNs/m)
d	초기에 설정된 로봇 간의 유지 거리(m)

하는 두 로봇간의 관계로 생각할 수 있다. 합과 차는 방향을 의미한다. 최외각 로봇들의 밀변에 평행한 일직선상에 있는 슬레이브 로봇들의 운동방정식은 식 (1)과 같다.

$$\begin{aligned} \dot{P}_{nq} &= \frac{k}{m}(P_{n2} - P_{n1} - d_{row_n1}) + \frac{c}{m}(\dot{P}_{n2} - \dot{P}_{n1}) \\ &= \frac{k}{m}\{(P_{n(q+1)} - P_{nq} - d_{row_nq}) - (P_{nq} - P_{n(q-1)} - d_{row_n(q-1)})\} + \frac{c}{m}\{(\dot{P}_{n(q+1)} - \dot{P}_{nq}) - (\dot{P}_{nq} - \dot{P}_{n(q-1)})\} \\ &= -\frac{k}{m}(P_{nm} - P_{n(n-1)} - d_{row_n(n-1)}) - \frac{c}{m}(\dot{P}_{nm} - \dot{P}_{n(n-1)}) \end{aligned} \quad (q=1)$$

$$\begin{aligned} &= \frac{k}{m}\{(P_{n(q+1)} - P_{nq} - d_{row_nq}) - (P_{nq} - P_{n(q-1)} - d_{row_n(q-1)})\} + \frac{c}{m}\{(\dot{P}_{n(q+1)} - \dot{P}_{nq}) - (\dot{P}_{nq} - \dot{P}_{n(q-1)})\} \\ &= -\frac{k}{m}(P_{nm} - P_{n(n-1)} - d_{row_n(n-1)}) - \frac{c}{m}(\dot{P}_{nm} - \dot{P}_{n(n-1)}) \end{aligned} \quad (2 \leq q \leq n-1)$$

$$\begin{aligned} \dot{P}_{nq} &= \frac{k}{m}(P_{n2} - P_{n1} - d_{row_n1}) + \frac{c}{m}(\dot{P}_{n2} - \dot{P}_{n1}) \\ &= \frac{k}{m}\{(P_{n(q+1)} - P_{nq} - d_{row_nq}) - (P_{nq} - P_{n(q-1)} - d_{row_n(q-1)})\} + \frac{c}{m}\{(\dot{P}_{n(q+1)} - \dot{P}_{nq}) - (\dot{P}_{nq} - \dot{P}_{n(q-1)})\} \\ &= -\frac{k}{m}(P_{nm} - P_{n(n-1)} - d_{row_n(n-1)}) - \frac{c}{m}(\dot{P}_{nm} - \dot{P}_{n(n-1)}) \end{aligned} \quad (q=n)$$

최외각 로봇들의 좌변에 평행한 일직선상에 있는 슬레이브 로봇들의 운동방정식은 식 (2)와 같이 정의 할 수 있다. 식 (2)는 외각에 있는 로봇과 내부에 있는 로봇들과의 상관관계를 구분하여 계산한다.

$$\begin{aligned} \dot{P}_{nq} &= \frac{k}{m}(P_{n2} - P_{n1} - d_{row_n1}) + \frac{c}{m}(\dot{P}_{n2} - \dot{P}_{n1}) \\ &= \frac{k}{m}\{(P_{n(q+1)} - P_{nq} - d_{row_nq}) - (P_{nq} - P_{n(q-1)} - d_{row_n(q-1)})\} + \frac{c}{m}\{(\dot{P}_{n(q+1)} - \dot{P}_{nq}) - (\dot{P}_{nq} - \dot{P}_{n(q-1)})\} \\ &= -\frac{k}{m}(P_{nm} - P_{n(n-1)} - d_{row_n(n-1)}) - \frac{c}{m}(\dot{P}_{nm} - \dot{P}_{n(n-1)}) \end{aligned} \quad (q=1)$$

$$\begin{aligned} &= \frac{k}{m}\{(P_{n(q+1)} - P_{nq} - d_{row_nq}) - (P_{nq} - P_{n(q-1)} - d_{row_n(q-1)})\} + \frac{c}{m}\{(\dot{P}_{n(q+1)} - \dot{P}_{nq}) - (\dot{P}_{nq} - \dot{P}_{n(q-1)})\} \\ &= -\frac{k}{m}(P_{nm} - P_{n(n-1)} - d_{row_n(n-1)}) - \frac{c}{m}(\dot{P}_{nm} - \dot{P}_{n(n-1)}) \end{aligned} \quad (2 \leq q \leq n-1)$$

$$\begin{aligned} \dot{P}_{nq} &= \frac{k}{m}(P_{n2} - P_{n1} - d_{row_n1}) + \frac{c}{m}(\dot{P}_{n2} - \dot{P}_{n1}) \\ &= \frac{k}{m}\{(P_{n(q+1)} - P_{nq} - d_{row_nq}) - (P_{nq} - P_{n(q-1)} - d_{row_n(q-1)})\} + \frac{c}{m}\{(\dot{P}_{n(q+1)} - \dot{P}_{nq}) - (\dot{P}_{nq} - \dot{P}_{n(q-1)})\} \\ &= -\frac{k}{m}(P_{nm} - P_{n(n-1)} - d_{row_n(n-1)}) - \frac{c}{m}(\dot{P}_{nm} - \dot{P}_{n(n-1)}) \end{aligned} \quad (q=n)$$

최외각 로봇들의 우변에 평행한 일직선상에 있는 슬레이브 로봇들의 운동방정식은 식 (3)으로 나타낼 수 있다. 이때 외각에 있는 로봇들과 내부에 있는 로봇들과의 상관관계를 구분하여 계산한다.

$$\begin{aligned} \dot{p}_{nq} &= \frac{k}{m}(p_{(N-1)(q-1)} - p_{Nq} - d_{cr_{(N-1)(q-1)}}) + \frac{c}{m}(\dot{p}_{(N-1)(q-1)} - \dot{p}_{Nq}) \\ &\quad (n = N) \\ &= \frac{k}{m}\{(p_{(n-1)(q-1)} - p_{nq} - d_{cr_{(n-1)(q-1)}}) - (p_{nq} - p_{(n+1)(q+1)} \\ &\quad - d_{cr_{nq}})\} + \frac{c}{m}\{(\dot{p}_{(n-1)(q-1)} - \dot{p}_{nq}) - (\dot{p}_{nq} - \dot{p}_{(n+1)(q+1)})\} \\ &\quad (2 \leq n, q \leq N-1, 4 \leq N) \\ &= -\frac{k}{m}(p_{n1} - p_{(n+1)2} - d_{cr_{n1}}) - \frac{c}{m}(\dot{p}_{n1} - \dot{p}_{(n+1)2}) \\ &\quad (q = 1, N \neq 1) \end{aligned} \tag{3}$$

전체 로봇 시스템의 에너지는 식 (4)를 이용하여 구할 수 있다. 식 (4)는 주어진 시스템의 에너지가 항상 감소하고, 정상 상태에서 '0'에 접근한다. 이는 각 로봇 간의 거리 $d_{row_nq}, d_{d_nq}, d_{cr_nq}$ 으로 설정한 유지 간격 d 로 수렴한다.

$$\begin{aligned} \frac{dE}{dt} &= -c(2p_{11} - \dot{p}_{21} - \dot{p}_{22})' \dot{p}_{11} + c(\dot{p}_{11} - 4\dot{p}_{21} + \dot{p}_{22} + \dot{p}_{31} \\ &\quad + \dot{p}_{32})' \dot{p}_{21} - c(2\dot{p}_{11} - \dot{p}_{21} - \dot{p}_{22} + \dot{p}_{32})' \dot{p}_{22} \\ &\quad + c(\dot{p}_{21} - \dot{p}_{31} - \dot{p}_{32} + \dot{p}_{41} + \dot{p}_{42})' \dot{p}_{31} \\ &\quad \dots - c(\dot{p}_{NN} - \dot{p}_{N(N-1)})' \dot{p}_{NN} \leq 0, \forall t \geq 0 \end{aligned} \tag{4}$$

III. 장애물 회피를 위한 퍼지 제어기 설계

1. 단일 로봇의 장애물 회피 제어기 설계

본 논문에서는 장애물 회피 제어기의 설계와 구현을 위해 다음과 같은 두 가지 조건을 갖도록 한다.

- 1) 정지해 있는 정적 장애물에 대한 회피 제어기이다.
- 2) 군집 이동 시 로봇의 주된 동작은 약간의 방향 전환이 있는 전진 진행 방향으로 간주한다.

그림 3은 장애물 회피 퍼지 제어기의 구조이다. 제안된 장

표 2. 네트워크 기반 군집 로봇의 경로제어를 위한 퍼지 알고리즘 변수 정의.

Table 2. Variables of fuzzy algorithm for path control.

변수	정의
θ_{obs}	장애물과 로봇이 이루는 각도(°)
d_{obs}	장애물과 로봇과의 거리(m)
W_{LA}, W_{RA}	장애물 회피 퍼지 제어기에서 나오는 오른쪽 바퀴와 왼쪽 바퀴 속도 값(m/s)
W_{Lt}, W_{Rt}	스프링 댐퍼 임피던스 제어의 오른쪽 바퀴와 왼쪽 바퀴의 속도 값(m/s)
W_L, W_R	이동 선택 퍼지 제어기에서 나오게 되는 로봇의 속도 값(m/s)
DF	위험 요소

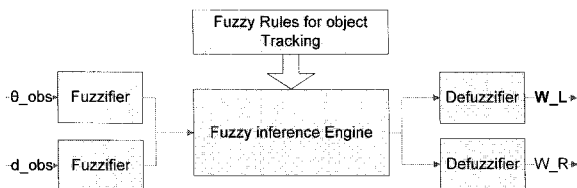


그림 3. 로봇의 장애물 회피 퍼지 제어기 구조. Fig. 3. Structure of obstacle avoidance controller.

표 3. 장애물 회피를 위한 퍼지 규칙. Table 3. Fuzzy rule for obstacle avoidance.

		각도				
		NB(-24)	NS(-12)	ZO(0)	PS(12)	PB(24)
거리	NB(0)	NB	NB	ZO	PB	PB
	NS(64)	NS	NB	ZO	PB	PS
	ZO(128)	NS	NS	ZO	PS	PS
	PS(192)	ZO	NS	ZO	PS	ZO
	PB(255)	ZO	ZO	ZO	ZO	ZO

(NB: 왼쪽으로60° 이상 회전 NS: 왼쪽으로30° 이상 회전 ZO: 조향각 없음 PS: 오른쪽 왼쪽으로60° 이상 회전 PB: 30° 이상 회전)

애물 회피 퍼지 제어기는 2개의 입력과 2개의 출력으로 구성된다. 이 중 2개의 입력은 센서로부터 측정된 장애물까지의 거리 정보이다. 이 정보를 이용해 로봇과 장애물까지의 거리 및 각을 계산한다. 장애물과의 각도 값은 θ_{obs} 및 거리 값은 d_{obs} 으로 정의한다. 제어기의 출력 값은 양쪽 바퀴의 각속도 W_{L}, W_{R} 으로 정의한다. 출력의 비-퍼지화(각속도 출력) 소속 함수는 물체 추적 제어기에서 설명한 그림 3과 같다.

표 3은 퍼지 규칙 작성에는 조건 (1), (2)에 근거해 제작하였다. 장애물이 정확히 정 중앙에 나타났을 때에는 우회전을 포함한 전진을 하도록 퍼지 규칙을 제작하였다.

2. 군집 로봇 시스템에 적용하기 위한 이동 선택 퍼지 제어기

이동 선택 퍼지 제어기는 군집 로봇이 경로를 추정할 때 장애물이 발생할 경우 회피 동작을 선택하게 한다. 이 때 장애물이 가까이 있을수록 장애물 회피 제어기의 값의 가중치가 증가하게 된다. 이동 선택 퍼지 제어기는 로봇과 장애물의 거리 및 각도 값을 이용한다. 경로 추정 제어기 및 장애물 회피 제어기의 값은 각각 W_L, W_R 와 W_{LA}, W_{RA} 으로 정의한다. 이동 선택 제어기는 장애물의 위험 요소를 반영하여 출력 W_L, W_R 을 계산한다.

그림 4는 로봇과 장애물 위치에 위험 요소 값을 배분한 것이다. 실제 장애물의 퍼지 위험 요소는 퍼지 제어기를 통해 위험 요소 값이 0.0~1.0범위의 연속적인 값을 가진다. 위험 요소는 로봇이 경로 추정 이동 중 장애물이 발생 했을 때 출력 값의 가중치이다.

그림 5는 스프링 댐퍼 임피던스 제어기와 장애물 회피 제어기가 모두 포함된 전체 구성도이다. 이동 선택 제어기는 장애물 회피 제어기와 장애물과의 각도 값 θ_{obs} 와 장애물까

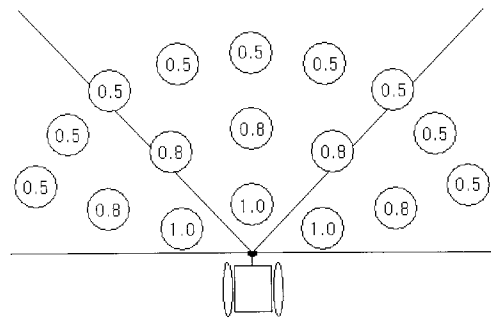


그림 4. 장애물과 로봇의 거리에 따른 위험 요소. Fig. 4. Weight variable of obstacle environment.

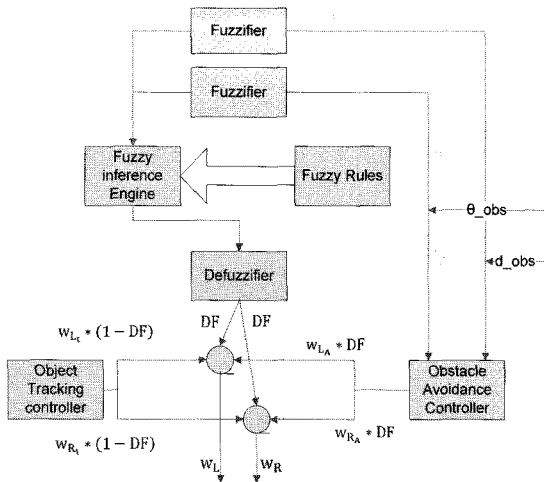


그림 5. 제어기가 포함된 전체 구성.
Fig. 5. Structure of overall controller.

표 4. 퍼지 규칙의 가중치

Table 4. Fuzzy rule for weight variable

		각도				
		NB (-24)	NS (-12)	ZO (0)	PS (12)	PB (24)
거리	NB(0)	NS	NS	PS	NS	NS
	NS(64)	ZO	NS	PS	NS	ZO
	ZO(128)	ZO	ZO	PS	ZO	ZO
	PS(192)	PS	ZO	PS	ZO	PS
	PB(255)	PS	PS	PS	PS	PS

지의 거리 d_{obs} 를 입력 받으면 퍼지 위험 요소를 출력한다. 제어기는 입력된 장애물의 위치를 측정하여 위험성을 판단한다. 장애물과의 충돌 위험이 클 수록 장애물 회피 제어기의 출력 값인 w_L, w_R 에 비중을 높게 주며 반대로 장애물과의 충돌 위험이 작을 경우 물체 추적 제어기의 출력 값인 w_L, w_R 에 비중을 두어 w_L, w_R 을 출력한다.

이동 선택 제어기의 입력은 장애물 회피 제어기의 입력과 같은 값이다.

$$w_L = w_{L1} \times (1 - DF) + w_{L2} \times DF \quad (5)$$

$$w_R = w_{R1} \times (1 - DF) + w_{R2} \times DF$$

표 4는 퍼지 위험 요소 출력을 위한 퍼지 규칙을 나타내고 있다. 로봇이 장애물에 접근할 때 측면 보다는 정면 쪽으로 접근할 경우 위험도가 크다. 즉 안전할 수록 '0'에 가까운 crisp 값이 나오며 '1'에 가까울수록 위험하다는 의미이다. 이동 선택 제어기에서는 로봇의 바퀴제어를 위한 각속도 값을 계산한다.

IV. 로봇의 바퀴 모델링

$$V_R = r w_R, V_L = r w_L \quad (6)$$

$$\theta_e = \theta_r - \theta_d$$

식 (7)은 미끄러짐이 없는 조건에서의 왼쪽과 오른쪽 바퀴의 지면과 접촉 점의 속도이다. V_R 와 V_L 각각 오른쪽과

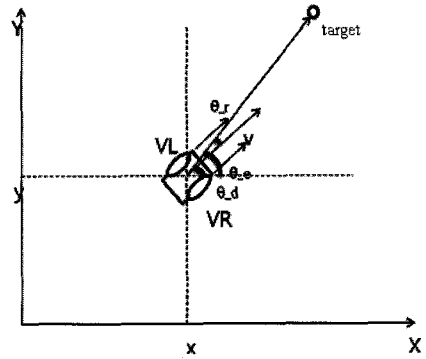


그림 6. 로봇의 양 바퀴 모델.
Fig. 6. Kinematics of wheel model.

왼쪽 바퀴의 선속도이다. 반 시계 방향으로의 각속도를 w 라고 하면 v, w 와 w_L, w_R 은 식 (7)로 정의한다.

$$V_L = r w_L, V_R = r w_R$$

$$w = \frac{V_R - V_L}{D} = r \times \frac{w_R - w_L}{D} \quad (7)$$

$$v = \frac{V_R + V_L}{2} = r \times \frac{w_R + w_L}{2}$$

V. UBSR시스템의 설계

1. UBSR 시스템 구조

UBSR시스템은 UMPC기반의 마스터 로봇을 구성 하고, 마스터 로봇을 중심으로 슬레이브 로봇으로 구성하였다.

UBSR는 802.11을 사용하여 웹상의 클라이언트서비스를 제공하여 사용자의 입장에서 쉽게 접근할 수 있도록 구성된다. UBSR 시스템 구조는 그림 7과 같이 세 부분으로 나누어진다.

설계된 사용자 계층은 원격으로 로봇의 비전시스템 제어 및 목적지 설정 등이 가능하다.

인지적 계층은 사용자 계층에서 입력된 명령어를 처리하는 계층으로 주변 로봇을 관측하는 카메라 영상 처리를 수행한다. 그리고 목적지까지의 A*알고리즘[15]과 제한된 임피던스 알고리즘을 통해 대형 유지 및 목적지까지의 네트워크 기반 군집 로봇의 최단 경로제어를 위한 데이터를 생성한다. 경로 데이터는 로봇을 제어하기 위한 모터제어 데이터와 비전시스템, 센서 등을 제어할 수 있는 신호로 변환하게 된다. 인지적 계층은 사용자 및 실행 계층 사이의 중간 계층으로 데이터 변환 및 교환을 위한 기술을 필요하며 패킷 교환 데이터 전송 서비스를 지원한다.

실행 계층은 로봇이 행동하는 구현 단계로 인지적 계층으로부터 받은 명령어를 실행하며 임무를 수행하게 된다. 실행 계층에서는 비전시스템과 센서로부터 받은 데이터를 인지적 계층으로 전송 한다.

2. UBSR 시스템 구성

그림 7은 UBSR 시스템의 구성도이다. 로봇 시스템은 비전시스템과 802.11을 통해 영상 획득 및 서버 PC와의 통신을 하게 된다. 서버 시스템은 UMPC를 활용하여 지능적 판단과 센서 등을 활용한 여러 기능을 모듈 형식으로 추가하여 사용 가능하다.

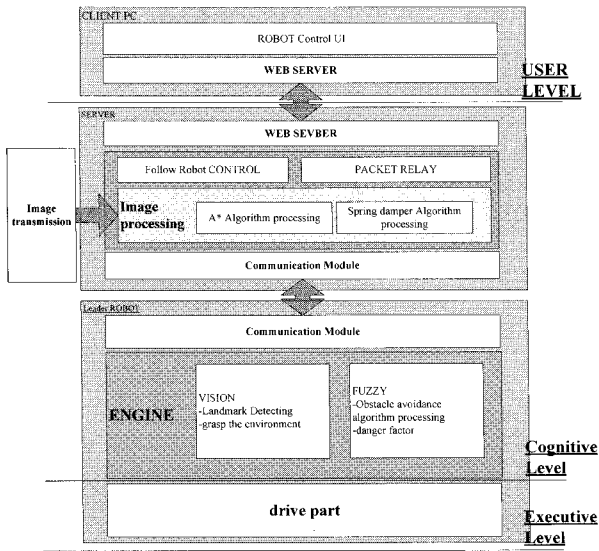


그림 7. UBSR 기능별 계층 시스템 구조.
Fig. 7. Level structure of UBSR system.

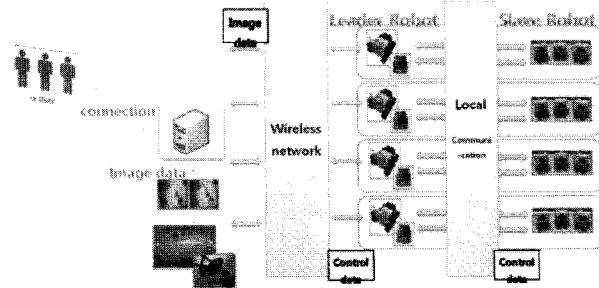


그림 8. UBSR 시스템 구성도.
Fig. 8. Architecture of UBSR system.

경로 저장 데이터베이스는 로봇의 현재 지점과 목적지 사이의 장애물을 회피한 네트워크 기반 군집 로봇의 최단 경로 제어 정보를 저장하게 된다. 군집 로봇은 저장된 네트워크 기반 군집 로봇의 최단 경로제어 정보를 통해 목적지까지 이동한다.

VI. 군집 로봇의 경로 구현 및 모의실험모델

모의실험모델을 위한 제한 조건은 다음과 같다. 장애물과의 거리는 0~2m이고 장애물과 로봇과 이루는 각도는 -24° ~24° 으로 제한한다.

1. 스프링 댐퍼 임피던스 시스템 에너지 모델 컴퓨터 모의 실험

본 실험을 위하여 모의실험모델을 구성하여 군집 이동 시 발생할 수 있는 여러 상황에서 군집 이동에 대한 모의실험을 실시 하였다. 그림 9는 모의실험모델을 4열 로봇으로 구성하고, 마스터 로봇을 중심으로 한 집합의 안정성을 비교한 것이다. 본 모의실험을 통해 일반적 군집 로봇에 비해 안정적으로 거리를 유지하며, 대형을 갖추어 군집을 이루는 것을 볼 수 있다. 본 모의실험모델을 통해 군집의 전체 대형은 삼각형으로 하여 정해진 거리에 수렴하여 형성된다.

그림 10은 평면 좌표에서 스프링 댐퍼 임피던스 제어 시 회전하는 슬레이브 로봇들의 움직임을 경로로 표시 하였다.

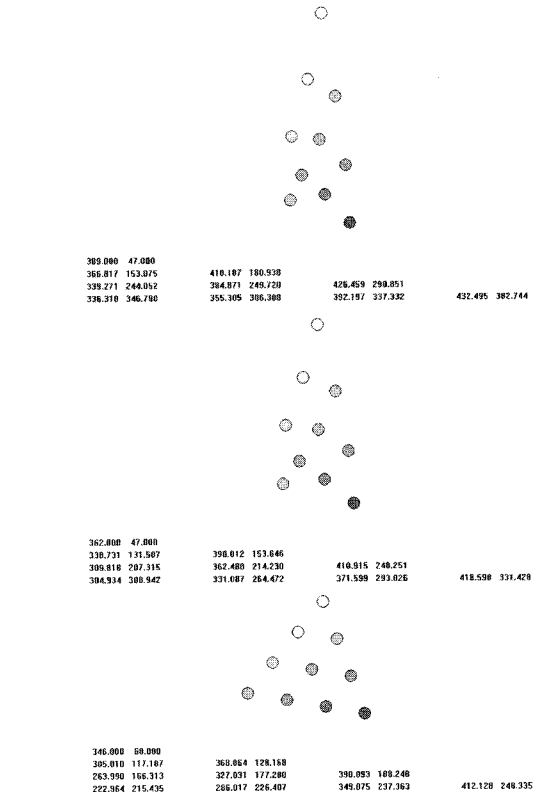
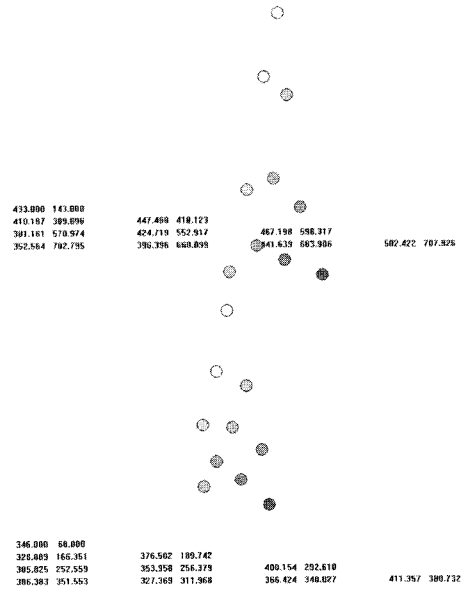


그림 9. 군집 로봇의 경로 제어 안정화 과정.
Fig. 9. Stabilization process of path control for swarm robot.

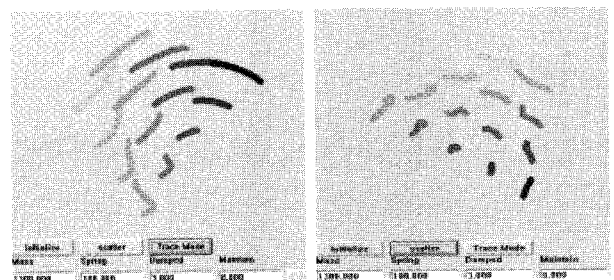


그림 10. 군집 로봇의 왼쪽 회전과 오른쪽 회전 동작.
Fig. 10. Right and left turning motions of swarm robot.

본 모의실험모델을 통해 단순 직진 이동 및 제자리 회전 및 방향성이 있는 직진 운동에서 군집 대형을 유지한다.

2. 시스템 모의실험모델

본 모의실험에서의 시스템 모의실험모델은 퍼지 알고리즘을 적용한 것이다.

그림 11은 장애물이 1개 이상 발생했을 때 회피 동작을 모의 실험해 보았다. 모의 실험 결과 2개 이상 발생하였을 때 도 경로 추정 및 장애물 회피를 수행한다.

3. 시스템 구현 및 테스트

실험에서는 UMPC 기반의 802.11 시스템과 서버 PC를 사용하여 네트워크 기반의 군집 로봇을 구성한다. UMPC는 개인용컴퓨터에 비해 메모리가 한정적이고 처리 가능한 데이터가 제한적이다. 이러한 제한성은 서버 PC를 두고 보완하였다. 서버 시스템은 영상, 지도, 행동계획 등의 모든 정보를 저장하게 되며, 로봇과 사용자의 요청에 의해 정보를 제공한다.

서버 시스템은 군집 로봇에서 전달 하는 데이터를 사용자 계층으로 전송한다. 사용자는 이 정보를 통해 사용자 기반의

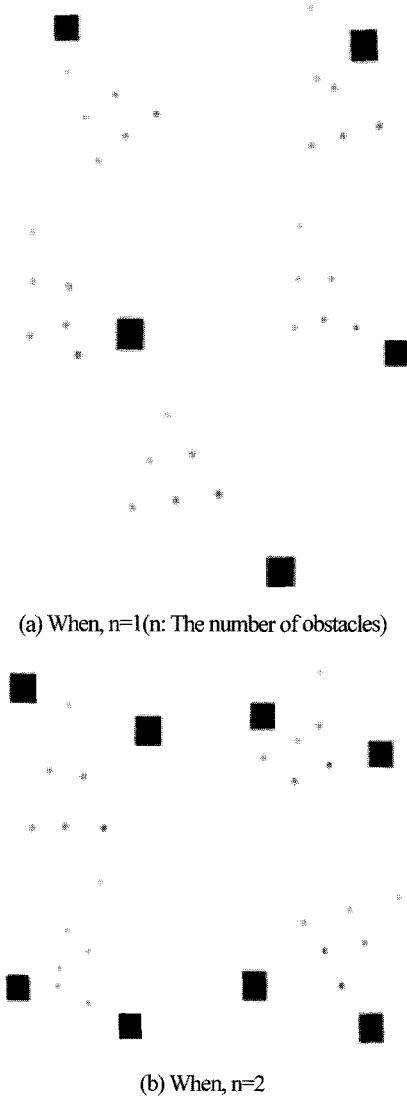


그림 11. 퍼지 알고리즘을 적용한 군집 로봇의 이동모습.
Fig. 11. Screenshot of moving trajectory of swarm robot.

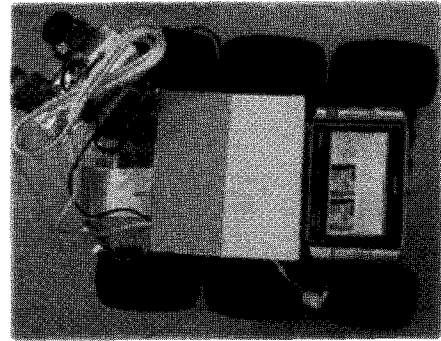


그림 12. 네트워크 기반의 마스터 로봇.
Fig. 12. Screenshot of master robot.



그림 13. 마스터로봇과 서버 시스템의 구성 모습.
Fig. 13. Master robot and server system.

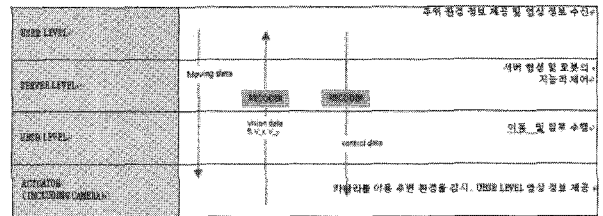


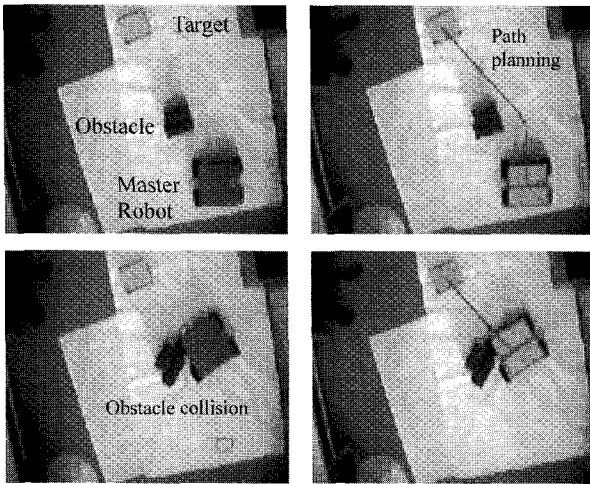
그림 14. 비전 정보 및 이동 데이터 흐름 구성도.
Fig. 14. Vision data and move transaction flow chart.

군집 로봇을 제어하게 된다. 서버 시스템은 로봇 시스템과 클라이언트 시스템을 연결 하는 중계자의 역할과 데이터를 분석 하여 군집 로봇을 제어 한다. 로봇이 가지는 효율을 늘리기 위한 보조적 역할을 하기도 한다. 서버 시스템은 로봇 시스템과 클라이언트 시스템이 서버 시스템에 접속하는 형식 이룬다.

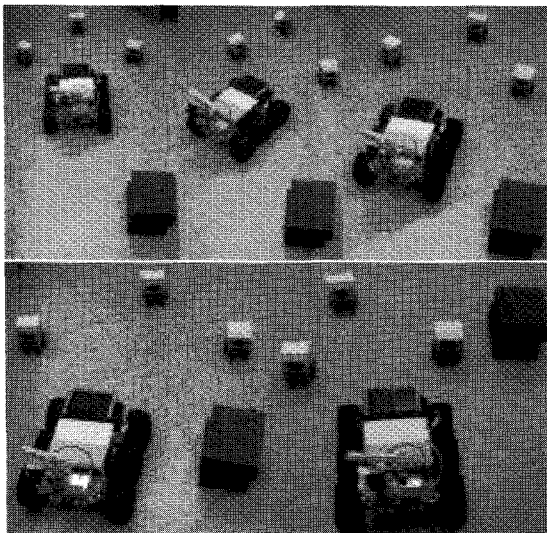
그림 12는 네트워크 상에서 클라이언트가 서버 시스템으로 접속하여 영상을 수신 받아 비전시스템을 제어하고 있다. 추가적으로 클라이언트가 목표를 지정해 주게 되면 서버 시스템에서는 지정물체정보를 저장하게 되고, 이 정보를 바탕으로 이동 및 임무 수행을 하게 된다. 제어 신호들은 중요도가 높은 데이터들을 포함 하기 때문에 비교적 신뢰도가 높은 TCP 기반의 전송 기법을 사용하였고, 실시간 영상 스트리밍은 부하를 줄이기 위한 UDP 기반을 전송 기법을 사용한다.

4. 경로 생성 및 퍼지 제어를 적용한 이동

군집 로봇의 경로계획은 A*알고리즘을 사용하여 구현한다. 군집 로봇은 목적지를 설정해 주면 A*알고리즘을 통해 최단 경로를 생성하게 된다. 군집 로봇은 이를 통해 군집 이동을 하게 된다. 그림 15(a)는 A*알고리즘을 통해 이동 시 발생한 장애물에 대한 경로 계획을 적용하기 전이다. 이 때 로봇은 경로에 대한 추정은 정상적으로 동작하지만 장애물에 대한



(a) Application of A* algorithm.



(b) Fuzzy algorithm applied to swarm robot.

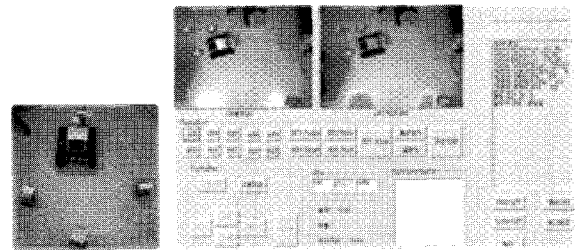
그림 15. 퍼지 알고리즘을 적용한 군집 로봇 시스템의 경로 이동.

Fig. 15. Test results of path control using spring damper impedance.

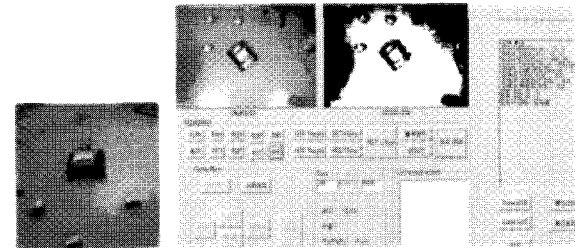
위험 정도를 인식하지 못하고 있다. 따라서 장애물을 치고 가는 문제가 발생 된다. 이를 해결 하기 위하여 군집 로봇에 퍼지 제어를 추가 실험을 하였다. 그림 15(b)는 퍼지 알고리즘을 적용한 후 경로 이동 과정을 보여 주고 있다. 마스터 로봇은 계획한 경로 계획에도 불구하고 장애물을 인식 후 장애물에 대한 회피 동작을 충실히 수행하고 있음을 보여 준다. 이를 따르는 후미 로봇은 장애물을 인식하였을 때 경로에 대한 정보를 배제하고 장애물에 대한 회피 동작을 수행한다.

5. 경로 군집 이동

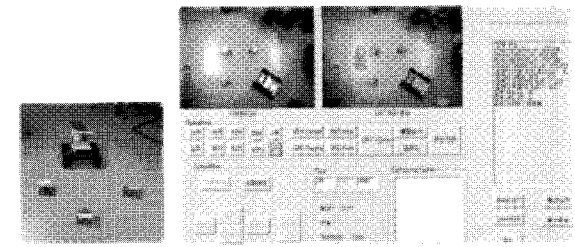
본 실험에서는 로봇을 관측하는 카메라를 이용하여 실시간 영상을 취득 한다. 실시간 영상은 로봇의 전후 위치를 비교하고, 로봇의 상대적 위치와 속도 등을 파악한다. 이 정보는 각 로봇들이 이동해야 하는 경로와 속도 정보로 변환 된다. 이 때 군집 로봇의 이동은 스프링 댐퍼 임피던스 특징을 이용하였으며, 유지 간격은 50cm를 기준으로 하였다. 그림 16은 마스터 로봇을 중심으로 대형을 형성하며 이동하는 실험 장면이며, 랜드마크로 붉은색 물체를 선정하였다.



(a) 초기화 및 목표설정



(b) 이동



(c) 목적지 도착

그림 16. 스프링 댐퍼 임피던스 특징을 적용한 네트워크 기반 군집 로봇의 이동 경로 제어.

Fig. 16. Trajectory of networked swarm robot system.

실험 결과 마스터 로봇을 기준으로 로봇들간 배열화 하여 우선 순위에 있는 로봇들이 대열을 형성한다. 이동 시 안전한 적 거리를 유지하며 이동한다.

VII. 결론

본 논문에서는 스프링 댐퍼 임피던스 제어를 이용한 네트워크 기반 군집 로봇의 경로제어 방법을 제안했다. 제안된 스프링 댐퍼 임피던스 제어를 통해 네트워크 기반 군집 로봇의 경로제어 시 설정한 간격을 유지하며 이동할 수 있다.

제안된 알고리즘은 기존의 연구에서 제기된 연산의 복잡도를 해결하였다. 스프링 댐퍼 임피던스 제어는 로봇의 군집 이동뿐만 아니라 무인 자동차 및 무인 비행기의 군집 이동 분야에 적용 가능하다.

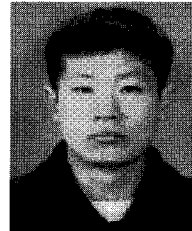
스프링 댐퍼 임피던스를 이용한 군집로봇의 경로제어는 다소 적은 데이터를 이용하여 군집 로봇의 경로를 제어할 수 있다. 그러나 위험지역의 이동이나 다수의 장애물이 발생했을 때 대형을 깨뜨리거나 심각한 오류가 발생할 수 있다.

향후 과제로는 스프링 댐퍼 임피던스 제어를 위한 군집로봇의 위치 추정 및 정보 교환 방법 등을 고려해 볼 수 있다.

참고문헌

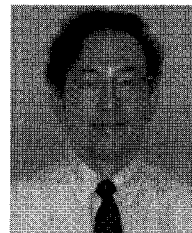
[1] Y. Hirata, Y. Kume, Z.-D. Wang, and K. Kosuge, "Handling of a

- single object by multiple mobile robots based on caster-like dynamics," *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 2215-2216, 2008.
- [2] J. Gudino-Lau, M. Arteaga, L. Munoz, and V. Parra-Vega, "On the control of cooperative robots without velocity measurements," *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, vol. 12, pp. 600-608, 2004.
- [3] B. Jakimovski, B. Meyer, and E. Maehle, "Swarm intelligence for self-reconfiguring walking robot," *Proceedings of the 2008 IEEE Swarm Intelligence Symposium*, pp. 1-8, 2008.
- [4] H. Hamann, M. Szymanski, and H. Worn, "Orientation in a trail network by exploiting its geometry for swarm robotics," *Proceedings of the 2007 IEEE Swarm Intelligence Symposium*, pp. 310-315, 2007.
- [5] T. Fukuda and G. Iritani, "Construction mechanism of group behavior with cooperation," *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, vol. 3, pp. 535-542, 1995.
- [6] S. I. Roumeliotis and G. A. Bekey, "Distributed multirobot localization," *IEEE Transactions on Robot and Automation*, pp. 781-795, 2002.
- [7] C. M. Clark, S. M. Rock, and J. C. Latombe, "Motion planning for multiple mobile robots using dynamic networks," *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 4222-4227, 2003.
- [8] F. Kobayashi, S. Sakai, and F. Kojima, "Determination of exploration target based on belief measure in multi-robot exploration," *IEEE International Symposium on Computational Intelligence in Robotics and Automation*, pp. 1545-1550, 2003.
- [9] M. Shimizu, T. Kawakatsu, and A. Ishiguro, "Coherent swarming through the local interaction by exploiting simulation techniques for many particle systems," *Transactions of the Society of Instrument and Conference*, pp. 126-134, 2005.
- [10] Y. Li and K. Gupta, "Real-time motion planning of multiple formations in virtual environments: Flexible virtual structures and continuum model," *IEEE/RSJ International Conference*, pp. 1902-1907, 2008.
- [11] H. Hashimoto, S. Aso, S. Yokota, A. Sasaki, Y. Ohyama, and H. Kobayashi, "Cooperative movement of human and swarm robot maintaining stability of swarm," *Proceedings of the 2008 IEEE International Symposium on Robot and Human Interactive Communication*, pp. 249-254, 2008.
- [12] A. Yamashita, I. Arai, J. Ota, H. Asama, T. FuKuda, and G. Iritani, "Motion planning of multiple mobile robots for Cooperative manipulation and transportation," *IEEE Transactions on Robot and Automat*, pp. 249-254, 2008.
- [13] Y.-G. Ha, J.-C. Sohn, and Y.-J. Cho, "Service-oriented integration of networked robots with ubiquitous sensors and devices using the semantic Web services technology," *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp. 3947-3952, 2005.
- [14] H.-S. Ahn, W. Yu, and J. Y. Lee, "Wireless localization network for ubiquitous robotic space: approaches and experimental test," *IEEE International Symposium on Robot and Human Interactive Communication*, pp. 481-486, 2007.
- [15] 최유표, 이원형, "3차원 지형에서 멀티 유닛을 위한 지능형 경로 탐색 기법," *한국컴퓨터게임학회논문지*, 제9호, pp. 5-16, 2006.
- [16] 이희재, 심귀보, "침입자 포위를 위한 군집 로봇의 분산 이동 알고리즘에 관한 연구," *Proceedings of KIIS Fall Conference*, pp. 129-132, 2008.
- [17] 이경노, "다개체 이동 로봇을 위한 협동 제어 방법론," *대한기계학회논문집*, 제22권 제5호, pp. 877-888, 1998.
- [18] 이수영, "차량 집단 주행 시스템을 위한 임피던스 제어," *대한전기학회논문지*, 제50D권 제6호, pp. 295-301, 2001.



김 성 옥

2002년 금오공과대학교 전자공학과(공학사). 2009년 3월~현재 금오공과 대학교 전자공학부(공학석사). 관심분야는 실시간 임베디드 시스템, 산업용 통신망.



김 동 성

1992년 한양대학교 전자공학과(공학사). 2003년 서울대학교 전기 및 컴퓨터공학부(공학박사). 1994년~1998년 서울대학교 ERC-ACI, 선임 연구원. 2003년~2004년 Cornell 대학교 전기 및 컴퓨터공학부(박사후 연구원). 2008년~2009년 U.C. Davis 전산학부 방문교수. 2004년 3월~현재 금오공과 대학교 전자공학부 조교수. 관심분야는 산업용 통신망, 네트워크 기반 임베디드 시스템 설계 및 성능분석.