

# 미지 환경 탐색 및 감시를 위한 다개체 로봇의 경로계획

## Multi-Robot Path Planning for Environmental Exploration/Monitoring

이 수 용\*  
(Sooyong Lee<sup>1</sup>)  
<sup>1</sup>Hongik University

**Abstract:** This paper presents a multi-robot path planner for environment exploration and monitoring. Robotics systems are being widely used as data measurement tools, especially in dangerous environment. For large scale environment monitoring, multiple robots are required in order to save time. The path planner should not only consider the collision avoidance but efficient coordination of robots for optimal measurements. Nonlinear spring force based planning algorithm is integrated with the spatial gradient following path planner. Perturbation/Correlation based estimation of spatial gradient is applied. An algorithm of tuning the stiffness for robot coordination is presented. The performance of the proposed algorithm is discussed with simulation results.

**Keywords:** path planning, multi-robots, spatial gradient, sensor network

### I. 서론

최근 일본에서의 원전사고 예에서 보여주듯이 인간이 직접 활동할 수 없는 지역을 탐사하고 감시할 필요성은 빠르게 증가하고 있다. 가장 대표적인 해법은 센서네트워크를 구축하여 각 센서에서 수집한 정보를 얻는 것이다. 특히 무선 센서 네트워크는 설치와 유지가 유선 네트워크에 비하여 상대적으로 수월하기 때문에 화산 활동 감시나, 오염도 측정, 온도, 습도 측정 등의 용도로 널리 사용되고 있다. 무선 센서 네트워크는 공간상에 퍼져 있으며, 온도, 소리, 진동, 압력, 움직임 등의 물리량을 측정하거나 오염도 등의 환경 상태를 감시하는 자율적이며 협동적인 센서들로 구성된 네트워크를 의미한다[1]. 무선 센서 네트워크는 초기에는 전쟁터에서의 구조작업과 같은 군사적인 목적으로 개발되었으나, 그 후 생산공정 모니터링과 제어, 기계 상태감시 등의 산업분야나 환경 감시, 의료장치, 홈 오토메이션, 교통제어 등 민간분야로 그 적용분야가 확대되었다[2].

그러나 감시 영역이 어느 정도 이상으로 확대되면 필요한 센서 노드들의 수가 증가 되고 전원 용량 및 운용시간을 고려한 무선 통신 가능 거리의 한계가 존재한다. 항공기에서 투하하여 설치하는 방법도 일부 사용될 수 있으나, 대부분의 경우 사람이 직접 현장에 센서 노드들을 설치하여야 하므로 위험한 지역에는 무선 센서네트워크를 사용할 수 없는 문제가 있다.

이와 같이 고정된 센서 노드를 사용하는 일반적인 센서 네트워크와는 다르게 본 논문에서 제안하는 방법은 이동 로봇에 센서를 장착하여 센서를 옮겨가며 측정 하는 이동 노드 방식의 센서 네트워크이다. 센서 네트워크를 구성 한 후(그림 1(a)), 전원 절약 및 통신부하량 감소를 위하여, 그림 1(b)와 같이 관심 지역 근처의 노드만 활성화시켜 측정하는 방법

이 흔히 사용된다. 이와 달리 본 논문에서 제안하는 방법은 상대적으로 적은 수의 센서 노드들을 설치 하고(그림 1(c)), 관심 지역에 노드들을 이동 배치하여 필요한 정보를 얻는 것이다(그림 1(d)). 이를 위하여 노드의 운동성이 요구되므로, 각 노드를 이동 로봇으로 구성하면 노드의 배치 계획은 곧 로봇의 경로 생성을 의미한다. 다수의 로봇을 배치하는 기준은 감지 능력의 향상과 총 감지 시간의 단축, 측정 분해능의 향상 등이다.

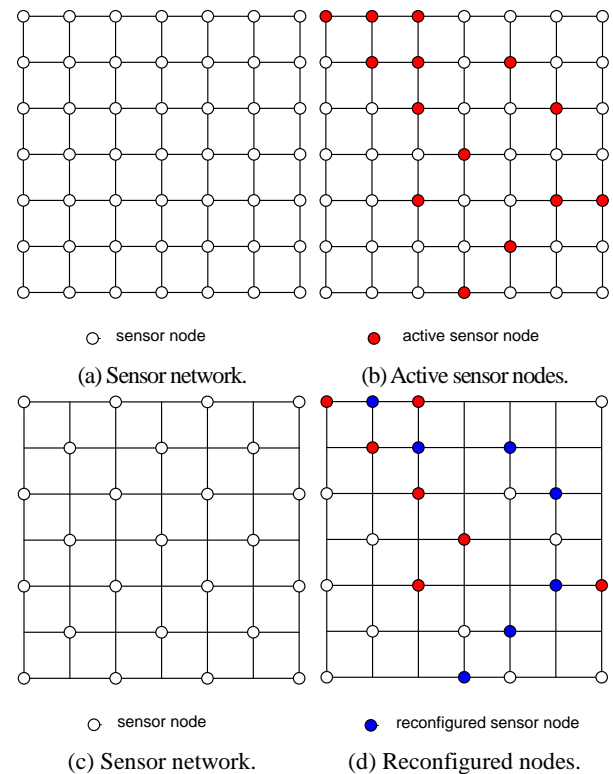


그림 1. 센서 네트워크.  
Fig. 1. Sensor network.

\* 책임저자(Corresponding Author)

논문접수: 2012. 2. 26., 수정: 2012. 3. 20., 채택확정: 2012. 3. 27.

이수용: 홍익대학교 기계시스템디자인공학과(sooyong@hongik.ac.kr)

※ 이 논문은 2011년 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(2010-0007794).

이를 위하여 사용하는 정보는 센서의 움직임에 대한 센서 출력의 변화량이다. 수학적으로는 위치 변화에 대한 센서 출력의 변화 구배(gradient)에 해당한다. 이 구배 값의 크기가 0에 가까우면 물리량의 변화가 없이 고르게 분산되어 있음을 의미하며 이러한 영역에서는 로봇들 사이의 배치 간격을 넓히고 이동 속도를 높일 수 있다. 반면 구배 값의 크기가 큰 지역에서는 로봇의 이동 속도를 줄이고 다수의 로봇들을 조밀하게 배치하여 상대적으로 측정 분해능을 향상 시키는 것이 이 논문에서 사용된 방법이다. 이러한 방법을 수학적으로 구현하고 모의 실험을 통하여 그 성과를 검증하였다.

II 장에서는 로봇의 위치 이동과 센서값의 변화 사이의 기울기, 즉 공간구배를 구하는 섭동/상관관계 기반 기울기 추정 방법을 설명하였다. III 장에서는 공간 구배 정보와 함께 사용할 로봇간의 가상 스프링/댐퍼 모델에 대하여 서술하였다. IV 장에서는 가상의 모의 환경에 대하여 본 논문에서 제안하는 방법을 적용하여 얻은 로봇의 경로에 대한 평가와 활용방법 등을 논의하였다.

## II. 로봇 경로 변화에 대한 센서 측정량 변화 추정

로봇의 움직임에 대한 센서 측정량의 변화를 추정하기 위하여 본 논문에서는 섭동/상관관계를 이용한 함수의 기울기를 추정한다[3]. 이 장에서는 이 방법의 일반화를 위하여 몇 가지 종류의 함수에 대하여 그 유효성을 검증한다.

다음 식과 같이 간단한 형태의 단일 입력 변수,  $x$  를 갖는 함수  $F$  에 대하여

$$F = F(x) \quad (1)$$

공칭점(nominal point)  $x_0$  에 섭동 값  $\delta(t)$  를 더한 입력 변수가 주어진다.

$$x(t) = x_0 + \delta(t) \quad (2)$$

섭동 값은 일반적으로 연속이며 미분 가능한 함수 값이 사용되며, 흔히 다음과 같이 진폭  $\varepsilon$ , 주파수  $\omega$  값을 갖는 sin 함수가 사용된다.

$$\delta(t) = \varepsilon \sin(\omega t) \quad (3)$$

상관 관계 값  $R$  은 다음 식과 같이 정의된다.

$$R = \int_t^{t+2\pi/\omega} \delta(\tau) F(x(\tau)) d\tau \quad (4)$$

마찬가지로 이산 시스템에 대하여 상관 관계 값  $\hat{R}$  는 다음과 같이 정의된다.

$$\hat{R} = \sum_{i=1}^{2N} \varepsilon \sin\left(\frac{\pi}{N}i\right) F(x(t_i)) \quad (5)$$

입력변수  $x$  에 대한 섭동입력의 이산 시스템 표현은

$$x(t_i) = x_0 + \varepsilon \sin\left(\frac{\pi}{N}i\right); i=1, \dots, 2N \quad (6)$$

과 같이 표현되므로, 상관 관계 값은 다음과 같이 표현된다.

$$\hat{R} = \sum_{i=1}^{2N} \varepsilon \sin\left(\frac{\pi}{N}i\right) F\left(x_0 + \varepsilon \sin\left(\frac{\pi}{N}i\right)\right) \quad (7)$$

상관 관계 값과 함수의 기울기 사이의 관계를 유도하기 위하여 선형회귀 방법을 적용한다. 즉,  $(x(t_i), F(x(t_i))); i=1, \dots, 2N$  데이터의 선형회귀분석으로부터 기울기  $K$  는 다음과 같이 유도된다.

$$K = \frac{\sum_{i=1}^{2N} [(x(t_i) - \bar{x}) [F(x(t_i)) - \bar{F}]]}{\sum_{i=1}^{2N} (x(t_i) - \bar{x})^2} \quad (8)$$

여기서  $\bar{x} = \frac{1}{2N} \sum_{i=1}^{2N} x(t_i)$  이며  $\bar{F} = \frac{1}{2N} \sum_{i=1}^{2N} F(x(t_i))$  로 정의된다. 섭동이 가해진  $x(t_i)$  를 대입하면 위 식은

$$K = \frac{\sum_{i=1}^{2N} \varepsilon \sin\left(\frac{\pi}{N}i\right) [F(x(t_i)) - \bar{F}]}{\sum_{i=1}^{2N} \varepsilon^2 \sin^2\left(\frac{\pi}{N}i\right)} \quad (9)$$

와 같이 표현되며, 이때 분자의 둘째 항과 분모는 다음과 같이 단순화된다.

$$\sum_{i=1}^{2N} \bar{F} \varepsilon \sin\left(\frac{\pi}{N}i\right) = 0 \quad (10)$$

$$\sum_{i=1}^{2N} \varepsilon^2 \sin^2\left(\frac{\pi}{N}i\right) = N\varepsilon^2 \quad (11)$$

따라서 섭동이 가해진 데이터의 선형 회귀분석으로부터 함수의 기울기 추정 값은

$$K = \frac{\sum_{i=1}^{2N} F(x(t_i)) \sin\left(\frac{\pi}{N}i\right)}{N\varepsilon} \quad (12)$$

이므로, 이를 상관계수  $\hat{R}$  식과 비교하여 둘 사이의 관계를 구하면 다음과 같다.

$$\hat{R} = n\varepsilon^2 K \quad (13)$$

위의 관계식은 상관 값과 함수의 기울기 사이의 관계를 나타낸다.

다음은 섭동/상관관계를 두 개의 입력 변수를 갖는 함수에 대하여 적용해본다. 아래 식과 같이 두 개의 입력변수  $x, y$  를 갖는 함수  $F$  에 대하여

$$F = F(x, y) \quad (14)$$

테일러 급수 전개를 통하여 이 함수는

$$F[x(\tau + \Delta t), y(\tau + \Delta t)] = F[x(\tau), y(\tau)] + \delta_x(t) \left. \frac{\partial F}{\partial x} \right|_{\tau} + \delta_y(t) \left. \frac{\partial F}{\partial y} \right|_{\tau} \quad (15)$$

와 같이 표현된다. 두 개의 입력 변수에 동시에 섭동을 주기 위해서 다음과 같은 직교(orthogonal) 함수를 각각 사용한다.

$$\delta_x = \varepsilon_x \sin(\omega t) \quad (16)$$

$$\delta_y = \varepsilon_y \cos(\omega t) \quad (17)$$

$\varepsilon_x, \varepsilon_y$  는 각 섭동입력의 진폭,  $\omega$  는 섭동 주파수이다. 입력 변수  $x$  와 함수  $F$  간의 상관관계를 구하면,

$$\overline{\delta_x F} = \int_{\tau-\frac{2\pi}{\omega}}^{\tau} \delta_x F[x(\tau), y(\tau)] dt + \int_{\tau-\frac{2\pi}{\omega}}^{\tau} \delta_x^2 \frac{\partial F}{\partial x} \Big|_r dt + \int_{\tau-\frac{2\pi}{\omega}}^{\tau} \delta_x \delta_y \frac{\partial F}{\partial y} \Big|_r dt \quad (18)$$

하나의 입력변수인 경우와 마찬가지로 섭동 함수로 사용된 sin 함수의 특성으로 다음과 같이 식이 정리되며,

$$\int_{\tau-\frac{2\pi}{\omega}}^{\tau} \delta_x dt = 0 \quad (19)$$

$$\int_{\tau-\frac{2\pi}{\omega}}^{\tau} \delta_x^2 dt = \frac{\pi \varepsilon_x^2}{\omega} \quad (20)$$

또한 직교관계인 sin 함수와 cos 함수의 특성으로 인하여

$$\int_{\tau-\frac{2\pi}{\omega}}^{\tau} \delta_x \delta_y dt = 0 \quad (21)$$

와 같이 단순화 된다. 따라서 입력변수  $x$  와 함수  $F$  간의 상관관계는

$$\overline{\delta_x F} = \frac{\pi \varepsilon_x^2}{\omega} \frac{\partial F}{\partial x} \Big|_r \quad (22)$$

로 단순화되고, 이 식으로부터 함수  $F$  의 입력 변수  $x$  에 대한 기울기는

$$\frac{\partial F}{\partial x} \Big|_r = \frac{\omega}{\pi \varepsilon_x^2} \overline{\delta_x F} \quad (23)$$

와 같이 표현된다. 마찬가지로 단순화 과정을 거쳐, 함수  $F$  의 입력 변수  $y$  에 대한 기울기는 다음 식과 같이 정리된다.

$$\frac{\partial F}{\partial y} \Big|_r = \frac{\omega}{\pi \varepsilon_y^2} \overline{\delta_y F} \quad (24)$$

이상과 같은 관계식으로부터 로봇의 위치( $x, y$ ) 변화에 대한 센서 출력값의 변화, 즉 구배 값을 추정할 수 있다.

이 방법을 로봇을 이용한 센싱에 적용하기 위해서 로봇의 위치에 섭동을 가하는 것은 비현실적이며, 그보다는 센서를 로봇에 장착하는 부분에 섭동 움직임을 생성할 수 있도록 구동부를 설치하여 그림 2와 같이 센서는 방향(heading)을 유지하며 원운동을 하여 X, Y방향에 식 (16), (17)과 같은 서로 직교하는 섭동을 생성한다. ( $\varepsilon_x = \varepsilon_y = \varepsilon$ )

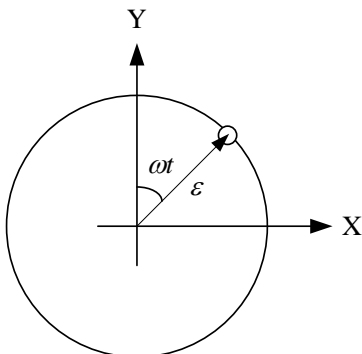


그림 2. X, Y 방향 섭동을 가하기 위한 센서의 움직임.  
Fig. 2. Sensor movement for X, Y-directional perturbation.

섭동을 가하여 구배 값을 구하는 방법의 적용 조건을 구하기 위하여 함수  $F$  가 두 개의 입력변수  $x, y$  뿐 만 아니라 섭동이 가해지지 않는 입력 변수  $\xi$  를 추가로 갖는다고 가정하고 다음과 같이 식을 전개하였다.

$$F[x(\tau + \Delta t), y(\tau + \Delta t), \xi(\tau + \Delta t)] = F[x(\tau), y(\tau), \xi(\tau)] + \delta_x(t) \frac{\partial F}{\partial x} \Big|_r + \delta_y(t) \frac{\partial F}{\partial y} \Big|_r + \delta_\xi(t) \frac{\partial F}{\partial \xi} \Big|_r + g(2) \quad (25)$$

상관관계를 근사화하면,

$$\overline{\delta_x F} \approx \int_{\tau-\frac{2\pi}{\omega}}^{\tau} F[x(\tau), y(\tau), \xi(\tau)] \delta_x(t) dt + \int_{\tau-\frac{2\pi}{\omega}}^{\tau} \delta_x^2 \frac{\partial F}{\partial x} \Big|_r dt + \int_{\tau-\frac{2\pi}{\omega}}^{\tau} \delta_x \delta_y \frac{\partial F}{\partial y} \Big|_r dt + \int_{\tau-\frac{2\pi}{\omega}}^{\tau} \delta_x \delta_\xi \frac{\partial F}{\partial \xi} \Big|_r dt \quad (26)$$

입력변수  $x, y$  는 식 (16), (17)과 같은 직교 함수를 사용하며 이를 식 (26)에 대입하여 계산하면,

$$\overline{\delta_x F} \approx 0 + \frac{\varepsilon_x^2 \pi}{\omega} \frac{\partial F}{\partial x} \Big|_r + 0 + \frac{\partial F}{\partial \xi} \Big|_r \int_{\tau-\frac{2\pi}{\omega}}^{\tau} \delta_x \delta_\xi dt \quad (27)$$

따라서 상관 관계로부터 구배 값을 구하는 식 (23)이 성립하기 위하여 다음과 같은 조건을 만족해야 한다.

$$\left| \frac{\partial F}{\partial \xi} \Big|_r \int_{\tau-\frac{2\pi}{\omega}}^{\tau} \delta_x \delta_\xi dt \right| \ll \left| \frac{\varepsilon_x^2 \pi}{\omega} \frac{\partial F}{\partial x} \Big|_r \right| \quad (28)$$

### III. 비선형 스프링과 댐퍼로 연결된 다개체 로봇 경로 생성

다수의 로봇의 경로생성은 매우 활발히 연구되고 있는 주제이다. 미지의 환경 탐색을 위한 연구들 중의 하나로, [4]에서 센서값의 구배를 따라 측정값의 국부최소점(local minimum)과 국부최대점(local maximum)을 번갈아 찾아가는 로봇 경로 생성기에 대한 연구가 소개 되었으나 구배가 0에 가까운 지역에서는 이동명령을 임의의 방향으로 선정해야하는 문제점과 다수의 로봇간의 배치가 고려되지 않은 단점을 갖고 있다. 생체 모방 기술로 개미[5] 등 인간에 비하여 낮은 지능과 진화 정도가 떨어지는 동물, 특히 곤충의 감각이나 운동원리를 모방하여 기계에 적용하는 기술에 대한 연구도 활발히 진행되고 있다. 다수의 비행기의 군집 비행을 위한 비행경로 생

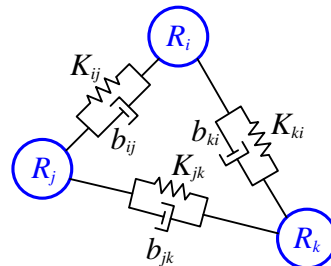


그림 3. 스프링과 댐퍼로 상호연결된 로봇.  
Fig. 3. Interconnected robots with springs and dampers.

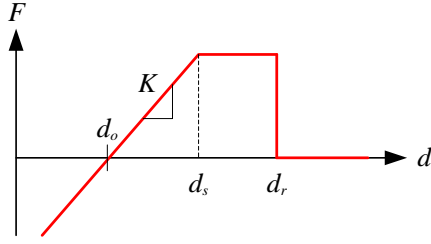


그림 4. 스프링 상수 특성.

Fig. 4. Spring constant characteristics.

성에 관한 연구[6], 무인비행기의 경로 생성에 관한 연구[7]등도 소개되었고, 특히[8,9]에서는 로봇 사이에 가상의 스프링과 댐퍼로 연결되어 로봇의 움직임이 상대 로봇의 속도 명령에 영향을 미치도록 하였다.

본 논문에서도 이와 마찬가지로 그림 3과 같이 각 로봇 사이에 가상의 스프링과 댐퍼로 연결되어 각 로봇의 움직임이 상대 로봇의 움직임에 영향을 미치는 모델을 설정하였다. 여기에 사용된 스프링은 거리에 따라 힘이 생성되어 상대 로봇에 영향을 미치는 목적으로, 그리고 댐퍼는 급격한 경로 변화로 인하여 발생할 수 있는 진동을 줄이기 위함이다.

기존연구와의 차이점은 로봇 사이에 연결된 스프링 상수의 비선형 특성과 특성치 값의 실시간 조정이다. 그림 4에 나타낸 것과 같은 특성을 갖는 스프링을 사용하였다.

거리에 비례하는 일반적인 스프링과 유사하여 상호 거리 값에 비례하는 유인력을 발생하나, 상호 거리값이 offset 값,  $d_o$ 보다 작으면 반발력이 발생하여 서로 밀어내는 효과를 얻는다. 즉, 서로간의 충돌을 방지하는 역할을 하며 이 offset 값을 적절히 조정하여 로봇간의 상호 거리, 즉 로봇 배치 밀도를 조절할 수 있다. 앞서 언급하였듯이 센서값 구배의 크기가 큰 경우는 로봇의 밀도를 높여야 하므로 offset 값을 줄이고, 센서값 구배의 크기가 작은 경우에는 offset 값을 늘려 로봇간의 간격을 넓히는 결과를 얻는다. 멀리 떨어져 있는 로봇간에 너무 큰 유인력 발생을 방지하기 위하여 일정 거리,  $d_s$  이상에서는 유인력이 거리에 따라 더 이상 증가하지 않으며, 영향 거리  $d_r$ 을 설정하여 이보다 멀리 떨어져 있는 경우에는 상호간의 영향이 없도록 하였다. 이를 식으로 정리하면 다음과 같다.

$$F = K(d - d_o) \quad \text{if } d < d_s \quad (29)$$

$$F = F_s \quad \text{if } d_s < d < d_r \quad (30)$$

$$F = 0 \quad \text{if } d_r < d \quad (31)$$

이러한 스프링 힘과 댐퍼로부터 발생하는 힘의 합력이 로봇의 경로 생성에 다음과 같이 작용한다.

$$\Delta X_i \propto \sum_{i \neq j} F_{i,j} \quad (32)$$

$$X_{i,new} = X_{i,old} + \Delta X_i \quad (33)$$

여기서  $\Delta X_i$ 는  $i$ 번째 로봇의 위치 벡터 변화량이며,  $F_{i,j}$ 는  $i$ 번째 로봇과  $j$ 번째 로봇간의 상호 거리에 따라 식 (25)-(27)들 중의 하나를 사용하여 구한 힘 벡터이다.

이 관계식을 사용하여 하나의 선행 로봇을 추종하는 두개

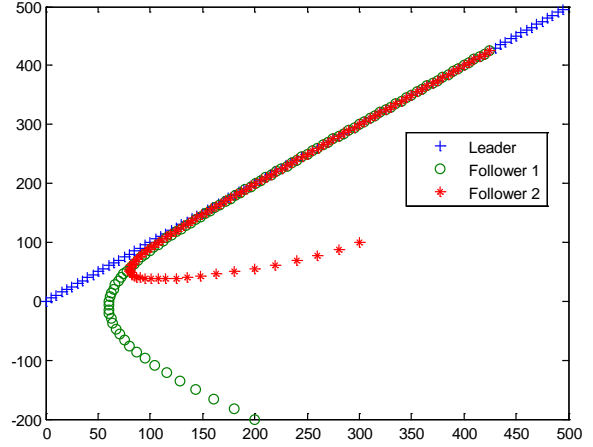


그림 5. 선행로봇 추종 궤적.

Fig. 5. Trajectories of followers.

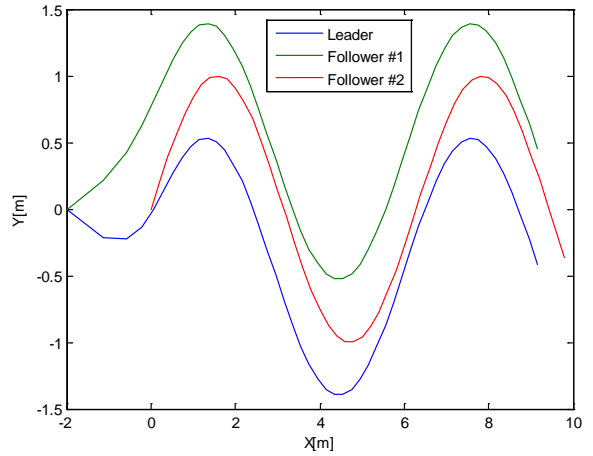


그림 6. 편대 이동 궤적.

Fig. 6. Vee formations.

의 로봇의 경로를 생성하면 그림 5와 같다. 선행 로봇은 원점에서 출발하여 (500,500)의 위치로 이동하며 1번 로봇은 (300,100), 2번 로봇은 (200,-200)의 초기위치에서 출발하여 선행 로봇을 추종한다. 그림에서 두 로봇은 선행 로봇을 일정 간격을 유지하며 그 궤적을 추종하는 것을 보여주며 이는 offset값 만큼의 거리를 유지하는 것이다.

또한 비행체의 편대 비행에서 흔히 볼 수 있는 vee 편성의 경우에 적용한 결과를 그림 6에 나타내었다. 선행로봇은 원점에서 출발하여 sin 함수 형태로 움직이도록 명령하였고, 다른 두 로봇은 (0,-2)에서 출발하여 vee 편성을 이루며 선행 로봇을 추종한다.

#### IV. 모의 환경에서의 다수 로봇 경로 생성

II 장, III 장에서 설명된 로봇 경로 생성기를 검증하기 위하여 그림 7에 나타낸 물리량이 분포된 모의 환경을 구성하였다. 물리량의 분포는 다음 식과 같다.

$$F = xe^{(-3x^2 - y^2)} + 0.2(y - 2)e^{(-(x-2)^2 - 2(y-3)^2)} \quad (34)$$

로봇들이 탐색할 영역은  $-2 \leq x \leq 6, -2 \leq y \leq 6$  이다. 그림

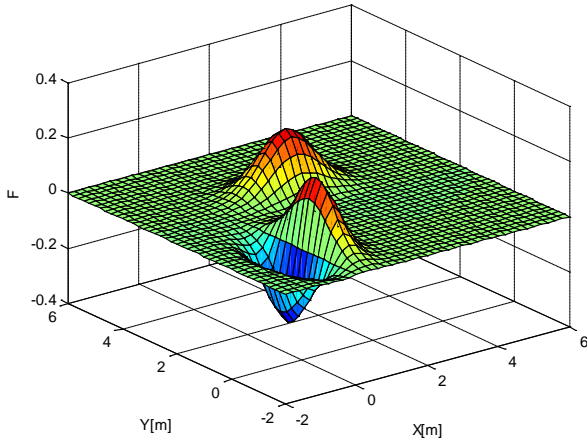


그림 7. 모의 물리량 분포.  
Fig. 7. Simulated physical property distribution.

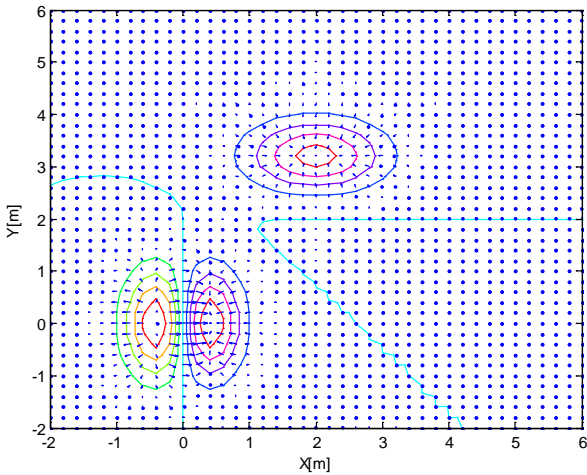


그림 8. 물리량의 등고선 분포.  
Fig. 8. Contour of the physical property distribution.

8의 등고선 분포에 나타내었듯이 두 개의 국부최대값과 하나의 국부최소값이 존재하며 이들을 제외한 대부분의 영역에서는 물리량의 값이 0에 가깝다.

3대의 로봇은 각각 (1,3,5), (-1,0), (5,2)의 위치에서 출발하였다. 각 로봇은 자신의 현재 위치에서 섭동/상관관계를 기반으로 물리량의 구배를 구하고, 그 크기가 미소 값  $\delta$  보다 작은 경우에는 III 장의 경우와 마찬가지로 식 (25)-(28)을 사용하여 새로운 위치를 구하며, 구배의 크기가  $\delta$  보다 큰 경우에는 최급강하법(steepest descent method)을 따라 이동 경로를 생성한다. 또한 물리량 구배 값의 절대 값에 따라 비선형 스프링상수 특성값을 바꾸어 로봇간의 간격을 조절한다. 그림 9의 로봇 경로에서 3번 로봇의 경우 초기 위치에서는 구배값이 0에 가까우므로 상대적으로 가까운 1번 로봇의 유인력에 의하여 1번 로봇에 가까이 이동하며, 그 후 구배 값의 절대 값이 큰 영역에 도달하면 속도를 늦추고 구배값의 변화가 큰 방향으로 이동한다.

본 논문에서 제안한 방법의 비교 대상은 모든 로봇들이 등간격으로 일직선을 이루며 전체 영역을 지나가는 방법이다. 이러한 방법은 균일한 분해능을 얻을 수 있으나 국부 분포에

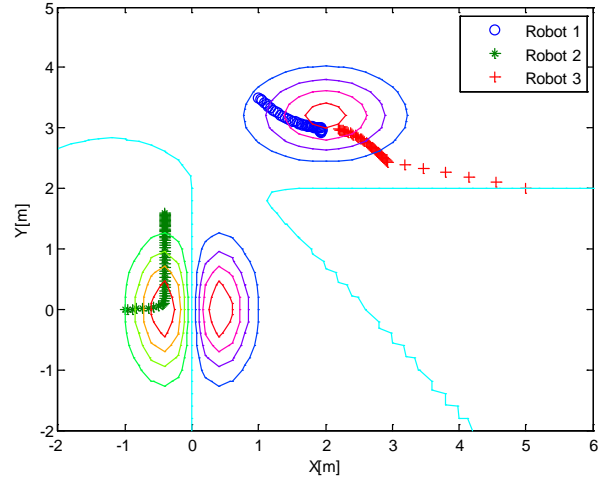


그림 9. 3대의 로봇 경로.  
Fig. 9. Trajectories of three robots.

따른 능동적인 적응 능력이 없는 단점을 갖는다. 그러나 객관적이며 정량적인 성능비교 결과는 주어진 물리량의 분포에 따라 달라질 수 있다.

### V. 결론

다수의 이동로봇을 사용하여 환경을 탐색하는 것은 그 필요성이 계속 증가하고 있다. 무선 센서네트워크와 달리 센서가 부착된 로봇을 자유롭게 이동시키므로 센서배치의 유연성이 증대되며, 이때 이동 로봇 경로생성은 가장 중요한 필수 기술이다. 이를 위하여 측정하는 물리량의 구배값과 로봇간 상호 연결된 가상의 스프링과 댐퍼에서 발생하는 힘의 영향으로 로봇의 경로를 생성하였다. 특히 측정 분해능을 환경 조건에 따라 가변적으로 운용할 수 있도록 다수 로봇의 배치에 대한 고려가 이루어졌다. 하나의 가상 환경에 대한 모의 실험을 통하여 제안된 방법의 검증이 이루어졌으며, 다양한 환경에 적용할 수 있는 일반화된 범용 경로생성기에 대한 연구가 계속되고 있다.

### 참고문헌

- [1] I. F. Akyildiz, W. Su, Y. Sankarasubramaniam, and E. Cayirci, "Wireless sensor networks: a survey," *Computer Networks Elsevier Journal*, vol. 38, no. 4, pp. 393-422, Mar. 2002.
- [2] K. Römer and M. Friedemann, "The design space of wireless sensor networks," *IEEE Wireless Communications*, vol. 11, no. 6, pp. 54-61, 2004.
- [3] S. Lee, "Perturbation/Correlation based optimization," *Journal of Institute of Control, Robotics and Systems (in Korean)*, vol. 17, no. 9, pp. 875-881, 2011.
- [4] J. Bae, G-W. Kim, and S. Lee, "Application of perturbation/correlation based gradient estimation for environment exploration," *International Journal of Control, Automation, and Systems (in Korean)*, vol. 7, no. 2, pp. 233-242, 2009.
- [5] M. Krieger, J. B. Billeter, and L. Keller, "Ant-like task allocation and recruitment in cooperative robots," *Nature*, vol. 406, pp. 992-995, 2000.
- [6] S. Kim, S. Jo, S. Park, D. Kim, and C.-K. Ryoo, "A formation guidance law design based on relative-range information for

swam flight,” *Journal of Institute of Control, Robotics and Systems (in Korean)*, vol. 18, no. 2, pp. 87-93, 2012.

- [7] S. A. Bortoff, “Path planning for UAVs,” *American Control Conference*, pp. 364-368, Chicago, U.S.A., Jun. 2000.
- [8] E. MacArthur and C. D. Crane, “Compliant formation of a multi-vehicle system,” *IEEE International Symposium on Computational Intelligence in Robotics and Automation*, pp. 479-484, Jacksonville, U.S.A. Jun. 2007.
- [9] P. Urcola, L. Riazuelo, M. T. Lazaro, and L. Montano, “Cooperative navigation using environment compliant robot formation,” *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp. 2789-2794, Nice, France, Sep. 2008.



### 이수용

1989년 서울대학교 기계공학과(공학사).  
 1991년 서울대학교 기계공학과(공학석사).  
 1996년 MIT 기계공학과(공학박사).  
 1996년~1999년 한국과학기술연구원 선임연구원.  
 2000년~2003년 Texas A&M대학 기계공학과 조교수.  
 2003년~현재 홍익대학교 기계시스템디자인공학과 교수.  
 관심분야는 Robotics.