

<http://dx.doi.org/10.7236/IIBC.2015.15.1.147>

IIBC 2015-1-19

## 다수의 무인기를 이용한 유해 물질 감시 센서 네트워크

### A Hazardous Substance Monitoring Sensor Network Using Multiple Robot Vehicle

천정명\*, 김사목\*, 이상후\*, 윤석훈\*\*

Jeongmyong Chun\*, Samok Kim\*, Sanghu Lee\*, Seokhoon Yoon\*\*

**요약** 본 논문에서는 인력이 접근하기 힘든 오염지역 감시를 위하여 다수 무인기 기반 이동센서네트워크를 고려한다. 개별 무인기의 센싱 범위는 제한되어 있으므로 효과적인 지역 감시를 위해서는 무인기가 서로 협력하여 효과적인 센싱 커버리지를 획득하고 보다 많은 유해물질이 검출되는 지점으로 이동할 수 있어야 한다. 본 논문에서는 센싱 및 통신 거리의 제약을 극복하기 위하여 가상력 기반의 알고리즘을 이용하는 감시 네트워크를 제안하고 테스트베드를 구축한다. 감시 네트워크에서 각 무인기는 이웃 무인기의 센싱값과 위치 정보를 바탕으로 최적 커버리지를 획득하고 감시 지역의 센싱 최대치 지점으로 이동하게 된다. 야외 테스트베드를 이용한 시험을 통해 제안하는 유해 물질 감시 센서 네트워크는 오염 지역에 자발적 접근이 가능하고 높은 가중 커버리지(Weighted Coverage) 획득이 가능함을 보인다.

**Abstract** In this paper, we consider a mobile sensor network for monitoring a polluted area where human beings cannot access. Due to the limited sensing range of individual unmanned vehicles, they need to cooperate to achieve an effective sensing coverage and move to a more polluted region. In order to address the limitations of sensing and communication ranges, we propose a hazardous substance monitoring network based on virtual force algorithms, and develop a testbed. In the considered monitoring network, each unmanned vehicle achieves an optimal coverage and move to the highest interest area based on neighboring nodes sensing values and locations. By using experiments based on the developed testbed, we show that the proposed monitoring network can autonomously move toward a more polluted area and obtain a high weighted coverage.

**Key Words** : Hazardous substance monitoring, mobile sensor network, unmanned vehicle, cooperative algorithm

## 1. 서론

다양한 형태와 기능을 가진 소형 무인기 기술이 발달함에 따라 무인기 활용범위가 점차 확대되고 있다. 무인기 실내 자동 운행, 레이저 센서를 활용한 이동 물체 추적, 대형 구조물 주변 환경 변화 관찰, 탐사 및 보안 시스템

등 무인기를 이용한 연구들이 활발히 진행되고 있다<sup>1, 2, 3</sup>.

무인기를 활용의 또 다른 예는 다수의 무인기가 관제 센터의 직접적인 제어 및 조작 없이 자발적 협력을 통해 네트워크를 구축하고 지역을 감시하는 것이다<sup>4, 5, 6</sup>.

특히 무인기를 이용하여 유해물질을 감시하는 모바일 센서네트워크 구성을 고려할 수 있다. 무인기의 통신 및

\*준회원, 울산대학교 전기전자컴퓨터공학과

\*\*정회원, 울산대학교 전기전자컴퓨터공학과 (교신저자)

접수일자 : 2015년 1월 7일, 수정완료 : 2015년 2월 1일

계재확정일자 : 2015년 2월 13일

Received: 7 January, 2015 / Revised: 1 February, 2015

Accepted: 13 February, 2015

\*\*Corresponding Author: seokhoonyoon@ulsan.ac.kr

Dept. of Electrical and Computer Engineering, University of Ulsan, Korea

센싱 거리 제약으로 인하여 높은 센싱 커버리지를 획득하고 보다 많은 유해물질이 검출되는 지점으로 이동하기 위해서는 무인기들이 서로 협력할 수 있어야 한다.

본 논문에서는 가상력(Virtual Force) 이용하여 다수의 무인기가 자율적으로 협력하여 네트워크를 구성하고 높은 농도의 유해물질 오염 지역으로 이동할 수 있는 시스템을 제안한다. 또한 야외 테스트 베드를 구축하여 제안된 시스템의 검증을 수행한다.

제안하는 시스템에서 무인기는 이웃 노드와 유해물질 센싱 값 및 현재 위치 정보를 상호 교환한다. 수집한 주변 노드의 정보를 바탕으로 가상력을 계산한다. 계산된 가상력을 이용하여 무인기를 이동시킴으로써 무인기들의 대형을 유지시키고 센싱 커버리지를 최대화한다. 또한 이러한 가상력 기반의 위치제어는 결과적으로 전체 이동센서네트워크를 보다 많은 유해 물질에 오염된 지역으로 이동케 한다.

각 무인기는 애드혹 모드를 지원하는 네트워크 인터페이스 어댑터와 GPS모듈 및 센서모듈을 장착한다. 무인기의 다양한 센서 데이터 처리와 이동 제어 및 주변 무인기 정보 관리를 위해 컴포넌트 기반 무인기 SW 플랫폼인 OPRoS(Open Platform for Robotic Service)를 사용한다<sup>[8]</sup>. OPRoS는 무인기의 각종 센서 데이터, 동작 알고리즘, 제어 신호 송수신 기능을 컴포넌트로 구성하며 컴포넌트들의 데이터 교환으로 무인기의 시스템을 제어한다.

제안한 유해 물질 감시 센서 네트워크 테스트 베드를 구축 후 실제 야외 실험을 통해 동작을 확인한다. 또한 감시 지역 가중 커버리지와 각 무인기의 이동 접근경로를 통해 성능을 평가한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 다수의 무인기를 이용한 VirFID 기반 유해 물질 감시 알고리즘에 대해 논하고, 3장에서는 본 논문에서 제안한 유해 물질 감시 시스템 구성과 테스트베드, 무인기와 관제센터의 하드웨어와 소프트웨어에 대해 논하며, 4장에서 야외에서 테스트베드를 이용하여 시행된 유해 물질 감시 시스템 실험에 대한 성능평가 및 결과 분석, 5장에서 본 논문의 결론을 맺는다.

## II. 유해 물질 감시 알고리즘

최근 이동센서무인기를 이용하여 목표물을 추적하거

나 중앙 통제 없이 무인기들을 자율 이동 시키는 알고리즘이 연구되고 있다<sup>[7,8,9]</sup>. 특히 VirFID(A Virtual Force(VF)-based Interest-Driven)<sup>[7]</sup>에서는 가상력을 이용하여 넓은 지역에서 노드들이 그룹을 이루어 이동할 수 있음을 보였다.

본 논문에서는 개활 지역에서의 유해 물질 감시 및 최대 오염 지역 탐색을 위해 VirFID 기반의 유해물질 감시 알고리즘과 시스템을 제안한다. 제안하는 감시 구조에서 무인기들은 자신이 주변에 탐지된 유해 물질 센싱값과 위치를 이웃 무인기와 공유하며, 공유된 정보를 기반으로 가상력을 계산하여 다음 이동 위치를 결정한다.

무인기로 구성된 이동센서네트워크가 오염지역으로 이동시키게 하는 관심가상력과 높은 센싱커버리지 획득을 위해 무인기가 일정 거리를 유지시키게 하는 구성 가상력을 사용한다.

### 1. 오염지역으로의 이동을 위한 관심가상력

다수 무인기들의 이웃노드 간 상호 정보 교환을 통해 감시 지역의 센싱 값이 약한 지역에서 강한 지역을 향해 무인기 대형의 이동을 위한 방안을 설명한다. 각 무인기는 통신 거리 내에 있는 이웃 무인기와 주기적으로 위치 정보와 센싱 값이 포함된 정보 메시지 교환 후 센싱 크기를 비교하여 관심 가상력을 계산한다.

가상력  $\vec{F}$ 는 힘의 크기  $f$ 와  $x$ 축을 기준으로 각도  $\theta$ 로 구성되며  $\vec{F} = (f, \theta)$  로 표현한다.  $F_{ij}^I$ 는 노드  $i$ 와 이웃 노드  $j$ 의 관심 가상력(Interest Virtual Force)을 나타내며 아래 식 (1)를 이용하여 계산된다.

$$F_{ij}^I = \begin{cases} (\eta_i I(i, j), \theta_{ij}), & I(i) < I(j) \\ 0, & I(i) = I(j) \\ (\eta_i I(i, j), \theta_{ij} + \pi), & I(i) > I(j) \end{cases} \quad (1)$$

$\eta_i$ 는 가상력 크기의 강도를 조절하는 상수이다. 관심 가상력  $F_{ij}^I$ 는 노드  $i$ 가 노드  $j$ 보다 센싱값이 작을 경우 노드  $i$ 는  $j$ 를 향한  $\theta_{ij}$  각도를 가진다. 반대로 노드  $i$ 가 노드  $j$ 보다 센싱값이 클 경우 노드  $j$ 의 반대방향  $\theta_{ij} + \pi$ 를 가지게 된다. 만일 동일한 센싱값이면 관심 가상력의 방향과 가상력 크기를 가지지 않는다. 관심 가상력  $F_{ij}^I$ 의

힘의 크기는 강도 조절 상수  $\eta_i$ 와 두 노드의 센싱값 차이  $I(i,j)$ 를 이용하여 계산된다.

$$I(i,j) = \begin{cases} |I(i) - I(j)|, & |I(i) - I(j)| \leq I_{\max} \\ I_{\max}, & |I(i) - I(j)| > I_{\max} \end{cases} \quad (2)$$

$I(i)$ 는 노드  $i$  센싱 값을 나타낸다.  $I(i,j)$ 는 노드  $i$ 와  $j$ 의 센싱 값 차이를 나타낸다.  $I_{\max}$ 는 최대 차이 값으로서 두 노드간의 극심한 센싱 값 차이로 인한 관심 가상력 풀림현상을 방지한다. 두 노드의 센싱값을 뺀 절대값이  $I_{\max}$ 보다 작거나 같을 경우 센싱 값의 차이는 두 노드의 센싱 값을 뺀 절대 값이 할당되며, 반대로 절대 값이  $I_{\max}$ 보다 클 경우  $I_{\max}$ 가 센싱 값의 차이로 할당된다.

## 2. 무인기간 일정 거리 유지를 위한 구성가상력

다수 무인기들의 제한된 통신 거리와 센싱 거리에 기반 센싱 커버리지 최대화를 위하여 무인기 간 대형 및 노드 간 일정 거리를 유지하는 것이 바람직하며, 이를 위하여 구성 가상력을 이용한다.

구성 가상력(Formation virtual force)  $F_{ij}^{\vec{F}}$ 은 노드  $i$ 와 이웃노드  $j$ 의 사이의 거리  $d(i,j)$ 를 이용하여 힘의 크기와 방향이 계산된다. 아래 식 (3)은 구성 가상력을 나타낸다.

$$F_{ij}^{\vec{F}} = \begin{cases} (\eta_a d(i,j) - \xi, \theta_{ij}), & d(i,j) \geq \xi \\ (\eta_r |d(i,j) - \xi|, \theta_{ij} + \pi), & d(i,j) < \xi \end{cases} \quad (3)$$

$\xi$ 는 노드 간 유지되어야 할 거리 임계 값이며,  $\eta_a, \eta_r$ 은 가상력 강도 조절 상수를 나타낸다. 임계 값  $\xi$ 는 커버리지 홀(Coverage hole)을 회피하며 동시에 센싱 커버리지 최대화를 위해  $\xi = \sqrt{3}R_s$ 로 설정된다. 이때  $R_s$ 는 센싱 거리를 나타낸다. 구성 가상력  $F_{ij}^{\vec{F}}$ 은 노드  $i$ 와 노드  $j$ 간 거리  $d(i,j)$ 가 임계 값  $\xi$ 보다 크거나 같을 경우  $d(i,j)$ 에서  $\xi$ 를 뺀 절대 값과 가상력 강도 조절 상수  $\eta_a$ 를 이용하여 가상력 크기와 각도  $\theta_{ij}$ 의 방향을 가진다. 반대로 두 노드간의 거리  $d(i,j)$ 가 임계값  $\xi$ 보다 작을 경우 노드  $j$ 의 반대 방향  $\theta_{ij} + \pi$ 와  $d(i,j)$ 에서  $\xi$ 를 뺀 절대 값과 가상력 강도 조절 상수  $\eta_r$ 를 이용하여 가상력 크기

와 방향을 결정한다. 두 노드  $i, j$ 의 거리가 좁혀질수록 센싱 커버리지의 겹치는 범위가 증가된다. 그러므로 노드 간 척력을 발생시켜 최소 거리를 유지하여 커버리지를 최대화한다. 반대로 두 노드의 거리가  $\xi$ 보다 클 경우 인력이 발생하여 두 노드사이 커버리지 공백을 최소화한다. 그림 1은 노드  $i$ 와 이웃노드  $a, b, c$ 와의 거리 간격을 비교하여 각 노드별 구성 가상력을 이차원 평면에 나타낸다.

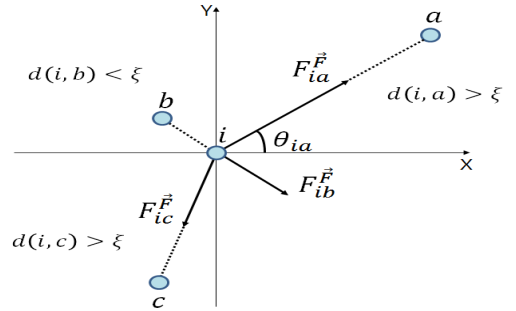


그림 1. 구성 가상력 계산을 위한 이웃 노드와의 거리 비교  
 Fig. 1. Compare between neighbor nodes for calculating formation virtual force

그림 1에서 노드  $i$ 와 노드  $a$ 의 거리  $d(i,a)$ 는 임계 값  $\xi$ 보다 크므로 노드  $a$ 를 향한 힘이 발생한다, 반대로 노드  $i$ 와 노드  $b$ 의 거리는 임계 값보다 작으므로 척력이 발생하며 노드  $b$ 의 반대 방향으로 힘이 작용하게 된다.

## 3. 무인기의 이동

주변의 이웃노드 위치 정보와 센싱 값이 포함된 정보 메시지를 교환 후 계산 된 관심 가상력과 구성 가상력을 종합하여 무인기가 현재 위치에서 이동할 다음 위치를 계산한다. 아래 식 4는 관심 가상력과 구성 가상력이 결합된 지역 가상력(Local Force)  $F_i^{\vec{L}}$ 을 나타낸다.

$$F_i^{\vec{L}} = \sum_{j \in N_i} (F_{ij}^{\vec{I}} + F_{ij}^{\vec{F}}) \quad (4)$$

$F_i^{\vec{L}}$ 는 지역 가상력으로서 노드  $i$ 의 모든 이웃노드들의 관심 가상력  $F_{ij}^{\vec{I}}$ 과 구성 가상력  $F_{ij}^{\vec{F}}$ 의 힘의 크기와 방향을 합하여 다음 이동 할 위치를 결정한다. 지역 가상력  $F_i^{\vec{L}}$ 을 통해 다수의 무인기들은 센싱 감시 지역의 센싱

최대치 지역을 향해 다가가며 동시에 센싱 최대치 주변에 분포되어 거리를 유지한다.

### III. 시스템 구현 및 테스트베드

#### 1. 무인기

##### 가. 하드웨어

각 모듈은 통신부, 제어부, 센서부, 구동부로 구분된다. 통신부는 무선네트워크카드 IP-time사의 N300UA 802.11b/g/n USB형을 사용한다. 센서부는 수신신호세기(RSSI) 값 획득을 위한 TinyOS사의 K mote-S1 모듈과 위성항법장치인 UIGOODS사의 UIGGUB02-R001 그리고 방향각 값을 얻기위한 Honeywell사의 HMC5883L 3축 지자기 센서를 사용한다. 제어부는 FALinux사의 G100-S5PV210으로 센서, 통신 모듈 및 모터보드를 결집시키는 메인보드이다. 무인기 모터 제어와 자기센서(Magnetic Sensor) 값 수신에 필요한 DAGU사의 Wild Thumper robot controller를 사용한다. 구동부는 DAGU사의 Wild Thumper 6WD Chassis를 사용한다.

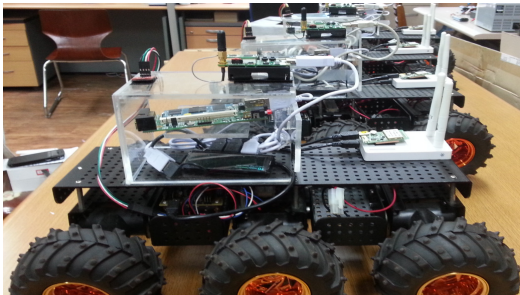


그림 2. 디바이스가 장착된 무인기 모습  
Fig. 2. The robot vehicle that installed device

##### 나. 소프트웨어

그림 4는 무인기의 전체 소프트웨어 구성도를 나타낸다. 메인보드의 운영체제는 디바이스 모듈, 네트워크, 메모리 관리에 특화된 리눅스(Linux kernel 2.6.35)를 사용한다. 연결된 디바이스 모듈은 리눅스 커널 내부의 디바이스 드라이버를 통해 제어되며, 커널과 OPRoS 플랫폼의 통신을 통해 센서 값 처리, 무인기 이동 명령 신호 제어, 무선 통신 메시지 송수신이 이뤄진다.

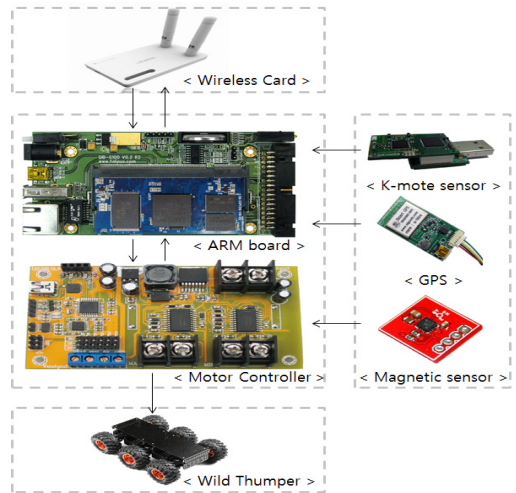


그림 3. 무인기 하드웨어 구성도  
Fig. 3. The hardware architecture of robot vehicle

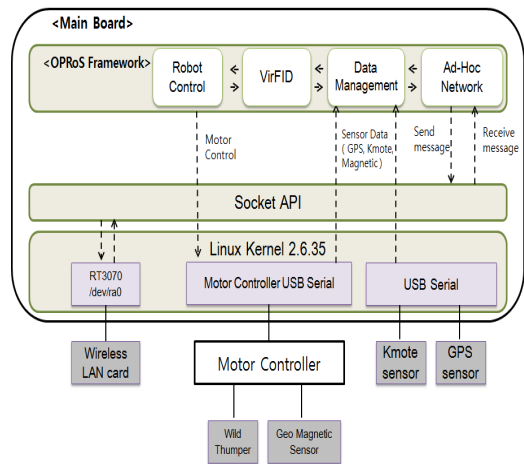


그림 4. 무인기 소프트웨어 구성도  
Fig. 4. The software architecture of robot vehicle

OPRoS<sup>[10]</sup>는 무인기의 다양한 디바이스 모듈 데이터와 주기적인 메시지의 데이터 흐름 제어를 컴포넌트로 구성한다. 그림 5은 OPRoS의 컴포넌트 연결구성도를 나타낸다. 컴포넌트는 센서 데이터, 동작 알고리즘, 제어 메시지 송수신 그룹으로 나뉜다.

센서 데이터는 지자기, GPS, K mote의 센서 모듈 컴포넌트로 구성된다. 무인기의 방향과 방위각의 변화를 탐지하는 지자기 센서, GPS 센서, RSSI 신호로 센싱 값의 측정을 위한 K mote 센서가 컴포넌트로 제어된다. 동작

알고리즘은 자율 탐색 주행, 데이터 변환 및 관리 컴포넌트로 구성된다. 각각의 컴포넌트는 유해 물질 감시 알고리즘, 센서 모듈 및 무선 네트워크 카드에서 데이터 수신과 변환기능을 수행한다.

제어 메시지 통신은 UDP 통신 컴포넌트를 통해 이루어진다. UDP 무선통신 컴포넌트는 무인기의 통신 범위 내 속한 이웃 무인기에 브로드캐스트(Broadcasting)과 플러딩(Flooding)으로 통신 거리를 벗어난 목적지에 메시지 전달한다. 또한 무선통신 컴포넌트는 관제센터와 통신을 유지한다. 모터보드 제어는 무인기의 모터를 관리하는 컴포넌트로서, 메인보드와 모터보드 사이의 정해진 디지털 신호를 전송하여 제어한다.

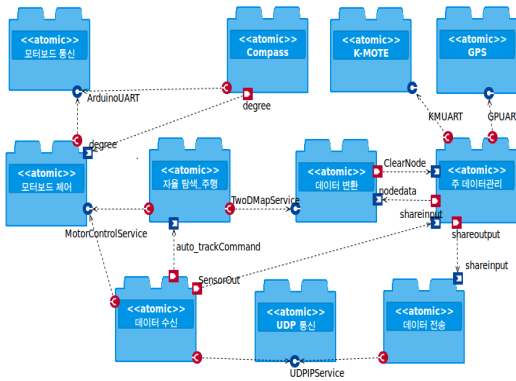


그림 5. OPRoS 컴포넌트와 서비스 연결  
 Fig. 5. Components and service connection of The OPRoS

다. 애드혹 네트워킹

다수의 무인기는 AP(Access Point)에 종속된 네트워크 통신이 아닌 기반시설 없는 독립된 노드 그룹들의 네트워크 통신 Ad-hoc을 사용한다. 또한 고속 무선 통신 802.11n 프로토콜을 이용한다. Ad-hoc은 AP에 구애받지 않고 다수의 노드를 이용한 패킷 전송 경로의 탐색, 제거, 복구를 통해 다양한 방법의 메시지의 중계가 가능하다. Ad-hoc을 이용한 라우팅 프로토콜은 DSR, DSDV, AODV 등이 있다<sup>[11, 12, 13]</sup>.

본 연구에서는 기존의 라우팅 프로토콜이 아닌 브로드캐스팅과 플러딩을 이용하여 메시지를 전달한다.

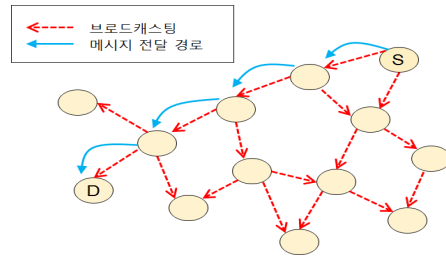


그림 6. 플러딩(Flooding)을 이용한 메시지 전달  
 Fig. 6. Forward message using a flooding

그림 6은 중계 노드들의 브로드캐스팅 반복을 통한 시작노드에서 목적지노드까지 패킷이 전달되는 플러딩 과정을 보여준다. 플러딩 중 패킷을 송신한 중계노드가 동일한 패킷을 수신하고 이를 다시 송신하는 과정이 반복될 경우 브로드캐스팅 스톱이 발생된다.

이를 방지하기 위하여 노드 고유 번호(Robot ID)와 시퀀스번호(Sequence number)를 사용한다<sup>[10]</sup>. 무인기는 이웃 노드들의 메시지 관리를 위하여 시퀀스번호 테이블을 생성하며 이를 바탕으로 이전에 수신된 패킷의 중복 송수신을 방지한다.

0		31	
SRC	DST	SEQ	
CMD	DIR	reserved	
INTEREST			
LATITUDE			
LONGITUDE			

그림 7. 패킷 구조  
 Fig. 7. Packet structure

그림 7은 무인기와 관제센터에 사용되는 패킷 구조를 보여준다. 'SRC'와 'DST' 필드는 메시지의 송신노드와 수신노드를 나타내며, 이웃노드로부터 수신된 메시지는 'DST' 값을 비교하여 중계 또는 획득을 결정한다. 패킷이 생성된 노드로부터 할당된 패킷의 고유 시퀀스번호 'SEQ' 필드는 플러딩에 의해 발생하는 무인기 간 패킷 중복 송수신 방지에 사용된다. 'CMD' 필드는 관제센터의 무인기 제어 요청 및 응답에 쓰이며, 'DIR' 필드는 관제센터로부터 무인기의 수동제어 시 무인기의 이동 진행 방향 정보가 포함된다. 'INTEREST', 'LATITUDE', 'LONGITUDE' 필드는 무인기들의 유해 물질 감시 알고

리즘의 관심, 구성 가상력 계산에 쓰이는 센싱값과 위도, 경도 위치 정보이다.

## 2. 관제센터

### 가. 하드웨어

관제센터는 랩탑과 무선 네트워크 카드로 구성된다. 랩탑은 DELL사의 Vostro-3450로서 IntelCore i5 Dual Core processors, 1333MHz Dual Channel DDR3 4G Memory, Intel Integrated Graphics Media Accelerator HD가 사용된다. 무선 네트워크 카드는 무인기에 연결된 어댑터와 동일한 802.11b/g/n 프로토콜이 지원 가능한 IP-time사의 N300UA를 사용한다.



그림 9. 야외 실험  
Fig. 9. The outdoor experiment



그림 8. 관제 센터의 무인기 상태 감시 및 제어 GUI  
Fig. 8. The GUI to monitor a robot vehicle condition and to control it from ground control center

### 나. 소프트웨어

관제센터는 무인기의 이동을 직접 제어하지는 않지만 무인기의 현재 위치와 수집하는 센싱 값을 수신하여 표시하는 기능을 수행한다.

그림 8은 관제센터의 무인기 관리 프로그램을 나타낸다. GUI는 MFC(Microsoft foundation class)로 제작된다. Javascript 기반 Googlemap-API를 포함하여 무인기의 위치를 표시한다. 무인기의 위치 정보와 센싱 정보를 텍스트로 나타내며, 관제센터와 무인기의 메시지 송수신 상태를 오른쪽 상단 상태창에 보여준다. 또한 무인기의 알고리즘 시작과 중단 기능, 비상상황 발생 시 무인기의 수동 조작 기능을 관리한다.

## IV. 실험 및 결과

본 절에서는 다수의 무인기를 이용한 이동센서네트워크 야외 테스트베드 실험 설정을 기술한다. 또한 가중 커버리지와 무인기의 이동 경로를 통해 성능 결과를 논의한다.

장소는 대학캠퍼스 야외의 경기장에서 진행하였다. 실험에는 4대의 무인기와 랩탑이 쓰이며 장착된 무선 네트워크 인터페이스는 동일한 네트워크 식별자(SSID)내에서 802.11n과 Ad-hoc모드를 사용하였다. 무인기들이 관제센터의 시작 명령이 수신된 시점을 0초로 약 360초 동안 실험이 진행되었다. 신호 발생기와 무인기 대형과의 거리는 약 20M정도 이격된다.

야외 실험은 실제 유해 물질을 이용함에 있어 안전과 위험성이 문제되어 실험에 큰 제약이 있으므로 야외 실험에 제약이 없는 신호 발생기를 이용하여 유해물질 농도를 모의한다. Knote 센서모듈의 주기적인 신호 발생을 통해 거리에 따른 수신신호세기(RSSI:Received Signal Strength Indication)값으로 센싱 값(유해물질 농도)을 대체하였다.

야외 테스트베드 실험에서 무인기들의 정보 메시지 교환 시 위치 정보는 위도와 경도, 센싱 값은 수신신호세기를 사용하여 가상력을 계산하였다. 시간이 경과함에 따라 점차 무인기 대형이 신호 발생기 주변으로 이동하였으며 거리 유지를 통해 센서 네트워크의 센싱 커버리지 최대화를 아래 결과를 통해 확인한다.

### 1. 가중 커버리지(Weighted Coverage) 계산

유해 물질 감시 알고리즘을 이용한 센서 네트워크의

성능 측정은 감시 지역 무인기들의 커버리지 면적과 거리 당 센싱 값을 이용한 가중 커버리지를 사용한다. 그러나 무인기의 센싱 범위에 포함된 모든 연속 된 지점에서 신호발생기로부터 수신신호세기를 측정하는 것은 현실적으로 불가능하다. 그러므로 일정거리마다 수신신호세기 측정값으로 최소 자승법에 따른 식을 도출한다. 도출된 식을 이용하여 거리에 따른 수신신호세기를 추정한다. 가중 커버리지 계산 시 무인기의 센싱 범위에 포함된 임의의 지점 수신신호세기는 수신신호세기 추정값을 사용한다.

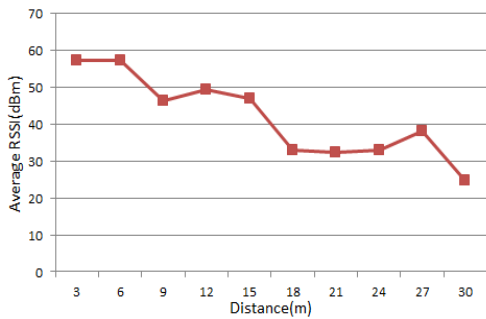


그림 10. 센서 거리 당 평균 RSSI 세기  
 Fig. 10. The average RSSI power per meters

그림 10은 Kmote 센서모듈의 일정거리마다 측정된 수신신호세기의 평균값을 나타낸다. 고정 센서와 이동 센서를 이용하여 약3M 거리를 주기로 수신신호세기를 최대 30M까지 측정한다. 신호는 초 당 1회 발생하며 각 거리 당 250회 신호를 수신하였다.

식 (5)은 센서모듈 간 거리에 따른 수신신호세기 평균값에 최소 자승법(Least Square Method)을 이용한 식이다. 오차를 최소화하여 거리 당 RSSI 세기 근사 값을 추정한다.

$$RSSI_{approx} = -1.127 * d + 60.495 \quad (5)$$

$d$ 는 현재 위치를 기준으로 신호발생기까지의 거리를 나타낸다.

식 (6)은 거리에 따른 수신신호세기 근사 값을 이용하여 센싱 값을 얻기 위한 식이다.

$$InterestValue = \frac{1024 * RSSI_{approx}}{Max\_RSSI_{approx}} \quad (6)$$

센싱 값은 두 센서모듈 간 거리차가 0일 때 센싱 최대값 1024를 기준으로 수신신호세기 근사값( $RSSI_{approx}$ )에 의해 계산된다.

가중 커버리지 계산 시 시간에 따른 무인기와 신호 발생기의 위치 정보를 2차원 평면좌표로 변환한다. 2차원 평면은 정사각형(1cm × 1cm)의 블록으로 가른다. 무인기의 센싱 범위 내에 블록의 중점이 포함되면 커버리지에 속함을 뜻하며 블록의 센싱 값은 중점과 신호 발생기의 거리를 기준으로 계산된다. 무인기들의 센싱 범위에 포함된 블록의 센싱 값(Interest Value)의 합산으로 가중된 커버리지가 계산된다.

$$WeightedCoverage = \sum_{i=0}^n INT_i * BlockSize \quad (7)$$

식 (7)은 전체 블록에서 무인기의 센싱 범위에 포함된  $n$ 개의 블록 중  $i$  번째 블록의 Interest Value( $INT$ )의 전체 합과 블록 넓이를 곱한 가중된 커버리지의 크기를 나타낸다.

## 2. 결과

그림 11은 감시 지역에 놓인 다수의 무인기들의 시간 변화에 따른 가중된 커버리지 크기이다.

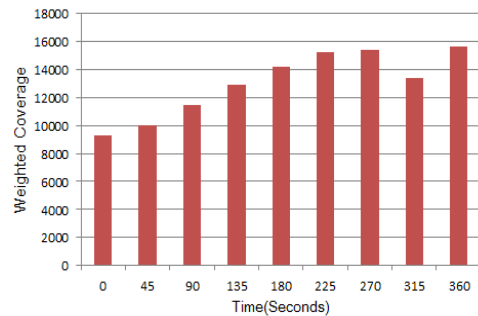


그림 11. 시간 주기 당 가중된 커버리지 크기  
 Fig. 11. The weighted coverage per seconds

그림 12는 감시 지역에 시작지점으로부터 센싱 최대 지점에 접근하는 무인기들의 시간 별 이동경로 궤적을 나타낸다. 각 경로의 점과 점 사이의 시간은 45초 주기이다.

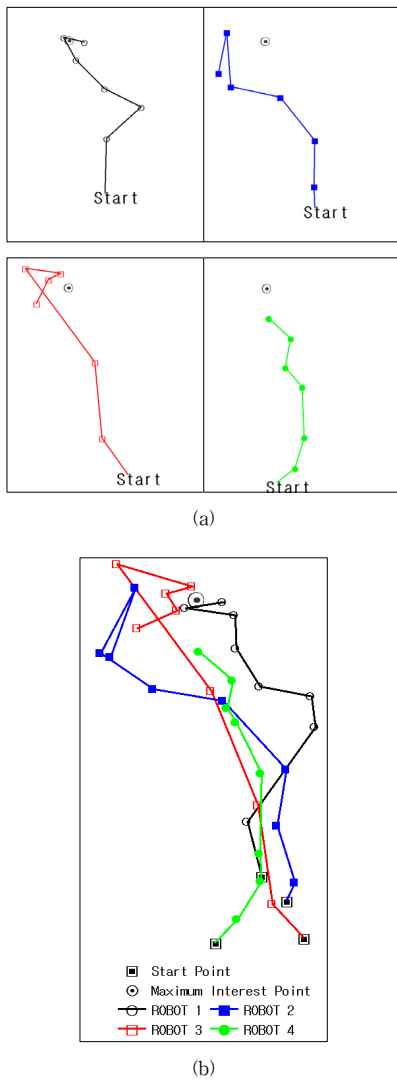


그림 12. (a) 각 무인기의 이동 경로, (b) 전체 이동 경로  
 Fig. 12. (a) The moving path of each robot vehicles, (b) The total moving path

그림 12.(a)에서 고정된 신호 발생기와 시간 흐름에 따른 개별 무인기의 위치 변화를 나타낸다. 0초에서 225초까지는 무인기들의 센싱 값과 이웃 간 거리 비교를 통해 신호 발생기로 점차 접근한다. 무인기와 신호 발생기의 거리차가 좁혀짐에 따라 무인기의 센싱 영역 내에 센싱 값도 증가하며 가중된 커버리지도 증가함을 그림 11을 통해 알 수 있다. 225초에서 270초까지는 신호 발생기에 도달하여 주변 지역을 감시한다. 270초에서 315초 사이 가중된 커버리지의 급격한 감소 요인은 그림 12.(b)에

서 볼 수 있듯 무인기들이 한 지점으로 모여 무인기 간 센싱 범위가 겹쳐진다. 315초 이후 360초 까지 신호 발생기 주변에 밀집된 다수의 무인기는 이웃 노드와의 거리 유지를 위해 무인기 간 자발적 척력이 발생한다. 시간이 경과함에 따라 무인기들의 확산과 거리 유지로 인해 가중된 커버리지의 증가함을 그래프로 볼 수 있다.

## V. 결론

본 논문에서는 다수의 무인기를 이용하여 인력 접근이 힘든 오염지역 접근 및 감시 센서 네트워크를 제안하였다. 가상력 기반 유해 물질 감시 알고리즘은 주변 센싱 정보 교환을 통한 오염지역 접근과 이웃 무인기와 거리 유지하여 최적 커버리지 획득한다. 무인기와 센서가 탑재된 다수의 무인기와 관제센터를 이용하여 이동센서네트워크 테스트베드 구축하였다. 야외 실험 결과 다수의 무인기는 시간이 흐름에 따라 감시지역의 센싱 최대치 지점을 향해 자발적 접근한다. 또한 센싱 최대 지점을 기점으로 높은 가중 커버리지를 유지하며 주변을 감시함을 확인하였다.

## References

- [1] P. Benavidez, M. Jamshidi, "Mobile Robot Navigation and Target Tracking", Proc. of the 2011 6th International Conference on System of Systems Engineering, Albuquerque, New Mexico, pp.299-304, 2011.
- [2] T. Han, Y. Seo, "Emergency Situation Detection using Images from Surveillance Camera and Mobile Robot Tracking System", The Journal of The Institute of Internet, Broadcasting and Communication(JIIBC) VOL. 9, No. 5, pp. 101-107, 2009.
- [3] Y. Seo, "Development of Network based Remote Surveillance System Using Omni-Directional Mobile Robot", The Journal of The Institute of Internet, Broadcasting and Communication(JIIBC) VOL. 10 No. 4, pp.91-97, 2010.
- [4] S. L. Smith, D. Rus, "Multi-Robot Monitoring in Dynamic Environments with Guaranteed Currency of Observations", 49th IEEE Conference on

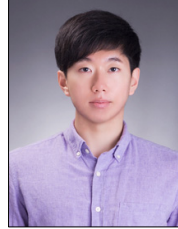


Decision and Control, pp.514-521, 2010.

- [5] A. Renzaglia, L. Doitsidis, A. Martinelli, E. B. Kosmatopoulos, "Adaptive-based Distributed Cooperative Multi-Robot Coverage", American Control Conference (ACC), pp.468-473, 2011.
- [6] A. Derbakova, N. Correll, D. Rus, "Decentralized Self-Repair to Maintain Connectivity and Coverage in Networked Multi-Robot Systems", IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp.3863 - 3868, 2011.
- [7] D. V. Le, H. Oh, S. Yoon, "VirFID: A Virtual Focce(VF)-based Interest-Driven moving phenomenon monitoring scheme using multiple mobile sensor nodes", Ad Hoc Networks, 2014, <http://dx.doi.org/10.1016/j.adhoc.2014.12.002>
- [8] Q. Zhang, G. Sobelman, T. He, "Gradient-driven target acquisition in mobile wireless sensor networks", Second International Conference on Mobile Ad-hoc and Sensor Networks, pp. 365-376, 2006.
- [9] R. Olfati-Saber, "Flocking for multi-agent dynamic systems: Algorithms and theory", IEEE Transactions on Automatic Control 51, 401 - 420, 2006.
- [10] The Open Platform for Robotic Services(OPRoS) <http://www.opros.or.kr/>
- [11] D. B. Johnson, D. A. Maltz, "Dynamic source routing in adhoc wireless networks," in Mobile computing Chapter 5., 1996.
- [12] C. E. Perkins, P. Bhagwat, "Highly Dynamic Destination-Sequenced Distance-Vector(DSDV) Routing for Mobile Computers", ACM, pp.234 -244, 1994.
- [13] C. E. Perkins, E. M. Royer, "Ad Hoc On-Demand Distance Vector Routing", in Proc. of the 2nd IEEE Workshop on Mobile Computing Systems and Applications, pp. 90-100, 1999.

## 저자 소개

### 천 정 명(준회원)



- 2014년 2월 : 울산대학교 컴퓨터정보통신공학과 졸업
- 2014년 3월 ~ 현재 : 울산대학교 전기전자컴퓨터공학과 석사 과정  
 <주관심분야 : 애드혹네트워크, 이동통신, 임베디드 시스템>

### 김 사 목(준회원)



- 2005년 3월 ~ 현재 : 울산대학교 컴퓨터정보통신공학과 학사 과정  
 <주관심분야 : 애드혹네트워크, 모바일 네트워크, 유비쿼터스>

### 이 상 후(준회원)



- 2009년 3월 ~ 현재 : 울산대학교 컴퓨터정보통신공학과 학사 과정  
 <주관심분야 : 애드혹네트워크, 모바일 네트워크, 유비쿼터스>

### 윤 석 훈(정회원)



- 2000년 2월 : 인하대학교 자동차공학과 공학사
- 2005년 6월 : 뉴욕주립대 (SUNY at Buffalo) 컴퓨터공학석사
- 2009년 9월 : 뉴욕주립대 (SUNY at Buffalo) 컴퓨터공학박사
- 2009년~ 2011년 : LIG 넥스원 책임연구원
- 2011년 ~ 현재 : 울산대학교 전기공학부 조교수  
 <주관심분야 : 애드혹네트워크, 협력형 로봇네트워크, 수중통신망, 전술통신망>

※ 이 논문은 2014년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임 (No. NRF-2014R1A1A1A1003732)