

<http://dx.doi.org/10.7236/IIBC.2016.16.4.97>

IIBC 2016-4-15

대규모 공중무인기를 이용한 가상력 기반 재난 감시 네트워크

Virtual Force(VF)-based Disaster Monitoring Network Using Multiple UAVs

천정명*, 윤석훈**, 김대영***

Jeongmyong Chun*, Seokhoon Yoon**, Daeyoung Kim***

요약 본 논문에서는 넓은 개활지역에서의 신속한 재난 감시 및 탐지를 위하여 대규모 공중무인기로 구성된 협업 감시 네트워크를 고려한다. 관제센터의 한정된 자원은 다수의 공중무인기의 개별 제어에 제한이 있으며 이는 감시네트워크의 성능 저하를 가져온다. 따라서 공중무인기 기반 감시네트워크는 자율적 이동센서네트워크 구축, 재난지역 감시 범위 최대화, 재난발생 특성에 따른 효과적인 대형 변화 방안이 요구된다. 본 논문에서는 가상력을 이용한 대규모 공중무인기의 네트워크 구축 및 효율적 제어 알고리즘을 제안한다. 공중무인기의 회전 움직임을 바탕으로 감시범위의 확장과 네트워크의 분할과 합병을 통해 재난 지역의 효과적인 감시가 가능하다. 시뮬레이션을 이용하여 대규모 공중무인기 기반 협업 감시네트워크는 공중무인기 간 자율적 감시네트워크 구축, 네트워크의 신속한 지역 이동 그리고 넓은 지역의 효율적 감시가 가능하고 높은 이벤트 탐지율(Event Detection Ratio) 획득이 가능함을 보인다.

Abstract In this paper, we consider a cooperative monitoring network, which consists of a large number of UAVs, in order to promptly detect event in a disaster area. A command center may not be able to control each UAV individually due to resource constraints. Therefore, UAVs need to autonomously construct a mobile monitoring network in order to maximize monitoring coverage and to adapt the network formation according to environment changes in the disaster area. To that end, we propose multiple UAVs-based cooperative monitoring schemes that uses virtual forces. In this monitoring scheme, an effective monitoring is enabled by extending monitoring coverage using each UAV's circle movements. The UAVs-based monitoring network can also be splitted or merged in order to increase the monitoring effectiveness. Through simulations, we show that the proposed scheme can effectively monitor a large area and achieve a high event detection ratio.

Key Words : Disaster Monitoring Network, Unmanned Aerial Vehicle, Virtual-Force

1. 서론

대규모 무인기 기반 이동센서네트워크는 인력의 접근

이 제한된 재난 지역 감시 관찰, 이동 목표물 추적, 조난 탐색 및 구조 활동과 같은 다양한 영역에서 활용되고 있으며 지속적인 연구 개발을 통해 활용 범위와 수요가 확

*준회원, 울산대학교 전기전자컴퓨터공학과

**정회원, 울산대학교 전기전자컴퓨터공학과 (교신저자)

***정회원, 창신대학교 소프트웨어공학과

접수일자 : 2016년 5월 12일, 수정완료 : 2016년 7월 12일

계재확정일자 : 2016년 8월 5일

Received: 12 June, 2016 / Revised: 12 July, 2016 /

Accepted: 5 August, 2016

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

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

대 되고 있다^[1,2,3,4].

최근 무인기 분야에서 화두가 되는 공중무인기(Unmanned Aerial Vehicle)는 기존 무인기의 단점인 지리적 환경에 따른 이동 제약과 적용 범위의 한계에 대한 문제점을 보완 할 수 있다. 특히 공중무인기의 기동성은 관제센터 또는 관리자가 원하는 목표 지역의 신속한 위치 이동을 통해 네트워크의 성능을 개선할 수 있다. 복수개의 공중무인기 운용과 협업을 통해 기존 다중 무인기 연구의 성능 개선과 새로운 방식의 문제 접근이 가능하다^[5,6,7,8].

대규모 공중무인기로 이루어진 이동센서네트워크는 기존 지상무인기 기반 네트워크의 지리적 환경에 따른 시스템 성능 저하를 보완할 수 있다. 그러나 관제센터의 한정된 인력과 자원으로 인해 공중무인기 개별 제어에 많은 어려움이 뒤따르며, 이동센서네트워크의 성능에 큰 영향을 미친다. 따라서 대규모 공중무인기 기반 시스템은 이동센서네트워크의 협업 알고리즘을 바탕으로 자율적 네트워크 구축, 제한된 센싱 거리 제약을 극복하는 효율적 지역 감시, 신속한 네트워크 이동 제어 그리고 지형 특성에 따른 네트워크 대형 변화가 요구된다.

본 논문에서는 가상력 기반 대규모 공중무인기들의 협업을 통한 감시 네트워크 구성과 단일 공중무인기의 감시 범위 확장, 네트워크의 분할 및 합병 방안을 제안한다. 가상력(Virtual Force)은 상대좌표계를 가지는 노드가 이웃 노드 간 거리 정보와 루트 노드 정보를 이용하여 계산된 가상의 힘과 방향이다. 가상력은 무인기의 다음 이동에 대한 이동방향과 속도를 결정한다.

제안하는 알고리즘은 공중무인기가 원을 그리는 회전 움직임을 수행하여 단일노드의 감시지역 확장이 가능토록 한다. 이동센서네트워크의 노드들은 이웃노드와 위치 정보, 응집 값 정보를 주기적으로 교환한다. 주변 공중무인기의 정보를 바탕으로 가상력을 계산하며 가상력을 통해 노드의 다음 이동지점을 산출한다. 가상력 계산 시 임계 거리값을 이용하여 이웃노드와의 거리를 유지하며 노드 감시지역의 중복을 최소화한다. 이동센서네트워크의 노드 종류는 중앙에 위치한 루트노드와 루트노드를 제외한 감시노드로 구성되며 네트워크 대형은 루트노드를 중심으로 감시노드들의 밀집된 형태를 이룬다. 지상 관제센터는 루트노드에 명령을 전달하여 이동센서네트워크의 전체 노드를 제어한다.

이벤트 기반 시뮬레이터 MASON^[14]을 사용하여 시간

흐름에 따른 노드들의 움직임을 통한 이동센서네트워크 구성과 지역 감시를 확인한다. 시뮬레이션에 배치된 모든 노드의 시간 별 위치 정보를 기록한다. 세 가지의 이벤트 모델과 노드의 위치 정보를 이용하여 이동센서네트워크의 이벤트 탐지율을 측정한다. 제안된 알고리즘 이외에 무작위 행로와 VirFID 알고리즘의 이벤트 탐지율을 측정하여 비교 및 평가한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 배경연구를 논하고, 3장에서는 공중무인기 기반 네트워크 모델, 4장에서는 재난 감시를 위한 협업 감시 네트워크 구성 알고리즘에 대해 논하며, 5장에서는 성능 비교평가 및 결과 분석, 6장에서 본 논문의 결론을 맺는다.

II. 배경 연구

본 절에서는 기존연구에서 제시한 대규모 공중무인기 기반 협업 임무 알고리즘과 가상력 기반 네트워크 구성 알고리즘에 대해 논한다.

1. 다수의 공중무인기 기반 협업 임무 수행

다수의 무인기 기반 시스템은 적용되는 환경에 따라 재난 지역 감시 관찰, 네트워크 인프라 구축 등에 활용 가능하다^[7,9,10].

Park 외^[7]는 공중무인기 편대를 통한 네트워크 인프라 구축 및 실제 무선 모바일 장치의 데이터 중계가 가능함을 보였다. Sujit 외^[9]은 다수의 공중무인기를 이용하여 산불 초기 감시 및 분산된 산불 감시를 위한 공중무인기 분할 감시를 제안하였다. Wu 외^[10]는 감시지역 분할, 목표물 탐지를 위한 협업 감시, 최적 이동 경로 탐색을 하는 다수의 공중무인기 기반 지역 감시 전략을 제안하였다. 본 논문에서는 대규모 공중무인기 협업을 통한 재난 감시 및 탐지에 초점을 둔다. 또한 지리적 환경과 재난 특성에 따른 다양한 재난 발생 모델을 이용하여 네트워크의 이벤트 탐지율을 측정한다.

2. 가상력 기반 네트워크 구성 알고리즘

대규모 무인기의 자율적 네트워크 구성을 위한 방안으로 가상력을 이용한 연구가 활발히 진행중이다^[11, 12]. Yu 외^[11]는 무선 센서 네트워크에서 노드 간 연결성 유지와 최대 커버리지 획득을 위해 가상력 기반 배치 알고리

증을 제안하였다. VirtualForce(VF)-based Interest-driven^[12]는 가상력을 통해 다수 이동로봇노드의 센싱네트워크 구축 및 최대 센싱커버리지 유지와 동시에 네트워크의 자발적으로 관심 지역 이동이 가능함을 보였다. 또 다수의 무인기 기반 테스트 베드 구축 및 실제 야외실험을 통해 네트워크의 자율적 관심지역 이동과 가중커버리지 최대 값 획득이 가능함을 보였다.

VirFID^[12]에서 사용된 구성 가상력(Formation Virtual Force)은 다수의 노드로 구성된 네트워크에서 노드 간 일정 거리 유지를 통해 노드의 중복 감시지역을 최소화 한다. 가상력 \vec{F} 는 직교좌표계 벡터로서 $\vec{F}=(F_x, F_y)$ 로 표현하며 F_x 는 가상력의 x축 좌표 값, F_y 는 벡터의 y축 좌표 값을 뜻한다. 식 (1)은 노드 i 와 노드 j 간 거리 값 $d(i,j)$ 를 임계 거리 값 ρ 와 비교에 따른 구성 가상력 $F_{ij}^{\vec{F}}$ 를 계산하는 식이다.

$$F_{ij}^{\vec{F}} = \begin{cases} (\eta_a(\rho - d_{(i,j)}) \frac{d_{x(i,j)}}{d_{(i,j)}}, \eta_a(\rho - d_{(i,j)}) \frac{d_{y(i,j)}}{d_{(i,j)}}) & d_{(i,j)} > \rho \\ 0 & d_{(i,j)} = \rho \\ (\eta_r(\rho - d_{(i,j)}) \frac{d_{x(i,j)}}{d_{(i,j)}}, \eta_r(\rho - d_{(i,j)}) \frac{d_{y(i,j)}}{d_{(i,j)}}) & d_{(i,j)} < \rho \end{cases} \quad (1)$$

η_a, η_r 은 구성 가상력의 강도를 제어하는 상수이다. ρ 는 임계 거리 값으로 노드 i 와 노드 j 의 유지 거리를 제어한다. 임계 거리 값 ρ 를 이용하여 노드 간 적절한 거리를 유지함과 동시에 6각형의 대형 유지를 통해 커버리지

홀(Coverage hole)을 제거 할 수 있다.

아래 식 (2)는 보다 센싱값이 강한 지역을 향해 무인기 대형의 자율적 이동을 위한 관심 가상력(Interest Virtual Force)을 계산하는 식이다.

$$F_{ij}^{\vec{I}} = \begin{cases} (\eta_i e^{\frac{-1}{I(i)-I(j)}} \frac{d_{x(i,j)}}{d_{(i,j)}}, \eta_i e^{\frac{-1}{I(i)-I(j)}} \frac{d_{y(i,j)}}{d_{(i,j)}}) & I(i) > I(j) \\ 0 & I(i) = I(j) \\ (\eta_j e^{\frac{-1}{I(i)-I(j)}} \frac{d_{x(i,j)}}{d_{(i,j)}}, \eta_j e^{\frac{-1}{I(i)-I(j)}} \frac{d_{y(i,j)}}{d_{(i,j)}}) & I(i) < I(j) \end{cases} \quad (2)$$

η_i 는 가상력 크기의 강도를 조절하는 상수이다. 관심 가상력 $F_{ij}^{\vec{I}}$ 는 노드 i 의 센싱값 $I(i)$ 과 이웃노드 j 의 센싱 값 $I(j)$ 의 크기를 비교하며 노드 i 가 노드 j 보다 센싱값이 클 경우 j 의 방향으로, 작을 경우 노드 j 의 반대방향으로 관심 가상력 방향을 가지게 된다. 이를 통해 네트워크는 센싱 값이 큰 지역을 향해 이동하게 된다.

본 논문에서는 구성 가상력 계산 시 노드와 노드 사이의 거리 값이 아닌 노드의 감시 영역의 중점 간 거리 값을 이용함으로써 기존 연구와 차이를 보인다. 관심 가상력은 높은 관심 값을 가지는 지역이동 시 노드의 이웃노드의 관심 값에 의존적이며 이는 이동센서네트워크의 신속한 지역 이동과 네트워크 대형 분할에 어려움이 있다. 때문에 기존 제한사항을 극복하기 위해 특정 노드를 중심으로 결집하는 응집 가상력과 단일 노드의 감시 범위 확장을 위한 회전 가상력을 제안한다.

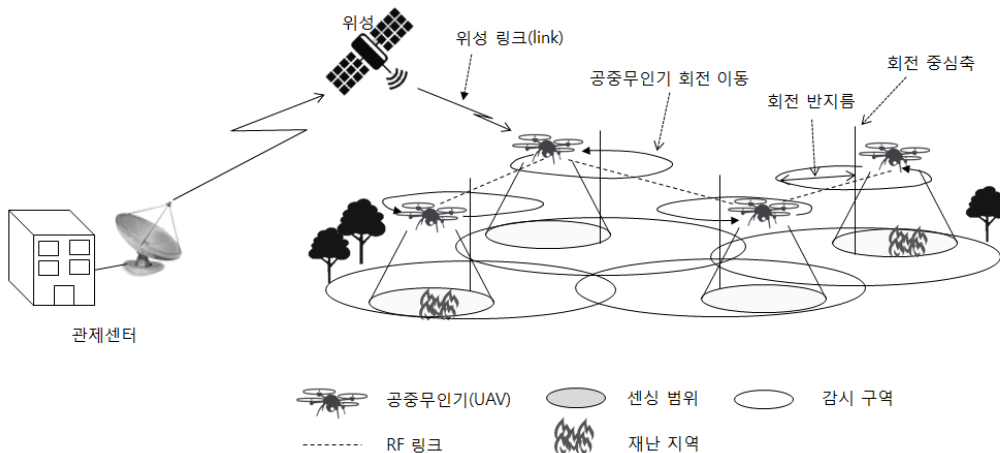


그림 1. 공중무인기 기반 감시네트워크 시스템 구조도
 Fig. 1. UAV based Monitoring Network System Architecture

III. 네트워크 모델

본 논문에서는 대규모 공중무인기로 구성된 이동센서 네트워크를 고려한다. 공중무인기는 크기에 따라 초소형에서 초대형, 프로펠러 유무에 따른 고정익 항공기에서 회전익 항공기 등 상황에 적합한 공중무인기가 사용된다. 공중무인기는 이웃 노드와의 데이터 교환을 위하여 고속 무선 통신 장치가 장착되며 무인기의 위치 정보 획득을 위한 GPS 장치와 재난 지역에 따른 센서가 고려 될 수 있다.

그림 1은 재난 발생 지역에서 다수의 공중무인기 기반 감시 네트워크를 나타낸다. 공중무인기의 센싱범위는 제한적이므로 단일 노드의 효율적인 지역 감시를 위해 중심축을 기준으로 회전 이동한다. 그림 2에서 볼 수 있듯이 공중무인기는 회전 중심축을 기준으로 회전 반지름 R_{circle} 만큼의 거리를 유지하며 회전 이동궤적을 따라 이동한다. 회전 움직임을 통해 단일 노드의 감시 가능한 지역의 범위를 확장한다.

이동센서네트워크의 노드는 루트노드(Root node)와 감시노드(Monitoring node)로 구분된다. 루트노드는 네트워크의 중심에 위치하며 이를 기준으로 감시노드들이 밀집한다. 루트노드는 지상 관제센터로부터 지역 이동, 센서네트워크 분할과 합병 명령을 수신한다. 또한 루트노드의 위치 정보를 주기적으로 모든 감시노드에게 송신하여 꺾임 값 계산에 필요한 정보를 제공한다. 감시노드는 자신의 통신범위에 속한 이웃노드와 위치 정보, 꺾임 값을 교환한다. 교환된 정보는 노드의 지역 가상력 계산에 사용된다.

IV. 재난 감시 네트워크 구성 알고리즘

공중무인기는 이동제약이 적기 때문에 이동궤적을 가지는 비행이 용이하며 이를 통해 단일 노드의 감시 범위의 확장이 가능하다. 예를 들어 일정 시간동안 원을 그리는 패턴 비행은 호버링을 유지하는 비행보다 많은 지역 탐색이 가능하다^[13]. 또한 재난특성과 지리적 환경을 고려할 수 있다. 넓은 개활지역의 재난발생은 경우에 따라 특정지역에서 집중적으로 또는 반복적으로 발생할 수 있으며, 또는 복수개의 재난 지역으로 분포되어 발생할 수 있다. 네트워크 대형 변화가 제한된 단일 네트워크는 여러 재난발생 상황에 효과적인 대처가 어려우며 네트워크

의 성능 저하, 자원 낭비의 비효율성을 가져온다. 때문에 재난지역의 특성에 따라 네트워크의 분할 또는 합병으로 이동센서네트워크를 재구성한다.

본 논문에서는 대규모 공중무인기 기반 자율적 이동센서네트워크 구축, 공중무인기의 회전 움직임을 이용한 단일 노드의 감시 범위 확장, 루트 노드를 중심으로 결집되는 협업 감시 네트워크 구성, 재난 발생 지역 환경에 따른 효율적 감시를 위한 이동센서네트워크의 분할 또는 합병 방안을 제안한다.

1. 원 움직임을 위한 회전 가상력

제한된 센싱 거리를 가진 공중무인기는 패턴 비행을 통해 단일 노드의 감시범위를 확장할 수 있다. 이를 통해 대규모 무인기를 이용하여 보다 넓은 지역의 감시가 가능하다. 본 절에서는 공중무인기가 원 궤적을 따라 이동하기 위한 회전 가상력(Circle Virtual Force)을 설명한다. 아래 식(3)은 노드 i 의 회전 가상력 $F_i^{\vec{C}}$ 를 계산하기 위한 식이다.

$$F_i^{\vec{C}} = (\eta_c S_{uav} \frac{D_x^{next}}{D^{next}}, \eta_c S_{uav} \frac{D_y^{next}}{D^{next}}) \quad (3)$$

회전 가상력의 크기를 제어하는 상수 η_c 와 공중무인기의 현재 이동 속도 S_{uav} 를 통해 회전 가상력의 크기를 계산할 수 있다. D^{next} 는 회전 가상력을 실제거리로 변환한 값이다. 실제거리 D^{next} 와 원 궤적을 그리는 식을 이용하여 회전 가상력의 방향을 계산할 수 있다. D_x^{next} , D_y^{next} 는 실제 거리 값의 x축 값과 y축 값을 나타낸다.

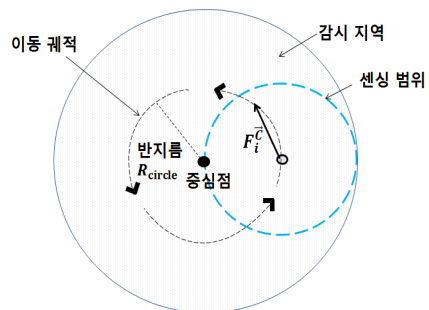


그림 2. 회전 가상력을 이용한 노드의 원 움직임
Fig. 2. Node circular movement using Circle Virtual Force

그림 2는 회전 가상력을 이용한 노드 i 의 회전 이동을 나타낸다. 노드는 원의 중심점을 기준으로 회전 반지름 R_{circle} 만큼 거리를 유지한 채 회전이동 궤적을 따라 움직인다. 원의 반지름은 노드의 원 움직임으로 인한 커버리지 홀이 발생하지 않도록 노드의 센싱 범위 보다 크지 않아야 한다.

2. 구성 가상력을 이용한 네트워크 대형 유지

회전 가상력을 통해 감시지역이 확장된 단일 노드는 이웃노드와의 중복되는 감시지역을 최소화하여 네트워크 커버리지가 최대화됨이 바람직하다. 따라서 구성 가상력을 이용하여 단일 노드의 감시범위 간 일정 거리 이격 및 네트워크 대형 유지를 이룬다.

식(4)는 노드 i 의 구성 가상력 $F_{ij}^{\vec{F}}$ 를 계산하기 위한 식이다.

$$F_{ij}^{\vec{F}} = \begin{cases} (\eta_a(\rho - D_{(i,j)}) \frac{D_x(i,j)}{D_{(i,j)}}, \eta_b(\rho - D_{(i,j)}) \frac{D_y(i,j)}{D_{(i,j)}}) & D_{(i,j)} > \rho \\ 0 & D_{(i,j)} = \rho \\ (\eta_r(\rho - D_{(i,j)}) \frac{D_x(i,j)}{D_{(i,j)}}, \eta_r(\rho - D_{(i,j)}) \frac{D_y(i,j)}{D_{(i,j)}}) & D_{(i,j)} < \rho \end{cases} \quad (4)$$

$D_{(i,j)}$ 는 노드 i 와 노드 j 의 원 중심점의 거리 값을 나타낸다. $D_x(i,j)$ 는 두 노드의 x축 거리 값, $D_y(i,j)$ 는 y축 거리 값을 나타낸다. 상수 η_a, η_r 는 구성 가상력의 세기를 제어한다. ρ 는 임계 거리 값으로 노드 i 와 노드 j 의 유지 거리를 제어한다. 또한 임계 거리 값을 이용하여 노드 간 6각형(Hexagon)의 배치가 가능하며 커버리지 홀(Coverage hole)을 제거 할 수 있다.

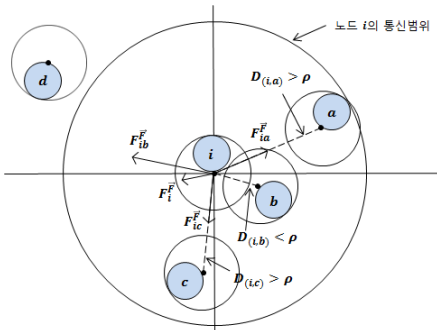


그림 3. 이웃 노드와 거리를 이용한 구성 가상력 계산
 Fig. 3. Calculate formation virtual force using distance between neighbor nodes

그림 3에서 노드 i 는 통신범위 내에 위치한 이웃노드의 정보를 이용한다. 노드 i 와 노드 a 간 원 중심점의 거리 값 $D_{(i,a)}$ 는 임계 거리 값 ρ 보다 크므로 노드 a 를 향한 구성 가상력 $F_{ia}^{\vec{F}}$ 이 발생하며, $D_{(i,c)}$ 또한 임계 거리 값 보다 크기 때문에 노드 c 를 향한 구성 가상력 $F_{ic}^{\vec{F}}$ 이 발생한다. 반대로 노드 b 의 경우 원 중심점의 거리 값 $D_{(i,b)}$ 이 임계 거리 값 보다 작으므로 노드 b 의 반대 방향으로 구성 가상력 $F_{ib}^{\vec{F}}$ 이 발생한다. 노드 i 는 이웃노드들로부터 발생하는 구성 가상력을 총합하여 노드 i 의 구성 가상력 $F_i^{\vec{F}}$ 을 계산한다.

3. 응집 가상력을 이용한 네트워크 결집성

루트노드는 위치 정보와 관계센터의 명령을 모든 노드에게 전파하기 위해 네트워크의 중앙하며 이는 루트노드를 중심으로 감시노드가 둘러싼 응집된 형태가 바람직하다. 따라서 감시노드는 루트노드의 향한 가상력이 발생하며 이를 응집 가상력(Cohesion Virtual Force)이라 한다.

응집 가상력 $F_{ij}^{\vec{C}}$ 는 노드 i 의 응집 값 $C(i)$ 와 이웃노드 j 의 응집 값 $C(j)$ 의 차이를 비교하여 응집 가상력을 계산한다.

$$F_{ij}^{\vec{C}} = \begin{cases} (\eta_s e^{\frac{-1}{C(i)-C(j)}} \frac{D_x(i,j)}{D_{(i,j)}}, \eta_s e^{\frac{-1}{C(i)-C(j)}} \frac{D_y(i,j)}{D_{(i,j)}}) & C(i) < C(j) \\ 0 & C(i) \geq C(j) \end{cases} \quad (5)$$

η_s 는 응집 가상력의 크기를 제어하는 상수이다. $D_{(i,j)}$ 는 노드 i 와 노드 j 의 원 중심점의 거리 값이다. 노드의 응집 가상력은 응집 값이 더 큰 이웃 노드를 향한다. 따라서 모든 감시노드는 최대 응집 값을 가지는 루트노드를 향해 결집된다. 아래 식 (6)은 노드 i 의 응집 값 $C(i)$ 를 계산하기 위한 식이다.

$$C(i) = \begin{cases} C_{\max} \frac{D_{\max} - D_{(i,R)}}{D_{\max}} & D_{(i,R)} < D_{\max} \\ 0 & o/w \end{cases} \quad (6)$$

$D_{(i,R)}$ 은 노드 i 의 원 중심점과 루트노드의 원 중심점 간 거리 값이다. D_{\max} 는 최대 거리를 나타내는 상수이며 A_{\max} 는 최대 응집 값을 가지는 상수이다. 응집 값은 루트노드와의 거리 값에 반비례한다.

4. 가상력 기반 네트워크 구성

본 절에서는 가상력에 의한 노드의 위치 이동과 그에 따른 네트워크 구성을 논한다. 또한 다수의 노드로 구성된 이동센서네트워크는 루트노드의 이동에 따라 네트워크 대형의 이동이 가능함을 설명한다.

네트워크에 속한 모든 노드는 노드의 현재 위치 값과 원 중심점의 위치 값을 관리한다. 가상력을 실제거리로 변환한 값과 두 개의 위치 값을 이용하여 다음 이동 위치를 계산한다. 원 중심점은 구성 가상력과 응집 가상력을 이용한다.

$$F_i^{\vec{L}} = \sum_{j \in N_i} (F_{ij}^{\vec{C}} + F_{ij}^{\vec{F}}) \quad (7)$$

식(7)는 노드 i 의 주변에 위치한 모든 이웃 노드의 응집 가상력 $F_{ij}^{\vec{C}}$ 과 구성 가상력 $F_{ij}^{\vec{F}}$ 을 종합한 지역 가상력 $F_i^{\vec{L}}$ 을 계산하는 식이다.

노드는 네트워크 구성을 위한 지역 가상력과 더불어 회전 가상력 \vec{F}_i^R 또한 최종 가상력 \vec{F}_i^L 를 이용한다.

$$\vec{F}_i = F_i^{\vec{L}} + F_i^{\vec{C}} \quad (8)$$

식 (8)은 노드 i 의 최종 가상력을 계산하기 위한 식이다. 노드의 다음 위치 값과 원 중심의 다음 위치 값은 가상력에 비례하는 거리 변환 식을 통해 이동 위치를 계산한다.

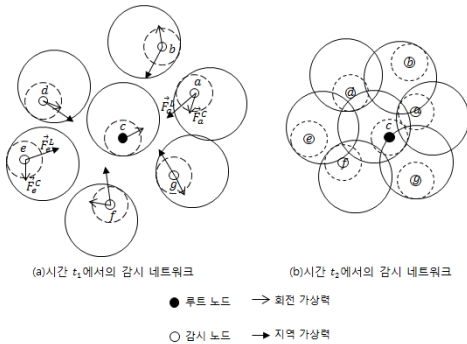


그림 4. 가상력 기반의 네트워크 구성
Fig. 4. Network construction based on virtual force

네트워크 구성 시 초기 노드배치에 따라 노드 간 중복 감시지역이 많은 경우 또는 이격 거리가 긴 비감시지역

이 많은 경우가 발생한다. 커버리지 홀이 다량 발생한 네트워크는 이웃노드를 향함과 동시에 루트노드를 향하는 지역 가상력을 가진다. 즉 지역 가상력을 이용하여 다수의 노드는 시간이 흐름에 따라 커버리지 홀을 제거하는 감시 네트워크를 구성하게 된다.

그림 4는 주변 정보에 의해 계산되는 노드의 가상력과 시간 흐름에 따른 네트워크 대형 변화를 나타낸다. 시간 t_1 일 때, 네트워크의 감시 지역은 회전 가상력에 의한 단일 노드의 감시 범위가 확장되었음에도 불구하고 노드와 노드 사이 간격이 멀기 때문에 커버리지 홀이 발생한다. 시간 t_2 에서 감시노드들은 응집 가상력에 의해 루트노드를 중심으로 응집한 형태를 보인다. 이때 노드와 노드 사이의 거리가 임계 거리보다 짧을 경우 서로 밀어내는 구성 가상력이 발생하여 노드 간 감시 지역 중복을 최소화한다.

관제센터는 루트노드 중심으로 응집하는 재난 감시 네트워크의 성질을 이용하여 네트워크 대형의 지역 이동을 제어한다. 네트워크에 속한 다수의 감시노드는 지속적으로 루트노드를 향한 응집 가상력이 발생하기 때문에 루트노드를 이동시킴으로 감시 네트워크의 이동이 가능해진다.

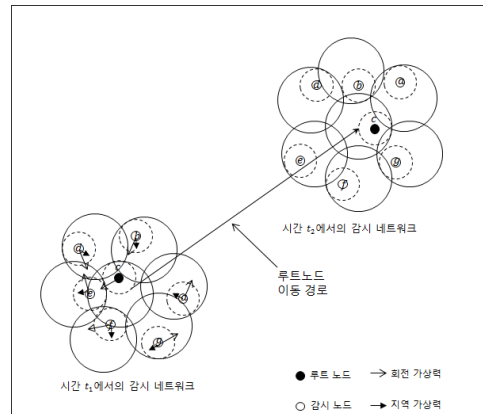


그림 5. 감시네트워크 이동 예시
Fig. 5. Monitoring network movement example

그림 5는 루트노드의 이동을 통해 감시 네트워크 대형의 지역이동을 나타낸다. 시간 t_1 에서 루트노드가 중심되는 감시 네트워크가 구성된다. 관제센터의 지역이동 명령을 통해 루트노드는 목적지를 향해 이동한다. 이때 주변 감시노드는 응집 가상력을 통해 루트노드를 따라간다.

시간 t_2 에서 루트노드가 목적지역에 도착함과 동시에 지역 가상력을 통해 감시 네트워크의 대형을 구성한다.

5. 감시 네트워크의 분할과 합병

넓은 재해 지역 감시는 때때로 다양한 형태의 재해 상황이 발생한다. 단일 감시 네트워크는 대형 변화에 유연하지 못하며 재난 지역이 분산된 재해 지역의 경우 효과적인 감시가 어렵다. 따라서 단일 감시 네트워크의 분할 후 복수개의 무인기 집단을 이용하여 분산된 재해지역 감시 방안이 요구된다.

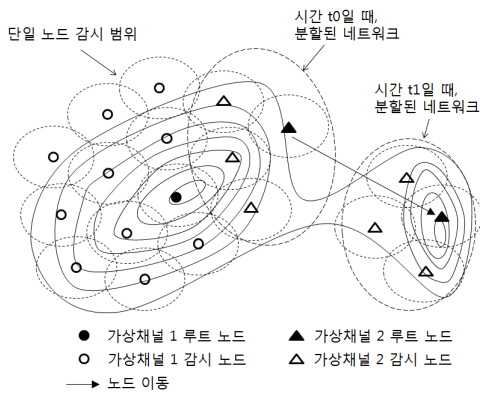


그림 6. 단일 감시 네트워크의 분할
 Fig. 6. Separate a monitoring network

그림 6는 단일 감시 네트워크의 분할 예시를 나타낸다. 지상 관제센터는 감시노드 중 하나를 새로운 루트노드로 선택한다. 새로운 루트노드 주변에 위치한 기존 감시 네트워크의 감시노드를 새로운 네트워크에 포함시킨다. 이때 각 노드는 자신이 속한 네트워크의 식별 값인 가상력 채널을 사용한다. 노드는 하나의 가상력 채널에 속하며 자신이 속한 가상력 채널의 루트 노드와 감시 노드만 가상력 계산에 영향을 주고받는다. 예를 들어 그림 6의 시간 t_0 일 때, 가상력 채널 값 '1'의 감시노드는 주변에 위치한 가상채널 값 '2'의 감시노드로부터 가상력 계산에 어떠한 영향도 받지 않는다.

그림 7은 이동센서네트워크의 분할 알고리즘에 대한 의사코드이다. 다수의 노드로 이루어진 감시 네트워크는 너비우선탐색(BFS)을 이용해 말단 노드 집합(LNS, Leaf Node Set)을 생성한다. 다음 감시가 필요한 새로운 재난 지역으로부터 가까운 순서대로 말단 노드 집합을 정렬한

다. 관리센터는 말단 노드 집합 중 최대로 근접해 있는 말단 노드를 새로운 루트노드를 선택한다. 새로운 루트노드의 가상채널 값은 자신의 노드 번호로 변경한다. 이후 네트워크 감시 지역에 영향이 미치지 않을 정도의 적절한 수만큼 노드를 순차적으로 선택한다. 이때 선택된 노드는 새로운 루트노드의 가상채널과 동일한 가상채널 값으로 변경한다.

Algorithm 1 Network Separation

Predefine:

- N_i : Node i
- N_i^{VC} : Virtual Force Channel of node i
- N_i^{point} : Coordinate of node i
- N^{select} : The number of selection nodes
- P_{area} : Coordinate point of new disaster area

1. **BEGIN**
2. Create the Leaf Node Set(LNS).
3. **FOR** $i \in \{1, \dots, n\}$: $i \leftarrow 1$
4. **if** N_i is the leaf node **then**
5. Add N_i in LNS
6. **END FOR**
7. Sorted LNS \leftarrow Sort(LNS, P_{area})
8. Select new root node(N_j) in Sorted LNS
9. $N_j^{VC} \leftarrow j$
10. **FOR** $i \in \{1, \dots, N^{select}\}$: $i \leftarrow 1$
11. $N_i \leftarrow$ Sorted LNS[i]
12. $N_i^{VC} \leftarrow j$
13. $i \leftarrow i + 1$
14. **END FOR**
15. **END**

Function Sort(Set, P_{area})

Arrange nodes of set in order of short distance between N_i^{point} and P_{area}

END Function

그림 7. 네트워크 분할 알고리즘 의사코드

Fig. 7. Network separation algorithm pseudo-code

또 다른 재해지역 특성으로 광범위한 재난 지역의 경우 소규모 공중무인기로 구성된 이동센서네트워크는 감시가 되지 않는 비 감시 영역을 발생시킨다. 이는 감시 네트워크들의 합병을 통해 네트워크의 감시 지역을 확장하여 비 감시지역을 메울 수 있다.

복수개의 네트워크 합병 시 주변 네트워크는 합병하고자 하는 네트워크와 동일한 가상력 채널로 변경한다. 단일 네트워크는 노드의 가상력 계산에 따라 감시 지역을 확장하게 된다.

V. 실험 및 결과

본 절에서는 시뮬레이터를 이용하여 제안된 알고리즘의 적용 방안, 시뮬레이션에 대한 네트워크 모델, 환경을 기술하며 이벤트 모델을 통해 성능 측정과 결과를 분석한다. 제안된 알고리즘은 이벤트 기반 시뮬레이터 MASON^[14]을 사용하여 노드들 간 움직임 변화를 확인한다. 뿐만 아니라 시간 별 노드의 위치 정보를 기록하여 이벤트 탐지율을 측정에 사용한다. 성능 평가는 제안된 알고리즘 이외에 무작위 행로 알고리즘과 VirFID 알고리즘에 대한 이벤트 탐지율을 측정 및 비교한다.

1. 무인기의 위치 이동

감시 네트워크에 속한 모든 노드는 회전 가상력과 지역 가상력을 이용하여 실제 거리 값으로 변환하여 다음 이동 지점을 계산한다. ΔT_m 은 이동 시간 주기로 무인기는 매 주기마다 거리와 방향을 계산한다.

$$\text{Dist}_C = \min(\eta_d F_i^C \Delta T_m, \frac{S_{\max} \Delta T_m}{2}) \quad (9)$$

식(9)은 회전 가상력을 실제 이동거리 Dist_C 로 변환하는 식이다. 상수 η_d 는 회전 가상력의 강도를 조절하는 상수이다. S_{\max} 는 공중무인기의 최대 속도이다. 공중무인기의 이동 시간 ΔT_m 동안 회전 가상력의 크기가 공중무인기의 최대 이동거리의 절반 보다 작을 경우 회전 가상력을 이용해 Dist_C 를 계산한다. 그렇지 않을 경우 회전 가상력을 환산한 실제 이동거리는 최대 이동거리의 절반만큼 값을 가진다.

$$\text{Dist}_L = \frac{S_{\max} \Delta T_m}{2} e^{\frac{-1}{F^L}} \quad (10)$$

Dist_L 은 지역 가상력을 실제 거리로 변환한 값이다. 지역 가상력의 크기가 커질수록 최대 이동거리의 절반 값에 가까워지며 가상력의 크기에 비례하여 실제 거리

값 Dist_L 이 계산된다.

$$(X_{\text{next}}, Y_{\text{next}}) = (X_{\text{curr}} + \frac{F_x^C}{F^C} \text{Dist}_C + \frac{F_x^L}{F^L} \text{Dist}_L, Y_{\text{curr}} + \frac{F_y^C}{F^C} \text{Dist}_C + \frac{F_y^L}{F^L} \text{Dist}_L) \quad (11)$$

식 (11)은 노드의 다음 이동 위치 좌표 $(X_{\text{next}}, Y_{\text{next}})$ 를 나타낸다. 공중무인기는 현재위치 $(CX_{\text{curr}}, CY_{\text{curr}})$ 에서 회전 가상력 F^C 과 지역 가상력 F^L 의 합하여 다음 위치를 계산한다.

$$(CX_{\text{next}}, CY_{\text{next}}) = (CX_{\text{curr}} + \frac{F_x^L}{F^L} \text{Dist}_L, CY_{\text{curr}} + \frac{F_y^L}{F^L} \text{Dist}_L) \quad (12)$$

식 (12)는 노드의 원 중심점의 다음 좌표 값 $(CX_{\text{next}}, CY_{\text{next}})$ 을 계산하기 위한 식을 나타낸다. 원 중심점은 지역 가상력 F^L 을 이용하여 계산한다.

2. 네트워크 모델

본 논문에서는 다수의 공중무인기 기반 이동센서네트워크를 통해 넓은 개활 지역에서의 감시를 고려한다.

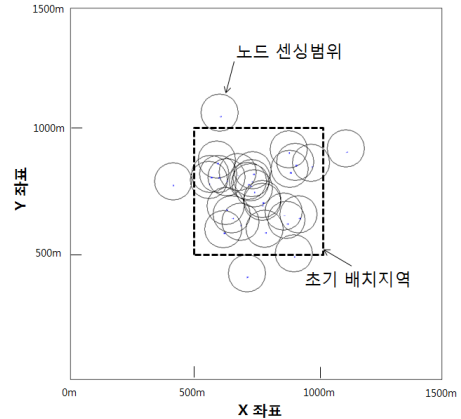


그림 8. 노드의 초기 배치 예시

Fig. 8. Initial node deployment example

그림 8은 시뮬레이션 시 초기 배치지역 범위를 나타낸다. 노드의 초기 배치 지점은 재난지역의 정중앙을 기준으로 가로 500m, 세로 500m의 지역에서 무작위로 배치된다.

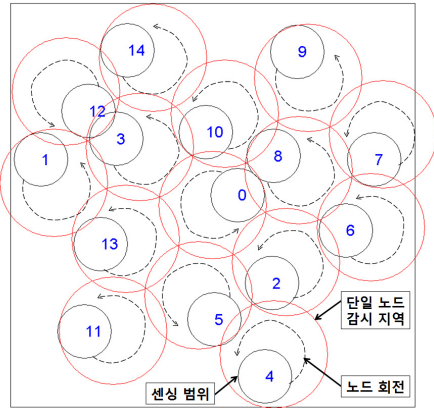


그림 9. 네트워크 구성 및 원 움직임 예시
 Fig. 9. Network construction and circle movement example

그림 9은 다수의 노드를 이용한 재난 탐지 네트워크 구성 및 노드의 원 움직임 예시를 나타낸다. 루트노드(0번)를 중심으로 감시노드들이 밀집하며 거리 유지를 통해 중복 감시지역의 최소화를 가진다. 또한 노드들은 자신의 원 중심점을 기준으로 회전 경로를 따라 이동하여 단일 노드의 감시범위를 확장한다.

3. 이벤트 모델

본 논문에서는 재난발생 특성을 구분하여 세 개의 이벤트 발생 모델을 고려한다. 이벤트는 이동성 유무에 따른 고정형 이벤트모델과 이동형 이벤트모델로 나뉘며, 재난발생 지역의 이벤트 발생 빈도에 차이를 두는 지역 별 편중 이벤트모델로 구분된다.

이벤트 특성은 발생 위치 $E(x,y)$, 이벤트 발생 시점 E^{start} , 이벤트 유지시간 ΔE^{period} 을 가진다. 세 개의 특성은 최소, 최대 범위 내에서 무작위 값을 가지며, 아래 식 (11), (12), (13)를 이용한다.

$$E_i^{start} = T_{sim} * \xi \quad (13)$$

$$\Delta E_i^{period} = \Delta T_{min} + \lambda e^{-\lambda \xi} (\Delta T_{max} - \Delta T_{min}) \quad (14)$$

$$E_i(x,y) = (X_{size} * \xi, Y_{size} * \xi) \quad (15)$$

ξ 는 0과 1사이의 무작위 실수 값이다. 식 (13)은 0초에서 T_{sim} 초 사이에서 i 번째 이벤트의 발생 시점 E_i^{start} 을 계산한다. 식 (14)은 이벤트의 최소 유지 시간 ΔT_{min}

과 최대 유지시간 ΔT_{max} 을 이용하여 i 번째 이벤트의 유지시간 ΔE_i^{period} 을 계산한다. 이때 λ 는 이벤트 평균 유지시간을 조절하는 상수이다. 식 (15)을 이용하여 i 번째 이벤트의 발생 위치 $E(x,y)$ 를 계산한다. X_{size} , Y_{size} 는 시뮬레이션 감시 지역의 가로크기 값과 세로크기 값이다.

가. 고정형 이벤트

고정형 이벤트는 발생 이벤트의 이동속력과 방향이 없는 이벤트 모델이다. 감시지역 전역에서 무작위로 발생하며 이벤트 유지 시간동안 발생 위치에서 고정된다. 고정형 이벤트는 주로 유독가스 노출, 화산폭발 등의 움직임이 없는 이벤트를 나타낸다.

나. 이동형 이벤트

이동형 이벤트는 0m/s에서 10m/s 사이에 속력과 0에서 2π 사이에 이동방향을 가지는 이벤트를 고려한다. 속도는 무작위로 설정되며 이벤트 발생 이후 유지시간 동안 동일한 속도를 가진다. 재난 지역에서의 사람 또는 동물 위치 이동 이벤트를 나타낸다.

다. 지역 별 편중 이벤트

지역 별 편중 이벤트는 광범위한 감시지역 중 집중적으로 발생하는 이벤트 특성을 고려한다. 감시지역은 세 지역으로 분류하며 지역 별 이벤트 발생 비율을 α, β, γ 상수로 조절한다.

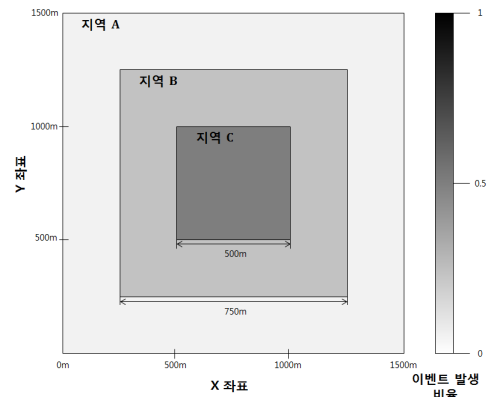


그림 10. 지역 별 편중된 분포 이벤트 예시
 Fig. 10. Regional distribution of events example

표 1. 시뮬레이션 파라미터 설정값
Table 1. Simulation Parameters Value

Parameter	Values
Simulation time	1000s
Sensing Range	100m
Communication Range	200m
Number of UAVs	50
UAV Speed	15m/s
Circle Radius	40m
Field Size	1500m x 1500m
Number of Events	100
ΔT_{min}	5s
ΔT_{max}	30s
ΔT_m	1s
λ	1

그림 10은 지역 별 편중 이벤트 예시를 나타낸다. 각 지역은 이벤트 발생 비율 상수에 따라 이벤트 발생한다. 예를 들어 비율이 1:0:0(α, β, γ)일 경우, 모든 지역의 비율은 동일하며, 비율이 0.5:0.5:0 일 경우, B,C 지역은 A 지역보다 많은 이벤트가 발생한다. γ 비율이 높아질수록 재난 지역의 이벤트는 중앙에 더욱 포진된다.

시뮬레이션 시 공중무인기 개수와 속도 그리고 이벤트 유지 시간을 변화하여 결과를 나타낸다. 기본 값으로 공중무인기는 50개, 속도는 15m/s, 이벤트 평균 유지시간은 30초이다. 공중무인기의 통신거리는 200m, 센싱 거리는 100m이다. 시뮬레이션 시간 동안 100개의 이벤트가 발생된다. 지역 별 편중 이벤트의 비율 상수 α, β, γ 는 각각 0.5, 0.3, 0.2이다.

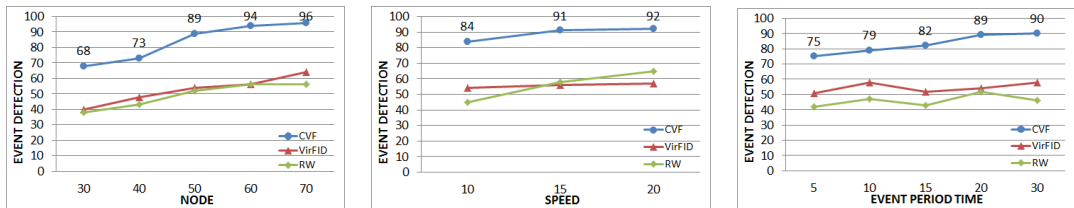


그림 11. 고정형 이벤트 시나리오에 대한 이벤트 탐지율
Fig. 11. Static Event Detection Ratio

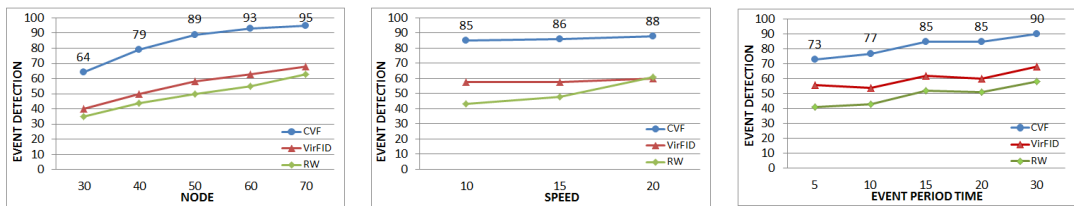


그림 12. 이동형 이벤트 시나리오에 대한 이벤트 탐지율
Fig. 12. Mobile Event Detection Ratio

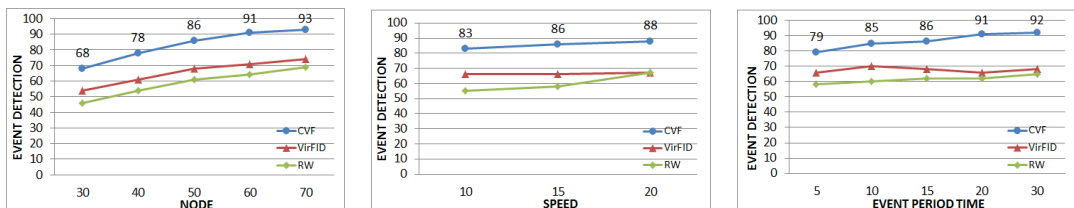


그림 13. 지역 별 편중 이벤트 시나리오에 대한 이벤트 탐지율
Fig. 13. Regional Distribution of Events Detection Ratio

4. 결 과

네트워크의 성능은 시물레이션 시간에 발생한 이벤트 개수와 노드의 센싱 범위 내에 탐지된 이벤트 개수 비율을 측정한다. 시물레이션 시 재난탐지네트워크 알고리즘, VirFID 알고리즘, 임의 행로(Random Walk) 알고리즘이 적용되며. 그림 11, 12, 13는 고정형 이벤트, 이동형 이벤트, 지역 별 편중 이벤트에 따른 네트워크 별 이벤트 탐지율을 나타낸다.

그림 11은 고정형 이벤트 모델에 따른 네트워크 별 이벤트 탐지율을 나타낸다. 이동센서네트워크는 노드를 증가시킴으로 감시네트워크의 감시 범위가 넓어진다. 따라서 이벤트를 탐지 할 확률이 높아진다. 또한 노드와 노드 사이의 중복되는 감시 면적이 커지며 이는 자신노드가 탐지하지 못한 이벤트를 주변 이웃에 의해 탐지 될 확률이 더 높아짐을 의미한다. 무인기의 속도를 증가 시킬 경우 단일 노드의 회전 시간을 단축시킴에 따라 단일 노드의 감시 범위 내에서 발생한 이벤트를 탐지 할 확률이 증가한다. 마찬가지로 이벤트 유지 시간을 증가 시킬 경우 단일 노드의 회전 이동에 의해 탐지 될 확률이 높아진다.

이동형 이벤트 모델은 고정형 이벤트 모델과 유사한 결과를 가진다. 하지만 이벤트 유지 시간을 증가 시킬 경우 네트워크의 비 감시지역에 발생한 이벤트가 감시지역으로 이동 할 가능성이 커지기 때문에 VirFID의 이벤트 탐지율이 증가함을 보인다.

지역 별 편중 이벤트 모델의 경우 VirFID와 RW의 성능이 상승한다. 특히 VirFID는 구성가상력만 노드에 영향을 주기 때문에 감시 지역 중앙에 포진된다. 따라서 감시지역 중앙 집중적으로 이벤트가 발생할 경우 보다 많은 개수의 이벤트를 탐지 가능하다.

VI. 결 론

본 논문에서는 넓은 개활지역의 신속한 재난 탐지를 위해 대규모 공중무인기를 이용한 협업 감시 네트워크를 제안하였다. 공중무인기는 가상력 기반 자율적 이동센서 네트워크 구축, 회전 움직임을 통한 단일 무인기의 감시 범위 확장, 무인기 간 일정거리 유지를 이용한 감시 범위 최대화를 획득한다. 또한 재난 지역 상황에 따른 감시 네

트워크의 분할과 합병으로 효율적인 감시를 가진다. 제안된 알고리즘은 시물레이션 툴을 이용하여 시간 흐름에 따른 네트워크 이동 변화를 관찰한다. 제안된 알고리즘 외에 무작위 행로 알고리즘과 VirFID 알고리즘의 이벤트 탐지율을 측정하며 성능 결과 값을 비교 분석한다. 시물레이션 결과 공중무인기 기반 자율적 네트워크 구축, 단일 노드의 회전 움직임 그리고 감시 지역의 확장이 가능하였으며 기존 알고리즘에 비해 높은 이벤트 탐지율을 획득함을 확인하였다.

References

- [1] 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, 10.1109/ICRA.2011.5980367.
- [2] 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, 10.1109/CDC.2010.5717132.
- [3] T. Han, Y. Seo, "Emergency Situation Detection using Images from Surveillance Camera and Mobile Robot Tracking System", The Journal of The Institute of Webcasting, Internet Television and Telecommunication VOL. 9 No. 5, pp.101-107, 2009.
- [4] J. Chun, S. Kim, S. Lee, S. Yoon, "A Hazardous Substance Monitoring Sensor Network Using Multiple Robot Vehicle", The Journal of The Institute of Internet, Broadcasting and Communication VOL. 15 No. 1, pp.147-155, 2015, 10.7236/IIBC.2015.15.1.147.
- [5] A. Garcia, E. Mattison, K. Ghose. "High-speed vision-based autonomous indoor navigation of a quadcopter." Unmanned Aircraft Systems (ICUAS), 2015 International Conference on. IEEE, 2015, 10.1109/ICUAS.2015.7152308.
- [6] T. Shmelova, O. V. Shostak, "System for monitoring external pilot emotional state during UAV control." Actual Problems of Unmanned

Aerial Vehicles Developments (APUAVD), 2015 IEEE International Conference. IEEE, 2015, 10.1109/APUAVD.2015.7346634.

[7] S. Park, J. Lee, H. Kim, "Net-Drone: Network infra construction using squadron", The Journal of The Korean Institute of Communication Sciences VOL. 33 No. 2, pp.107-116, 2016.

[8] D. Orfanus, E. de Freitas, F. Eliassen, "Self-Organization as a Supporting Paradigm for Military UAV Relay Networks", IEEE COMMUNICATIONS LETTERS, 2016, 10.1109/LCOMM.2016.2524405.

[9] P. Sujit, D. Kingston, R. Beard, "Cooperative forest fire monitoring using multiple UAVs", Decision and Control, 2007 46th IEEE Conference, 2017, 10.1109/CDC.2007.4434345.

[10] Q. Wu, S. Zhou, S. Yan, W. Liu, "A cooperative region surveillance strategy for multiple UAVs", Guidance, Navigation and Control Conference, 2014, 10.1109/CGNCC.2014.7007446.

[11] X. Yu, W. Huang, J. Lan, X. Qian, "A novel virtual force approach for node deployment in wireless sensor network", Distributed Computing in Sensor Systems, 2012, 10.1109/DCOSS.2012.32.

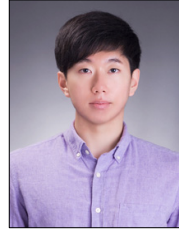
[12] D. V. Le, H. Oh, S. Yoon, "VirFID: A Virtual Force(VF)-based Interest-Driven moving phenomenon monitoring scheme using multiple mobile sensor nodes", Ad Hoc Networks, 2014, 10.1016/j.adhoc.2014.12.002

[13] Y. Kobayashi, K. Otsubo, S. Hosoe, "Design of Decentralized Capturing Behavior by Multiple Mobile Robots", Distributed Intelligent Systems: Collective Intelligence and Its Applications IEEE Workshop, 2006, 10.1109/DIS.2006.23.

[14] Multi Agent Simulator Of Network(MASON) <http://cs.gmu.edu/~eclab/projects/mason/>

저자 소개

천 정 명(준회원)



- 2014년 2월 : 울산대학교 컴퓨터정보통신공학과 졸업
- 2014년 3월 ~ 현재 : 울산대학교 전기전자컴퓨터공학과 석사 과정

<주관심분야 : 에드혹네트워크, 이동 통신, 임베디드 시스템>

윤 석 훈(정회원)



- 2000년 2월 : 인하대학교 자동화공학과 공학사
- 2005년 6월 : 뉴욕주립대 (SUNY at Buffalo) 컴퓨터공학석사
- 2009년 9월 : 뉴욕주립대 (SUNY at Buffalo) 컴퓨터공학박사
- 2009년 ~ 2011년 : LIG 넥스원 책임연구원

• 2011년 ~ 현재 : 울산대학교 전기전자컴퓨터공학과 조교수
<주관심분야 : 에드혹네트워크, 협력형 로봇네트워크, 수중통신망, 전술통신망>

김 대 영(정회원)



- 경희대학교 컴퓨터공학과 공학박사
- 2010년 10월 ~ 2013년 4월 : LIG넥스원 통신연구센터 선임연구원
- 2013년 4월 ~ 2015년 4월 : AirPlug, Inc. 선임연구원
- 2015년 4월 ~ 2015년 8월 : 경북IT융합산업기술원 선임연구원

• 2015년 9월 ~ 현재 : 창신대학교 소프트웨어공학과 조교수
<주관심분야 : 무선 에드혹 네트워크, WiFi, 임베디드시스템 소프트웨어>

※ 이 논문은 2014년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임 (No. NRF-2014R1A1A1003732)