

論文

J. of The Korean Society for Aeronautical and Space Sciences 42(6), 461-467(2014)

DOI: <http://dx.doi.org/10.5139/JKSAS.2014.42.6.461>

통신중계를 위한 다수 소형 무인항공기의 최적배치

정준호**, 김승균*, 오현동***, 석진영**

Optimal Positioning of Small UAVs for Communication Relay

Junho Jeong**, Seungkeun Kim*, Hyondong Oh*** and Jinyoung Suk**
 Department of Aerospace Engineering, Chungnam National University*,**
 Department of Computing, University of Surrey, UK***

ABSTRACT

This paper investigates using small UAVs as communications relay nodes for expanding communications links and improving communications quality, primarily for a fleet of ground or navy vessels. An airborne relay in ground/maritime space can effectively connect to units operating over the horizon, beyond normal communication range, or under limited satellite communication environment. Even if the equipment development is mature for communications relay, where to locate UAVs for efficient relay is still a pending question. With this background, this paper will develop high-level deployment algorithms to optimize the location of UAVs for improving the connectivity of a wireless network among a fleet of ground or navy vessels.

초 록

본 논문은 지상이나 해상의 선단 간의 통신 품질을 향상시키기 위하여 소형 무인항공기를 통신중계의 노드로 활용하기 위한 연구를 다룬다. 지상과 해상 공간에서의 무인항공기에 의한 공중 통신중계는 일반적인 통신 한계거리를 넘어서거나 혹은 제한된 위성통신만 가능한 경우에 선단 간의 통신을 효과적으로 보장할 수 있다. 이러한 공중 통신중계를 위한 전자장비는 이미 개발과 양산이 이루어지고 있지만 효과적인 통신중계를 위해 무인항공기를 운용할 지점이나 궤적을 설계하는 연구는 미비하다고 볼 수 있다. 이러한 문제를 해결하기 위하여, 본 논문은 선단 사이의 무선통신 성능을 향상시키기 위한 무인항공기의 배치를 최적화하기 위한 알고리즘을 제안한다.

Key Words : Unmanned Air Vehicle(무인항공기), Communications Relay(통신중계), Trajectory Planning(궤적설계), Global Message Connectivity(글로벌 메시지 연결), Minimum Spanning Tree(최소 스패닝 트리)

1. 서 론

전통적으로 통신중계는 정찰, 감시, 전투 지원 등 주요 임무 수행을 위해 배치된 무인항공기의

보조 임무로 간주되었다. 그러나 최근 기술발전 에 따른 무인항공기의 경량화, 강건화, 자율화를 통해 전장에서 통신중계 임무 수행이 가능하게 되었다[1]. 무인항공기 자체의 가격을 넘을 정도

† Received: January 17, 2014 Accepted: May 20, 2014

* Corresponding author, E-mail : skim78@cnu.ac.kr

<http://journal.ksas.or.kr/>

pISSN 1225-1348 / eISSN 2287-6871

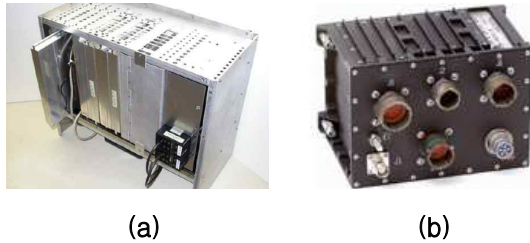


Fig. 1. Equipments for VHF/UHF communications relay of Northrop Grumman (a), LMAR of Thales (b) [captured from the websites of Northrop Grumman and Thales]

로 고가인 전자광학 센서장비와는 달리 공중 통신중계를 위한 탑재장비는 소규모의 군 통신부대가 운용할 수 있을 정도로 비교적 저가로 생산이 가능하다. 또한, 무인항공기를 이용한 공중 통신중계는 현재 Predator, ERMP (Extended Range Multi Purpose UAV), Fire Scout, Hunter와 같은 전술급 무인항공기에 사용되고 있는 기존의 통신방식을 대체할 수 있다[2]. Fig. 1(a)에서 도시한 Northrop Grumman의 통신중계 장비는 VHF (Very High Frequency)와 UHF (Ultra High Frequency) 대역에 있는 전형적인 파형을 처리 가능한 4개의 통신 소프트웨어 프로그램 채널을 제공한다. 위 채널들은 통신채널로 독립적인 사용이 가능하며, 지대지/공대공/지대공 중계를 위한 채널로 설정 할 수 있다. 또한, 실시간 영상과 같은 고속 데이터 통신을 위한 별도의 L-Band 중계기를 포함하고 있다. Thales에서는 영국 Watchkeeper 프로그램을 위해 LMAR (Lightweight Multiband Airborne Radio)의 전용 버전을 개발하고 있으며, 이는 Fig. 1(b)에서 형상을 확인 할 수 있다. 상기 모듈은 독립적인 듀얼 통신을 사용하거나 크로스밴딩 구성으로 재전송 처리 할 수 있도록 설계되어있다.

미 해군연구소는 최근 Dragon Warrior라는 회전익항공기를 이용하여 모함과 지상의 상륙부대 및 수륙양용 장비들 간의 통신중계를 구축하기 위한 연구를 진행하고 있으며, 통신중계 플랫폼에 대한 요구조건과 운용개념은 Fig. 2와 같다. 국내에서는 최근 항공우주연구원에 의해 개발이 완료된 무인기를 통신중계 장비로 활용하는 것이 검토되고 있으며, 국방과학연구소에서는 '경전투용 다중로봇 통합운용/제어기술 개발' 과제 수행의 일환으로 가시선이 보장되지 않는 산악지형에서 다수의 지상로봇 사이에서 무인항공기를 이용한 공중 통신중계를 위한 연구를 수행하고 있다.



Objective Performance:

- Comms range: 50 nmi (90km)
- Internet Protocol rate: 1 Mbps
- 28-35 pounds in payload weight

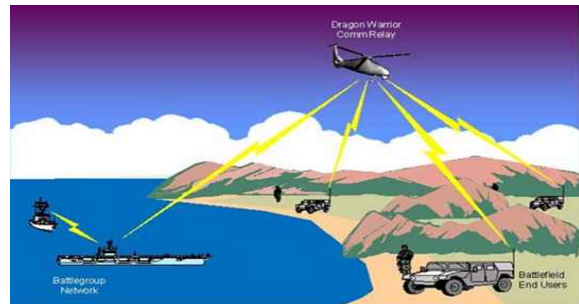


Fig. 2. Dragon Warrior's objective performance and the operational concept [captured from the website of the US NRL]

통신중계 최적화를 위해서 단일 무인항공기를 이용한 모바일 임시 네트워크 (MANET, Mobile Ad-hoc NETWORK) 연구가 수행되었으며[3], 이종 소형 무인항공기들의 meshed ad-hoc를 경험적 통신모델을 통한 네트워크 방법이 제안되었다[4]. 고정익 무인항공기의 방향각을 고려하여 통신중계를 위한 최적화 기법과 handoff 알고리즘을 이용한 집중형 네트워크 토폴로지 방법이 제안되었으며[5], 단일 무인항공기를 이용해 지상국과 이동하는 단일 플랫폼에 대한 dual-hop 중계에 대한 시뮬레이션 연구가 수행되었다[6]. 하지만, 분산화 통신중계를 위한 복수 무인기 위치 최적화 연구는 미비한 실정이다.

본 논문에서는 지상이나 해상의 선단 간의 통신 품질을 향상시키기 위하여 소형 회전익 무인항공기를 통신중계 노드로 활용하기 위한 시뮬레이션 연구를 수행한다. 지상과 해상 공간에서의 무인항공기에 의한 공중 통신중계는 일반적인 통신 한계거리를 넘어서거나 제한된 위성통신만 가능한 경우에서 선단간의 효과적인 통신을 보장할 수 있다. 이러한 공중 통신중계를 위한 전자장비는 이미 개발과 양산이 이루어지고 있지만 효과적인 통신중계를 위해 무인항공기를 운용할 지점이나 궤적을 설계하는 연구는 미비하다고 볼 수 있으며, 대부분의 연구가 단일 무인항공기 기반으로 이루어져 있어 다수 무인항공기의 배치



Fig. 3. Conceptual maritime MANET

고려한 연구가 필요하다. 이러한 문제를 해결하기 위해서 본 논문에서는 선단 사이의 무선통신 성능을 향상시키기 위한 무인항공기의 배치를 최적화하기 위한 알고리즘을 제안하며, 함정 간 효과적 통신중계를 위한 무인항공기 최적 배치 시뮬레이션을 무인항공기의 유/무, 개체수에 따라 진행한다. 통신의 연결성은 모든 선단 사이의 명령이 전달되는 것을 보장하기 위하여 모바일 임시 네트워크의 관점에서 글로벌 메시지 연결로 모델링하며, Fig. 3에서 개념도를 확인 할 수 있다. 본 논문에서 제안한 알고리즘은 지상/해상 선단간의 통신 품질을 향상시키기 위한 무인항공기의 최적화된 위치를 자동으로 결정해주며, 이를 통해 운용자의 업무량을 크게 감소시켜 임무수행의 효율성을 극대화 할 수 있다. 또한, 통신중계를 활용한 민수분야에서도 다양하게 적용 될 수 있다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 현실적인 무선통신 모델과 최소 스패닝 트리(MST, Minimum Spanning Tree) 개념을 이용한 통신 연결 모델링, 그리고 효율적인 통신 연결을 위한 무인항공기 최적화 배치 알고리즘을 제시한다. 3장에서는 공중 통신중계를 위한 무인항공기의 운용 대수에 따른 다수 선단 간 통신 연결성 결과를 수치적 시뮬레이션을 통해 나타낸다. 마지막으로, 결론 및 향후 연구는 4장에 기술한다.

II. 통신 네트워크 모델링 및 무인항공기 위치 최적화

본 연구는 소형 무인항공기를 지상 및 해상 선단 간의 자동화된 통신중계 전략을 개발하는

것을 목표로 하며, 무인항공기의 경로계획에 관한 사전 연구[1]를 확장한다. 참고문헌 [1]에서는 지상기지국과 비행경로가 미리 알려져 있는 아군 유인비행단 사이의 통신을 중계하기 위한 무인항공기 군집의 사전 경로계획을 다루었으며, 단순히 통신거리에 기반한 통신 가능성의 유무만을 제한조건으로 고려하였다. 각 노드는 송수신이 가능하며, 다중통신이 가능한 환경이라 가정한다. 이와는 달리 Adhoc 통신의 개념으로 무인항공기 노드의 통신중계 뿐만 아니라 연결 가능한 선단간의 통신품질 향상을 위한 무인항공기의 최적화 배치 알고리즘을 고려한다. 이를 위하여, 각 선단들의 통신은 모바일 임시 네트워크를 통해 구현한다. 무인항공기를 이용한 통신중계의 효용성 판단을 경험적 접근방법으로 수행한 기존 연구들 [7-10]과는 다르게, 본 연구는 선단간의 무선 통신 시 통신품질 향상과 통신영역 확대를 위한 무인항공기 배치 최적화를 위해 수학적 모델과 최적화 기법을 활용한다.

2.1 현실적 무선 통신 모델

무인항공기를 활용한 대부분의 기존 통신중계 연구들은 통신 거리에 따른 간략화 된 무선통신 모델을 사용하였다. 본 연구에서는 선단 노드와 무인항공기 간의 무선 통신 모델 구현을 위해 보다 현실적인 방법을 차용하였다. 우선, 노드 i 는 전력 P_i 로 전송하고, 수신 시 평균 전력 노이즈 전력 N_j 를 고려한다. 군 임무 수행을 위한 통신 대역폭이 충분하다고 가정하며, 다른 사용자들과 무인항공기는 다른 주파수를 사용하여 간섭에 의한 영향은 적다고 본다[3]. 정보를 송신한 노드는 i , 수신한 노드는 j 로 정의되며, 수신된 SNR Γ_{ij} 는 다음과 같이 주어진다.

$$\Gamma_{ij} = \frac{P_i G_{ij}}{N_j} \tag{1}$$

식(1)에서 G_{ij} 는 채널 이득을 의미하며 이는 다음과 같다.

$$G_{ij} = \frac{C_{ij} |h_{ij}|^2}{(D_{ij})^\alpha} \tag{2}$$

여기서 C_{ij} 는 안테나 이득과 Shadowing에 관련된 상수이며, h_{ij} 는 다중경로 페이딩(fading)을 의미한다. D_{ij} 는 송수신한 두 개의 노드 사이의 거리이며, 무인항공기가 포함된 상황에서 D_{ij} 는 무인항공기 위치 $\vec{x} = \{(x_1, y_1)^T, \dots, (x_n, y_n)^T\}$ 가 고려

된다. α 는 전달 손실 계수를 나타낸다.

h_{ij} 가 영의 평균과 단위 분산을 가진 복소 가우시안인 빠른 Rayleigh 페이딩을 갖는 채널일 때, 두 노드 사이에 송신 성공 확률은 다음과 같이 표현될 수 있다[3].

$$P_{ij}(\Gamma_{ij} \geq \gamma) = \exp\left(-\frac{N_j \gamma (D_{ij})^\alpha}{C_{ij} P_i}\right) \quad (3)$$

여기서 γ 는 최소 통신 품질을 의미한다.

2.2 최소 스패닝 트리를 이용한 네트워크 연결성

군집 군용 모바일 임시 네트워크를 포함한 많은 응용분야에서 모든 노드가 접속된 상태를 유지하는 것이 중요하다. 예를 들어 해상 전투 시나리오에서는 선단 안의 분산된 모든 함선들에 명령을 전파하는 것이 필수적이다. 이러한 경우 모든 노드가 연결되어 있으면서 동시에 전체 네트워크 연결성이 최대화 되도록 정보를 효율적으로 분배하는 방법이 요구된다. 본 연구에서는 그래프 이론기반의 최소 스패닝 트리 (MST, Minimal Spanning Tree)를 통한 접근방법으로 상기 문제에 대한 해결책을 제시한다. 스패닝 트리는 그래프 안에 모든 노드를 다 포함하면서 그 자신 또한 트리가 되는 서브 그래프를 의미한다. 비록 단일 그래프가 서로 다른 다수의 스패닝 트리를 가질 수 있다 하더라도, 가중치는 거리를 나타내는 각각의 그래프에 할당될 수 있으며, 주어진 스패닝 트리의 비용은 연결선의 모든 가중치 합으로 계산될 수 있다. 최소 스패닝 트리는 모든 스패닝 트리의 비용에서 가장 작은 값을 지닌 스패닝 트리를 의미하며, Fig. 4는 MST 활용 예를 보여준다. 아래 예에서는 10개의 노드를 이용하여 네트워크를 구성하고 있으며, 총 스패닝

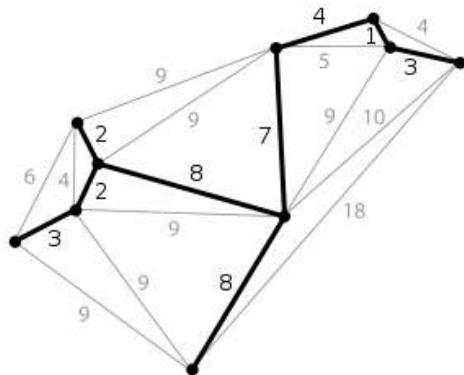


Fig. 4. An example of the minimum spanning tree[11]

트리 비용의 합이 최소값을 갖는 링크 연결은 굵은 선으로 나타난다.

본 연구에서는 각 그래프의 가중치를 식(3)에서 명시한 송신 성공 확률에 대한 함수로 설정하였으며, 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$W_{ij} = -\log P_{ij} \quad (4)$$

Kruskal 알고리즘은 최소 스패닝 트리를 구현하는 방법이다. 그래프 $G=(V,E)$ 는 정점(V , Vertice)와 선(E , Edge)로 구성되어 있으며, 최소 가중치 값을 갖는 선이 순차적으로 선택된다. 선택된 선이 사이클을 이루는 선은 배제되면 그래프의 모든 정점들이 선으로 연결된 가중치의 합 $\sum W_{ij}$ 이 최소가 되는 최소 스패닝 트리 구현이 가능하다. 움직이는 함정과 무인항공기의 실시간 위치정보가 확보된다면 상기 알고리즘을 적용한 실시간 최소 스패닝 트리 구현이 가능하다. 본 연구에서는 적정한 가중치와 송신 성공 확률의 증대 및 연결성 증진을 위해 Kruskal 알고리즘을 사용하여 최소 스패닝 트리를 구현한다[12,13].

2.3 네트워크 연결성 최대화를 위한 무인항공기 위치 최적화

무인항공기의 최적 배치를 위해서, 가장 먼저 무인항공기 위치에 따른 네트워크 연결성의 성능지수에 대한 정의가 요구된다. 본 연구에서는 정보가 최소 스패닝 트리를 통해 전 노드로 전송될 수 있도록 글로벌 메시지 연결을 정의한다. 무인항공기의 위치가 초기화 된 경우에, 최소 스패닝 트리는 n 대의 무인항공기와 m 대의 모바일 노드 간의 가중치 W_{ij} 로 구성된다. 행렬 A 는 최소 스패닝 트리를 나타내며, i 노드와 j 노드가 연결되었을 때 $A_{ij}=1$ 로, 연결되지 않았을 때 $A_{ij}=0$ 로 각각 정의한다. 최소 스패닝 트리 가중치의 합은 최소 스패닝 트리를 통해 메시지가 성공적으로 전송되는 전체 확률에 상응되며, 글로벌 메시지 연결의 성능지수는 최소 스패닝 트리 행렬과 가중치의 곱인 식(5)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\mathcal{J}(\bar{x}) = \sum_{i=1}^{n+mm+m} \sum_{j=1}^{n+mm+m} A_{ij} W_{ij} \quad (5)$$

식(5)의 가중치는 각 노드의 거리 D_{ij} 에 대한 함수로 나타나지며, 통신중계를 위한 무인항공기들의 위치 \bar{x} 에 대한 최적화 문제는 식(6)과 같은 글로벌 네트워크 연결의 성능지수를 최소화하는 식으로 표현된다.

$$\min_{\bar{x}} J(\bar{x}) = \min_{\bar{x}} \sum_{i=1}^{n+m} \sum_{j=1}^{n+m} A_{ij} W_{ij} \quad (6)$$

최적화를 위해 Trust-Region-Reflective 알고리즘을 적용하며, 해를 구하기 위해 전처리된 켈레구배법 (PSG, Preconditioned Conjugate Gradient) 기법을 사용한다[15,16].

III. 통신중계 시뮬레이션

통신중계 시뮬레이션을 위해 2장에서 제안한 통신모델을 기반으로 한 5km×5km 넓이의 해상에 8대의 해군 함정으로 구성된 선단 운용을 고려한다. 공중 통신중계를 위해 소형 무인항공기가 사용되며, 통신모델 파라미터 구성을 위해 소형 무인항공기 통신모델로 많이 사용되는 Freewave사의 MM2 모델을 고려하며, 주요 사양은 Table 1과 같다. 선정 통신모델 사양을 고려하여 Table 2와 같이 통신 파라미터를 정의한다. 시뮬레이션은 공중 통신중계를 위해 무인항공기의 운용 대수를 0대~3대로 변경하며 시뮬레이션을 수행한다.

시뮬레이션 결과에서 노란점은 8대의 해군 함정을 의미하며, 하늘색 삼각형은 무인항공기를 나타낸다. 청색 점선은 각 노드 간 연결을 나타내며, 적색 선은 가중치 합 $\sum W_{ij}$ 이 최소가 되는 최소 스패닝 트리를 나타낸다. 각 선에 표시된 숫자는 각각 채널의 가중치 W_{ij} 를 의미한다.

Table 1. Communication module “MM2” specifications


	Frequency Range	902-928MHz
	Transmission power	1W
	Range @LOS	96km
	Received noise power	-103dBm @115.2kbps
	Weight	14g

Table 2. Communications parameters

Parameters	Value	Dimension
Transmission power P_i	30	dBm
Received noise power N	-103	dBm
SNR requirement γ	10	dB
Propagation loss factor α	3	N/A
Antenna gain constant C_{ij}	1	N/A

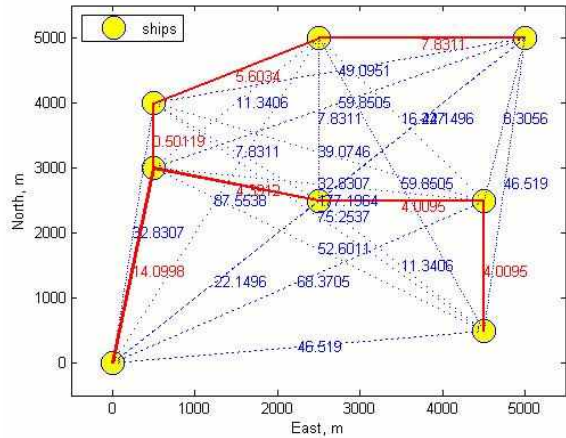


Fig. 5. The MST connection of a fleet of eight naval vessels without UAV engagement

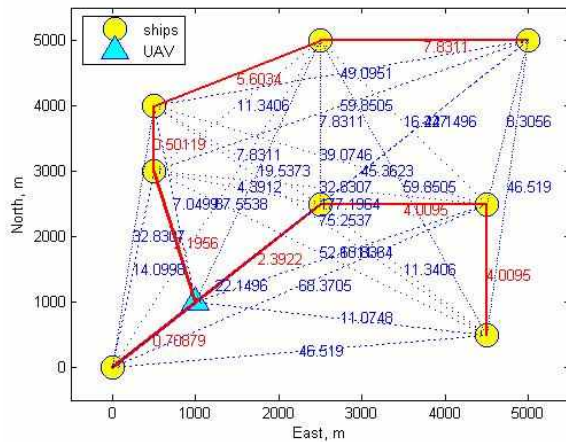


Fig. 6. The MST connection of a fleet of eight naval vessels with a single UAV engaged for communications relay

Figure 5에서는 무인항공기가 존재하지 않은 상태에서 선단 내 함정간 통신 연결에 대한 시뮬레이션을 보여주고 있으며, 글로벌 메시지 연결의 총 비용은 $J=80.89$ 이다.

Figure 6에서는 한 대의 무인항공기를 이용한 통신중계 시 최적화된 선단의 최소 스패닝 트리 연결을 보여주고 있다. 글로벌 메시지 연결의 총 비용은 공중 통신중계를 수행하지 않은 이전 시뮬레이션 값 $J=80.89$ 에 비하여 급격히 감소한 $J=57.37$ 임을 확인 할 수 있다. 이는 단 한 대의 무인항공기를 투입하는 것으로 전 함정의 통신 품질을 141%나 증가 시킬 수 있다는 것을 의미한다.

Figure 7-8에서는 통신중계를 위해 각각 2대와 3대의 무인항공기를 활용하여 최적화된 최소 스패

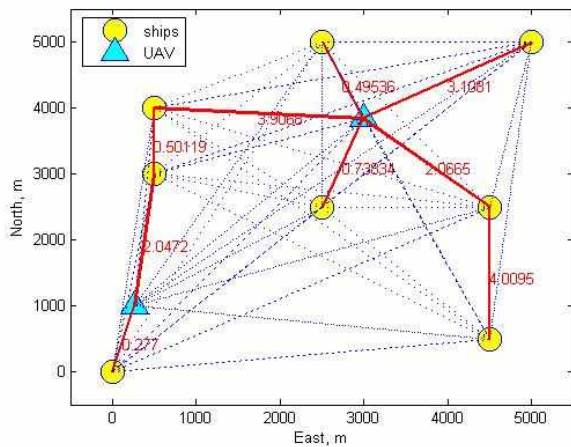


Fig. 7. The MST connection of a fleet of eight naval vessels with two UAVs engaged for communications relay

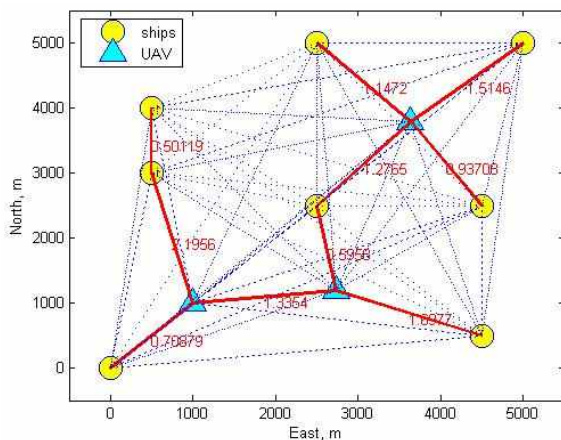


Fig. 8. The MST connection of a fleet of eight naval vessels with three UAVs engaged for communications relay

닝 트리 연결의 시뮬레이션을 나타낸다. 본 연구에서 제안한 최적화된 무인항공기 위치 선정을 통해 글로벌 메시지 연결의 총 비용은 급격히 감소한 $J=34.30$ 와 $J=23.82$ 이며, 이는 통신중계를 위한 무인항공기가 2대일 경우 236%, 3대일 경우 340%의 통신 품질이 향상되었음을 의미한다. 본 시뮬레이션은 해군 함정의 위치가 고정되어 있다는 제한조건하에 이루어 졌지만, 통신 품질의 향상된 결과를 통해서 회전익 무인항공기를 통신중계 노드로 활용하였을 때의 이점을 확인 할 수 있다.

IV. 결 론

본 논문에서는 지상이나 해상의 선단 간의 통신 품질 최대화를 위해 소형 회전익 무인항공기를 중계용 노드로 활용한 위치 최적화에 관한 연

구를 수행하였으며, 넓은 통신중계 영역을 고려한 다수의 무인항공기 운용을 고려한 최적화 연구를 수행하였다. 현실적 무선 통신 모델을 구현하였으며, 시뮬레이션을 위해 소형 무인항공기에 적용되고 있는 통신모듈 사양을 고려한 파라미터를 활용하였다. 시뮬레이션 연구를 통해 무인항공기를 활용한 모바일 임시 네트워크가 분산된 선단에 명령 전달의 완결성을 나타내는 통신연결에 관한 품질 향상을 확인 할 수 있었으며, 소형 무인항공기의 운용 대수에 따른 통신 품질 향상을 확인 하였다. 향후 보다 현실적인 상황을 고려하여 움직이는 지상 또는 해상 선단이 고려된 모델로 연구를 보다 넓은 영역에서의 통신중계 문제로 확장할 예정이며, 회전익 무인항공기 뿐만 아닌 고정익 무인항공기를 이용한 통신중계 연구로 적용할 예정이다. 이에 따른 무인항공기 배치 및 궤적 결과를 도출하여 최적 공중 통신중계를 위한 전략 수립에 활용하고자 한다.

후 기

본 연구는 충남대학교에서 지원하는 학술연구의 일환으로 수행되었습니다.

References

- 1) S. Kim, P. Silson, A. Tsourdos, and M. Shanmugavel, 2011, "Dubins Path Planning of Multiple UAVs for Communication Relay," *Journal of Aerospace Engineering, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part G*, Vol.225, No.1, pp.12-25.
- 2) T. Samad, J. Bay, and D. Godbole, 2007, "Network-centric systems for Military Operations in Urban Terrain: The Role of UAVs," *Proceedings of the IEEE*, Vol.95, No.1, pp.92-107.
- 3) H. Zhu, A.L. Swindlehurst, and K. Liu, 2009, "Optimization of MANET connectivity via smart deployment/movement of unmanned air vehicles," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, Vol.58, No.7, pp.3533-3546.
- 4) E.W. Frew and T.X. Brown, 2008, "Airborne Communication Networks for Small Unmanned Aircraft Systems," *Proceedings of the IEEE*, Vol.96, No.12, pp.2008-2027.
- 5) F. Zhan, K. Yu, and A.L. Swindlehurst, 2011, "Wireless Relay Communications with

Unmanned Aerial Vehicles: Performance and Optimization," IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, Vol.47, No.3, pp.2068-2085.

6) O. Jian, Z. Yi, L. Min, and L. Jia, 2014, "Optimization of beamforming and path planning for UAV-assisted wireless relay networks," Chinese Journal of Aeronautics, Vol.27, pp.313-320.

7) D. L. Gu, G. Pei, H. Ly, M. Gerla, B. Zhang, and X. Hong, 2000, "UAV aided intelligent routing for ad hoc wireless network in single area theater," in Proc. IEEE Wireless Commun. Netw. Conf., Chicago, IL, Vol.3, pp.1220 - 1225.

8) D. L. Gu, H. Ly, X. Hong, M. Gerla, G. Pei, and Y. Lee, 2000, "C-ICAMA, a centralized intelligent channel assigned multiple access for multi-layer ad-hoc wireless networks with UAVs," in Proc. IEEE Wireless Commun. Netw. Conf., Chicago, IL, Vol.2, pp.879 - 884.

9) K. Xu, X. Hong, M. Gerla, H. Ly, and D. L. Gu, 2001, "Landmark routing in large wireless battlefield networks using UAVs," in Proc. IEEE MILCOM, Washington, DC, Vol.1, pp.230 - 234.

10) I. Rubin, A. Behzad, H. Ju, R. Zhang, X. Huang, Y. Liu, and R. Khalaf, 2004, "Ad hoc

wireless networks with mobile backbones," in Proc. 15th IEEE Int. Conf. Pers., Indoor Mobile Radio Commun., Barcelona, Spain, Vol.1, pp.566 - 573.

11) Wikipedia, Minimum_spanning_tree, <http://en.wikipedia.org/wiki/>, last accessed on 17 Jan 2014.

12) R. Diestel, 2005, "Graph theory," in Graduate Texts in Mathematics, 3rd ed., Vol.173. New York: Springer-Verlag.

13) M. Choi and S. Lee, 2013, "An Efficient Implementation of Kruskal's and Reverse-Delete Minimum Spanning Tree Algorithm," (in Korean), The Journal of The Institute of Internet, Broadcasting and Communication, Vol.13, No.2, pp.103-114.

14) Freewave, Communication module MM2, <https://www.freewave.com/products/allproducts/mm2.aspx>, last accessed on May 2014.

15) T.F. Coleman and Y. Li, 1994, "On the Convergence of Reflective Newton Methods for Large-Scale Nonlinear Minimization Subject to Bounds," Mathematical Programming, Vol.67, No.2, PP.189-224.

16) T.F. Coleman and Y. Li, 1996, "An Interior, Trust Region Approach for Nonlinear Minimization Subject to Bounds," SIAM Journal on Optimization, Vol.6, PP.418-445.