

전장환경에서 단일 UAV를 활용한 공중 중계 최적위치 선정 기법

지한국*, 이종관*, 임재성°, 박찬이**

Optimal Airborne Relay Point Selection Scheme for Battlefields Using Single UAV

Hanguk Jee*, Jongkwan Lee*, Jaesung Lim°, Chan Yi Park**

요약

본 논문은 지상의 GPS 사용이 제한되는 전장환경에서 통신 중계용 UAV가 중계를 위한 최적위치를 효율적으로 선정하는 기법을 제안한다. 전장의 전투원들은 각자 지휘관과의 원활한 지휘통제를 항시 보장받아야 하며, 중계용 UAV가 최적위치를 선정하고 기동하는 방법은 전투원들이 작전임무를 효과적으로 수행하도록 기여한다. 제안기법은 크게 2단계로 구성된다. 첫 번째 단계에서 단일 UAV는 빠른 위치변화 특성을 활용한 TOA (Time of Arrival) 와 Minimax 이론 기반의 최적 위치를 선정하고, 두 번째 단계에서 단말과 UAV의 기하학적인 특징을 기반으로 불필요한 최소제곱법의 회귀연산을 제거한다. 제안하는 기법의 성능 평가를 위해 임의의 대대급 전장환경을 컴퓨터 시뮬레이션으로 구현하고, 최적위치의 RMSE (Root Mean Square Error)와 최대 통신거리, 회귀연산 횟수 등을 분석한다. 이를 통해 전장환경에서 제안하는 기법의 활용가능성을 확인한다.

Key Words : Unmanned Aerial Vehicle, Optimal Position, Time of Arrival, Communication Relay

ABSTRACT

In this paper, we propose a scheme in which a communication relay UAV (unmanned aerial vehicle) efficiently selects the optimal relay position on the battlefield where GPS on the ground is limited. Warfighters on the battlefield must communicate with their commander all the time, and the scheme in which the relay UAV chooses and maneuvers the optimal point contributes effectively to accomplish mission success. The proposed scheme consists of two steps. In the first step of the proposed scheme, a single UAV selects the optimal point based on TOA (Time of Arrival) and Minimax theory using the fast position change characteristics. In the second step, we remove the unnecessary regression of least squares method based on the geometric characteristics of the ground terminals and the UAV. In order to evaluate the performance of the proposed scheme, arbitrary battlefield was implemented using computer simulation, and the RMSE (Root Mean Square Error), the maximum communication range, and the number of iterations were measured. We also confirmed the feasibility in real environment through generalized virtual attack and defense model.

※ 본 연구는 방위사업청과 국방과학연구소가 지원하는 미래전투체계 네트워크기술 특화연구센터 사업의 일환으로 수행되었습니다.(UD160070BD)

• First Author : (ORCID:0000-0003-0249-8052)Ajou University, Department of NCW, jee@ajou.ac.kr, 학생회원

° Corresponding Author : (ORCID:0000-0003-0080-9398)Ajou University, Department of NCW, jaslim@ajou.ac.kr, 종신회원

* (ORCID:0000-0003-2195-2417)Department of Computer Science, Korea Military Academy, c13525@kma.ac.kr, 정회원

** (ORCID:0000-0001-6772-911X)Agency for Defense Development, chyipark@add.re.kr, 정회원

논문번호 : KICS2018-01-011, Received January 8, 2018; Revised May 20, 2018; Accepted May 28, 2018

I. 서론

최근 군에서 파일럿의 생존성 보장을 위해 개발되었던 무인항공기 (Unmanned Aerial Vehicle, UAV)는, 현재까지 적 지역 또는 험난한 지역을 감시 및 정찰하기 위한 용도로 주로 사용되었다. 하지만 최근 항공 수요가 급증하고 무인기술이 상용화되면서 국방과 정보통신, 기상관측, 물자수송, 농업, 임업, 레저 및 스포츠 등 다양한 분야에서 널리 활용되고 있다. 특히 국방 분야에서는 무인항공기 관련 기술이 미국의 ‘Third Offset Strategy’의 핵심 분야로 지목되면서 다양한 용도로 활용될 수 있는 복합무기체계로의 발전 가능성이 더욱 기대되고 있다^{1,2)}.

무인항공기는 빠른 기동성과 채공 능력을 바탕으로 지상 및 위성 무선통신의 근본적인 문제들을 쉽게 극복할 수 있다. UAV 기반의 공중 계층 네트워크는 (1) 네트워크 인프라가 구축되지 않은 상황에서도 통신 서비스를 신속하게 제공할 수 있으면서, (2) 빠른 전개와 철수로 생존성이 높고, (3) BLoS (Beyond Line-of-Sight)와 NLoS (Non-Line-of-Sight) 상황에 대한 극복이 용이하다. 또한, (4) 위성보다 낮은 개발 및 유지비용으로도 충분한 효과를 가진다³⁾. 다양한 장점을 갖고 있는 UAV 기반 통신 중계 네트워크는 항공 기술의 발전과 함께 발전 가능성이 매우 높은 분야이다.

공중 중계와 관련된 기술 중에서 최근 들어 중계 UAV의 최적 위치선정에 관한 연구가 꾸준히 증가하고 있다. UAV를 활용하여 중계 네트워크의 최적 점을 선정하는 문제는 NP-hard 문제로 분류된다. 특히 전장 상황과 같이 다양한 마찰과 우연성으로 인해 지상 단말에 대한 상태정보가 불확실할 수밖에 없는 경우에는 문제가 더욱 복잡해진다. 위치선정에 관한 연구는 RSS (Received Signal Strength) 기반의 연구^{4,5)}와 연결확률 모델 (Connection probability model) 기반의 연구^{6,7)}로 나누어 볼 수 있다. RSS 기반의 연구는 수신신호 세기를 최대화하는 지점으로 UAV가 기동하도록 유도하며, 연결확률 모델 기반의 연구는 단말간의 메시지 송신 성공확률을 기준으로 Ad-hoc 네트워크의 QoS (Quality of Service)와 통신 커버리지를 최대화하기 위해 UAV를 전개하는 방식으로 제안되었다. 하지만 기존의 연구들은, 신호를 연속적으로 송신하는 가정과 네트워크 모니터링 문제로 실제 전장 환경에 적용하기에 적절하지 않았다. 본 논문에서는 이러한 문제점을 해결하기 위해 거리기반 측정값을 활용한 위치추정과 효율적인 중계 위치 선정 기법

을 제안한다.

제안기법은 2개의 단계로 구분된다. 첫 번째 단계에서 통신 중계용 UAV는 단말 상공을 선회비행하며 스스로를 참조노드로 거리 측정값을 획득하고 TOA (Time of Arrival) 기반의 위치 인식 기법을 통해 신호를 송신하는 지상 단말들의 전체 분포를 확인한다. 두 번째 단계에서는 최적 위치를 선정하기 위해 사용된 Minimax center와 TOA의 의사거리가 가지는 기하학적 특징을 이용하여 최적위치 추정을 위해 사용되는 TOA의 연산 복잡도를 최소화한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서 기존 RSS 기반과 연결확률 모델 기반의 최적 위치 선정에 관한 연구를 소개하고, 3장에서는 제안 기법의 단말 분포 추정방법과 효율적인 중계위치 선정 방안을 제시한다. 4장에서는 시뮬레이션을 통해 전장 환경에서 제안기법의 성능과 활용가능성을 분석한다. 마지막으로 5장에서 본 연구의 결론을 맺는다.

II. 관련 연구

2.1 RSS 기반 중계 최적 위치 선정기법

2012년 Dixon과 Frew는 UAV 중계 최적 위치 기동을 위해 Chaining Controller 아키텍처를 제안하였다⁴⁾. 제안된 아키텍처는 4개의 블록으로 구분되었으며 각각 Gradient Estimation, Control Point Dynamics, LGVF Control, Phase Control 로 정의되었다. 종단 간 통신 네트워크상에 단일 혹은 복수의 UAV로 중계할 때 통신로상의 통신용량을 최대화하기 위해 가상의 Control Point 위치가 유도되며, Control Point의 위치는 Control Point Dynamics와 Gradient Estimation 블록에서 확률론적 근사기법을 활용하여 추정된 목적함수의 기울기를 통해 유도되었다. 이때 기울기의 추정은 Control Point를 중심으로 선회하는 UAV의 통신용량을 최대화하기 위한 SNR (Signal to Noise Ratio) 기반 목적함수의 관측값을 기초로 구해진다. 앞의 두 블록에서 Control Point의 위치가 결정되면 LGVF Controller 블록에서 UAV의 운동 역학적인 특성을 고려하여 UAV가 Control Point를 중심으로 선회하도록 유도한다. 제안된 기법을 검증하기 위해 컴퓨터 시뮬레이션과 NexSTAR 무인기를 사용한 비행시험이 수행되었으며 Chaining Controller의 활용으로 종단간 통신 중계의 통신용량이 향상됨을 증명하였다.

2014년 Choi와 Sung은 전장환경에서 운용되는 통신 중계 UAV가 지상 단말로부터의 RSS와 RSS의 변

화량을 기반으로 헤딩각도에 변화를 줌으로서 자율 기동하는 방법을 제안하였다⁵⁾. UAV는 분산된 다수의 지상 단말 상공을 선회비행하며 단말의 신호를 수신하여 주기적으로 단말들의 RSS를 측정한다. 이때, 수신된 신호 중 가장 작은 RSS와 그 RSS의 시간당 측정값의 변화량이 증가하면 기동방향을 계속 유지하고 둘 중 하나라도 작아지면 정해진 특정 각속도로 UAV 헤딩 각도를 수정하여 최적의 위치를 찾는다.

하지만 RSS 기반의 최적위치 선정 기법들은 공통적으로 다중경로와 셰도잉 등의 외부적인 영향에 매우 취약하다. 또한 추정된 최적지점 혹은 방향 선정을 위해 UAV가 계속 선회하여야하기 때문에 매우 비효율적이며 최적의 선회위치로 이동하는데 까지 시간이 과도하게 소모된다. 뿐만 아니라 지상 단말들이 신호를 연속적으로 송신한다는 가정은 비현실적이며 에너지 소비 측면에서도 비효율적이다.

2.2 연결확률 모델 기반 중계 최적 위치 선정기법

2009년 Han과 Swindlehurst는 Ad hoc 네트워크에서 QoS와 커버리지를 최대화하기 위해 네트워크의 연결확률을 최적화할 수 있는 UAV의 위치 선정 기법을 제안하였다⁶⁾. UAV 중계 네트워크의 연결성 모델은 크게 1) Global message connectivity, 2) Worst-case connectivity, 3) Network bisection connectivity, 4) K-connectivity의 네 가지 유형으로 분류된다. 첫 번째인 Global message 모델은 네트워크 안에서 모든 노드에 대한 메시지 전송 성공 확률이 가장 높은 경우이고, 두 번째 Worst-case 모델은 메시지 전송 성공 확률이 가장 낮은 경우이다. 이 두 모델에서는 널리 알려진 최소 스패닝 트리 (Minimal Spanning Tree)를 기반으로 위치를 선정한다. 세 번째 Network bisection 모델은 네트워크가 두 그룹으로 분할된 경우를 가정하며, 스펙트럼 그래프 이론의 변형된 라플라시안 행렬(Laplacian matrix)을 사용한다. 마지막으로 K-connectivity 모델은 신뢰성 있는 네트워크를 보장하기 위해 k개 노드가 필요한 경우를 가정하며, 최대 흐름 최소 절단 정리 (Max-flow min-cut theorem)와 멩거의 정리 (Menger's theorem)가 사용된다.

2017년 Alzenad와 Yanikomeroğlu는 기지국용 UAV가 최소의 에너지를 사용하여 최대의 지상 단말을 통신 지원하는 최적지점 선정 기법을 제안하였으며⁷⁾, UAV 최적 위치 선정 문제를 수직 요소인 UAV 고도와 수평요소인 2D 평면모델로 나누었다. 최적의 고도는 가시선 (Line-of-sight) 그룹 과 비 가시선

(Nonline-of-sight) 그룹의 송신 성공 확률과 각각의 경로손실 모델의 관계식으로부터 도출되며, 최적의 2D 평면 좌표를 찾기 위해서는 주어진 통신 커버리지 기반의 최소포함원 (The smallest enclosing circle) 문제를 알고리즘에 적용하였다.

하지만 연결확률 모델의 최적화를 위해 모든 링크 상태를 지속적으로 모니터링 하는 것은 높은 네트워크 오버헤드를 야기할 수 있다. 또한 인프라 통신 네트워크 없이 단말들 간의 연결확률을 기반으로 하는 Ad hoc 환경은 Star형 토폴로지를 기반으로 하는 UAV 네트워크와 운용환경이 서로 상이하므로, 전투제대 전장환경 모델에 적용하기에 적절하지 않다.

III. 제안 기법

앞서 살펴본 기존의 최적위치 선정기법들은 다소 비현실적인 네트워크 환경에 대한 가정과 과도한 네트워크 오버헤드를 야기할 수 있어 실제 전장환경에서 현실적으로 활용되기에 부적절하다. 이러한 이유로 본 논문에서는 거리기반의 위치 인식 기법을 적용하였다. 특히, 전투원들이 PPLI (Precise Participant Location Identification)와 같은 상황정보를 주기적 혹은 비주기적으로 송수신하는 군 통신 환경의 특성은 거리 기반 측정값을 활용하기에 적합하다.

본 논문에서 제안하는 중계 UAV의 최적위치 선정 기법은 전장 환경에서 적 재밍 등의 영향으로 GPS의 지상 수신이 제한된다고 가정할 때, 지상 단말의 위치 정보를 단일 UAV가 스스로 추정하고, 위치 정보 기반의 중계 최적위치를 낮은 복잡도의 연산만으로 효율적으로 선정하는 방법이다.

3.1 시스템 모델

제안기법의 이해를 위해 전장에서 전투제대가 무선 통신 단말들을 이용하여 지휘통제하는 환경을 고려한다. 전투제대에서의 UAV 통신 중계 시스템은 (1) UAV를 직간접적으로 조정통제하며 운영하는 지상통제국과 (2) 공중에서 중계 역할을 수행하는 UAV, (3) 전장정보와 지휘통제를 무선으로 주고받는 지상 단말 등 크게 3가지 요소로 구성된다. 단일 UAV 기반의 소규모 UAV 중계 네트워크의 특징 중 하나는 UAV를 중심으로 Star형 토폴로지가 형성된다는 점이다. 네트워크의 중앙 노드인 UAV는 지상통제국 및 지상 단말과 직접 연결되어 있으며 연결된 링크는 CNPC (Control and Non-Payload Communication) 링크와 데이터 링크로 구분된다. CNPC 링크는 지상통제국과

UAV간의 제어링크로서, UAV의 안정적인 이착륙과 경로계획, 자세제어, 비행통제 등을 지원한다. 데이터 링크는 전장에서의 임무수행을 위한 지휘통제가 실질적으로 이루어지는 통신링크이며, 주기 혹은 비주기적으로 각종 보고와 지시들이 데이터 링크를 통해 실시간으로 이루어진다. 제안기법에서는 시각 동기화된 네트워크 환경에서 데이터 링크를 통해 송수신되는 신호의 타임스탬프 (Time stamp)를 활용하여 지상 단말의 분포를 추정한다.

3.2 단일 UAV를 활용한 단말 분포 추정

제안기법의 첫 번째 단계는 1기의 통신 중계용 UAV와 거리기반의 측정값을 활용하여, 신호를 송신하는 지상 단말들의 위치를 추정하고 전체 단말 분포를 확인하는 것이다.

거리기반 측정값을 활용하는 위치 인식 기법의 대표적인 방식인 GPS는 미 국방부에서 개발되어 현재 전 세계 다양한 국가에서 활발하게 운용하고 있다. 하지만 GPS는 수신기에 도달하는 항법 신호의 세기가 약하고, 위협 세력에 의한 노출 및 재밍 공격에 취약하여 전장에서의 원활한 활용에는 제한이 따른다^[8]. 이러한 취약점을 극복하기 위해 제안기법에서는 항법 위성이 아닌 저고도 통신 중계용 UAV를 활용하여 지상 단말의 위치 정보를 획득한다. 자체적인 항법시스템 (GPS, 관성항법장치, 영상항법장치 등)으로 기동하는 1기의 저고도 UAV는 지상 단말의 입장에서 상대적으로 항법위성보다 빠른 기하학적인 위상변화와 짧은 전파지연 시간의 특성으로 TOA (Time of Arrival) 및 TDOA (Time Difference of Arrival)의 참조노드로의 활용이 용이하다^[9]. 그림 1은 다른 시간대의 1기의 UAV가 같은 시간대의 위성 여러 기와 같은 기하학적인 특성을 가짐을 보여준다.

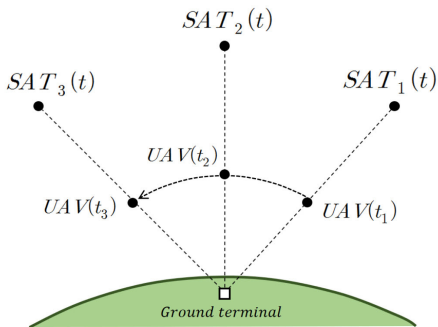


그림 1. 항법 위성과 UAV의 상대적인 기하학 관계
Fig. 1. Relative geometric relationship between navigation satellites and UAV

다수의 지상 단말에서 전송되는 신호를 중계하는 UAV의 경우 항법 위성 신호 같은 별도의 위치 신호를 송수신하지 않고, 원 신호를 중계 또는 단순히 수신하는 것만으로도 단말들의 위치 추정이 가능하다. 그림 2는 UAV가 단말 상공을 비행하며 n 번 신호를 수신하는 과정을 의미한다. 최초로 지상통제국의 제어를 받으며 이륙한 UAV는 사전 계획된 비행경로를 비행하며 지상의 (x, y, z) 좌표에 위치한 단말의 신호를 중계한다. UAV는 시간 τ_i 에 $U(\tau_i) = (x_i, y_i, z_i)$, ($i = 1, 2, 3, \dots, n$)의 위치에서 n 번 신호를 수신하였으며, 이때 메시지에 기록된 신호 송신 시간은 t_i 이었다고 가정한다.

TOA의 의사거리 ρ_i 는 식 (1)과 같이 계산되며, 식 (2)는 의사거리를 유클리드 공간의 직각 좌표계와 벡터로 표현한 식이다. 여기에서 ϵ_i 는 UAV와 단말간의 clock bias 등 각종 내외부적인 오차의 합, $\|\cdot\|$ 는 노름 벡터, $\underline{R}_{U(\tau_i)}$ 는 $U(\tau_i)$ 에서의 UAV 위치벡터, \underline{R}_T 는 지상 단말의 위치벡터를 의미한다.

$$\rho_i = c \times (\tau_i - t_i) + \epsilon_i \quad (1)$$

$$\rho_i = \frac{\| \underline{R}_{U(\tau_i)} - \underline{R}_T \|}{\sqrt{(x-x_i)^2 + (y-y_i)^2 + (z-z_i)^2}} \quad (2)$$

식 (2)의 양변을 제곱하고 첫 번째 수식 ($i = 1$)을 활용하여 식 (3)과 같이 정리할 수 있다.

$$2 \begin{bmatrix} x_i - x_1 & y_i - y_1 & z_i - z_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \rho_1^2 - \rho_i^2 + x_i^2 + y_i^2 + z_i^2 - x_1^2 - y_1^2 - z_1^2 \end{bmatrix} \quad (3)$$

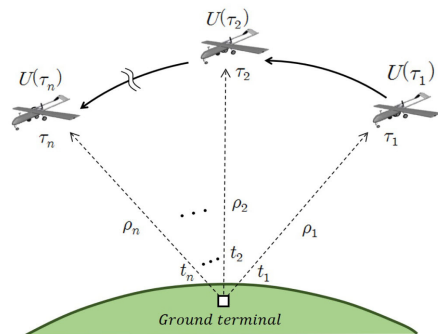


그림 2. UAV 기반 단말 위치 추정
Fig. 2. Estimation of terminal location based on UAV

UAV에 n 개의 단말 신호가 수신되면 식 (3)은 식 (4)와 같은 비선형 측정 모델식 (Non-linear measurement model)의 형태로 유도된다. 일단 모델식 형태가 유도되면 단말의 위치벡터 추정값 $\hat{R}_T = [x, y, z]^T$ 는 식 (6)의 비선형 최소제곱법 (LSM, Least Squares Method)에 의해 회귀적으로 연산된다.

$$2 \underline{H} \cdot \hat{R}_T = \underline{Z} \tag{4}$$

여기서 \underline{H} , \hat{R}_T , \underline{Z} 는 각각 식 (5)와 같다.

$$\underline{H} = \begin{bmatrix} x_2 - x_1 & y_2 - y_1 & z_2 - z_1 \\ x_3 - x_1 & y_3 - y_1 & z_3 - z_1 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ x_n - x_1 & y_n - y_1 & z_n - z_1 \end{bmatrix}, \hat{R}_T = \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}, \tag{5}$$

$$\underline{Z} = \begin{bmatrix} \rho_1^2 - \rho_2^2 + x_2^2 + y_2^2 + z_2^2 - x_1^2 - y_1^2 - z_1^2 \\ \rho_1^2 - \rho_3^2 + x_3^2 + y_3^2 + z_3^2 - x_1^2 - y_1^2 - z_1^2 \\ \vdots \\ \rho_1^2 - \rho_n^2 + x_n^2 + y_n^2 + z_n^2 - x_1^2 - y_1^2 - z_1^2 \end{bmatrix}$$

$$\hat{R}_T = \frac{1}{2} (\underline{H}^T \underline{H})^{-1} \underline{H}^T \underline{Z} \tag{6}$$

중계 UAV는 식 (6)을 병렬로 연산하여 각 단말의 위치를 추정하고, 단말의 이동을 고려한 이동평균법 (Moving Average)을 적용하여 신호를 송신하는 모든 단말의 분포를 확인한다. 추정된 전체 단말 분포의 최적 지점은 UAV가 최소의 에너지로 최대의 통신 반경을 지원하도록 Minimax center 즉, P-center를 활용하여 선정할 수 있다. Minimax 이론은 주어진 각 점들과의 가장 긴 거리를 최소화하는 지점을 P-center로 선정하며, 식 (7)은 P-center의 평면좌표 (x_p, y_p) 를 도출하기 위한 식이다.

$$\arg \min_{(x_p, y_p)} \max_{(i=1,2,\dots,n)} \sqrt{(x_p - x_i)^2 + (y_p - y_i)^2} \tag{7}$$

3.3 효율적인 P-center 선정 기법

제안기법의 1단계에서 중계 최적위치가 선정되면 UAV는 기존 경로를 이탈하여 최적위치로 직선 이동한다. 하지만 전장의 전투원들은 작전 경과에 따라 지속적으로 기동하고 그때마다 UAV는 새로운 단말의 분포를 추정해야하기 때문에 최소제곱법의 과도한 연산 복잡도를 요구한다. 제안기법의 두 번째 단계에서는, TOA의 최소제곱 회귀분석의 연산량을 줄이기 위해 TOA 의사거리와 P-center의 기하학적인 특징을 활용한 방법이 제안된다.

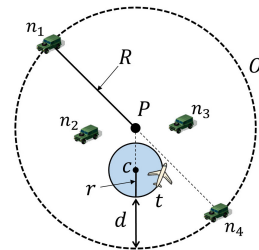
2차원 공간의 P-center를 구하기 위해서는 대부분의 경우 2개, 때로는 3개 이상의 단말이 최외각의 점으로 사용된다¹⁰⁾. 즉 회귀분석으로 모든 단말의 위치를 반드시 추정할 필요는 없으며, P-center 선정에 관여하지 않는 단말의 위치는 연산이 불필요하다. 그림 3은 제안기법의 두 번째 단계가 어떻게 동작하는지 설명하는 간단한 예로, UAV와 단말의 위치를 xy 평면에 정사영 시킨 그림이다. UAV는 제안기법 첫 번째 단계에서 구해진 P-center로 기동하여 선회하며, 동시에 지상 단말은 이동한다.

그림 3의 (a)에서 n_1, n_2, n_3, n_4 는 각각 이동된 단말이며 n_1, n_4 와 같이 P-center를 만드는 최외각 단말들은 정의점 (Defining point)이라고 한다. 이전 시점 정의점들에 의한 원을 O 라고 하고 P 는 정의점에 의한 정의 P-center를 의미한다. t 는 UAV의 선회경로, c 는 선회중심을 나타내며, 이는 지상 단말이 이동하기 이전 시점에서의 P-center라고 할 수 있다. 이때 특정 거리 d 는 식 (8)과 같이 정의한다.

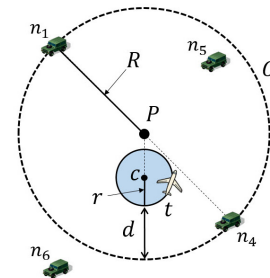
$$d = R - (\|P - c\| + r) \tag{8}$$

식 (8)에서 R 은 O 의 반지름, $\|P - c\|$ 는 P 와 c 의 노름벡터, r 은 UAV 선회반경을 나타낸다.

그림 3의 (a)와 같이, UAV는 c 를 중심으로 선회하며 변위된 단말의 신호를 수신하여 거리를 측정한다.



(a) Case 1: Non-promising terminals (n_2, n_3)



(b) Case 2: Promising terminals (n_5, n_6)

그림 3. 제안기법 2단계의 동작 예

Fig. 3. Example of proposed scheme in the second step

이때 i 번째 단말 n_i 로부터 수집된 m 번째 의사거리 $\rho_{m,i}$ 들의 집합 $P_i = \{\rho_{1,i}, \rho_{2,i}, \dots, \rho_{m,i}\}$ 의 구성요소들 중에서 d 보다 작은 $\rho_{m,i}$ 가 하나라도 존재하면 노드 n_i 는 O 안에 반드시 위치하므로 P-center의 정의점이 될 수 없다. 그림 3의 (a)의 n_2, n_3 가 여기에 해당하여 Non-promising 정의점으로 분류되고 최소제곱법 연산을 수행하지 않는다. 반면, 그림 3의 (b)에서 n_5, n_6 와 같이 의사거리가 모두 d 보다 크다면 Promising 정의점으로 분류되어 최소제곱법 연산을 수행한다. 실제 정의점인지는 minimax 식 (7)에 의해 판별된다.

제안기법의 1단계와 2단계는 중계간 반복적으로 수행되며 최적위치를 선정하고, 작전 종료나 UAV 체공가능 시간에 따라 임무를 종료하고 복귀한다.

그림 4는 제안기법의 순서도이며, 음영된 블록들은 각 단말에 대해 병렬로 수행되는 부분을 의미한다.

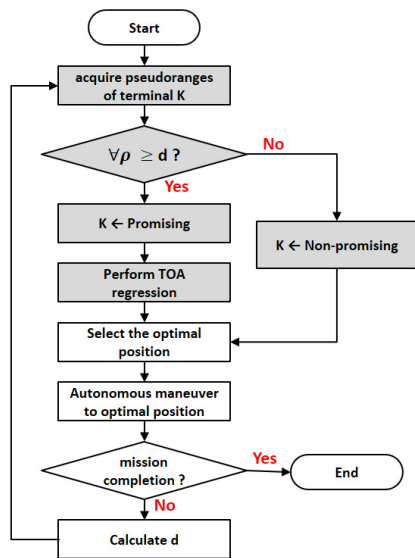


그림 4. 제안기법의 순서도
Fig. 4. Flowchart for proposed scheme

IV. 모의실험

4.1 모의실험 환경

본 장에서는 모의실험을 통해 가상의 작전환경에서 제안 기법의 활용가능성과 성능을 증명하였다. 컴퓨터 시뮬레이션 도구인 MATLAB R2015a를 활용하여 10,000회 모의실험의 평균값을 사용하였고, 적용된 변수는 표 1과 같다.

표 1. 모의실험 변수
Table 1. Simulation parameters

Parameters	Values
Number of terminals	4 nodes
Altitude of UAV	1 km
Speed of UAV	140 km/h
Turning radius of UAV	1 km
Max iterations of LSM	100 times

가상의 작전환경을 가정하기 위해 그림 5와 같이 일반적인 보병대대급 제대의 공격과 방어모델을 각각 적용하였다. 공격모델은 후방의 일정한 위치에 고정된 대대장 단말을 기점으로, 3개의 중대장 단말이 작전 단계에 따라 전방을 지향하여 랜던한 속력과 방향으로 기동하도록 설정하였으며 방어모델은 반대의 경우를 가정하였다. 작전지역의 중심과 정면은 5km에서 20km까지 각각 변화하며 측정하였으며, 작전의 단계는 작전 지역을 가로로 7등분하였을 때 단말 위치를 기준으로 7개 단계로 구분하였다. 단말위치가 인식되지 않은 1단계에서 UAV는 원점좌표 (0,0)를 선회하도록 설정하였다.

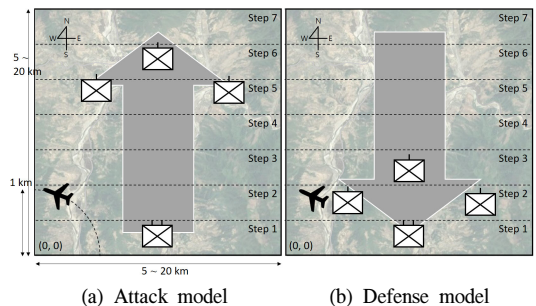
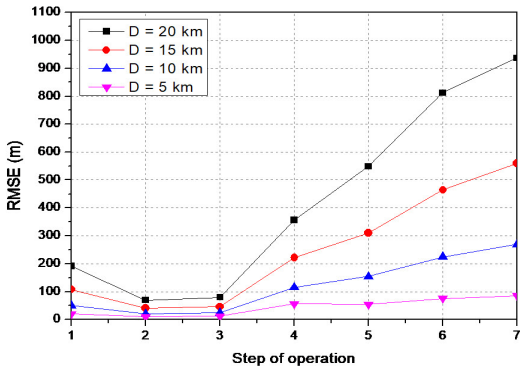


그림 5. 공격 및 방어 모의실험 모델
Fig. 5. Attack and defense simulation model

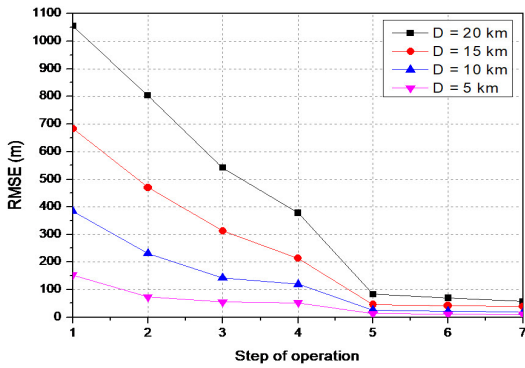
4.2 모의실험 결과

그림 6은 UAV 중계 네트워크 환경에서 작전 단계의 변화에 따른 UAV의 최적위치 선정의 정확도를 측정할 결과이다. 측정된 척도는 실제 좌표의 P-center와 UAV로 추정된 최적위치 사이의 RMSE이며, 작전지역의 크기를 의미하는 작전 정면 및 중심 길이인 D 를 관련변수로 지정하였다.

실험결과, GPS의 거리오차가 약 20m인데 비해 전반적으로 높은 수준의 거리오차를 보이는 것을 확인할 수 있었다. 하지만 통신 효율의 관점에서는 거리오차가 QoS에 심각한 영향을 주지 않으므로, 작전지역



(a) Attack model



(b) Defense model

그림 6. 작전단계에 따른 최적위치의 RMSE
Fig. 6. RMSE of optimal point according to step of operation

이 작은 경우에 타당한 수준의 오차로 판단되었다. 그림 6의 (a) 공격모델과 (b) 방어모델에서 공통적으로 작전지역의 크기가 커질수록, 즉 상급부대에서 운용하는 상황을 가정할수록 거리오차가 증가함을 알 수 있다. 이는 참조점인 UAV와 단말과의 거리가 멀어질수록, 상대적인 기하학이 위치결정에 미치는 오차가 커지고, 추정된 단말의 위치가 부정확해지기 때문이다⁹⁾. 그림 6의 (a)와 같은 공격모델에서는 중대장 단말의 전진으로 통신반경이 점차 커짐에 따라 RMSE가 점차 증가하였으며, (b)의 방어모델에서는 반대의 결과가 확인되었다.

그림 7은 공격모델에서 단계별 최적위치의 가장 긴 통신거리만을 산출하여 나타낸 그림이다. 최적위치의 UAV와 단말의 가장 긴 통신거리는 통신반경을 의미하며 경로손실, 전파지연, 에너지 소비 등의 통신 성능에 직접적으로 영향을 주는 매우 중요한 요소이다.

모의실험 결과 그림 6의 실험에서 확인하였던 것과 같이, 작전 지역이 커질수록, 작전단계가 진행되어 단

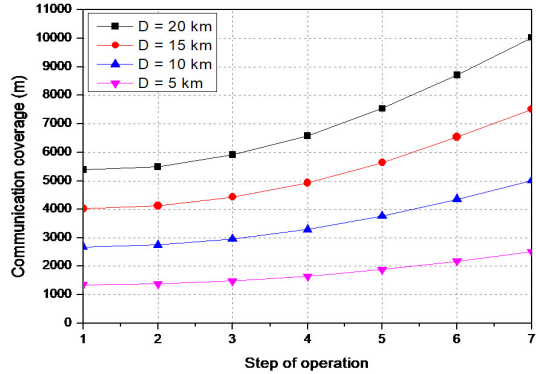


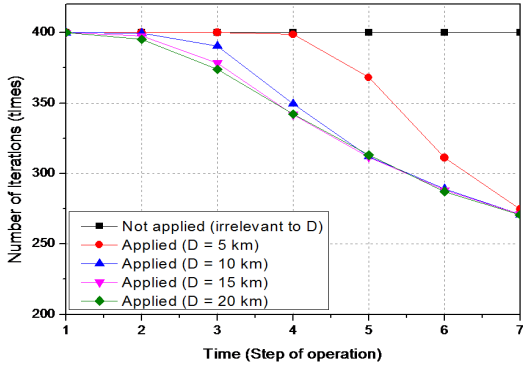
그림 7. 작전단계에 따른 최적위치에서의 최대 통신거리
Fig. 7. Maximum communication range according to step of operation

말간의 거리가 멀어질수록, 최대 통신거리가 커짐을 알 수 있다. 방어모델의 경우에는 작전단계에 따라 공격모델과 반대되는 그래프의 경향을 확인할 수 있었다.

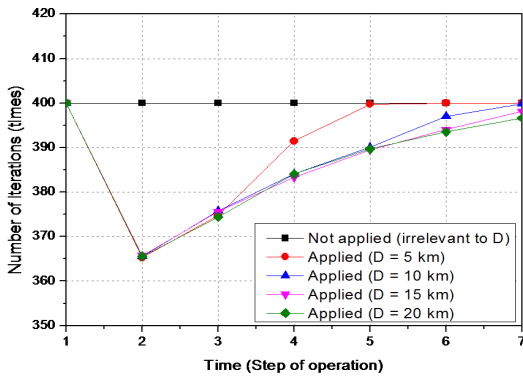
그림 8은 제안기법의 두 번째 단계인 효율적인 P-center 선정기법의 성능을 측정하기 위한 최소제곱법의 연산 횟수 그래프이다. 1개의 단말의 위치를 추정하기 위해서는 최소제곱법의 오차 허용범위 이내로 수렴하거나, 수렴하지 않을 경우 최대 100번의 회귀 연산이 수행되도록 설정하였고, 2단계 기법을 적용한 결과와 적용하지 않은 결과의 연산횟수를 비교하여 분석하였다.

모의실험 결과 2단계 기법이 미적용 되었을 때, 4개 단말의 위치를 매 단계마다 모두 추정하므로 D 와 무관하게 400번 연산을 반복하였다. 이에 반해, 제안 기법이 적용된 경우에는 기존보다 적은 연산을 수행한 것을 확인할 수 있다. 특히 공격모델인 그림 8의 (a)에서는 작전지역이 커져서 단말간 거리가 점차 늘어남에 따라 연산횟수가 꾸준히 감소하였다. 이는 식 (8)에서의 R 이 커짐에 따라 d 가 커지고, 단말의 신호로부터 측정된 의사거리가 d 보다 작을 확률이 증가하기 때문이다. 의사거리 중 하나라도 d 이하의 값이 존재한다면 Non-promising 정의점으로 분류되어 연산을 수행하지 않으므로 UAV의 연산 복잡도는 감소한다. 반면에 그림 8의 (b)와 같은 방어모델의 경우에는 식 (8)의 d 가 작아지므로 큰 효과를 보이지 않았다.

그림 9는 이전의 실험에서 랜덤하게 생성하였던 단말 위치를 공격과 방어모델의 일반적인 상황으로 고정시킴으로서 중계 UAV가 중계 최적위치를 선정하는 과정을 도식화한 것이다. 그래프 내부의 숫자는 작전 단계의 진행에 따라 각 단말이 위치한 좌표를 의미한다. 이때 단계마다 최적의 UAV 위치가 각각 추정



(a) Attack model



(b) Defense model

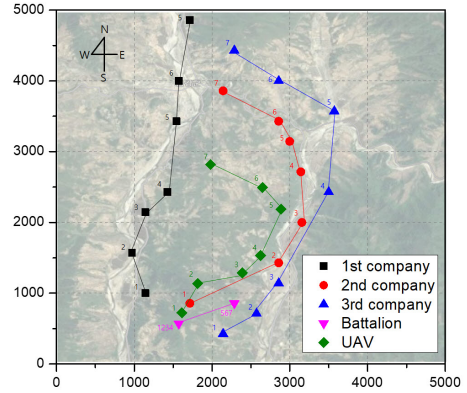
그림 8. 작전단계에 따른 최소제곱법 회귀연산 횟수 비교
Fig. 8. Comparison of LSM regression according to step of operation

되었다. 그림 9를 통해 작전이 단계별로 진행됨에 따라 변화하는 단말의 분포를 UAV가 추적하고 Minimax 기반의 중계 최적위치를 적절히 선정함을 직접 확인할 수 있었다.

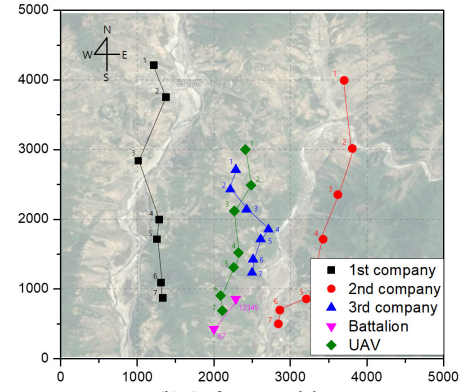
V. 결론

본 논문에서는 지상 단말이 작전경과에 따라 이동하는 전장환경에서 통신 중계용 UAV가 중계를 위한 최적위치를 효율적으로 선정하는 기법을 제안하였다. 제안하는 기법은 크게 2단계로 나누어졌으며, 첫 번째 단계에서 단일 UAV의 빠른 변위를 활용한 TOA 기법과 Minimax 이론으로 최적위치를 선정하였다. 두 번째 단계에서는 UAV의 연산복잡도를 감소시키기 위해 TOA와 P-center의 기하학적인 특성을 활용하여 불필요한 최소제곱법의 회귀연산을 제거하는 방법이 제안되었다.

제안기법은 불확실한 전장의 GPS 사용과는 별개로



(a) Attack model



(b) Defense model

그림 9. 제안기법의 단말과 UAV 경로
Fig. 9. The trajectory of terminals and relay UAV of the proposed scheme

동작하여 거리기반의 중계 최적위치를 선정하였고, 원신호의 타임스탬프만을 활용하여 위치정보 노출의 위험성이 제거할 수 있었다. 또한, 성능평가 결과 일반화된 가상의 공격, 방어모델 시뮬레이션을 통해 실제 환경에서의 활용가능성을 확인할 수 있었다.

References

[1] A. F. B. Hanscom, *Unmanned aircraft system service demand 2015-2035*, Res. Innov. Technol. Admin., U.S. Dept. Transp., Washington, DC, USA, Tech. Rep. DOT-VTSC-DoD-13-01, Sept. 2013.

[2] Robert Marinage, "Toward a New Offset Strategy: Exploiting US Long-Term Advantage to Restore US Global Power Projection Capability," CSBA, DC, Rep. Dec. 2014.

[3] P. Ladosz, et al., "Optimal positioning of communication relay unmanned aerial vehicles in urban environments," *IEEE ICUAS*, pp. 1140-1147, Washington, USA, 2016.

[4] C. Dixon and E. W. Frew, "Optimizing cascaded chains of unmanned aircraft acting as communication relays," *IEEE J. Sel. Areas in Commun.*, vol. 30, no. 5, pp. 883-898, Jun. 2012.

[5] D. Choi, et al., "Low-complexity maneuvering control of a UAV-based relay without location information of mobile ground nodes," *IEEE ISCC*, pp. 1-6, Madeira, Portugal, 2014.

[6] Z. Han, et al., "Optimization of MANET connectivity via smart deployment/movement of unmanned air vehicle," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 59, no. 7, pp. 3533-3546, Sept. 2009.

[6] M. Alzenad, et al., "3-D placement of an unmanned aerial vehicle base station (UAV-BS) for energy-efficient maximal coverage," *IEEE Wireless Commun. Lett.*, vol. 6, no. 4, pp. 434-437, Aug. 2017.

[8] K. Lee and J. Lim, "A positioning algorithm using virtual reference for accuracy improvement in relay-based navigation system," *J. KICS*, vol. 40, no. 10, pp. 2102-2112, 2015.

[9] H. Jee, et al., "Autonomous maneuvering of relay UAV for battlefields using TDOA localization," *IEEE MILCOM*, pp. 453-458, Baltimore, USA, 2017.

[10] J. Elzinga and D. W. Hearn, "Geometrical solution for some minimax location problems," *Transp. Sci.*, vol. 6, no. 4, pp. 379-394, 1972.

지 한 국 (Hanguk Jee)



2009년 3월 : 육군사관학교 무
기공학과 학사
2018년 2월 : 아주대학교 NCW
학과 석사
2018년 1월~현재 : 방사청 전
술통제통신사업팀
<관심분야> 전술통신, 항법

이 종 관 (Jongkwan Lee)



2000년 3월 : 육군사관학교 전
자공학과 학사
2004년 2월 : KAIST 전기 및
전자공학과 석사
2014년 2월 : 아주대학교 NCW
학과 박사
2017년 12월~현재 : 육군사관학
교 컴퓨터과학과 조교수

<관심분야> 사이버전, 국방전술통신, Dynamic TDMA

임 재 성 (Jaesung Lim)



1983년 2월 : 아주대학교 전자
공학 학사
1985년 2월 : KAIST 영상통신
석사
1994년 2월 : KAIST 디지털통
신 박사
1998년 3월~현재 : 아주대학교

소프트웨어학과 정교수
<관심분야> 이동통신, 무선네트워크, 국방전술통신

박 찬 이 (Chan Yi Park)



1998년 2월 : 부산대학교 컴퓨
터공학과 학사
2000년 2월 : POSTECH 컴퓨
터공학과 석사
2002년 1월~현재 : 국방과학연
구소 책임연구원

<관심 분야> 전술통신, 이동통
신, 위성통신, M&S