

환경 변화에 적응적인 FANET 토폴로지 재구성

김도엽*, 이장원^o

FANET Topology Reconfiguration Adaptive to Environmental Changes

Do-Yup Kim*, Jang-Won Lee^o

요약

본 논문에서는 주어진 임무를 수행하기 위해 지상 관제탑(GCS)과 다수의 무인항공기(UAV)로 구성된 공중 애드 혹 네트워크(FANET)가 운용되는 상황에서 환경 변화에 맞춰 적응적으로 토폴로지를 재구성하는 문제를 다룬다. 본 논문에서는 체계적인 시스템 모델과 최적화 문제를 세우고, 알고리즘을 제시한다.

Key Words : Flying ad hoc network (FANET), topology control, unmanned aerial vehicle (UAV).

ABSTRACT

In this letter, we study an adaptive topology reconfiguration problem in response to environmental changes in a flying ad hoc network (FANET) that consists of a ground control station (GCS) and multiple unmanned aerial vehicles (UAVs). We present systematic system model, optimization problem, and algorithm.

1. 서론

최근 무인항공기(UAV)의 소형화와 비용절감으로 인해 다수의 고성능 센서를 탑재한 UAV로 구성된 공

중 애드 혹 네트워크(FANET)를 운용하는 다양한 애플리케이션이 제안되고 있다^{1,2)}. 특히 UAV의 높은 이동성 때문에 UAV 배치에 의존적인 FANET 토폴로지 제어에 관한 연구가 주목받고 있다³⁻⁶⁾.

[4]에서는 최대한 높은 네트워크 통신 성능을 갖는 FANET 토폴로지가 구성되도록 최적의 위치에 UAV를 배치하는 연구가 진행되었고, [5]에서 UAV의 동적인 움직임이 추가로 고려되어 연구가 확장되었다. [6]에서는 UAV의 배치뿐만 아니라 임무 할당을 함께 고려하여 FANET 토폴로지를 구성하는 연구가 진행되었다.

FANET은 특정한 임무 수행을 목적으로 주로 이용되며, 제한된 배터리를 갖는 고장에 민감한 UAV로 이루어져 있다. 따라서 기용 UAV 및 수행 임무의 변화는 매우 중요한 고려사항이다. 그러나 앞서 소개한 기존 연구⁴⁻⁶⁾에서는 모두 UAV와 임무를 고정된 집합으로 갖는 시스템을 고려하였다.

따라서 본 논문에서는 다수의 임무를 수행하기 위해 FANET이 운용되고 있을 때, 특정 임무의 완수 및 중단, 새로운 임무의 추가, 특정 UAV의 배터리 방전 및 고장, 새로운 UAV의 추가 등의 환경 변화에 맞춰 적응적으로 FANET 토폴로지를 재구성하기 위한 최적화 문제를 제시하고, NP-hard 클래스에 속하는 기존 문제를 선형 문제로 변환하여 손쉽게 해결하는 알고리즘을 개발한다.

II. 시스템 모델

본 논문에서는 하나의 지상 관제탑(GCS)과 최대 하나의 임무를 수행할 수 있는 다수의 UAV로 구성된 FANET을 운용하여, 다수의 임무를 수행하는 시스템을 고려한다. GCS는 g , UAV 집합은 U , 임무 집합은 M , GCS의 위치는 x_g , UAV u 의 위치는 x_u , UAV의 위치 집합은 $X = \{x_u\}_{u \in U}$ 로 표기한다. GCS와 UAV를 FANET 노드로 총칭하고, GCS는 이동성이 없으며 위치가 주어졌다고 가정한다. 임의의 두 노드 u 와 v 의 링크를 (u, v) 로 표기하고, 해당 링크의 길이가 δ_c 이하면 서로 통신이 가능하고, δ_s 이

* 본 연구는 과학기술정보통신부의 재원으로 한국연구재단, 무인이동체미래선도핵심기술개발사업단의 지원을 받아 수행되었음. (NRF-2018M1B3A1A02937507)

• First Author : (ORCID:0000-0002-4165-1323) Yonsei University, Department of Electrical and Electronic Engineering, danny.doyup.kim@yonsei.ac.kr, 학생회원

o Corresponding Author : (ORCID:0000-0002-5627-5914) Yonsei University, Department of Electrical and Electronic Engineering, jangwon@yonsei.ac.kr, 종신회원

논문번호 : 201812-375-B-LU, Received June 16, 2018; Revised December 19, 2018; Accepted December 19, 2018

상이면 충돌 사고로부터 안전하다고 가정한다. 본 논문에서는 하나의 UAV에 의해 수행되어야 하는 임무를 고려하고, 각 임무 m 은 최적의 임무수행 지점 \mathbf{p}_m 을 가진다고 가정한다. 임무 m 을 수행하는 UAV를 σ_m 으로 표기하고, σ_m 은 \mathbf{p}_m 에 위치해서 해당 임무를 수행해야 한다고 가정한다. 즉, $\mathbf{x}_{\sigma_m} = \mathbf{p}_m, \forall m \in \mathcal{M}$. 어떠한 임무도 수행하지 않는 UAV는 FANET의 중계 노드로 운용된다.

일반적으로 애드 혹 네트워크에서 라우팅 경로는 사전에 정의된 라우팅 프로토콜에 의해 결정된다. 본 논문에서는 사용 중인 라우팅 프로토콜은 알려져 있다고 가정하고, 해당 라우팅 프로토콜을 노드의 위치 정보를 기반으로 경로를 출력하는 라우팅 함수 $\rho: \{u, \mathbf{x}_g, \mathbf{X}\} \mapsto \rho_u$ 로 모델링하여 고려한다. 출력 값 ρ_u 는 UAV u 와 GCS g 사이의 라우팅 경로를 나타내는 링크 집합이다. 라우팅 함수를 도입함으로써, 본 연구의 적용 범위를 노드의 위치 정보를 기반으로 경로를 결정하는 라우팅 프로토콜을 사용하는 임의의 시스템으로 확장할 수 있다.

III. 문제 형성

이번 장에서는 환경 변화가 발생했을 때, 변화된 환경에 맞게 FANET 토폴로지를 재구성하는 문제를 형성한다. 여기서 환경 변화는 UAV의 배터리 방전, 고장, 추가 및 임무의 완수, 중단, 추가 등을 의미한다. 본 논문에서는 이러한 환경 변화를 FANET에서 UAV 노드의 제거와 추가, 임무의 제거와 추가로 일반화하여 고려하고, 해당 집합을 각각 \mathcal{U}_{del} 와 \mathcal{U}_{new} , \mathcal{M}_{del} 와 \mathcal{M}_{new} 로 표기한다. 표기의 편의를 위해, 본 논문에서는 환경 변화 이전과 이후를 각각 아래 첨자 t 와 τ 로 구별한다. 예를 들어, 환경 변화 이전의 UAV 집합과 임무 집합은 각각 \mathcal{U}_t 와 \mathcal{M}_t 로 표기하고, 환경 변화 이후의 UAV 집합과 임무 집합은 각각 $\mathcal{U}_\tau := \mathcal{U}_t \setminus \mathcal{U}_{del} \cup \mathcal{U}_{new}$ 와 $\mathcal{M}_\tau := \mathcal{M}_t \setminus \mathcal{M}_{del} \cup \mathcal{M}_{new}$ 로 표기한다.

본 논문에서는 값이 작을수록 좋은 성능을 나타내는 다음의 세 가지 성능 함수를 정의한다.

$$f_1(\mathbf{X}_t, \rho) = \sum_{m \in \mathcal{M}(u,v) \in \rho(\sigma_m, \mathbf{x}_g, \mathbf{X}_t)} \|\mathbf{x}_{u,\tau} - \mathbf{x}_{v,\tau}\|^2. \quad (1)$$

$$f_2(\mathbf{X}_t, \mathbf{X}_\tau) = \max_{u \in \mathcal{U}_\tau} \frac{\|\mathbf{x}_{u,\tau} - \mathbf{x}_{u,t}\|}{V}. \quad (2)$$

$$f_3(\mathbf{X}_t, \mathbf{X}_\tau) = \sum_{u \in \mathcal{U}_\tau} \|\mathbf{x}_{u,\tau} - \mathbf{x}_{u,t}\|. \quad (3)$$

위 식에서 $\|\cdot\|$ 는 ℓ_2 -norm을 나타내고, V 는 UAV의 속도를 나타낸다. 식 (1)은 네트워크 통신 성능을 나타내는 성능 함수로써, 무선 통신 성능이 거리에 반비례한다는 사실로부터, 각 임무수행 UAV와 GCS 사이의 라우팅 경로에 속하는 링크 길이의 제곱의 합으로 정의된다. 식 (2)는 토폴로지 재구성 딜레이를 나타내는 성능 함수로써, 이동거리를 속도로 나눈 값이 소요시간이라는 사실로부터, 토폴로지가 재구성되기 위해 필요한 각 UAV의 소요시간 중 가장 큰 값으로 정의된다. 식 (3)은 UAV의 전반적인 부하를 나타내는 성능 함수로써, 토폴로지가 재구성되기까지 필요한 모든 UAV들의 이동거리의 총합으로 정의된다. 위 성능 함수에서 새롭게 추가되는 UAV의 경우, GCS에 위치해 있었다고 가정한다. 즉, $\mathbf{x}_{u,t} = \mathbf{x}_g, \forall u \in \mathcal{U}_{new}$.

본 논문에서는 일시적인 토폴로지 재구성 과정에 대한 딜레이나 모든 UAV들의 총 이동거리에 비해 토폴로지 재구성 이후 지속될 네트워크 통신 성능을 훨씬 중요한 성능으로 고려한다. 따라서 $w_1 \gg w_2 + w_3$ 를 만족하는 f_1, f_2, f_3 에 대한 가중치 파라미터 w_1, w_2, w_3 을 도입하여 다음의 FANET 토폴로지 재구성 문제를 형성한다.

$$\underset{\mathbf{x}_{u,\tau} \in \mathcal{S} \forall u \in \mathcal{U}_\tau}{\text{minimize}} w_1 f_1(\mathbf{X}_\tau, \rho) + \sum_{i \in \{2,3\}} w_i f_i(\mathbf{X}_t, \mathbf{X}_\tau) \quad (4)$$

subject to

$$\|\mathbf{x}_{u,\tau} - \mathbf{x}_{v,\tau}\| \leq \delta_c, \forall (u,v) \in \rho_w, \forall w \in \mathcal{U}_\tau \quad (4-1)$$

$$\|\mathbf{x}_{u,\tau} - \mathbf{x}_{v,\tau}\| \geq \delta_s, \forall u,v \in \mathcal{U}_\tau, u \neq v, \quad (4-2)$$

$$\sigma_m \neq \sigma_n, \forall m,n \in \mathcal{M}_\tau, m \neq n, \quad (4-3)$$

$$\mathbf{x}_{\sigma_m,\tau} = \mathbf{p}_m, \forall m \in \mathcal{M}_\tau \quad (4-4)$$

$$\mathbf{x}_{\sigma_m,\tau} = \mathbf{x}_{\sigma_m,t}, \forall m \in \mathcal{M}_t \cap \mathcal{M}_\tau \quad (4-5)$$

위 식에서 \mathcal{S} 는 UAV의 배치 가능한 영역을 나타내는 집합이고, (4-1)은 모든 UAV와 GCS 간의 통신 보장을, (4-2)는 UAV 충돌 사고로부터의 안전 보장을, (4-3)은 UAV가 최대 1개의 임무를 수행할 수 있음을,

(4-4)는 임무수행 UAV는 최적의 임무수행 지점에 배치되어야 함을, (4-5)는 환경 변화 이후 지속되는 임무는 동일 UAV가 수행함을 나타낸다.

IV. 문제 해결

본 논문에서는 문제 (4)를 해결하기 위해, 선점형 최적화 방식^[7]을 이용한다. 선점형 최적화 방식은 우선순위가 높은 목적식만 고려해서 최적해 집합을 우선 구하고, 다음 순위의 목적식을 고려해서 최적해 집합을 축소해나가는 방식이다. 따라서 f_1 을 최소화하는 최적해 집합을 먼저 구하고, 구한 최적해 집합 내에서 f_2 와 f_3 를 최소화하는 해를 구한다. 문제 (4)의 제약식을 모두 만족하면서 f_1 을 최소화하는 문제를 해결하기 위해, 앞선 연구^[5]에서 개발한 FANET 토폴로지 구성 (FTC) 알고리즘을 이용한다. FTC 알고리즘은, 일반성을 잃지 않고 UAV의 수가 N 일 때, 각 UAV의 배치를 정해주는 것은 않지만 f_1 을 최소화하는 최적의 위치 집합 $\{\mathbf{y}_1, \dots, \mathbf{y}_N\}$ 을 제공해준다. 즉, N 개의 UAV가 N 개의 최적의 위치에 중복 없이 배치되면 f_1 은 최소로 유지된다. 그러나 어느 위치에 어느 UAV를 배치하는지에 따라 f_2 와 f_3 의 값은 달라질 수 있다. 따라서 본 논문에서는 UAV $u_i \in \mathcal{U}_r$ 를 \mathbf{y}_j 에 배치하면 1, 아니면 0인 변수 $z_{i,j}$ 를 도입하여, 중복 없는 배치를 유지하면서 토폴로지 재구성에 대한 딜레이와 모든 UAV들의 총 이동거리를 최소화하는 다음의 문제를 형성한다.

$$\text{minimize } w_2 \max_{z_{i,j}, \forall i,j} \frac{c_{i,j} z_{i,j}}{V} + w_3 \sum_i \sum_j c_{i,j} z_{i,j} \quad (5)$$

subject to

$$\sum_i z_{i,j} = 1, \quad \forall j, \quad (5-1)$$

$$\sum_j z_{i,j} = 1, \quad \forall i, \quad (5-2)$$

$$z_{i,j} \in \{0,1\}, \quad \forall i,j. \quad (5-3)$$

위 식에서 $c_{i,j} := \|\mathbf{x}_{u_i} - \mathbf{y}_j\|$ 는 UAV u_i 가 \mathbf{y}_j 에 배치되기 위한 이동거리이다. 추가로 $\max_{i,j} c_{i,j} z_{i,j}$ 을 대변하는 변수 K 를 도입하여, 문제 (5)를 다음의 동치 문제로 변환할 수 있다.

표 1. 모의실험 파라미터
Table 1. Simulation parameter

Item	Value	Item	Value
S	$[0,1000]^2$	δ_e, δ_s	300 m, 30 m
\mathcal{U}_i	$\{u_1, \dots, u_{10}\}$	V	60 m/s
\mathcal{M}_i	$\{m_1, m_2, m_3\}$	\mathcal{P}_{m_1}	(0, 1000)
\mathcal{U}_{del}	$\{u_2, u_3\}$	\mathcal{P}_{m_2}	(500, 1000)
\mathcal{U}_{new}	$\{u_{11}, u_{12}\}$	\mathcal{P}_{m_3}	(1000, 1000)
\mathcal{M}_{del}	$\{m_2, m_3\}$	\mathcal{P}_{m_4}	(0, 400)
\mathcal{M}_{new}	$\{m_4, m_5\}$	\mathcal{P}_{m_5}	(800, 400)

$$\text{minimize } w_2 \frac{K}{V} + w_3 \sum_i \sum_j c_{i,j} z_{i,j} \quad (6)$$

subject to

$$c_{i,j} z_{i,j} \leq K, \quad \forall i,j, \quad (6-1)$$

$$\sum_i z_{i,j} = 1, \quad \forall j, \quad (6-2)$$

$$\sum_j z_{i,j} = 1, \quad \forall i, \quad (6-3)$$

$$z_{i,j} \in \{0,1\}, \quad \forall i,j. \quad (6-4)$$

위 식에서 (6-1)은 목적식에서 $\max_{i,j} c_{i,j} z_{i,j}$ 를 K 로 대치함에 따라 파생하는 제약식이고, 나머지 (6-2), (6-3), (6-4)는 문제 (5)에서의 제약식과 동일하다. 위 문제는 다양한 선형 계획법 알고리즘을 통해 해결될 수 있지만, 본 논문에서는 Matlab 내장 알고리즘 linprog를 이용해서 최적해를 구한다.

V. 모의실험 및 분석

이번 장에서는 환경 변화가 발생했을 때, 변화된 환경에 맞게 FANET 토폴로지를 재구성하는 모의실험을 수행한다. 본 모의실험에서 사용하는 파라미터는 표 1에 정리되어 있고, 환경 변화 이전에 FANET 토폴로지는 그림 1의 실선과 같이 주어져 있다고 가정한다. 환경 변화는 기존 UAV와 임무가 2개씩 없어지고, 새 UAV와 임무가 2개씩 추가되는 상황을 고려한다. 그림 1의 점선은 FTC 알고리즘을 통해 얻은 환경 변화 이후에 대한 최적의 위치에 UAV가 중복 없이 배치될 때의 FANET 토폴로지를 나타낸다. 환경 변

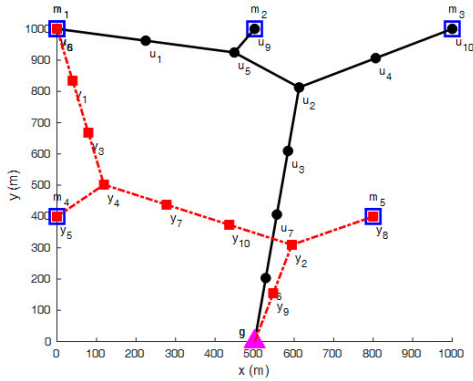


그림 1. 환경 변화 전후의 FANET 토폴로지
 Fig. 1. FANET topology before (solid line) and after (dotted line) environmental changes, where u_i is the i th UAV, y_j is the j th optimal location obtained by the FTC algorithm, and m_k is the k th mission.

화 이전의 UAV 위치와 FTC 알고리즘을 통해 얻은 최적의 위치로부터 $\{c_{i,j}\}$ 를 구하고, 문제 (6)을 해결하여 $z_{ij} = 1$ 인 경우, UAV u_i 를 y_j 로 이동시킴으로써 토폴로지를 재구성한다.

그림 2는 $w_2 + w_3 = 100$ 일 때, w_2 가 0에서 100까지 변화함에 따라 토폴로지 재구성 딜레이 f_2 와 모든 UAV들의 총 이동거리 f_3 를 나타낸다. 가중치 w_2 가 증가할수록 토폴로지 재구성 딜레이는 감소하지만, 반대로 UAV들의 총 이동거리는 증가하여 두 성능지표 간 trade-off가 존재함을 보여준다. 또한 가중치 w_2 가 20에서 60 사이로 설정될 때, 토폴로지 재구성 딜레이와 UAV들의 총 이동거리 모두 적절하게 좋은 성능이

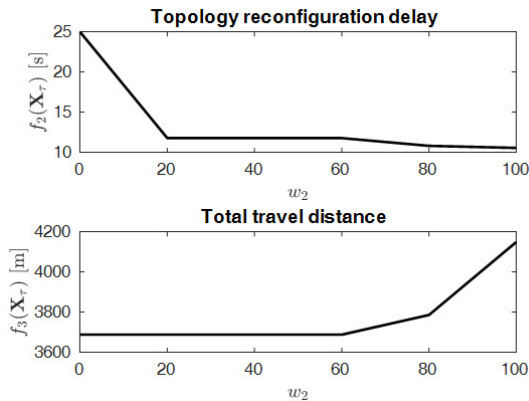


그림 2. FANET 토폴로지 재구성 딜레이 및 모든 UAV들의 총 이동거리 성능 결과
 Fig. 2. FANET topology reconfiguration delay and total travel distance performance results

주어짐을 보여준다.

VI. 결론

본 논문에서는 환경 변화에 따라 적응적으로 FANET의 토폴로지를 재구성하는 연구를 수행하였다. 네트워크 통신 성능뿐만 아니라 토폴로지 재구성 딜레이와 모든 UAV들의 총 이동거리를 함께 고려하여 효율적으로 토폴로지를 재구성하는 솔루션을 제시하였다.

References

- [1] İ. Bekmezci *et al.*, “Flying ad-hoc networks (FANETs): A survey,” *Ad Hoc Netw.*, vol. 11, no. 3, pp. 1254-1270, May 2013.
- [2] S. Hayat *et al.*, “Survey on unmanned aerial vehicle networks for civil applications: A communications viewpoint,” *IEEE Commun. Surveys Tuts.*, vol. 18, no. 4, pp. 2624-2661, 4th Quart. 2016.
- [3] D.-Y. Kim and J.-W. Lee, “Survey on topology management techniques in unmanned aerial vehicle networks,” *J. KICS*, vol. 43, no. 2, pp. 333-343, Feb. 2018.
- [4] D.-Y. Kim and J.-W. Lee, “Topology construction for flying ad hoc networks (FANETs),” in *Proc. ICTC*, pp. 153-157, Jeju, South Korea, Oct. 2017.
- [5] D.-Y. Kim and J.-W. Lee, “Integrated topology management in flying ad hoc networks: Topology construction and adjustment,” *IEEE Access*, vol. 6, pp. 61196-61211, 2018.
- [6] D.-Y. Kim and J.-W. Lee, “Joint mission assignment and location management for UAVs in mission-critical flying ad hoc networks,” in *Proc. ICTC*, pp. 323-328, Jeju, South Korea, Oct. 2018.
- [7] Ronald L. Rardin, *Optimization in operations research*, Prentice-Hall, 1998.