

재난 상황에서 다중 드론을 활용한 수송 문제의 혼합 정수 계획 모형

최현석, 정태수*
고려대학교 산업경영공학부
{frank3217, tcheong}@korea.ac.kr

A Mixed Integer Programming Model for the Vehicle Routing Problem Using Multiple UAVs in Disaster Scenarios

Hyun Suk Choi, Taesu Cheong*
School of Industrial Management Engineering, Korea University

요 약

본 논문은 재난 상황에서의 배송 드론과 통신 드론을 활용한 배송에 대해 각 드론들의 경로를 구하는 정수 계획 모형을 제시한다. 우선 최종 배송 시간을 최소화 하는 배송 드론의 경로 결정 문제의 정수 계획 모형과 시간대 별 배송 드론의 위치를 계산한다. 이후 배송 드론이 관제 센터와 통신이 가능하도록 하는 시간대 별 통신 드론의 위치 결정 문제의 정수 계획 모형을 제시한다.

I. 서 론

최근 미국, 영국 등 선진국에서 대규모 물류 배송에 드론을 활용하는 사례가 증가하고 있다. 또한, 재난 상황에서 생필품 배송 등 기존의 운송 수단으로 배송이 힘든 물류 상황에 드론이 활용된다 [1]. 그러나 재난 상황에서 천재 지변 등으로 인해 통신 문제가 발생한다. 이 경우 중계 드론(Relay Drone)을 활용하여 배송 드론과 관제 센터 간 통신을 원활하게 할 수 있다 [2,3]. 중계 드론을 활용하기 위해, 배송 드론의 경로와 함께 그에 따른 중계 드론의 경로도 동시에 결정해야 한다. 본 연구에서는 이러한 의사결정 문제를 해결하기 위한 정수계획법 기반 수리모형을 제시한다.

II. 본 론

1. 배송 드론의 경로 결정 모형 및 시간별 위치 계산을 위한 수리모형

각 배송 드론은 관제 센터에서 출발해 배송지에 도착하여 물품을 하차한 후, 다른 배송지로 가거나 관제 센터로 귀환한다. 모든 배송지에는 단 하나의 드론이 방문해야 하며 한 드론은 여러 번 비행 가능하다. 하차 시간, 드론의 속도, 최대 적재량은 고정되어 있으며, 관제 센터로 돌아온 후 일정 시간의 충전을 통해 배터리를 완충한다. 이 때 총 배송 시간과 배송 비용을 최소화하는 배송 드론의 경로를 구하기 위한 수리 모형은 다음과 같다.

1.1. 집합 및 계수

D : 배송 드론의 인덱스 집합

I : 배송지의 인덱스 집합

J : 관제 센터의 인덱스 집합

$N = I \cup J$: 노드 집합

F : 드론 별 배송 별 인덱스 집합

d_i : 각 배송지 별 수요량

T_e : 배터리 교환시간

T_u : 배송 드론의 하차 시간

CP : 배송 드론의 최대 적재 용량

FT_D : 배송 드론의 비행 가능 시간

t_{ij}^D : 배송 드론이 노드 i 에서 노드 j 로 가는 이동시간

1.2 결정변수

x_{ijf}^k : 배송 드론 k 가 f 번째 배송에서 노드 i 에서 노드 j 로 이동하면 1, 아니면 0 인 이진 변수 ($k \in D, i \in N, j \in N, f \in F, i \neq j$)

y_k : 배송 드론 k 가 사용되면 1, 아니면 0 인 이진 변수 ($k \in D$)

a_i : 배송지 i 에 마지막 배송 드론이 도착하는 시간 ($i \in N$)

a_{jf}^k : 배송 드론 k 의 f 번째 배송에서 물류 센터 j 에 도착하는 시간 ($k \in D, j \in J, f \in F$)

a_{max} : 모든 배송이 끝나는 시간

1.3. 제약식

$$\sum_{j \in N} x_{ijf}^k = \sum_{j \in N} x_{jif}^k \quad \text{for } k \in D, f \in F, i \in I \quad (1)$$

$$\sum_{i \in I} \sum_{j \in J} x_{ijf}^k = \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} x_{jif}^k \quad \text{for } k \in D, f \in F \quad (2)$$

$$\sum_{k \in D} \sum_{j \in N} \sum_{f \in F} x_{ijf}^k = 1 \quad \text{for } i \in I \quad (3)$$

$$\sum_{k \in D} \sum_{i \in I} x_{ijf}^k \leq 1 \quad \text{for } f \in F, \text{for } j \in J \quad (4)$$

$$My_k \geq \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \sum_{f \in F} x_{ijf}^k \quad \text{for } k \in D \quad (5)$$

$$a_i \geq a_j + t_u + t_{ij}^D + M(x_{ijf}^k - 1) \text{ for } k \in D, i \in I, f \in F, j \in N \quad (6)$$

$$a_{jf}^k \geq a_i + t_{ij}^D + M(x_{ijf}^k - 1) \text{ for } k \in D, f \in F, i \in I, j \in J \quad (7)$$

$$FT_D \geq a_{jk}^f \text{ for } k \in D, f \in F, j \in J \quad (8)$$

$$a_{max} \geq \sum_{f \in F} a_{jk}^f \text{ for } k \in D, j \in J \quad (9)$$

$$CP \geq \sum_{i \in I} \sum_{j \in N} d_i x_{ijf}^k \text{ for } k \in D, f \in F \quad (10)$$

$$\sum_{i,j \in Q, i \neq j} x_{ijf}^k \leq |Q| - 1 \text{ for } k \in D, f \in F, Q \subset I \quad (11)$$

1.4. 목적식

최종 수송 시간을 최소화하기 위하여 $\min a_{max}$ 를 목적식으로 설정하여 최적해를 계산한다. 최적해의 최종 배송 시간 a'_{max} 에 대해 제한식 $a_{max} \leq a'_{max}$ 를 추가하고 이하의 식을 최소로 하는 최적해를 계산한다.

$\sum_{k \in D} \sum_{i \in N} \sum_{j \in J} \sum_{f \in F} CC_D t_{ijf}^D x_{ijf}^k + \sum_{i \in I} EC_D d_i a_i + FC_D \sum_{k \in D} y_k$ 이는 총 비용의 계산식으로, 통신 비용과 전기 비용, 사용되는 드론 개수의 선형 합을 의미한다.

1.5. 배송 드론의 실시간 위치 계산 방법론

1.1 절부터 1.4 절의 정수 계획 모형을 통해 각 드론의 경로가 결정되고, 배송 드론 k 의 배송지 i 의 도착 시간 a_i^k 가 결정된다. 이를 통해 시간 t 에서 드론의 위치를 계산한다. 드론의 경로 $(d(1), \dots, d(n))$ 에서 $\sum_{i=1}^{m-1} (t_{d(i), d(i+1)} + T_u) \leq t$ 을 만족하는 배송지 $d(m)$ 에 대해 $d(m)$ 에서 출발 후 이동한 시간 t_R^k 은 하기와 같다:

$$t_R^k = t - \sum_{i=1}^{m-1} (t_{d(i), d(i+1)} + T_u).$$

배송지 i 의 위치 pt_i 에 대해 이하의 식을 통해 시간대 t 에서 위치를 계산한다. $t_{d(m), d(m+1)} \leq t_R^k$ 면 드론의 위치는 다음과 같다:

$$d_t = \frac{t_R^k pt_{d(m)} + (t_{d(m), d(m+1)} - t_R^k) pt_{d(m)}}{t_{d(m), d(m+1)}^D}.$$

2. 중계 드론의 위치 결정을 위한 수리 모형

배송 작업과 다른 드론이나 관제 센터와 통신을 같이 수행할 수 있는 배송 드론과 달리, 중계 드론은 통신 작업만 수행 가능하다. 드론이 관제 센터와 통신하기 위해선 직접 관제 센터와 통신하거나, 관제 센터와 통신 가능한 다른 드론과 연결되어야 한다. 여기서 중계 드론은 관제 센터나 통신 가능한 다른 드론에 연결이 불가능한 배송 드론을 관제 센터와 통신 가능하도록 연결한다. 본 모형은 현재 시간대 t 에서 배송 드론의 위치와 직전 시간대 t' 의 수송 드론의 위치에 대해 배송 드론들이 모두 통신 가능하도록 하는 수송 드론의 위치의 결정 문제 모형이다.

2.1. 집합 및 계수

CD_C : 관제 센터와 중계 드론 간 통신 가능 거리

CD_R : 중계 드론과 드론 간 통신 가능 거리

R : 중계 드론의 인덱스 집합

D : 시각 t 에서 배송 드론의 위치의 집합

J : 관제 센터의 인덱스 집합

P_k : 중계 드론 k 가 이동 가능한 지점의 집합

P : 모든 P_k 의 합집합

P_{out} P 의 지점 중 관제 센터나 배송 드론과 통신 불가능한 지점의 집합

$dist(i, j)$: 지점 i 와 지점 j 간 거리

$Neighbor(i)$: 지점 i 와 통신 가능한 지점, 관제 센터, 배송 드론의 집합

2.2. 결정 변수

x_i^k : 중계 드론 k 가 지점 i 에 위치하면 1, 아니면 0 인 이진 변수 ($k \in R, i \in P_k$)

y_{dj} : 배송 드론 d 의 중계 드론 연결 필요 여부를 나타내기 위한 이진 더미 변수 ($d \in D, j \in J \cup D, d \neq j$)

z_{ij} : 드론의 통신 가능 여부를 확인하기 위한 정수 더미 변수 ($i \in P \cup D \cup J, j \in Neighbor(i) \setminus J$)

2.3. 제약식

$$\sum_{i \in P_k} x_i^k = 1 \text{ for } k \in R \quad (11)$$

$$\sum_{k \in R} x_i^k \leq 1 \text{ for } i \in P \quad (12)$$

$$\sum_{i \in Neighbor(d) \cap P_k} \sum_{k \in R} x_i^k \geq y_{dj} \frac{dist(j, d) - CD_C}{M} \text{ for } d \in D, j \in J \quad (13)$$

$$\sum_{i \in Neighbor(d) \cap P_k} \sum_{k \in R} x_i^k \geq y_{dj} \frac{dist(j, d) - CD_R}{M} \text{ for } d \in D, j \in D, j \neq d \quad (14)$$

$$\sum_{j \in J \cup D} y_{dj} \geq 1 \text{ for } d \in D \quad (15)$$

$$\sum_{k \in R} x_i^k \leq \sum_{j \in Neighbor(i)} \sum_{k \in R} x_j^k \text{ for } i \in P_{out} \quad (16)$$

$$M \sum_{k \in R} x_i^k \geq z_{ij} \text{ for } i \in P \quad (17)$$

$$M \sum_{k \in R} x_j^k \geq z_{ij} \text{ for } j \in P \quad (18)$$

$$\sum_{i \in J} \sum_{j \in P} z_{ij} = \sum_{k \in R} \sum_{i \in P_k} x_i^k + |D| \quad (19)$$

$$\sum_{j \in N} z_{ji} - \sum_{j \in N} z_{ij} = \sum_{k \in R} x_i^k \text{ for } i \in P \quad (20)$$

$$\sum_{j \in N} z_{ji} - \sum_{j \in N} z_{ij} = \sum_{k \in R} x_i^k \text{ for } i \in P \quad (21)$$

III. 결론

본 방법론은 수리 모형을 통해 다중 드론들의 최적 경로를 도출한다. 또한 실시간별 재난 상황에 따라 배송 가능 지점을 선택할 수 있다. 다만, 통신 드론의 최대 비행 시간 및 성능 평가를 위한 목적식을 포함하는 추가 연구가 필요하다.

ACKNOWLEDGMENT

이 성과는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 정보통신기획평가원-대학 ICT 연구센터(ITRC) (IITP-2025-RS-2024-00436887) 및 한국연구재단(RS-2025-00521940)의 지원을 받아 수행된 연구임.

참고 문헌

- [1] Panda, K. G., Das, S., Sen, D., & Arif, W. (2019). Design and deployment of UAV-aided post-disaster emergency network. *IEEE access*, 7, 102985-102999
- [2] Yanmaz, E. (2022). Positioning aerial relays to maintain connectivity during drone team missions. *Ad Hoc Networks*, 128, 102800.
- [3] Yin, D., Yang, X., Yu, H., Chen, S., & Wang, C. (2023). An air-to-ground relay communication planning method for UAVs swarm applications. *IEEE Transactions on Intelligent Vehicles*, 8(4), 2983-2997.