



(19) 대한민국특허청(KR)
(12) 공개특허공보(A)

(11) 공개번호 10-2022-0147921
(43) 공개일자 2022년11월04일

(51) 국제특허분류(Int. Cl.)
G08G 5/04 (2006.01) G08G 5/00 (2006.01)
H04B 10/114 (2013.01)

(52) CPC특허분류
G08G 5/045 (2013.01)
G08G 5/0047 (2013.01)

(21) 출원번호 10-2021-0055050
(22) 출원일자 2021년04월28일
심사청구일자 2021년04월28일

(71) 출원인
연세대학교 산학협력단
서울특별시 서대문구 연세로 50 (신촌동, 연세대학교)

(72) 발명자
정종문
서울특별시 서대문구 연세로 50, 연세대학교 제3공학관 C203-1(신촌동)

송수은
서울특별시 서대문구 연세로 50, 연세대학교 제3공학관 C203-1(신촌동)
(뒷면에 계속)

(74) 대리인
민영준

전체 청구항 수 : 총 20 항

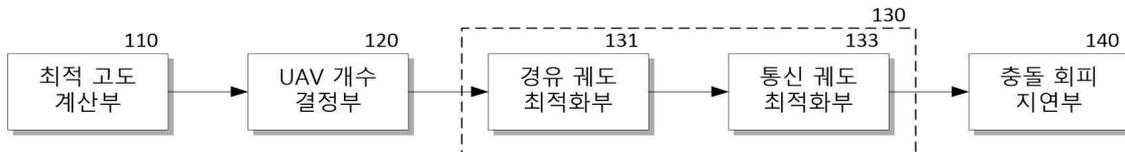
(54) 발명의 명칭 다수의 UAV 궤도 최적화 장치 및 방법

(57) 요약

본 발명은 지상에 위치하는 다수의 지상 터미널과 FSO 통신을 수행하는 UAV 개수를 기지정된 초기값부터 지상 터미널의 개수까지 증가시키면서, 다수의 지상 터미널을 증가되는 개수의 UAV에 분할 할당하고, 각 UAV의 할당된 지상 터미널에 대한 경유 순서를 결정하며, UAV의 개수에 따른 전체 에너지 대비 할당된 지상 터미널과 FSO 통신

(뒷면에 계속)

대표도 - 도2



을 위해 이용할 수 있는 근사 서비스 시간이 최대화되는 UAV 개수를 계산하여 선택하는 UAV 개수 결정부 및 선택된 개수의 UAV 각각이 할당된 지상 터미널을 지정된 순서로 경유할 때, 각 지상 터미널의 기지정된 FSO 통신 영역 밖에서 이동하는 동안 소모하는 경유 에너지가 최소가 되도록 하는 경유 궤도를 추출하여 설정하고, 각 UAV가 각 지상 터미널의 기지정된 FSO 통신 영역 내로 진입하면, 각 UAV의 전체 에너지에서 경유 에너지를 차감한 잔여 에너지 대비, 지상 터미널과의 통신 가능 시간인 서비스 시간이 최대가 되도록 하는 통신 궤도를 추출하여 설정하는 UAV 궤도 최적화부를 포함하여, 최소 개수의 UAV로 통신 성능과 에너지 효율성을 최대화할 뿐만 아니라, UAV 사이에 최소 거리를 유지하여 충돌을 방지할 수 있는 다수의 UAV 궤도 최적화 장치 및 방법을 제공한다.

(52) CPC특허분류

H04B 10/114 (2013.01)

(72) 발명자

최민수

서울특별시 서대문구 연세로 50, 연세대학교 제3공학관 C203-1(신촌동)

고다운

서울특별시 서대문구 연세로 50, 연세대학교 제3공학관 C203-1(신촌동)

이 발명을 지원한 국가연구개발사업

과제고유번호	1711126194
과제번호	2019-0-00685-003
부처명	과학기술정보통신부
과제관리(전문)기관명	정보통신기획평가원
연구사업명	방송통신산업기술개발(R&D, 정보화)
연구과제명	무선광통신 기반 수직 이동통신 네트워크 기술 개발
기여율	1/1
과제수행기관명	연세대학교 산학협력단
연구기간	2021.01.01 ~ 2021.12.31

명세서

청구범위

청구항 1

지상에 위치하는 다수의 지상 터미널과 FSO 통신을 수행하는 UAV 개수를 기지정된 초기값부터 상기 지상 터미널의 개수까지 증가시키면서, 다수의 지상 터미널을 증가되는 개수의 UAV에 분할 할당하고, 각 UAV의 할당된 지상 터미널에 대한 경유 순서를 결정하며, UAV의 개수에 따른 전체 에너지 대비 할당된 지상 터미널과 FSO 통신을 위해 이용할 수 있는 근사 서비스 시간이 최대화되는 UAV 개수를 계산하여 선택하는 UAV 개수 결정부; 및

선택된 개수의 UAV 각각이 할당된 지상 터미널을 지정된 순서로 경유할 때, 각 지상 터미널의 기지정된 FSO 통신 영역 밖에서 이동하는 동안 소모하는 경유 에너지가 최소가 되도록 하는 경유 궤도를 추출하여 설정하고, 각 UAV가 각 지상 터미널의 기지정된 FSO 통신 영역 내로 진입하면, 각 UAV의 전체 에너지에서 경유 에너지를 차감한 잔여 에너지 대비, 지상 터미널과의 통신 가능 시간인 서비스 시간이 최대가 되도록 하는 통신 궤도를 추출하여 설정하는 UAV 궤도 최적화부를 포함하는 UAV 궤도 최적화 장치.

청구항 2

제1항에 있어서, 상기 UAV 개수 결정부는

상기 UAV 개수를 기지정된 초기 개수로부터 상기 지상 터미널의 개수까지 순차적으로 증가시켜 설정하는 UAV 개수 조절부;

그래프 분할 방식을 적용하여 현재 설정된 UAV 개수에 따라 다수의 지상 터미널이 배치된 네트워크 영역을 다수의 섹터로 구분하고, 구분된 섹터에 포함된 지상 터미널들을 각 UAV에 할당하는 지상 터미널 할당부;

외관원 기법을 적용하여 각 UAV가 할당된 지상 터미널을 경유할 순서를 결정하는 경유 순서 결정부;

다수의 UAV 각각이 할당된 지상 터미널을 지정된 순서에 따라 경유하는 경로 거리를 추정하는 경로 거리 추정부;

추정된 경로 거리와 미리 획득된 최대 거리 속도에 따라 다수의 UAV가 경로 거리를 이동하는 동안 소모하는 근사 경로 에너지를 계산하고, 다수의 UAV의 전체 에너지에서 근사 경로 에너지를 차감하여 근사 서비스 에너지를 추정하는 서비스 에너지 추정부;

상기 근사 서비스 에너지와 미리 획득된 최대 지구력 속도로부터 지상 터미널과 FSO 통신을 수행할 수 있는 평균 시간인 상기 근사 서비스 시간을 추정하는 서비스 시간 추정부; 및

상기 다수의 UAV의 전체 에너지 대비 상기 근사 서비스 시간을 최대로 하는 UAV 개수를 계산하여 최적 UAV 개수로 설정하는 최적 UAV 개수 설정부를 포함하는 UAV 궤도 최적화 장치.

청구항 3

제2항에 있어서, 상기 경로 거리 추정부는

상기 UAV 각각의 경로 거리($D_{m,move}^{aprx}$)를 수학식

$$D_{m,move}^{aprx} = \sum_{i=0}^{k_m} \max\{D_i^{aprx}, 0\},$$

$$D_i^{aprx} = \begin{cases} \|\mathbf{w}_{m,i+1}\| - d_h & i = 0 \\ \|\mathbf{w}_{m,i} - \mathbf{w}_{m,i-1}\| - 2d_h & 0 < i < k_m \\ \|\mathbf{w}_{m,i}\| - d_h & i = k_m \end{cases}$$

(여기서 D_i^{aprx} 는 M개의 UAV 중 제m UAV(UAV_m)에 할당된 k_m 개의 지상 터미널(GT) 중 i번째 지상 터미널(GT_i)에서 i+1번째 지상 터미널(GT_{i+1})로 이동하는 거리를 나타내고, w_{m,i} 는 제m UAV(UAV_m)에 할당된 i번째 지상 터미널(GT_i)의 위치 벡터, d_h 는 지상 터미널(GT)의 통신 반경을 나타낸다.)

에 따라 계산하는 UAV 궤도 최적화 장치.

청구항 4

제3항에 있어서, 상기 서비스 에너지 추정부는

상기 근사 서비스 에너지(E_{serv}^{aprx})를 각 UAV의 총 에너지(E_{total})와 최대 거리 속도(v_{mr}) 및 최대 거리 속도(v_{mr})에서의 UAV의 추진 파워($P(v_{mr})$)를 이용하여 수학적식

$$E_{serv}^{aprx} = M E_{total} - \frac{P(v_{mr})}{v_{mr}} \sum_{m=1}^M D_{m,move}^{aprx}$$

에 따라 계산하며,

상기 서비스 시간 추정부는

상기 근사 서비스 시간(N_{serv}^{aprx})을 수학적식

$$N_{serv}^{aprx} = \frac{E_{serv}^{aprx}}{K P(v_{me})}$$

(여기서 K는 지상 터미널(GT)의 총 개수, P(v_{me})는 최대 지구력 속도(v_{me})에서의 UAV의 추진 파워)

에 따라 계산하는 UAV 궤도 최적화 장치.

청구항 5

제2항에 있어서, 상기 UAV 궤도 최적화부는

선택된 개수의 UAV 각각이 UAV 개수 결정부에 의해 할당된 지상 터미널을 지정된 순서로 경유할 때, 이전 경유하는 지상 터미널의 FSO 통신 영역 밖으로 이탈하는 시간에서 다음 경유하는 지상 터미널의 FSO 통신 영역으로 진입할 때까지의 위치별로 이동하는 동안 소모하는 경유 에너지를 계산하고, 계산된 경유 에너지가 최소가 되도록 하는 경유 궤도를 추출하여 설정하는 경유 궤도 최적화부; 및

각 UAV의 전체 에너지에서 상기 경유 에너지를 차감한 잔여 에너지를 기지정된 방식으로 할당된 지상 터미널에 분배하고, 각 지상 터미널에 분배된 에너지에 따라 각 UAV가 할당된 지상 터미널 각각과 FSO 통신을 수행할 수 있는 서비스 시간이 최대가 되도록 하는 통신 궤도를 추출하여 설정하는 통신 궤도 최적화부를 포함하는 UAV 궤도 최적화 장치.

청구항 6

제5항에 있어서, 상기 경유 궤도 최적화부는

타임 스텝(n)에 따른 UAV의 위치 벡터($q_m[n]$)와 지상 터미널의 위치 벡터($w_{m,i}$) 사이의 거리가 지상 터미널의 기지정된 통신 반경(d_h) 이내인지 여부에 따라 UAV가 지상 터미널의 통신 영역 내로 진입하거나 이탈하는지 여부를 판별하고, UAV(UVA_m)가 할당된 k_m 개의 지상 터미널(GT) 중 i번째 지상 터미널(GT_i)에서 i+1번째 지상 터미널(GT_{i+1})로 이동할 때 소비되는 지상 터미널간 경유 에너지($E_{move,i}$)를 수학적식

$$E_{move,i}(q_m[n]) = \sum_{n=N_{exit,i}}^{N_{entry,i+1}} P(v_m[n]) \delta_t$$

에 따라 계산하여, 수학적식

$$\text{minimize } E_{\text{move}}(\mathbf{q}_m[n]) = \sum_{i=0}^{k_m} E_{\text{move},i}(\mathbf{q}_m[n])$$

를 만족하는 UAV의 위치 벡터($\mathbf{q}_m[n]$)를 추출하여 상기 경유 궤도를 설정하는 UAV 궤도 최적화 장치.

청구항 7

제6항에 있어서, 상기 통신 궤도 최적화부는

각 UAV의 전체 에너지에서 상기 경유 에너지를 차감한 상기 잔여 에너지(E_{rem})를

수학적식

$$E_{\text{rem}} = E_{\text{serv}}(\mathbf{q}_m[n]) + P_{\text{FSO}}N_{\text{serv}}(\mathbf{q}_m[n])\delta_t = E_{\text{total}} - E_{\text{move}}(\mathbf{q}_m[n])$$

에 따라 계산하고, 상기 잔여 에너지(E_{rem})를 할당된 지상 터미널에 기지정된 방식으로 분배하며, 분배된 잔여 에너지($E_{\text{rem},i}$)로부터 각 지상 터미널(GT_i)에 대한 서비스 시간($N_{\text{serv},i}$)을 수학적식

$$N_{\text{serv},i}(\mathbf{q}_m[n]) = \left\lfloor \frac{E_{\text{rem},i}(\mathbf{q}_m[n])}{E_{\text{me}} + P_{\text{FSO}}\delta_t} \right\rfloor \approx \left\lfloor \frac{E_{\text{serv},i}(\mathbf{q}_m[n])}{E_{\text{me}}} \right\rfloor$$

(여기서 P_{FSO} 는 FSO 통신 파워이고, δ_t 는 타임 스텝(n)의 시간 간격, $E_{\text{serv},i}$ 는 UAV(UAV_m)가 할당된 지상 터미널 중 제i 지상 터미널(GT_i)의 통신 영역 내에서 이동하기 위해 소모하는 서비스 에너지, E_{me} 는 최대 지구력 속도 (v_{me})에 따른 소모 에너지)

에 따라 계산하여, 수학적식

$$\text{maximize } N_{\text{serv}}(\mathbf{q}_m[n]) = \sum_{i=1}^{k_m} N_{\text{serv},i}$$

를 만족하는 UAV의 위치 벡터($\mathbf{q}_m[n]$)를 추출하여 상기 통신 궤도를 설정하는 UAV 궤도 최적화 장치.

청구항 8

제7항에 있어서, 상기 통신 궤도 최적화부는

상기 잔여 에너지(E_{rem})를 할당된 지상 터미널 각각에 연결된 IoT 기기의 수, IoT 데이터의 종류 및 특성, 저장된 데이터의 양 중 적어도 하나에 따라 서로 다른 가중치(α_i)를 적용하여, 수학적식

$$E_{\text{rem},i}(\mathbf{q}_m[n]) = \alpha_i \frac{E_{\text{rem}}(\mathbf{q}_m[n])}{k_m}$$

으로 분배하는 UAV 궤도 최적화 장치.

청구항 9

제8항에 있어서, 상기 UAV 궤도 최적화부는

상기 경유 궤도 및 상기 통신 궤도를 설정할 때, 동일 타임 스텝(n)에서의 서로 다른 UAV의 위치 벡터가 기지정

된 최소 거리 이상이 되도록 추가적으로 설정되는 UAV 궤도 최적화 장치.

청구항 10

제8항에 있어서, 상기 UAV 궤도 최적화 장치는

UAV 관제 센터로부터 각각 할당된 지상 터미널로 이동하는 다수의 UAV 가 상호 충돌하지 않도록, UAV 사이의 기 지정된 최소 거리에 대응하는 시간 간격을 계산하고, 계산된 시간 간격에 따라 다수의 UAV가 상기 UAV 관제 센터에서 순차 출발하는 출발 순서 및 출발 시간을 지정하는 충돌 회피 지연부를 더 포함하는 UAV 궤도 최적화 장치.

청구항 11

지상에 위치하는 다수의 지상 터미널과 FSO 통신을 수행하는 UAV의 개수 및 궤도를 최적화하는 UAV 궤도 최적화 방법에 있어서,

상기 UAV의 개수를 기지정된 초기값부터 상기 지상 터미널의 개수까지 증가시키면서, 다수의 지상 터미널을 증가되는 개수의 UAV에 분할 할당하고, 각 UAV의 할당된 지상 터미널에 대한 경유 순서를 결정하며, UAV의 개수에 따른 전체 에너지 대비 할당된 지상 터미널과 FSO 통신을 위해 이용할 수 있는 근사 서비스 시간이 최대화되는 UAV 개수를 선택하는 단계; 및

선택된 개수의 UAV 각각이 할당된 지상 터미널을 지정된 순서로 경유할 때, 각 지상 터미널의 기지정된 FSO 통신 영역 밖에서 이동하는 동안 소모하는 경유 에너지가 최소가 되도록 하는 경유 궤도를 추출하여 설정하고, 각 UAV가 각 지상 터미널의 기지정된 FSO 통신 영역 내로 진입하면, 각 UAV의 전체 에너지에서 경유 에너지를 차감한 잔여 에너지 대비, 지상 터미널과의 통신 가능 시간인 서비스 시간이 최대가 되도록 하는 통신 궤도를 추출하여 UAV의 이동 궤도를 설정하는 단계를 포함하는 UAV 궤도 최적화 방법.

청구항 12

제11항에 있어서, 상기 UAV 개수를 선택하는 단계는

상기 UAV 개수를 기지정된 초기 개수로부터 상기 지상 터미널의 개수까지 순차적으로 증가시켜 설정하는 단계;

그래프 분할 방식을 적용하여 현재 설정된 UAV 개수에 따라 다수의 지상 터미널이 배치된 네트워크 영역을 다수의 섹터로 구분하고, 구분된 섹터에 포함된 지상 터미널들을 각 UAV에 할당하는 단계;

외관원 기법을 적용하여 각 UAV가 할당된 지상 터미널을 경유할 순서를 결정하는 단계;

다수의 UAV 각각이 할당된 지상 터미널을 지정된 순서에 따라 경유하는 경로 거리를 추정하는 단계;

추정된 경로 거리와 미리 획득된 최대 거리 속도에 따라 다수의 UAV가 경로 거리를 이동하는 동안 소모하는 근사 경로 에너지를 계산하고, 다수의 UAV의 전체 에너지에서 근사 경로 에너지를 차감하여 근사 서비스 에너지를 추정하는 단계;

상기 근사 서비스 에너지와 미리 획득된 최대 지구력 속도로부터 지상 터미널과 FSO 통신을 수행할 수 있는 평균 시간인 상기 근사 서비스 시간을 추정하는 단계; 및

상기 다수의 UAV의 전체 에너지 대비 상기 근사 서비스 시간을 최대로 하는 UAV 개수를 계산하여 최적 UAV 개수로 설정하는 단계를 포함하는 UAV 궤도 최적화 방법.

청구항 13

제12항에 있어서, 상기 경로 거리를 추정하는 단계는

상기 UAV 각각의 경로 거리($D_{m,move}^{aprx}$)를 수학적식

$$D_{m,move}^{aprx} = \sum_{i=0}^{k_m} \max\{D_i^{aprx}, 0\},$$

$$D_i^{aprx} = \begin{cases} \|w_{m,i+1}\| - d_h & i = 0 \\ \|w_{m,i} - w_{m,i-1}\| - 2d_h & 0 < i < k_m \\ \|w_{m,i}\| - d_h & i = k_m \end{cases}$$

(여기서 D_i^{aprx} 는 M개의 UAV 중 제m UAV(UAV_m)에 할당된 k_m 개의 지상 터미널(GT) 중 i번째 지상 터미널(GT_i)에서 i+1번째 지상 터미널(GT_{i+1})로 이동하는 거리를 나타내고, $w_{m,i}$ 는 제m UAV(UAV_m)에 할당된 i번째 지상 터미널(GT_i)의 위치 벡터, d_h 는 지상 터미널(GT)의 통신 반경을 나타낸다.)

에 따라 계산하는 UAV 궤도 최적화 방법.

청구항 14

제13항에 있어서, 상기 근사 서비스 에너지를 추정하는 단계는

상기 근사 서비스 에너지(E_{serv}^{aprx})를 각 UAV의 총 에너지(E_{total})와 최대 거리 속도(v_{mr}) 및 최대 거리 속도(v_{mr})에서의 UAV의 추진 파워($P(v_{mr})$)를 이용하여 수학적식

$$E_{serv}^{aprx} = M E_{total} - \frac{P(v_{mr})}{v_{mr}} \sum_{m=1}^M D_{m,move}^{aprx}$$

에 따라 계산하며,

상기 근사 서비스 시간을 추정하는 단계는

상기 근사 서비스 시간(N_{serv}^{aprx})을 수학적식

$$N_{serv}^{aprx} = \frac{E_{serv}^{aprx}}{K P(v_{me})}$$

(여기서 K는 지상 터미널(GT)의 총 개수, $P(v_{me})$ 는 최대 지구력 속도(v_{me})에서의 UAV의 추진 파워)

에 따라 계산하는 UAV 궤도 최적화 방법.

청구항 15

제12항에 있어서, 상기 UAV의 이동 궤도를 설정하는 단계는

선택된 개수의 UAV 각각이 UAV 개수 결정부에 의해 할당된 지상 터미널을 지정된 순서로 점유할 때, 이전 점유하는 지상 터미널의 FSO 통신 영역 밖으로 이탈하는 시간에서 다음 점유하는 지상 터미널의 FSO 통신 영역으로 진입할 때까지의 위치별로 이동하는 동안 소모하는 점유 에너지를 계산하고, 계산된 점유 에너지가 최소가 되도록 하는 점유 궤도를 추출하여 설정하는 단계; 및

각 UAV의 전체 에너지에서 상기 점유 에너지를 차감한 잔여 에너지를 기지정된 방식으로 할당된 지상 터미널에 분배하고, 각 지상 터미널에 분배된 에너지에 따라 각 UAV가 할당된 지상 터미널 각각과 FSO 통신을 수행할 수 있는 서비스 시간이 최대가 되도록 하는 통신 궤도를 추출하여 설정하는 단계를 포함하는 통신 궤도 최적화부를 포함하는 UAV 궤도 최적화 방법.

청구항 16

제15항에 있어서, 상기 경유 궤도를 추출하여 설정하는 단계는

타임 스텝(n)에 따른 UAV의 위치 벡터($\mathbf{q}_m[n]$)와 지상 터미널의 위치 벡터($\mathbf{w}_{m,i}$) 사이의 거리가 지상 터미널의 지정된 통신 반경(d_h) 이내인지 여부에 따라 UAV가 지상 터미널의 통신 영역 내로 진입하거나 이탈하는지 여부를 판별하고, UAV(UVA_m)가 할당된 k_m 개의 지상 터미널(GT) 중 i 번째 지상 터미널(GT _{i})에서 $i+1$ 번째 지상 터미널(GT _{$i+1$})로 이동할 때 소비되는 지상 터미널간 경유 에너지($E_{move,i}$)를 수학식

$$E_{move,i}(\mathbf{q}_m[n]) = \sum_{n=N_{exit,i}}^{N_{entry,i+1}} P(\mathbf{v}_m[n]) \delta_t$$

에 따라 계산하여, 수학식

$$\text{minimize} \quad E_{move}(\mathbf{q}_m[n]) = \sum_{i=0}^{k_m} E_{move,i}(\mathbf{q}_m[n])$$

를 만족하는 UAV의 위치 벡터($\mathbf{q}_m[n]$)를 추출하여 상기 경유 궤도를 설정하는 UAV 궤도 최적화 방법.

청구항 17

제16항에 있어서, 상기 통신 궤도 추출하여 설정하는 단계는

각 UAV의 전체 에너지에서 상기 경유 에너지를 차감한 상기 잔여 에너지(E_{rem})를 수학식

$$E_{rem} = E_{serv}(\mathbf{q}_m[n]) + P_{FSO}N_{serv}(\mathbf{q}_m[n])\delta_t = E_{total} - E_{move}(\mathbf{q}_m[n])$$

에 따라 계산하고, 상기 잔여 에너지(E_{rem})를 할당된 지상 터미널에 기지정된 방식으로 분배하며, 분배된 잔여 에너지($E_{rem,i}$)로부터 각 지상 터미널(GT _{i})에 대한 서비스 시간($N_{serv,i}$)을 수학식

$$N_{serv,i}(\mathbf{q}_m[n]) = \left\lfloor \frac{E_{rem,i}(\mathbf{q}_m[n])}{E_{me} + P_{FSO}\delta_t} \right\rfloor \approx \left\lfloor \frac{E_{serv,i}(\mathbf{q}_m[n])}{E_{me}} \right\rfloor$$

(여기서 P_{FSO} 는 FSO 통신 파워이고, δ_t 는 타임 스텝(n)의 시간 간격, $E_{serv,i}$ 는 UAV(UVA_m)가 할당된 지상 터미널 중 제 i 지상 터미널(GT _{i})의 통신 영역 내에서 이동하기 위해 소모하는 서비스 에너지, E_{me} 는 최대 지구력 속도(v_{me})에 따른 소모 에너지)

에 따라 계산하여, 수학식

$$\text{maximize} \quad N_{serv}(\mathbf{q}_m[n]) = \sum_{i=1}^{k_m} N_{serv,i}$$

를 만족하는 UAV의 위치 벡터($\mathbf{q}_m[n]$)를 추출하여 상기 통신 궤도를 설정하는 UAV 궤도 최적화 방법.

청구항 18

제17항에 있어서, 상기 통신 궤도 추출하여 설정하는 단계는

상기 잔여 에너지(E_{rem})를 할당된 지상 터미널 각각에 연결된 IoT 기기의 수, IoT 데이터의 종류 및 특성, 저장된 데이터의 양 중 적어도 하나에 따라 서로 다른 가중치(α_i)를 적용하여, 수학적

$$E_{rem,i}(q_m[n]) = \alpha_i \frac{E_{rem}(q_m[n])}{k_m}$$

으로 분배하는 UAV 궤도 최적화 방법.

청구항 19

제18항에 있어서, 상기 UAV의 이동 궤도를 설정하는 단계는

상기 경유 궤도 및 상기 통신 궤도를 설정할 때, 동일 타임 스텝(n)에서의 서로 다른 UAV의 위치 벡터가 지정된 최소 거리 이상이 되도록 추가적으로 설정되는 UAV 궤도 최적화 방법.

청구항 20

제18항에 있어서, 상기 UAV 궤도 최적화 방법은

UAV 관제 센터로부터 각각 할당된 지상 터미널로 이동하는 다수의 UAV가 상호 충돌하지 않도록, UAV 사이의 지정된 최소 거리에 대응하는 시간 간격을 계산하고, 계산된 시간 간격에 따라 다수의 UAV가 상기 UAV 관제 센터에서 순차 출발하는 출발 순서 및 출발 시간을 지정하는 충돌 회피 지연부를 더 포함하는 UAV 궤도 최적화 방법.

발명의 설명

기술 분야

[0001] 본 발명은 다수의 UAV 궤도 최적화 장치 및 방법에 관한 것으로, 광통신의 성능과 UAV 간의 충돌을 고려한 복수의 UAV 궤도 최적화 장치 및 방법에 관한 것이다.

배경 기술

[0002] 5G, 6G에서 요구하는 고대역폭의 통신 요구량을 충족시키기 위해 무선 광통신(Free Space Optics: 이하 FSO)에 대한 연구가 진행되고 있다. FSO는 RF와는 달리 더 많은 대역폭을 제공할 수 있으므로, 더욱 더 많은 데이터율(data rate)과 채널 용량(channel capacity)을 요구하는 5G나 6G와 같은 미래 네트워크의 시나리오에서 유용한 해결책으로 제시되고 있다. 또한 FSO는 RF보다 더 넓은 대역폭을 제공함과 동시에 서로 다른 통신 간의 간섭에 면역성을 가지며, 이는 더 효율적인 채널 사용에 도움을 줄 뿐만 아니라 보안 측면에서도 긍정적인 영향을 준다.

[0003] FSO는 mmWave보다 더욱 투과성이 낮아, 약간의 장애물에도 통신에 장애가 발생한다. 또한 전파 퍼짐 현상이 적기 때문에 송신단과 수신단 간의 정렬과 LoS(Line of Sight) 유지가 필수적이다. 이에 지상의 수평 통신보다 장애물이 적은 수직 통신을 사용할 수 있어, 더욱 용이하게 장애물을 회피해 송신단과 수신단 사이에 LoS를 유지할 수 있는 UAV(Unmanned Aerial Vehicle)와 FSO의 접목이 기대받고 있다.

[0004] 다만 UAV 기반 무선 통신의 개발은 UAV의 배터리와 그에 따른 운용 시간이 제한적이라는 한계를 가지고 있다. 현재까지 UAV에 대한 기술로는 공중에서의 급유 또는 에너지 충전이 매우 제한적이기 때문에 UAV가 출발 시 충전한 에너지 용량 내에서 UAV는 목적지로의 이동과, 목적지에서의 통신, 그리고 필요시 컴퓨팅까지 모두 처리할 필요가 있다. 따라서 UAV의 비행 시간은 한정적이며, 이 한정적인 비행 시간 내에서 최대한의 효율적인 통신이 가능하도록 UAV의 궤도를 최적화할 필요가 있다. 특히 다수의 UAV를 운용하는 경우, 다수의 UAV 궤도 최적화에 통신 성능과 에너지 소모를 고려해야 할 뿐만 아니라, UAV 간의 충돌을 회피할 수 있도록 고려해야 한다.

선행기술문헌

특허문헌

[0005] (특허문헌 0001) 한국 등록 특허 제10-2094414호 (2020.03.23 등록)

발명의 내용

해결하려는 과제

[0006] 본 발명의 목적은 통신의 성능과 에너지 효율성을 최대화할 수 있는 UAV 궤도 최적화 장치 및 방법을 제공하는 데 있다.

[0007] 본 발명의 다른 목적은 다수의 UAV 간의 충돌을 회피하면서 다수의 UAV 궤도를 최적화할 수 있는 UAV 궤도 최적화 장치 및 방법을 제공하는데 있다.

과제의 해결 수단

[0008] 상기 목적을 달성하기 위한 본 발명의 일 실시예에 따른 다수의 UAV 궤도 최적화 장치는 지상에 위치하는 다수의 지상 터미널과 FSO 통신을 수행하는 UAV 개수를 기지정된 초기값부터 상기 지상 터미널의 개수까지 증가시키면서, 다수의 지상 터미널을 증가되는 개수의 UAV에 분할 할당하고, 각 UAV의 할당된 지상 터미널에 대한 경유 순서를 결정하며, UAV의 개수에 따른 전체 에너지 대비 할당된 지상 터미널과 FSO 통신을 위해 이용할 수 있는 근사 서비스 시간이 최대화되는 UAV 개수를 계산하여 선택하는 UAV 개수 결정부; 및 선택된 개수의 UAV 각각이 할당된 지상 터미널을 지정된 순서로 경유할 때, 각 지상 터미널의 기지정된 FSO 통신 영역 밖에서 이동하는 동안 소모하는 경유 에너지가 최소가 되도록 하는 경유 궤도를 추출하여 설정하고, 각 UAV가 각 지상 터미널의 기지정된 FSO 통신 영역 내로 진입하면, 각 UAV의 전체 에너지에서 경유 에너지를 차감한 잔여 에너지 대비, 지상 터미널과의 통신 가능 시간인 서비스 시간이 최대가 되도록 하는 통신 궤도를 추출하여 설정하는 UAV 궤도 최적화부를 포함한다.

[0009] 상기 UAV 개수 결정부는 상기 UAV 개수를 기지정된 초기 개수로부터 상기 지상 터미널의 개수까지 순차적으로 증가시켜 설정하는 UAV 개수 조절부; 그래프 분할 방식을 적용하여 현재 설정된 UAV 개수에 따라 다수의 지상 터미널이 배치된 네트워크 영역을 다수의 섹터로 구분하고, 구분된 섹터에 포함된 지상 터미널들을 각 UAV에 할당하는 지상 터미널 할당부; 외판원 기법을 적용하여 각 UAV가 할당된 지상 터미널을 경유할 순서를 결정하는 경유 순서 결정부; 다수의 UAV 각각이 할당된 지상 터미널을 지정된 순서에 따라 경유하는 경로 거리를 추정하는 경로 거리 추정부; 추정된 경로 거리와 미리 획득된 최대 거리 속도에 따라 다수의 UAV가 경로 거리를 이동하는 동안 소모하는 근사 경로 에너지를 계산하고, 다수의 UAV의 전체 에너지에서 근사 경로 에너지를 차감하여 근사 서비스 에너지를 추정하는 서비스 에너지 추정부; 상기 근사 서비스 에너지와 미리 획득된 최대 지구력 속도로부터 지상 터미널과 FSO 통신을 수행할 수 있는 평균 시간인 상기 근사 서비스 시간을 추정하는 서비스 시간 추정부; 및 상기 다수의 UAV의 전체 에너지 대비 상기 근사 서비스 시간을 최대로 하는 UAV 개수를 계산하여 최적 UAV 개수로 설정하는 최적 UAV 개수 설정부를 포함할 수 있다.

[0010] 제2항에 있어서, 상기 UAV 궤도 최적화부는 선택된 개수의 UAV 각각이 UAV 개수 결정부에 의해 할당된 지상 터미널을 지정된 순서로 경유할 때, 이전 경유하는 지상 터미널의 FSO 통신 영역 밖으로 이탈하는 시간에서 다음 경유하는 지상 터미널의 FSO 통신 영역으로 진입할 때까지의 위치별로 이동하는 동안 소모하는 경유 에너지를 계산하고, 계산된 경유 에너지가 최소가 되도록 하는 경유 궤도를 추출하여 설정하는 경유 궤도 최적화부; 및 각 UAV의 전체 에너지에서 상기 경유 에너지를 차감한 잔여 에너지를 기지정된 방식으로 할당된 지상 터미널에 분배하고, 각 지상 터미널에 분배된 에너지에 따라 각 UAV가 할당된 지상 터미널 각각과 FSO 통신을 수행할 수 있는 서비스 시간이 최대가 되도록 하는 통신 궤도를 추출하여 설정하는 통신 궤도 최적화부를 포함할 수 있다.

[0011] , 상기 UAV 궤도 최적화 장치는 UAV 관제 센터로부터 각각 할당된 지상 터미널로 이동하는 다수의 UAV 가 상호 충돌하지 않도록, UAV 사이의 기지정된 최소 거리에 대응하는 시간 간격을 계산하고, 계산된 시간 간격에 따라 다수의 UAV가 상기 UAV 관제 센터에서 순차 출발하는 출발 순서 및 출발 시간을 지정하는 충돌 회피 지연부를 더 포함할 수 있다.

[0012] 상기 목적을 달성하기 위한 본 발명의 다른 실시예에 따른 다수의 UAV 궤도 최적화 방법은 지상에 위치하는 다수의 지상 터미널과 FSO 통신을 수행하는 UAV의 개수 및 궤도를 최적화하는 UAV 궤도 최적화 방법에 있어서, 상기 AUV의 개수를 기지정된 초기값부터 상기 지상 터미널의 개수까지 증가시키면서, 다수의 지상 터미널을 증가되는 개수의 UAV에 분할 할당하고, 각 UAV의 할당된 지상 터미널에 대한 경유 순서를 결정하며, UAV의 개수에

따른 전체 에너지 대비 할당된 지상 터미널과 FSO 통신을 위해 이용할 수 있는 근사 서비스 시간이 최대화되는 UAV 개수를 선택하는 단계; 및 선택된 개수의 UAV 각각이 할당된 지상 터미널을 지정된 순서로 경유할 때, 각 지상 터미널의 기지정된 FSO 통신 영역 밖에서 이동하는 동안 소모하는 경유 에너지가 최소가 되도록 하는 경유 궤도를 추출하여 설정하고, 각 UAV가 각 지상 터미널의 기지정된 FSO 통신 영역 내로 진입하면, 각 UAV의 전체 에너지에서 경유 에너지를 차감한 잔여 에너지 대비, 지상 터미널과의 통신 가능 시간인 서비스 시간이 최대가 되도록 하는 통신 궤도를 추출하여 UAV의 이동 궤도를 설정하는 단계를 포함한다.

발명의 효과

[0013] 따라서, 본 발명의 실시예에 따른 다수의 UAV 궤도 최적화 장치 및 방법은 최소 개수의 UAV로 통신 성능과 에너지 효율성을 최대화할 뿐만 아니라, UAV 사이에 최소 거리를 유지하여 충돌을 방지할 수 있다.

도면의 간단한 설명

[0014] 도 1은 FSO 통신 네트워크의 일 예를 나타낸다.
 도 2는 본 발명의 일 실시예에 따른 UAV 궤도 최적화 장치의 개략적 구성을 나타낸다.
 도 3은 도 2의 UAV 개수 결정부의 상세 구성의 일 예를 나타낸다.
 도 4는 그래프 분할 알고리즘을 기반으로 각 UAV에 할당되는 지상 터미널의 일 예를 나타낸다.
 도 5는 UAV가 특정 지상 터미널의 통신 영역에서 인접한 지상 터미널의 통신 영역으로 이동할 때 에너지 소모를 최소화하는 궤도의 예를 나타낸다.
 도 6은 UAV가 지상 터미널의 통신 영역에서 잔여 에너지의 제한 내에서 통신 시간을 최대화하는 궤도의 일 예를 나타낸다.
 도 7은 본 발명의 일 실시예에 따른 UAV 궤도 최적화 방법을 나타낸다.

발명을 실시하기 위한 구체적인 내용

[0015] 본 발명과 본 발명의 동작상의 이점 및 본 발명의 실시예에 의하여 달성되는 목적을 충분히 이해하기 위해서는 본 발명의 바람직한 실시예를 예시하는 첨부 도면 및 첨부 도면에 기재된 내용을 참조하여야만 한다.

[0016] 이하, 첨부한 도면을 참조하여 본 발명의 바람직한 실시예를 설명함으로써, 본 발명을 상세히 설명한다. 그러나, 본 발명은 여러 가지 상이한 형태로 구현될 수 있으며, 설명하는 실시예에 한정되는 것이 아니다. 그리고, 본 발명을 명확하게 설명하기 위하여 설명과 관계없는 부분은 생략되며, 도면의 동일한 참조부호는 동일한 부재임을 나타낸다.

[0017] 명세서 전체에서, 어떤 부분이 어떤 구성요소를 "포함"한다고 할 때, 이는 특별히 반대되는 기재가 없는 한 다른 구성요소를 제외하는 것이 아니라, 다른 구성요소를 더 포함할 수 있는 것을 의미한다. 또한, 명세서에 기재된 "...부", "...기", "모듈", "블록" 등의 용어는 적어도 하나의 기능이나 동작을 처리하는 단위를 의미하며, 이는 하드웨어나 소프트웨어 또는 하드웨어 및 소프트웨어의 결합으로 구현될 수 있다.

[0018] 도 1은 FSO 통신 네트워크의 일 예를 나타낸다.

[0019] 도 1을 참조하면, FSO 통신 네트워크는 UAV 관제 센터(UAV Station)를 기준으로 다수의 지상 터미널(Ground Terminal: GT)이 지상 기지정된 위치에 분포된다. 다수의 지상 터미널(GT) 각각은 활용 용도에 따라 주변의 각종 정보를 수집하는 데이터 수집 장치이거나, 주변에 위치하는 단말들과 RF 통신 등을 수행하는 기지국일 수 있다. 그리고 본 실시예에서 다수의 지상 터미널(GT) 각각은 기지정된 범위 내에 위치하는 UAV(UAV)와 FSO 통신을 수행할 수 있다.

[0020] 다수의 UAV(UAV)는 기본적으로 UAV 관제 센터에서 대기 상태를 유지하며 UAV 관제 센터의 명령에 따라 UAV 관제 센터를 출발하여 UAV 관제 센터에 의해 지정된 궤도를 따라 이동한다. 지정된 궤도를 따라 이동하는 UAV는 다수의 지상 터미널(GT) 중 현재 위치에 대응하는 지상 터미널(GT)과 통신을 수행하여 지상 터미널(GT)에서 수집된 정보를 획득할 수 있다. 그리고 수집된 정보를 획득한 UAV(UAV)는 에너지를 재충전하기 위해 UAV 관제 센터로 복귀하며, 에너지가 충전되면 UAV 관제 센터의 명령에 따라 출발할 때까지 다시 대기 상태를 유지하게 된다.

[0021] UAV 관제 센터는 다수의 지상 터미널(GT)에 수집된 정보를 획득하기 위해 요구되는 UAV(UAV) 개수와 각

UAV(UAV)의 이동 궤도를 결정한다. 그리고 결정된 개수의 UAV(UAV)에 결정된 궤도를 전달함으로써, 각 UAV가 지정된 궤도를 따라 이동하며 다수의 지상 터미널(GT)과 FSO 통신을 수행하여 지상 터미널(GT)에 수집된 정보를 획득하도록 한다. 이때 UAV 관제 센터는 요구되는 UAV(UAV) 개수와 이동 궤적을 신속하게 결정할 수 있는 계산 능력을 갖고 있는 것으로 가정한다. 그리고 UAV 관제 센터는 다수의 지상 터미널(GT)과 FSO 통신을 수행하여 수집된 정보를 획득한 UAV(UAV)가 복귀하면 에너지를 공급하여 충전시킨다.

[0022] 도 2는 본 발명의 일 실시예에 따른 UAV 궤도 최적화 장치의 개략적 구성을 나타낸다.

[0023] 본 실시예에 따른 UAV 궤도 최적화 장치는 UAV 관제 센터에 구비될 수 있으며, UAV 관제 센터에 대기중인 다수의 UAV(UAV) 중 지상 터미널(GT)에서 수집한 정보를 획득하기 위해 운용할 UAV의 개수와 각 UAV의 이동 궤도를 계산한다.

[0024] 도 2를 참조하면, 본 실시예에 따른 UAV 궤도 최적화 장치는 최적 고도 계산부(110), UAV 개수 결정부(120), UAV 궤도 최적화부(130) 및 충돌 회피 지연부(140)를 포함할 수 있다.

[0025] 도 2의 UAV 궤도 최적화 장치는 다수의 UAV 각각의 위치를 δ_t 의 시간 간격을 갖는 N개의 타임 스텝에서의 위치 좌표 형태로 지정하는 것으로 가정한다. 이 경우, 다수의 UAV(UAV)가 UAV 관제 센터에서 출발 및 복귀하므로, UAV 관제 센터는 자신의 위치를 3차원 좌표(여기서는 일 예로 xyz 좌표계) 상의 원점(0, 0, 0)으로 설정하여, 다수의 UAV(UAV)의 이동 궤도를 계산할 수 있다. 그리고 본 발명에서는 편의를 위하여 다수의 지상 터미널(GT)은 UAV 관제 센터와 동일한 높이의 xy 평면($z = 0$) 상에 위치하는 것으로 가정한다.

[0026] 최적 고도 계산부(110)는 다수의 UAV(UAV)의 동작 고도(H)를 FSO 채널 상태와 지상 터미널(GT)의 통신 반경에 따라 계산하여 설정한다. 여기서 지상 터미널(GT)의 통신 반경이 동일한 것으로 가정한다. 그리고 UAV(UAV)가 이동하기 이전에 각 지상 터미널(GT)에 대응하는 FSO 채널 상태는 사전에 획득될 수 없으므로, 통계적 FSO 채널 모델로 대체될 수 있다. 본 실시예에서는 다수의 UAV(UAV)가 기지정된 지상 터미널(GT)의 통신 반경과 통계적 FSO 채널 모델에 따라 동일한 고도($z = H$)에서 이동하는 것으로 가정한다.

[0027] 지정된 고도(H)에서 이동하는 다수의 UAV 중 제m UAV(UAV_m)($m = \{1, 2, \dots, M\}$)의 n번째 타임 스텝($n = \{1, 2, \dots, N\}$)에서의 위치 벡터($\mathbf{q}_m[n]$)와 속도 벡터($\mathbf{v}_m[n]$)는 각각 수학식 1 및 2로 표현될 수 있다.

수학식 1

[0028]
$$\mathbf{q}_m[n] = (x_{UAV}^m[n], y_{UAV}^m[n], H)^T$$

수학식 2

[0029]
$$\mathbf{v}_m[n] = \frac{\mathbf{q}_m[n+1] - \mathbf{q}_m[n]}{\delta_t}$$

[0030] 그리고 다수의 지상 터미널(GT) 중 제k 지상 터미널(GT_k)(여기서 $k = \{1, 2, \dots, K\}$)의 위치 벡터(\mathbf{w}_k)는 수학식 3으로 표현될 수 있다.

수학식 3

[0031]
$$\mathbf{w}_k = (x_{GT}^k, y_{GT}^k, 0)^T$$

[0032] 수학식 2의 속도 벡터($\mathbf{v}_m[n]$)는 UAV의 최대 속도(v_{max})를 초과할 수 없다는 제약($\|\mathbf{v}_m[n]\|$, 여기서 $\|\cdot\|$ 는 2차 놈 함수)을 가지며, 제m UAV(UAV_m)와 제k 지상 터미널(GT_k) 사이의 거리는 수학식 4로 표현될 수 있다.

수학식 4

$$d_{mk}[n] = \sqrt{H^2 + \|\mathbf{q}_m[n] - \mathbf{w}_k\|^2}$$

[0033]

[0034] 여기서는 다수의 UAV(UAV)가 수직 이착륙 가능하며, 방향 전환이 자유로운 로터리 윙 타입의 UAV(UAV)인 것으로 가정하며, 이 경우, 속도 벡터($\mathbf{v}_m[n]$)에 대한 UAV의 추진 파워(P)는 수학식 5와 같이 표현된다.

수학식 5

$$P(\mathbf{v}_m[n]) = P_0 \left(1 + \frac{3\|\mathbf{v}_m\|^2}{U_{tip}^2} \right) + P_i \left(\sqrt{1 + \frac{\|\mathbf{v}_m[n]\|^4}{4v_0^4}} - \frac{\|\mathbf{v}_m[n]\|^2}{2v_0^2} \right)^{0.5} + \frac{1}{2} d_0 \rho s A \|\mathbf{v}_m\|^3$$

[0035]

[0036] 여기서 $P_0 = \frac{\delta}{8} \rho s A \Omega^3 R_{rotor}^3$)는 UAV의 블레이드 파워 프로파일, $P_i = (1 + k_i) \frac{w^{3/2}}{\sqrt{2\rho A}}$)는 0 속도 상태에서 유도된 파워 프로파일, U_{tip} 은 로터 블레이드의 팁 속도, v_0 은 UAV의 호버링 시 평균 로터 유도 속도, d_0 는 동체 항력 비, ρ 는 공기 밀도, s 는 로터의 견고도, A 는 로터 디스크 면적, w 는 UAV의 무게, R_{rotor} 은 로터 블레이드의 반경을 나타낸다.

[0037] 수학식 5로부터 다수의 UAV의 총 추진 에너지(E_{prop})와 개별 UAV(UAV_m)의 총 소모 에너지(E_m)는 각각 수학식 6 및 7로 계산될 수 있다.

수학식 6

$$E_{prop}(\mathbf{q}_m[n]) = \sum_{n=1}^N P(\mathbf{v}_m[n]) \delta_t$$

[0038]

수학식 7

$$E_m(\mathbf{q}_m[n]) = E_{prop}(\mathbf{q}_m[n]) + E_{FSO}(\mathbf{q}_m[n]) \leq E_{total}$$

[0039]

[0040] 여기서 E_{FSO} 는 지상 터미널(GT)과의 FSO 통신을 위해 소모되는 에너지이며, E_{total} 은 배터리에 의해 결정되는 UAV의 총 에너지를 나타낸다.

[0041] 한편 본 실시예에서 지상 터미널(GT)과 UAV(UAV) 사이의 FSO 통신은 파장이 750 ~1600nm인 근적외선을 이용하여 수행되는 것으로 가정한다. FSO 통신은 비면허 대역(unlicensed) 스펙트럼의 넓은 대역폭을 사용할 수 있으므로 매우 높은 데이터 속도를 제공할 수 있으나 채널 상태, 즉 대기 조건에 의해 그 성능이 크게 영향을 받을 수 있다.

[0042] FSO 기반 채널 모델은 주로 대기 분자와 광자 간의 충돌로 인한 감쇠, 바람의 세기와 같은 난류로 인한 감쇠, 송신기와 수신기 간의 정렬 불량으로 인한 손실로 구성된다. 또한 본 실시예에서 UAV는 역반사 변조(Modulating Retro-Reflector: MRR) 모듈을 활용하여 송수신단 사이의 PAT(Pointing, Acquisition, Tracking)를 FSO 통신을 수행하고자 하는 지상 터미널(GT)로 전달하는 것으로 가정한다. 이에 따라 지상 터미널(GT)에서 UAV(UAV)로의 업링크 FSO 채널 모델(h_{UL})과 UAV(UAV)로에서 지상 터미널(GT)로의 다운링크 FSO 채널 모델(h_{DL})은 각각 수학식 8 및 9와 같이 획득될 수 있다.

수학식 8

$$h_{UL} = Rh_l h_a h_p$$

수학식 9

$$h_{DL} = h_{GU} \Xi h_{UG}$$

여기서 R은 수신기의 반응도, Ξ 는 MRR 모듈의 반사 효과, h_l 은 대기 산란 손실(여기서 $h_l = e^{-L_{sca}d}$, d는 UAV와 지상 터미널(GT) 사이의 거리(km), L_{sca} 는 흡광 계수를 나타낸다), h_a 는 난류 손실, h_p 는 포인팅 에러(Pointing error) 손실을 나타낸다. 그리고 h_{GU} 는 지상 터미널(GT)로부터 UAV(UAV)까지의 채널 모델을 나타내고, h_{UG} 는 UAV(UAV)에서 지상 터미널(GT)까지의 채널 모델을 나타낸다. 수학식 9에서 채널 모델(h_{GU})과 채널 모델(h_{UG})은 업링크 FSO 채널 모델(h_{UL})과 동일한 것으로 가정한다.

수학식 8에서 난류 손실(h_a)은 기존 UAV 네트워크 매개 변수에 기초하여 평균값이 1이고 분산은 매우 작다고 가정한다. 따라서 수학식 8에서 난류에 의한 영향을 나타내는 난류 손실(h_a)은 계산의 용이성을 위해 무시될 수 있다.

n번째 타임 스텝에서 제m UAV(UAV_m)의 위치($q_m[n]$)에서 제k 지상 터미널(GT_k)을 향한 FSO 빔은 FSO 빔과 z축 사이의 각도($\phi_{mk}[n]$)와 FSO 빔의 xy 평면으로의 프로젝션 및 x축 사이의 각도($\theta_{mk}[n]$)로 나타낼 수 있으며, 이에 FSO 통신의 포인팅 에러 손실(h_p)과 포인팅 에러 손실(h_p)의 확률 밀도 함수(probability density function: PDF)($f_{h_p}(h_p)$)는 수학식 10 및 11로 나타낼 수 있다.

수학식 10

$$h_p = A_0 \exp\left(\frac{2u^2}{-k_g w_d^2}\right)$$

수학식 11

$$f_{h_p}(h_p) = \frac{(1+q^2)k_g w_d^2}{4q(\lambda_1 + \lambda_2)A_0} \left(\frac{h_p}{A_0}\right)^{\frac{(1+q^2)^2 k_g w_d^2}{8q^2(\lambda_1 + \lambda_2)} - 1} I_0\left(-\frac{(1-q^4)k_g w_d^2}{8q^2(\lambda_1 + \lambda_2)} \log\left(\frac{h_p}{A_0}\right)\right)$$

여기서 u는 빔 중심과 렌즈 중심으로부터의 방사형 거리이고, w_d 는 거리 d에서의 빔 폭, $I_0(\cdot)$ 는 0차 1종 변형

베셀 함수를 나타내며, $k_g = \frac{1}{2} \left(\frac{\sqrt{\pi} \operatorname{erf}(v_1)}{2v_1 \exp(-v_1^2)} + \frac{\sqrt{\pi} \operatorname{erf}(v_2)}{2 \sin^2 \phi_m \cos^2 \theta_m v_2 \exp(-v_2^2)} \right)$ 이고, $v_1 = \sqrt{\frac{\pi}{2}} \frac{r_a}{w_d}$,

$v_2 = |\sin \phi_{mk} \cos \theta_{mk}| v_1$, $A_0 = \operatorname{erf}(v_1) \operatorname{erf}(v_2)$ 이다. $\operatorname{Erf}(\cdot)$ 는 에리 함수, r_a 는 수신단 렌즈 반지

름을 나타낸다. 그리고 $q = \sqrt{\frac{\min\{\lambda_1, \lambda_2\}}{\max\{\lambda_1, \lambda_2\}}}$ 이고, λ_1, λ_2 는 행렬 $\begin{bmatrix} (1+c_1^2)\sigma_p^2 + c_2^2\sigma_o^2 & c_1c_5\sigma_p^2 + c_2c_4\sigma_o^2 \\ c_1c_5\sigma_p^2 + c_2c_4\sigma_o^2 & (1+c_3^2)\sigma_p^2 + (c_4^2 + c_3^2)\sigma_o^2 \end{bmatrix}$,

$$c_1 = -\tan \theta_{mk}, \quad c_2 = -\frac{x_m}{\cos^2 \theta_{mk}}, \quad c_3 = -\frac{x_m}{\sin^2 \phi_{mk} \cos \theta_{mk}}, \quad c_4 = -\frac{x_m \cot \phi_{mk} \tan \theta_{mk}}{\cos \theta_{mk}}, \quad c_5 = -\frac{\cot \phi_{mk}}{\cos \theta_{mk}}$$

의 고유값(eigenvalue)이다. σ_p^2 는 UAV의 위치($q_m[n]$) 흔들림에 대한 분산, σ_0^2 는 FSO 빔 흔들림에 대한 분산을 나타낸다.

[0051] 또한 UAV(UAV)를 이용한 공중 네트워크에서는 건물과 같은 다양한 장애물이 존재하기 때문에, UAV(UAV)의 위치와 고도에 따라 LoS가 유지되거나 연결 해제될 수 있다. 제 m UAV(UAV $_m$)과 제 k 지상 터미널(GT $_k$) 사이의 LoS 확률은 수학적 식 12로 모델링될 수 있다.

수학적 식 12

$$P_{LoS}^{mk} = \frac{1}{1 + c \exp(-b(\psi_{mk} - c))}$$

[0053] 여기서 $\psi_{mk} = \frac{180}{\pi} \tan^{-1} \left(\frac{H}{d_{h,mk}} \right)$ 를 나타내고, b 와 c 는 도심, 부도심과 같은 통신 환경에 따라 결정되는 상수이다.

[0054] 수학적 식 6 내지 12 및 FSO 통신의 상한(Upper bound)에 따라 제 m UAV(UAV $_m$)과 제 k 지상 터미널(GT $_k$)의 업링크 데이터 전송율($\overline{R_{mk}^{UL}}$)과 다운링크 데이터 전송율($\overline{R_{mk}^{DL}}$)은 각각 수학적 식 13 및 14로 계산될 수 있다.

수학적 식 13

$$\overline{R_{mk}^{UL}} = P_{LoS}^{mk} E \left[\frac{1}{2} \log_2 \left(1 + \gamma' \exp \left(\frac{4u^2}{-k_g w_d^2} \right) \right) \right]$$

수학적 식 14

$$\overline{R_{mk}^{DL}}(h_p, H, d_{h,mk}) = (P_{LoS}^{mk})^2 E \left[\frac{1}{2} \log_2 \left(1 + \gamma'' \exp \left(\frac{8u^2}{-k_g w_d^2} \right) \right) \right]$$

$$\gamma' = \frac{\gamma R^2 A_0^2 e^{1-2L_{sca} \sqrt{H^2 + d_{h,mk}^2}}}{2\pi} \quad \text{이고,} \quad \gamma'' = \frac{\gamma \epsilon^2 R^4 A_0^4 e^{1-4L_{sca} \sqrt{H^2 + d_{h,mk}^2}}}{2\pi} \quad \text{이다.}$$

[0058] 본 실시예에서는 지상 터미널(GT)에서 UAV(UAV)로의 업링크가 다운링크가 중요하다고 가정하여 UAV(UAV)의 고도(H)는 업링크 데이터 전송율($\overline{R_{mk}^{UL}}$)이 최대가 되도록 설정한다. 즉 수학적 식 15와 같이 업링크 데이터 전송율($\overline{R_{mk}^{UL}}$)의 평균이 최대가 되는 최적 고도(H_{opt})를 계산할 수 있다.

수학적 식 15

$$\operatorname{argmax}_{H_{opt}} \overline{R_{mk}^{UL}}$$

- [0060] 즉 최적 고도 계산부(110)는 수학적 식 15에 따라 최적 고도(H_{opt})를 계산하고, 계산된 최적 고도(H_{opt})를 다수의 UAV(UAV)가 이동하는 고도(H)로 설정할 수 있다. 다만 상기한 바와 같이, 최적 고도 계산부(110)는 기지정된 지상 터미널(GT)의 통신 반경과 통계적 FSO 채널 모델에 따라 최적 고도(H_{opt})를 계산하며, 다수의 UAV(UAV)가 동일한 고도(H)로 설정되므로, 사전이 미리 다수의 UAV(UAV)에 대한 최적 고도(H_{opt})가 상수값의 형태로 계산되어 이용될 수도 있다. 이 경우, 최적 고도 계산부(110)는 생략될 수 있다.
- [0061] 한편, UAV 개수 결정부(120)는 K개의 지상 터미널(GT)에서 수집된 정보를 획득하기 위해 이용할 UAV 개수(M)를 계산한다. 특히 본 실시예에서 UAV 개수 결정부(120)는 에너지 효율성 관점에서 UAV(UAV_m)가 특정 지상 터미널(GT)의 FSO 통신 영역에서 해당 지상 터미널(GT)과 연결을 유지하는 근사 서비스 시간(N_{serv}^{aprx})을 최대화할 수 있도록 최적의 UAV 개수(M_{opt})를 계산한다.
- [0062] 도 3은 도 2의 UAV 개수 결정부의 상세 구성의 일 예를 나타내고, 도 4는 그래프 분할 알고리즘을 기반으로 각 UAV에 할당되는 지상 터미널의 일 예를 나타낸다.
- [0063] 도 3을 참조하면, UAV 개수 결정부(120)는 UAV 개수 조절부(121), 지상 터미널 할당부(122), 경유 순서 결정부(123), 경로 거리 추정부(124), 서비스 에너지 추정부(125), 서비스 시간 추정부(126) 및 최적 UAV 개수 설정부(127)를 포함할 수 있다.
- [0064] UAV 개수 조절부(121)는 UAV의 개수(M)를 최소값인 1부터 지상 터미널(GT)의 개수(K)까지 순차적으로 증가시킨다. 이때 UAV(UAV)의 개수(M)는 지상 터미널(GT)의 개수(K) 이하로 설정되어야 한다($M \leq K$), 즉 증가되는 UAV의 개수(M)의 최대값(M_{max})은 지상 터미널(GT)의 개수(K)이다.
- [0065] 지상 터미널 할당부(122)는 UAV 개수 조절부(121)에서 설정되는 UAV의 개수(M)에 따라 K개의 지상 터미널(GT)의 분포에 따른 그래프 분할 알고리즘을 기반으로 K개의 지상 터미널(GT)을 각 UAV에 대응하는 할당한다. 지상 터미널 할당부(122)는 설정된 UAV의 개수(M)에 따라 K개의 지상 터미널(GT)이 분포된 전체 네트워크를 대응하는 개수의 섹터로 구분할 수 있다. 이때, 각 섹터는 포함되는 일 예로 지상 터미널(GT)에 연결된 사용자 수, 트래픽 양 등이 가능한 균등해지도록 그래프 분할 알고리즘을 적용하여 구분될 수 있다. 그래프 분할 알고리즘은 공지된 기술이므로 여기서는 상세하게 설명하지 않는다.
- [0066] 도 4에서는 일 예로 네트워크가 6개의 지상 터미널(GT)이 4개의 UAV(UAV)에 할당되도록 그래프 분할 알고리즘을 적용하여 다수의 섹터로 구분된 경우를 도시하였다. 이 경우, 제1 UAV(UAV_1)에 할당되는 지상 터미널(GT)의 개수(k_1)는 1이고, 나머지 제2 내지 제4 UAV($UAV_2 \sim UAV_4$)에 할당되는 지상 터미널(GT)의 개수($k_2 \sim k_4$)는 모두 2이다.
- [0067] 도 4에서 각 지상 터미널(GT) 주변의 타원은 지상 터미널의 FSO 통신 가능 영역으로, 지상 터미널(GT)이 UAV(UAV)과 통신 가능한 최대 수평 통신 거리인 통신 반경(d_h)에 따라 크기가 지정된다.
- [0068] 경유 순서 결정부(123)는 도 4과 같이 UAV(UAV)의 개수(M)에 따라 각 UAV(UAV_m)에 구분된 섹터에 포함된 k_m 개의 지상 터미널(GT)이 할당되면, 외판원 알고리즘(traveling salesman problem: TSP)를 기반으로 각 UAV(UAV_m)가 자신에게 할당된 k_m 개의 지상 터미널(GT)을 모두 경유하기 위한 순서를 결정한다. 외판원 알고리즘은 잘 알려진 알고리즘이므로 여기서는 상세하게 설명하지 않는다.
- [0069] 경로 거리 추정부(124)는 경유 순서 결정부(123)에서 결정된 순서에 따라 각 UAV(UAV_m)가 할당된 k_m 개의 지상 터미널(GT)을 통신 연결없이 경유하여 이동하는 경로 거리($D_{m,move}^{aprx}$)를 수학적 식 16에 따라 개략적으로 추정한다.

수학식 16

$$D_{m,move}^{aprx} = \sum_{i=0}^{k_m} \max\{D_i^{aprx}, 0\},$$

$$D_i^{aprx} = \begin{cases} \|\mathbf{w}_{m,i+1}\| - d_h & i = 0 \\ \|\mathbf{w}_{m,i} - \mathbf{w}_{m,i-1}\| - 2d_h & 0 < i < k_m \\ \|\mathbf{w}_{m,i}\| - d_h & i = k_m \end{cases}$$

[0070]

[0071] 수학식 16에서 D_i^{aprx} 는 제 m UAV(UAV $_m$)에 할당된 k_m 개의 지상 터미널(GT) 중 i 번째 지상 터미널(GT $_i$)에서 $i+1$ 번째 지상 터미널(GT $_{i+1}$)로 이동하는 거리를 나타내고, $\mathbf{w}_{m,i}$ 는 제 m UAV(UAV $_m$)에 할당된 i 번째 지상 터미널(GT $_i$)의 위치 벡터, d_h 는 지상 터미널(GT)의 통신 반경을 나타낸다.

[0072] 즉 수학식 16은 각 UAV(UAV $_m$)가 외판원 알고리즘을 기반으로 각 지상 터미널(GT $_i$)이 통신 반경(d_h) 사이를 이동하는 거리를 근사화하여 나타낸다.

[0073] 서비스 에너지 추정부(125)는 할당된 지상 터미널(GT)을 결정된 순서에 따라 경유하는 UAV(UAV)가 지상 터미널(GT)의 통신 영역 내에서 사용할 수 있을 것으로 예상되는 근사 서비스 에너지(E_{serv}^{aprx})를 계산한다.

[0074] 수학식 5를 참조하면, 속도(v)에 따른 UAV의 추진 파워($P(v)$)는 수학식 17과 같이 근사될 수 있다.

$$P(v) \approx P_0 \left(1 + \frac{3v^2}{U_{tip}^2} \right) + P_i \left(\frac{v_0}{v} \right) + \frac{1}{2} d_0 \rho s A v^3$$

[0075]

[0076] 수학식 17을 이용하면, 동일한 에너지로 각 UAV(UAV $_m$)가 최대한 멀리 이동할 수 있도록 하는 최대 거리 속도(maximum range speed)(v_{mr})에서의 UAV의 추진 파워($P(v_{mr})$)를 획득할 수 있다.

[0077] 이에 서비스 에너지 추정부(125)는 수학식 16에 따라 각 UAV(UAV $_m$)의 경로 거리($D_{m,move}^{aprx}$)가 획득되면, 각 UAV의 총 에너지(E_{total})와 각 UAV(UAV $_m$)의 경로 거리($D_{m,move}^{aprx}$), 최대 거리 속도(v_{mr}) 및 최대 거리 속도(v_{mr})에서의 UAV의 추진 파워($P(v_{mr})$)를 이용하여, 근사 서비스 에너지(E_{serv}^{aprx})를 수학식 18에 따라 계산한다.

수학식 18

$$E_{serv}^{aprx} = M E_{total} - \frac{P(v_{mr})}{v_{mr}} \sum_{m=1}^M D_{m,move}^{aprx}$$

[0078]

[0079] 수학식 18에 따르면, 근사 서비스 에너지(E_{serv}^{aprx})는 M 개의 UAV(UAV) 전체의 총 에너지에서 UAV의 추진 파워($P(v_{mr})$)와 경로 거리($D_{m,move}^{aprx}$)에 따라 누적 계산된 에너지를 차감하여 계산될 수 있다.

[0080] 그리고 서비스 시간 추정부(126)는 UAV(UAV_m)가 지상 터미널(GT)과 연결을 유지하는 근사 서비스 시간(N_{serv}^{aprx})을 추정한다.

[0081] 개별 UAV(UAV_m)의 총 동작 추정 시간(N_{total}^{aprx})은 UAV(UAV_m)가 특정 지상 터미널(GT)의 FSO 통신 영역으로부터 다음 지상 터미널(GT)의 FSO 통신 영역까지 이동하는데 소요되는 GT 이동 소요 시간(N_{move}^{aprx})과 UAV(UAV_m)가 특정 지상 터미널(GT)의 FSO 통신 영역에서 해당 지상 터미널(GT)과 연결을 유지하는 근사 서비스 시간(N_{serv}^{aprx})으로 구성된다.

[0082] 따라서 수학적 식 18에 따라 계산된 근사 서비스 에너지(E_{serv}^{aprx})와 동일 에너지로 각 UAV(UAV_m)가 최대 시간 동안 운용 가능하도록 하는 최대 지구력 속도(maximum endurance speed)(v_{me})를 기반으로, 서비스 시간 추정부(126)는 근사 서비스 시간(N_{serv}^{aprx})을 수학적 식 19에 따라 추정할 수 있다.

수학적 식 19

[0083]
$$N_{serv}^{aprx} = \frac{E_{serv}^{aprx}}{K P(v_{me})}$$

[0084] 여기서 $P(v_{me})$ 는 최대 지구력 속도(v_{me})에서의 UAV의 추진 파워로 수학적 식 17에 따라 계산될 수 있다.

[0085] 최적 UAV 개수 설정부(127)는 수학적 식 19로 UAV 개수(M)에 따른 근사 서비스 시간(N_{serv}^{aprx})이 계산되면, 수학적 식 20과 같이 UAV의 총 에너지(E_{total})에 대비하여, 근사 서비스 시간(N_{serv}^{aprx})을 최대화하는 UAV 개수(M)를 최적 UAV 개수(M_{opt})로서 계산하여 획득한다.

수학적 식 20

[0086]
$$M_{opt} = \operatorname{argmax}_M \frac{N_{serv}^{aprx}}{M E_{total}}$$

[0087] 이는 각 UAV의 에너지가 배터리에 의해 제한되므로, 근사 서비스 시간(N_{serv}^{aprx})을 최대화하기 위해서는 UAV(UAV_m)가 지상 터미널(GT)과 연결되지 않은 상태에서 소비되는 에너지를 최소화할 필요가 있기 때문이다.

[0088] UAV 경로 최적화부(130)는 UAV 개수 결정부(120)에서 결정된 M 개의 UAV의 이동 경로를 최적화한다. 본 실시예에서 UAV 경로 최적화부(130)는 각 UAV(UAV_m)가 할당된 지상 터미널(GT)의 FSO 통신 영역 외에 위치하여, 지상 터미널(GT)과 통신을 수행하지 않고 이동하는 경우 경유 경로를 최적화하는 경우 경로 최적화부(131)와 UAV(UAV_m)가 할당된 지상 터미널(GT) 각각의 FSO 통신 영역 내에 진입하여 FSO 통신을 수행하는 동안의 경로를 최적화하는 통신 경로 최적화부(133)를 포함할 수 있다.

[0089] 즉 경유 경로 최적화부(131)는 각 UAV(UAV_m)가 UAV 개수 결정부(120)에서 그래프 분할 알고리즘에 따라 각 UAV(UAV_m)에 할당된 지상 터미널(GT)을 외판원 알고리즘을 기반으로 지정된 순서로 이동할 때 소비하는 경유 에너지(E_{move})가 최소화되도록 경유 경로를 최적화하고, 통신 경로 최적화부(133)는 각 UAV(UAV_m)가 할당된 지상 터미널(GT) 각각의 통신 영역 내에서 경유 에너지(E_{move})를 제외한 잔여 에너지(E_{rem})로 지상 터미널(GT)과의 통신 시간을 최대화할 수 있도록 통신 경로를 최적화한다.

[0090] 우선 경유 경로 최적화부(131)는 UAV 개수 결정부(120)에 의해 최적으로 설정된 개수(M)의 UAV의 지상 터미널(GT) 사이의 이동 경로인 경유 경로를 최적화하여 설정한다. 이를 위해 경유 경로 최적화부(131)는 각

UAV(UVA_m)가 UAV 관제 센터가 위치하는 원점(0, 0, 0)의 위치에서 출발하여 할당된 지상 터미널(GT)을 지정된 순서에 따라 순차적 거쳐 다시 원점에 위치하는 UAV 관제 센터로 복귀하는데 소모하는 경우 에너지(E_{move})가 최소가 되도록 하는 각 타임 스텝(n)에서의 UAV(UVA_m)의 위치 벡터(q_m[n])를 획득해야 한다. 이는 각 타임 스텝(n)에서 UAV(UVA_m)의 최적의 위치 벡터(q_m[n])가 곧 최적화된 UAV 경우 궤도이기 때문이다.

[0091] 도 5는 UAV가 특정 지상 터미널의 통신 영역에서 인접한 지상 터미널의 통신 영역으로 이동할 때 에너지 소모를 최소화하는 궤도의 예를 나타낸다.

[0092] 각 UAV(UVA_m)가 할당된 k_m 개의 지상 터미널(GT) 중 i번째 지상 터미널(GT)의 통신 영역으로 진입하는 시간과 이탈하는 시간을 각각 (N_{entry,i}), (N_{exit,i})라 하면, 도 5에 나타난 바와 같이, UAV(UVA_m)가 할당된 k_m 개의 지상 터미널(GT) 중 i번째 지상 터미널(GT)에서 i+1번째 지상 터미널(GT)로 이동하는데 소요되는 시간(N_{move,i})은 UAV(UVA_m)가 i+1번째 지상 터미널(GT)의 통신 영역으로 진입하는 시간(N_{entry,i+1})에서 i번째 지상 터미널(GT)의 통신 영역을 이탈하는 시간(N_{exit,i})의 차로 수학적 식 21과 같이 표현될 수 있다.

수학적 식 21

[0093]
$$N_{move,i} = N_{entry,i+1} - N_{exit,i}$$

[0094] 그리고 UAV 관제 센터는 할당된 k_m 개의 지상 터미널(GT) 중 첫번째 지상 터미널(GT₁) 이전에 배치된 초기 지상 터미널(GT_{0m})이라 할 수 있을 뿐만 아니라, 마지막 지상 터미널(GT_{km}) 이후 배치된 복귀 지상 터미널(GT_{km+1})이라 할 수도 있다.

[0095] 따라서 UAV 관제 센터에서 출발하는 시간, 즉 UAV 관제 센터를 이탈하는 시간(N_{exit,0})은 초기 시간이므로 N_{exit,0} = 0으로 설정되고, 마지막 지상 터미널(GT_{km})을 거쳐 UAV 관제 센터로 복귀하는 시간(N_{entry,km+1})은 전체 경우 소요 시간(N_{total} = N_{entry,km+1})으로 설정될 수 있다.

[0096] 그러므로 경우 궤도 최적화부(131)는 우선 UAV(UVA_m)의 초기 타임 스텝(n = 0)에서의 위치 벡터(q_m[0])와 전체 경우 소요 시간에 다른 타임 스텝(n = N_{total})에서의 위치 벡터(q_m[N_{total}])를 수학적 식 22와 같이 설정할 수 있다.

수학적 식 22

[0097]
$$\mathbf{q}_m[0] = \mathbf{q}_m[N_{total}] = (0,0,H)$$

[0098] 본 실시예에서는 UAV(UVA_m)가 원점 위치(0, 0, 0)에서 지정된 고도(H)까지 상승하거나, 지정된 고도(H)에서 원점 위치(0, 0, 0)로 하강하는데 소모되는 시간과 에너지는 지상 터미널(GT)을 경유하는데 소모되는 시간 및 에너지(E_{move})에 비해 상대적으로 매우 작으므로 무시한다.

[0099] 한편 UAV(UVA_m)가 할당된 k_m 개의 지상 터미널(GT) 중 i번째 지상 터미널(GT_i)의 통신 영역에 진입하는지 여부와 i번째 지상 터미널(GT_i)의 통신 영역에서 이탈하는지 여부는 수학적 식 23 및 수학적 식 24에 따라 판별될 수 있다.

수학적 식 23

[0100]
$$\|\mathbf{q}_m[N_{entry,i}] - \mathbf{w}_{m,i}\| \leq d_h, \forall i$$

수학식 24

$$\|\mathbf{q}_m[N_{exit,i}] - \mathbf{w}_{m,i}\| \leq d_h, \quad \forall i$$

[0101]

여기서 $\mathbf{w}_{m,i}$ 는 제 m UAV(UVA $_m$)에 할당된 i 번째 지상 터미널(GT $_i$)을 위치 벡터이다.

[0102]

그리고 UAV(UVA $_m$)가 할당된 k_m 개의 지상 터미널(GT) 중 i 번째 지상 터미널(GT $_i$)에서 $i+1$ 번째 지상 터미널(GT $_{i+1}$)로 이동할 때 소비되는 지상 터미널간 경유 에너지($E_{move,i}$)는 수학식 25로 계산될 수 있다.

[0103]

수학식 25

$$E_{move,i}(\mathbf{q}_m[n]) = \sum_{n=N_{exit,i}}^{N_{entry,i+1}} P(\mathbf{v}_m[n]) \delta_t$$

[0104]

여기서 UAV(UVA $_m$)의 속도는 UAV(UVA $_m$)의 최대 속도(v_{max})를 초과할 수 없으므로, 수학식 2를 참조하면 UAV(UVA $_m$)의 속도 벡터($\mathbf{v}_m[n]$)는 수학식 26을 만족해야 한다.

[0105]

수학식 26

$$\|\mathbf{v}_m[n]\| = \left\| \frac{\mathbf{q}_m[n+1] - \mathbf{q}_m[n]}{\delta_t} \right\| \leq v_{max}$$

[0106]

경유 에너지(E_{move})는 UAV(UVA $_m$)가 k_m 개의 지상 터미널(GT)을 모두 이동하는 동안 소모되는 에너지이므로, 경유 궤도 최적화부(131)는 수학식 27과 같이 경유 에너지(E_{move})가 최소가 되도록 각 타임 스텝(n)에서의 UAV의 위치 벡터($\mathbf{q}_m[n]$)를 설정함으로써 UAV 경유 궤도를 최적화할 수 있다.

[0107]

수학식 27

$$\text{minimize} \quad E_{move}(\mathbf{q}_m[n]) = \sum_{i=0}^{k_m} E_{move,i}(\mathbf{q}_m[n])$$

[0108]

여기서 경유 에너지(E_{move})는 배터리에 의해 결정되는 UAV의 총 에너지(E_{total}) 이하 ($E_{move}(\mathbf{q}_m[n]) \leq E_{total}$)이어야 한다.

[0109]

이때, 경유 궤도 최적화부(131)는 M 개의 UAV가 경유 궤도를 따라 이동하는 도중에 상호 충돌이 발생되지 않도록, M 개의 UAV 각각의 UAV 경유 궤도에서 동일 타임 스텝(n)에서의 위치 벡터($\mathbf{q}_m[n]$)가 기지정된 최소 거리(d_{min}) 이상이 되도록 수학식 28과 같이 추가적으로 설정할 수 있다.

[0110]

수학식 28

$$\|\mathbf{q}_m[n] - \mathbf{q}_j[n]\| \geq d_{min}, \quad \forall j \neq m$$

[0111]

[0112] 즉 제 m UAV(UAV $_m$)과 제 j UAV(UAV $_j$)가 동일 타임 스텝(n)에서 최소 거리(d_{min}) 이상 이격되도록 추가적으로 제약할 수 있다.

[0113] 한편, 통신 궤도 최적화부(133)는 UAV의 총 에너지(E_{total})에서 경유 궤도 최적화부(131)에 의해 설정된 경유 에너지(E_{move})를 제외한 잔여 에너지(E_{rem})를 이용하여 각 UAV(UAV $_m$)가 할당된 각 지상 터미널(GT)과의 통신 시간을 최대화할 수 있는 통신 궤도를 계산한다.

[0114] 도 6은 UAV가 지상 터미널의 통신 영역에서 잔여 에너지의 제한 내에서 통신 시간을 최대화하는 궤도의 일 예를 나타낸다.

[0115] 도 6을 참조하면, UAV(UAV $_m$)가 할당된 지상 터미널(GT) 중 하나의 지상 터미널(GT $_i$)과 FSO 통신을 수행하기 위해서는 UAV(UAV $_m$)가 지상 터미널(GT $_i$)의 통신 영역 내에 존재해야 한다. 즉 UAV(UAV $_m$)의 위치 벡터($q_m[n]$)와 지상 터미널(GT $_i$)의 위치 벡터($w_{m,i}$) 사이의 거리가 통신 반경(d_h) 이하이어야 하므로 수학적 29를 만족해야 한다.

수학적 29

[0116]
$$\|q_m[n] - w_{m,i}\| \leq d_h$$

[0117] 그리고 UAV(UAV $_m$)가 지상 터미널(GT $_i$)과 FSO 연결을 유지할 수 있는 서비스 시간($N_{serv,i}$)은 UAV(UAV $_m$)가 수학적 29를 만족하는 위치에 배치되어 지상 터미널(GT $_i$)의 통신 영역 내에 머무르는 시간으로, UAV(UAV $_m$)가 지상 터미널(GT $_i$)의 통신 영역 내로 진입한 시간($N_{entry,i}$)으로부터 통신 영역 외부로 이탈하는 시간($N_{exit,i}$)까지의 시간 구간이며, 수학적 30으로 표현될 수 있다.

수학적 30

[0118]
$$N_{serv,i} = N_{exit,i} - N_{entry,i} \quad \forall i$$

[0119] 서비스 시간($N_{serv,i}$)이 증가할수록 UAV(UAV $_m$)가 지상 터미널(GT $_i$)과 긴 시간 동안 많은 양의 통신을 수행할 수 있으므로, 통신 궤도 최적화부(133)는 수학적 31과 같이 각 UAV(UAV $_m$)의 전체 서비스 시간(N_{serv})이 최대가 되도록 UAV(UAV $_m$)의 각 타임 스텝(n)에서의 위치 벡터($q_m[n]$)를 결정함으로써, 통신 궤도를 최적화할 수 있다.

수학적 31

[0120]
$$\text{maximize} \quad N_{serv}(q_m[n]) = \sum_{i=1}^{k_m} N_{serv,i}$$

[0121] 다만, UAV(UAV)가 사용할 수 있는 에너지는 제한된다. 이에 통신 궤도 최적화부(133)는 우선 각 UAV(UAV $_m$)가 할당된 각 지상 터미널(GT)과의 FSO 통신 시에 사용 가능한 잔여 에너지(E_{rem})를 계산한다. 잔여 에너지(E_{rem})는 UAV(UAV $_m$)의 전체 에너지(E_{total})에서 경유 궤도 최적화부(131)에 의해 계산된 최소의 경유 에너지(E_{move})를 차감($E_{rem} = E_{total} - E_{move}$)한 에너지라고 볼 수 있다. 그리고 UAV(UAV $_m$)는 잔여 에너지(E_{rem})를 이용하여 지상 터미널(GT)의 통신 영역 내를 비행하면서 지상 터미널(GT)과 FSO 통신을 수행해야 하므로, 잔여 에너지(E_{rem})는 지상 터미널(GT)의 통신 영역 내에서 이동하기 위한 서비스 에너지(E_{serv})와 지상 터미널(GT)과 FSO 통신을 위한 통신 에너지의 합으로 볼 수 있다. 그리고 통신 에너지는 FSO 통신 파워(P_{FSO})와 서비스 시간($N_{serv}(q_m[n]) \delta t$)의 곱으로

로 표현될 수 있으므로, 잔여 에너지(E_{rem})는 수학식 32로 표현될 수 있다.

수학식 32

[0122]
$$E_{rem} = E_{serv}(\mathbf{q}_m[n]) + P_{FSO}N_{serv}(\mathbf{q}_m[n])\delta_t = E_{total} - E_{move}(\mathbf{q}_m[n])$$

[0123] 여기서 UAV(UAV_m)가 지상 터미널(GT)의 통신 영역 내에서 이동하기 위해 소모하는 서비스 에너지(E_{serv})는 수학식 17 및 수학식 25의 이동 에너지($E_{move,i}$) 계산 방식과 유사하게 수학식 33으로 계산될 수 있다.

수학식 33

[0124]
$$E_{serv}(\mathbf{q}_m[n]) = \sum_{i=1}^{k_m} \sum_{N_{entry,i}}^{N_{exit,i}} \left(P_0 \left(1 + \frac{3\|\mathbf{v}_m[n]\|^2}{U_{tip}^2} \right) + P_i \left(\frac{v_0}{\|\mathbf{v}_m[n]\|} \right) + \frac{1}{2} d_0 \rho s A \|\mathbf{v}_m[n]\|^3 \right) \delta_t$$

[0125] 다만, 통신 궤도 최적화부(133)는 잔여 에너지(E_{rem})가 UAV(UAV_m)가 할당된 k_m 개의 지상 터미널(GT) 각각에 기지 정된 방식으로 분배되도록 설정할 수 있다. 통신 궤도 최적화부(133)는 잔여 에너지(E_{rem})가 k_m 개의 지상 터미널(GT) 각각에 균등하게 분배되도록 설정할 수 있으나, 경우에 따라서는 k_m 개의 지상 터미널(GT) 각각에 연결된 IoT 기기의 수, IoT 데이터의 종류 및 특성, 저장된 데이터의 양 등을 고려하여 각 지상 터미널(GT_i)에 서로 다른 가중치(α_i)를 적용하여, 수학식 34 및 35와 같이 잔여 에너지(E_{rem})를 k_m 개의 지상 터미널(GT)에 분배할 수 있다.

수학식 34

[0126]
$$E_{rem}(\mathbf{q}_m[n]) = \sum_{i=1}^{k_m} E_{rem,i}(\mathbf{q}_m[n])$$

수학식 35

[0127]
$$E_{rem,i}(\mathbf{q}_m[n]) = \alpha_i \frac{E_{rem}(\mathbf{q}_m[n])}{k_m}$$

[0128] 이에 통신 궤도 최적화부(133)는 수학식 30의 각 지상 터미널(GT_i)에 대한 서비스 시간($N_{serv,i}$)을 수학식 36에 따라 근사적으로 계산할 수 있다.

수학식 36

[0129]
$$N_{serv,i}(\mathbf{q}_m[n]) = \left\lfloor \frac{E_{rem,i}(\mathbf{q}_m[n])}{E_{me} + P_{FSO}\delta_t} \right\rfloor \approx \left\lfloor \frac{E_{serv,i}(\mathbf{q}_m[n])}{E_{me}} \right\rfloor$$

- [0130] 여기서 E_{me} 는 최대 지구력 속도(v_{me})에 따른 소모 에너지이다.
- [0131] 통신 궤도 최적화부(133)는 수학적 식 36의 서비스 시간($N_{serv,i}$)과 수학적 식 31의 잔여 에너지(E_{rem})와 서비스 시간($N_{serv,i}$)과의 관계로부터 수학적 식 30을 만족시키기 위한 UAV(UAV_m)의 각 타임 스텝(n)에서의 위치 벡터($q_m[n]$)를 결정함으로써, 통신 궤도를 최적화한다.
- [0132] 통신 궤도 최적화부(133) 또한 경유 궤도 최적화부(131)와 마찬가지로 M개의 UAV가 통신 궤도를 따라 이동하는 도중에 상호 충돌이 발생되지 않도록, M개의 UAV 각각의 UAV 통신 궤도에서 동일 타임 스텝(n)에서의 위치 벡터($q_m[n]$)가 기지정된 최소 거리(d_{min}) 이상이 되도록 수학적 식 28과 같이 추가적으로 설정할 수 있다.
- [0133] 결과적으로 UAV 궤도 최적화부(130)에서 경유 궤도 최적화부(131)는 UAV(UAV)가 할당된 지상 터미널(GT)의 통신 영역들로 이동하는데 소모하는 경유 에너지(E_{move})가 최소가 되도록 각 UAV(UAV_m)의 타임 스텝별 위치 벡터($q_m[n]$)를 획득하고, 통신 궤도 최적화부(133)는 UAV(UAV_m)의 총 에너지에서 경유 에너지(E_{move})를 제외한 잔여 에너지(E_{rem})를 이용하여 할당된 각 지상 터미널(GT_i)과 최대한 긴 시간 동안 통신을 수행할 수 있도록 각 UAV(UAV_m)의 타임 스텝별 위치 벡터($q_m[n]$)를 획득하여 UAV(UAV)의 이동 경로를 최적화한다.
- [0134] 충돌 회피 지연부(140)는 다수의 UAV의 사이의 충돌을 회피하기 위한 지연 시간을 계산하여 설정한다. 상기한 바와 같이, UAV 궤도 최적화부(130)의 경유 궤도 최적화부(131)와 통신 궤도 최적화부(133) 각각이 수학적 식 28에 따라 M개의 UAV 각각의 UAV 통신 궤도에서 동일 타임 스텝(n)에서의 위치 벡터($q_m[n]$)가 기지정된 최소 거리(d_{min}) 이상이 되도록 제한할지라도 다수의 UAV가 출발 및 복귀하는 UAV 관제 센터에는 다수의 UAV가 집결될 수 있어 혼잡할 수밖에 없으며, 특히 다수의 UAV가 관제 센터에서 동시에 출발하는 경우, 수학적 식 28의 최소 거리(d_{min}) 조건을 만족시킬 수 없게 된다.
- [0135] 이에 본 실시예에서 충돌 회피 지연부(140)는 다수의 UAV가 UAV 관제 센터를 출발하는 순서를 결정하고, 결정된 순서에 따라 UAV 관제 센터를 출발하는 다수의 UAV 사이의 간격이 기지정된 최소 거리(d_{min}) 조건이 되는 시간 간격 계산하여, 다수의 UAV 각각이 이전 UAV가 출발한 시간으로부터 계산된 시간 간격만큼 지연한 후 출발하도록 각 UAV의 출발 시간을 설정한다.
- [0136] 도 7은 본 발명의 일 실시예에 따른 UAV 궤도 최적화 방법을 나타낸다.
- [0137] 도 1 내지 도 6을 참조하여 도 7의 UAV 궤도 최적화 방법을 설명하면, 우선 UAV 궤도 최적화는 운용할 다수의 UAV(UAV)의 고도(H)를 설정한다(S10). 여기서 UAV(UAV)의 고도(H)는 FSO 채널 상태와 지상 터미널(GT)의 통신 반경을 기반으로 계산되어 설정될 수 있으나, 지상 터미널(GT)의 기지정된 통신 반경과 통계적 FSO 채널 모델에 따라 동일한 고도($z = H$)로 설정될 수도 있다.
- [0138] UAV(UAV)의 고도(H)가 설정되면, 다수의 지상 터미널(GT)이 획득한 데이터를 인가받도록 운용할 UAV의 개수를 최적화한다(S20). UAV의 개수를 최적화하는 단계(S20)에서는 UAV의 개수를 임의로 조절하면서 다수의 지상 터미널(GT)을 조절된 개수의 UAV에 할당한 후, 모든 UAV의 전체 에너지(E_{total})에서 할당된 지상 터미널(GT)을 순차적으로 경유하는데 소비하는 근사 경유 에너지를 추정하여 차감함으로써, 전체 UAV(UAV_m)가 전체 지상 터미널(GT)에 사용할 수 있는 근사 서비스 에너지(E_{serv}^{aprx})를 추정한다. 그리고 추정된 근사 서비스 에너지(E_{serv}^{aprx})를 기반으로 모든 UAV의 전체 에너지 대비 전체 지상 터미널(GT)과 통신을 수행할 수 있는 서비스 시간이 최대가 되도록 하는 최적의 UAV 개수(M_{opt})를 계산하여 설정한다.
- [0139] 구체적으로 UAV의 개수를 최적화하는 단계(S20) 먼저, UAV 개수를 기지정된 초기 개수(여기는 일 예로 1개)로 설정한다(S21). 그리고 현재 설정된 개수의 UAV(UAV)에 다수의 지상 터미널(GT)을 할당한다(S22). 이때, 다수의 지상 터미널(GT)이 분포된 전체 네트워크 영역에 그래프 분할 기법을 적용하여, 설정된 UAV(UAV) 개수에 대응하는 개수의 섹터로 분할하고, 분할된 각 섹터에 위치하는 지상 터미널(GT)을 대응하는 UAV(UAV)에 할당할 수 있다.
- [0140] 다수의 지상 터미널(GT)이 설정된 개수의 UAV(UAV)에 할당되면, 각 UAV(UAV_m)가 할당된 지상 터미널(GT)을 경유할 순서를 외판원 기법에 따라 결정한다(S23). 그리고 각 UAV(UAV)가 결정된 경유 순서에 따라 자신에게 할당

된 지상 터미널(GT)을 경유하는 개략적인 경로 거리($D_{m,move}^{aprx}$)를 수학적 식 16에 따라 추정한다(S24). 이후, 수학적 식 18에 따라 전체 M개의 UAV(UAV)의 에너지($M \cdot E_{total}$)에서 UAV들이 경로 거리($D_{m,move}^{aprx}$)를 이동하는데 이용하는 근사 경로 에너지를 차감하여 근사 서비스 에너지(E_{serv}^{aprx})를 추정하고, 추정된 근사 서비스 에너지(E_{serv}^{aprx})로부터 수학적 식 19에 따라 근사 서비스 시간(N_{serv}^{aprx})을 계산한다(S25).

[0141] 근사 서비스 시간(N_{serv}^{aprx})이 추정되면, 현재 설정된 UAV 개수(M)가 지상 터미널(GT) 개수(K) 이상인지 판별한다(S26). 만일 UAV 개수(M)가 지상 터미널(GT) 개수(K) 미만($M < K$)이면, UAV의 개수(M)를 증가시킨다(S27). 그리고 다시 근사 서비스 시간(N_{serv}^{aprx})을 근사적으로 추정한다(S22 ~ S25). 그러나 UAV 개수(M)가 지상 터미널(GT) 개수(K) 이상($M \geq K$)이면, 수학적 식 20을 만족시키는 최적 UAV 개수(M_{opt})를 UAV 개수(M)로 설정한다(S28). 즉 전체 UAV(UAV)의 에너지($M \cdot E_{total}$) 대비 근사 서비스 시간(N_{serv}^{aprx})이 최대가 되는 UAV의 개수(M)를 추출하여 설정한다.

[0142] UAV 개수 최적화 단계(S20)에 의해 최적의 UAV 개수(M)가 설정되면, 설정된 개수의 UAV의 이동 궤도를 최적화한다. UAV의 이동 궤도를 최적화하는 단계는 설정된 개수의 UAV가 각각 할당된 지상 터미널(GT)의 통신 영역 밖에서 지상 터미널(GT) 사이를 통신 없이 이동하는 경유 궤도와 각 지상 터미널(GT)의 통신 영역 내에서 해당 지상 터미널(GT)과 통신을 수행하면서 이동하는 통신 궤도를 구분하여 최적화한다.

[0143] 우선 경유 궤도를 최적화하는 단계(S30)는 각 UAV(UAV_m)가 지정된 경유 순서에 따라 할당된 지상 터미널(GT)의 통신 영역 외부 사이를 이동할 때 소모되는 위치별 경유 에너지($E_{move,i}$)를 수학적 식 25에 따라 계산한다. 그리고 수학적 식 26과 같이 수학적 식 25에 따라 계산되는 위치별 이동 에너지($E_{move,i}$)가 최소화되는 타임 스텝별(n) UAV의 위치 벡터($q_m[n]$)를 추출하여 경유 궤도를 설정한다(S32).

[0144] 그리고 통신 궤도를 최적화하는 단계(S40)에서는 우선 각 UAV(UAV_m)의 이론적 최대 에너지인 전체 에너지($E_{total,i}$)에서 할당된 모든 지상 터미널(GT)을 경유하기 위해 이용되는 경유 에너지(E_{move})를 차감한 잔여 에너지(E_{rem})를 계산한다(S41).

[0145] 그리고 각 UAV(UAV_m)의 잔여 에너지(E_{rem})를 할당된 지상 터미널(GT)에 분배한다(S42). 이때, 잔여 에너지(E_{rem})는 할당된 적어도 하나의 지상 터미널(GT)에 균등 분배될 수 있으나, 각 지상 터미널(GT_i)에 서로 다른 가중치(α_i)를 적용하여 수학적 식 35와 같이 서로 상이하게 분배될 수도 있다.

[0146] 그리고 각 지상 터미널(GT_i)에 분배된 잔여 에너지($E_{rem,i}$)로부터 각 지상 터미널(GT_i)별 UAV 위치($q_m[n]$)에 따른 서비스 시간($N_{serv,i}$)을 수학적 식 36에 따라 계산한다(S43).

[0147] 이후 수학적 식 31에 따라 서비스 시간(N_{serv})을 최대로 할 수 있는 UAV 위치 벡터($q_m[n]$)를 추출하여 통신 궤도를 설정한다(S44).

[0148] 경로 궤도와 통신 궤도가 설정되면, 설정된 개수의 UAV(UAV)가 출발할 순서를 지정하고, 지정된 순서에 따라 다수의 UAV(UAV)가 출발할 때, 서로 기지정된 최소 거리(d_{min}) 이격되어 출발하여 서로 충돌이 발생하지 않도록, 최소 거리(d_{min})에 대응하는 시간 간격을 계산한다(S51). 그리고 계산된 시간 간격에 따라 순차 출발하는 다수의 UAV(UAV)의 지연 시간을 설정한다(S52).

[0149] 본 발명에 따른 방법은 컴퓨터에서 실행시키기 위한 매체에 저장된 컴퓨터 프로그램으로 구현될 수 있다. 여기서 컴퓨터 판독가능 매체는 컴퓨터에 의해 액세스될 수 있는 임의의 가용 매체일 수 있고, 또한 컴퓨터 저장 매체를 모두 포함할 수 있다. 컴퓨터 저장 매체는 컴퓨터 판독가능 명령어, 데이터 구조, 프로그램 모듈 또는 기타 데이터와 같은 정보의 저장을 위한 임의의 방법 또는 기술로 구현된 휘발성 및 비휘발성, 분리형 및 비분리형 매체를 모두 포함하며, ROM(판독 전용 메모리), RAM(랜덤 액세스 메모리), CD(컴팩트 디스크)-ROM, DVD(디지털 비디오 디스크)-ROM, 자기 테이프, 플로피 디스크, 광데이터 저장장치 등을 포함할 수 있다.

[0150] 본 발명은 도면에 도시된 실시예를 참고로 설명되었으나 이는 예시적인 것에 불과하며, 본 기술 분야의 통상의

지식을 가진 자라면 이로부터 다양한 변형 및 균등한 타 실시예가 가능하다는 점을 이해할 것이다.

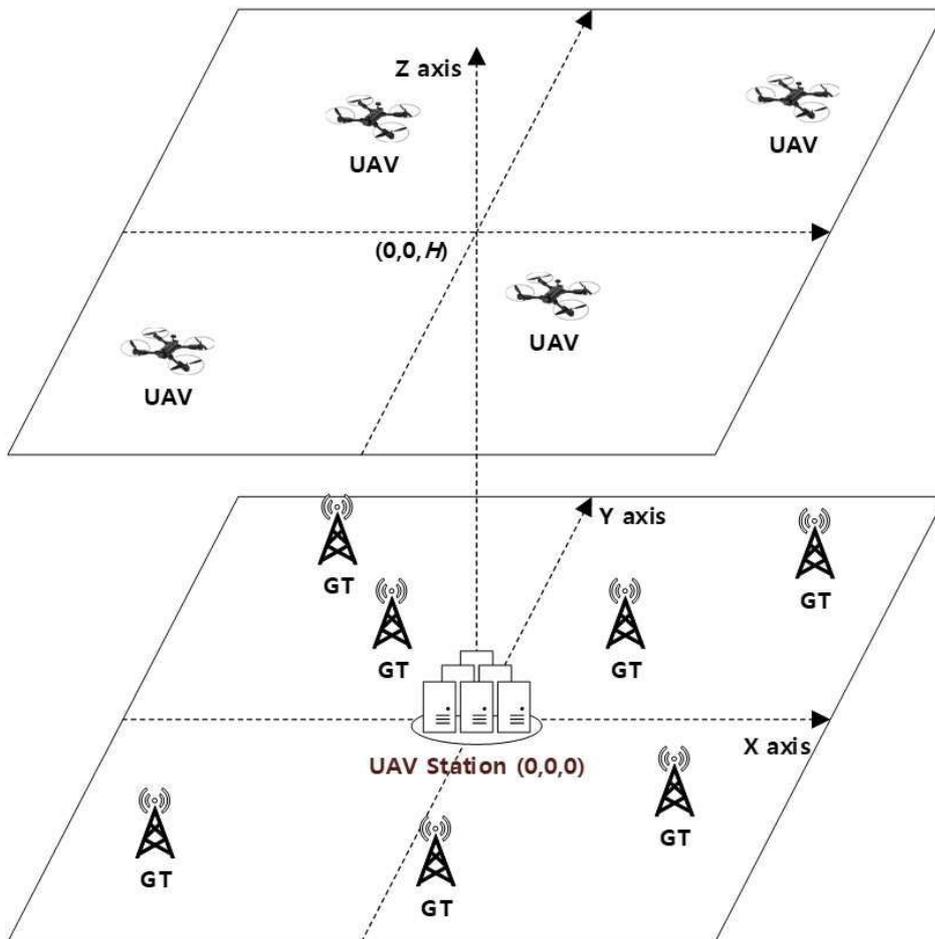
[0151] 따라서, 본 발명의 진정한 기술적 보호 범위는 첨부된 청구범위의 기술적 사상에 의해 정해져야 할 것이다.

부호의 설명

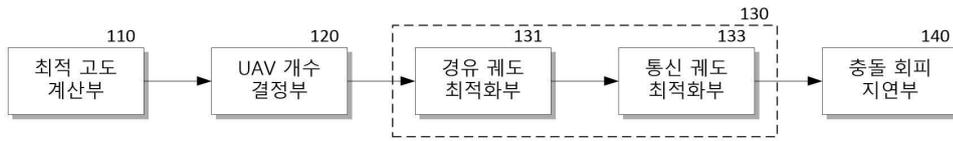
- [0152] 110: 최적 고도 계산부 120: UAV 개수 결정부
 121: UAV 개수 조절부 122: 지상 터미널 할당부
 123: 경유 순서 결정부 124: 경로 거리 추정부
 125: 서비스 에너지 추정부 126: 서비스 시간 추정부
 127: 최적 UAV 개수 설정부 130: UAV 궤도 최적화부
 131: 경유 궤도 최적화부 133: 통신 궤도 최적화부
 140: 충돌 회피 지연부

도면

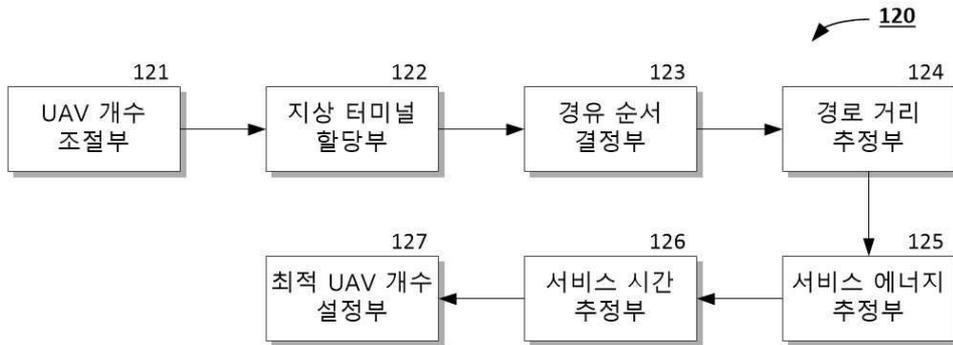
도면1



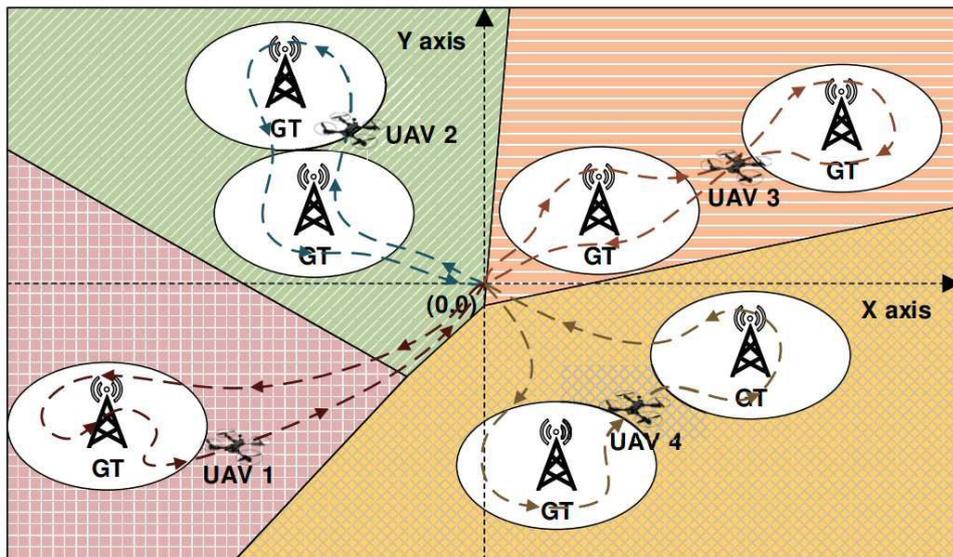
도면2



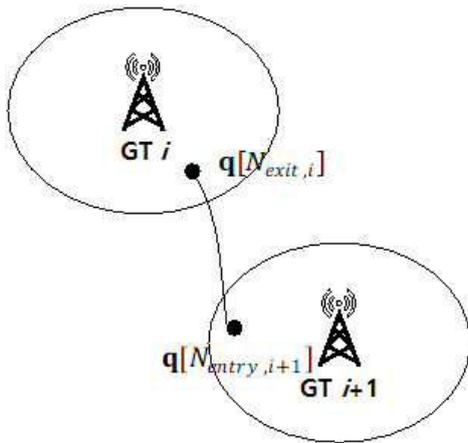
도면3



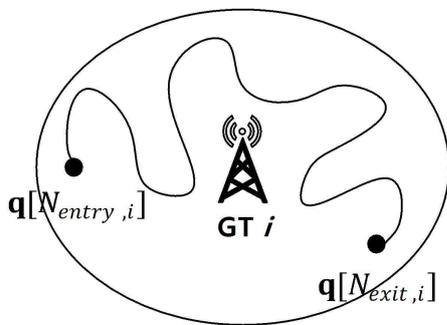
도면4



도면5



도면6



도면7

