

유전 알고리즘 기반 위치 추정을 보장하는 군집 저궤도 위성망 설계

이재영, 김태운, 오하빈, 김재현*

아주대학교 AI융합네트워크학과, *아주대학교 전자공학과

{dlwodudd4865, xodbsxogjs, habeen0727, *jkim}@ajou.ac.kr

Design of LEO Satellite Constellation for Positioning Based on Genetic Algorithm

JaeYeong Lee, Tae-Yoon Kim, Habeen Oh, Jae-Hyun Kim*

Department of Artificial Intelligence Convergence Network, Ajou University

*Department of Electrical and Computer Engineering, Ajou University

요약

본 논문은 유전 알고리즘을 활용하여 최소한의 위성 수로 위치 추정을 보장하는 군집 저궤도 위성망을 설계한다. 설계되는 군집 저궤도 위성망 유형은 Walker Delta, Walker Star, Hybrid이다. 각 위성망 유형의 위치 추정 성능을 geometric dilution of precision(GDOP)로 평가하고, 최적의 위치 추정 성능을 나타내는 위성망을 분석한다.

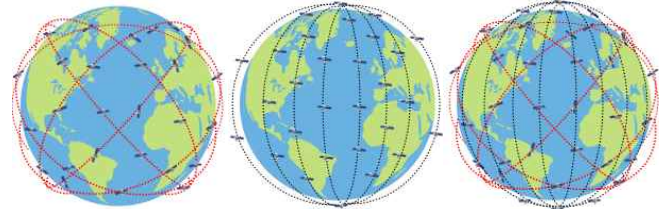
I. 서론

위성 기반 위치 추정은 global navigation satellite system(GNSS)을 활용한다 [1]. 그러나 GNSS 위성은 수천에서 수만 km의 높은 궤도에서 운용되며, 위성 수가 제한적이어서 위치 추정에 활용 가능한 위성 조합이 한정적이기 때문에 위치 추정 정확도가 저하될 수 있다. 반면, 저궤도 위성은 상대적으로 낮은 고도에서 다수의 위성으로 위성망이 운용되므로, 다양한 위성 조합을 활용하여 보다 정밀한 위치 추정이 가능하다. 하지만 위성 수가 과도하게 많아지면, 위성망 구축 및 운용 비용이 증가하고, 통신 오버헤드로 인해 시스템 성능 저하가 발생할 수 있다. 따라서 본 논문에서는 유전 알고리즘을 활용해 최소한의 위성 수로 위치 추정을 보장하는 군집 저궤도 위성망을 설계한다. 이를 위해 Walker Delta, Walker Star 유형 위성망과 두 유형을 결합한 Hybrid 유형 위성망을 각각 설계하고, geometric dilution of precision(GDOP) 지표로 위치 추정 성능을 평가한다.

II. 군집 저궤도 위성망 설계

본 논문에서 설계하는 위성망 유형은 그림 1과 같다. 그림 1.(a)는 Walker Delta 유형의 설계 위성 파라미터는 궤도 평면 수 P_d , 궤도 평면 당 위성 수 s_d , 그리고 궤도 경사각 i_d 이다. 그림 1.(b)는 Walker Star 유형의 설계 위성 파라미터는 궤도 평면 수 P_s , 궤도 평면 당 위성 수 s_s 이며, 해당 유형의 궤도 경사각 i_s 는 90° 로 고정한다. 두 유형의 위성들은 일정한 간격으로 분포하여 궤도 평면 내에 균일하게 배치된다. 두 유형의 결합으로 설계하는 그림 1.(c)의 Hybrid 유형의 설계 파라미터는 P_d, s_d, i_d, P_s, s_s 이며, 이를 통해 다양한 위성 조합을 위치 추정에 적용할 수 있다.

각 위성망의 설계 파라미터는 유전 알고리즘을 활용해 도출한다. 유전 알고리즘은 자연의 유전 현상을 모방하여 개체생성, 교차, 변이, 평가, 선택의 과정을 통해 복잡한 최적화 문제의 해를 탐색하는 알고리즘으로, 비선형적 특성을 지닌 위성망 설계 문제에 적합하다 [2]. 개체는 각 위성망의 설계되는 위성 파라미터들의 집합이며, 초기 개체는 표 1의 범위 내에서 N_{pop} 개만큼 랜덤하게 생성된다. 생성된 초기 개체는 교차 및 변이 과정을 거치며, 평



(a) Walker Delta (b) Walker Star (c) Hybrid

그림 1. 설계하는 군집 저궤도 위성 유형 및 위치 추정 시스템 모델

가 과정에서 교차와 변이를 거친 개체들의 적합도를 목적 함수를 기반으로 계산한다. 목적 함수는 각 위성망 유형에 따라 (1)~(3)과 같이 정의한다.

$$f_d = \frac{1}{P_d \times s_d}, \quad (1)$$

$$f_s = \frac{1}{P_s \times s_s}, \quad (2)$$

$$f_h = \frac{1}{P_d \times s_d + P_s \times s_s} \quad (3)$$

f_d, f_s, f_h 는 각각 Delta, Walker 그리고 Hybrid 유형의 목적 함수이다. 각 유형의 목적 함수는 위성망을 구성하는 위성 수의 역수이며, 위성 수가 적은 개체의 적합도를 증가시켜, 위성 수가 많은 개체보다 선택 과정에서 다음 세대로 유전될 확률을 높인다.

본 논문에서 유전 알고리즘을 통해 설계되는 위성망들은 삼변측량법으로 위치를 추정하기 때문에, 다음 세대로 유전되는 개체는 최소 4개의 LoS 위성을 상시 보장해야 한다. 따라서 개체가 다음 세대로 유전되기 전에, 시뮬레이션 전체 기간 $T = \{t | t = 1, T_s, \dots, T\}$ 동안 위성 $N = \{n | n = 1, 2, \dots, N\}$ 과 셀 $C = \{c | c = 1, 2, \dots, C\}$ 간 고도각 $\theta_n^c[t]$ 이 최소 고도각 θ_{min} 보다 높은지 판단한다. $\theta_n^c[t]$ 의 총합이 보장되어야 하는 LoS 위성 개

표 1. 설계 위성 파라미터 범위

N_{LoS}	Delta				Star		Hybrid					
	P_d	s_d	i_d		P_s	s_s	P_d	s_d	i_d	P_s	s_s	
4	9-15	10-20	34-55		10-15	15-25	3-15	20-25	34-54	2-10	20-25	
5	10-15	12-20	34-55		10-15	20-25	4-15	20-25	34-55	3-10	20-25	
6	10-15	14-20	34-55		10-15	23-27	4-15	20-25	34-55	4-10	20-25	

표 2. 군집 저궤도 위성망 설계 결과

N_{LoS}	Delta					Star			Hybrid				
	P_d	s_d	i_d	합		P_s	s_s	합	P_d	s_d	i_d	P_s	s_s
4	9	11	54	99		11	15	165	3	20	37	2	20
5	11	12	50	132		11	20	220	5	20	35	3	23
6	10	15	37	150		11	23	253	5	24	38	4	20

수가 N_{LoS} 이상이면 해당 개체는 위치 추정을 보장하여 다음 세대로 유전된다. 위 과정을 N_{gen} 번 반복하여 위성망의 설계 위성 파라미터를 도출한다.

III. 시뮬레이션

1. 시뮬레이션 환경

본 논문은 MATLAB을 기반으로 시뮬레이션을 구현한다. 시뮬레이션 기간 T 는 2시간, 샘플 타임 T_s 는 30초로 설정하고, 5개의 셀 C 를 한반도에 균일하게 배치하여 시뮬레이션을 진행한다. 최소 고도각 θ_{min} 은 10° , N_{pop} 은 100개로 설정하고, N_{gen} 은 20세대로 설정한다 [3]. 보장되어야 하는 LoS 위성 개수 N_{LoS} 은 4, 5, 6으로 설정하여 N_{LoS} 에 따른 위치 추정 성능을 분석한다. 설계된 위성망의 위치 추정 성능은 아래 수식으로 계산한다.

$$GDOP = \frac{1}{\sigma} \sqrt{\text{trace}(\sigma^2 (H^T H)^{-1})} = \sqrt{\text{trace}((H^T H)^{-1})}, \quad (4)$$

H 는 수신기에서 가시 위성 방향으로의 단위 벡터로 구성된 행렬이다. $\sigma^2 (H^T H)^{-1}$ 는 수신기의 실제 위치와 추정 위치 간 상대적인 오차의 분산을 나타내며, 대각 요소의 합으로 위치 추정 성능을 나타낼 수 있다. 따라서 GDOP 값의 감소는 위치 추정 성능의 개선을 의미한다.

2. 시뮬레이션 결과

유전 알고리즘을 통해 도출한 각 위성망의 위성 파라미터 결과는 표 2와 같다. N_{LoS} 증가에 따라 모든 위성망의 위성 수가 늘어나며, Walker Delta, Star, Hybrid 순으로 설계된 위성 수가 많다. 위성 수 증가율은 Hybrid가 100%로 가장 높고, Walker Delta는 약 67.7%, Star는 약 42.4% 증가하였다. Hybrid가 두 유형을 결합해 위성의 기하학적 배치를 다양화하기 때문에, N_{LoS} 가 증가할수록 위성 배치 다양성을 보장하기 위해 위성망을 구성하는 데 필요한 위성 수가 증가한다.

설계한 위성망의 GDOP 성능은 표 3과 같다. Walker Delta, Walker Star, Hybrid 유형의 평균 GDOP는 N_{LoS} 가 4에서 5로 증가할 때 각각 3.283, 1.569, 0.944 감소하고, 표준편차는 3.175, 2.325, 1.933 감소한다. N_{LoS} 가 5에서 6으로 증가할 때 평균 GDOP는 0.259, 0.345, 0.199 감소하고, 표준편차는 0.230, 0.306, 0.056 감소한다. N_{LoS} 가 증가할수록 LoS 위성 수가 증가하여, 위치 추정에 활용되는 위성 수가 늘어나기 때문에, 평균 GDOP와 표준편차가 감소하여 위치 추정 성능이 개선된다.

모든 위성망 중 위치 추정 성능이 가장 뛰어난 유형은 Hybrid 유형이다. Hybrid 유형은 모든 N_{LoS} 구간에서 가장 낮은 평균 GDOP와 표준편차를 보이며, N_{LoS} 증가에 따른 성능 저하율도 가장 작다. 또한 N_{LoS} 가 4에서 5로 증가할 때 위치 추정 성능 저하율보다 N_{LoS} 가 5에서 6으로 증

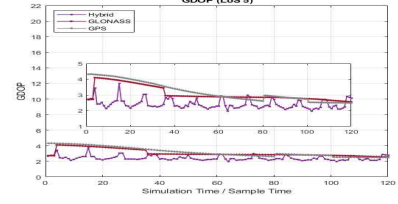


그림 2. 5개의 LoS 위성을 보장하는 Hybrid 유형과 GNSS의 GDOP

표 3. 설계한 군집 저궤도 위성망의 GDOP 평균 및 표준편차

N_{LoS}	4		5		6	
유형	평균	표준편차	평균	표준편차	평균	표준편차
Delta	6.088	3.747	2.805	0.572	2.546	0.342
Star	4.143	2.775	2.574	0.450	2.229	0.144
Hybrid	3.359	2.227	2.415	0.294	2.216	0.238

가할 때 위치 추정 성능 저하율이 매우 적다. 이는 Hybrid 유형의 N_{LoS} 가 증가함에 따라 위치 추정에 적용 가능한 위성 조합이 다양해지기 때문이다. 따라서 최소한의 위성 수로 효율적인 위치 추정 성능을 보장하는 군집 저궤도 위성망은 5개의 LoS 위성을 보장하는 Hybrid 위성망이다.

그림 2는 5개의 LoS를 보장하는 Hybrid 위성망과 4개의 LoS를 보장하는 GLONASS, GPS의 GDOP를 나타낸다. GLONASS 평균 GDOP는 3.365, 표준편차 0.457, GPS는 3.500과 0.549로, Hybrid 위성망의 위치 추정 성능이 더 우수함을 확인할 수 있다. 또한 Hybrid 위성망은 시뮬레이션 기간동안 안정적인 위치 추정 성능을 보인 반면, GNSS는 낮은 위성 위치 변화율로 인해 위치 추정 성능이 저하되는 구간이 존재한다. 설계한 Hybrid 저궤도 위성망이 GNSS의 단점을 보완함을 확인할 수 있다.

IV. 결론

본 논문에서는 유전 알고리즘을 활용해 최소한의 위성 수로 위치 추정 성능을 보장하는 군집 저궤도 위성망을 설계했다. Walker Delta, Walker Star, Hybrid 유형의 위성망을 각각 설계하고, 설계된 위성망의 위치 추정 성능을 GDOP로 평가했다. 분석 결과, N_{LoS} 가 증가할수록 모든 위성망의 GDOP 성능이 향상되었으며 N_{LoS} 가 5일 때 Hybrid 유형이 가장 효율적인 위성 수로 뛰어난 위치 추정 성능과 안정성을 보장하였다. 또한 N_{LoS} 가 5인 Hybrid 유형과 기존 GNSS의 위치 추정 성능을 비교한 결과, Hybrid 유형이 GNSS보다 개선된 위치 추정 성능을 제공하는 것을 확인했다.

ACKNOWLEDGMENT

본 연구는 2025년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 정보통신기획평가원의 지원을 받아 수행된 연구임 (No. RS-2022-II220704, 초고속 이동체 지원을 위한 3-D NET 핵심 기술 개발

참고 문헌

- [1] F. PROL et al., "Position, navigation, and timing (PNT) through low earth orbit (LEO) satellites: A Survey on Current Status, Challenges, and Opportunities," IEEE Access, vol. 10, pp. 83671-84002, Jul. 2022.
- [2] A. Konak, DW. Coit, AE. Smith, "Multi-objective optimization using genetic algorithms: A tutorial," Reliability engineering & system safety, vol. 91, pp. 992-1007, Sep. 2006.
- [3] 3GPP, "Solutions for NR to support non-terrestrial networks (NTN) (Release 16)," TR 38.821, ver. 16.2.0, Apr. 2023.