

우주물체의 시공간 추론을 위한 Three-filter Algorithm의 수행 성능 분석

지민우², 최승환^{12*}, 김현우², 유중현¹², 김덕수¹²스페이스맵 주식회사¹, 한양대학교 기계공학부²Performance Analysis of the Three-Filter Algorithm for
Spatiotemporal Reasoning of Space ObjectsMinwoo Ji², Shawn Seunghwan Choi^{1*}, Hyunwoo Kim²,Peter Joonghyun Ryu¹², Douglas Deok-Soo Kim¹²**Key Words** : Conjunction Assessment(충돌 위험 분석), Early Prediction(조기 예측), Spatiotemporal Problem(시공간 문제)

서 론

우주는 우주 물체로 가득 차 있고 앞으로도 더욱 늘어날 전망이다. 우주 공간의 효율적인 활용을 위해서는 궤도운동하는 우주물체들의 시공간 추론은 중요한 문제이다. 가장 기본적인 안전문제를 고려하면, 우주 물체의 증가는 우주 물체 간의 충돌 위험을 증가시킨다. 우주 물체는 수 km/s 이상의 속도로 움직이므로 충돌한다면 치명적인 손상을 입게 된다. 따라서 우주 물체 간의 충돌 위험을 예측하는 것은 더욱 중요해질 것이다. 본 연구에서는 기존에 충돌 위험 예측을 위해 널리 사용되는 Three-filter 알고리즘을 기반으로 계산의 가속을 위해 기하학적 해싱 기술인 Bucket hashing과 kd-tree를 적용하였다. 또한 추가적인 Screening filter인 Smart-sieve를 활용하여 충돌 위험의 효율적인 계산이 가능하도록 개선하였다. 본 논문은 여러 계산 가속화 방법을 통하여 충돌 예측 계산의 가속화 방법의 실험적 비교를 통해 메모리와 계산 시간을 최적화할 수 있는 방안을 제시한다.

본 론

Three-filter 알고리즘

Three-filter 알고리즘(3F)은 1984년 처음 발표된 방법으로 이 방법을 기반으로 많은 연구가 이루어졌다. 3F는 우주 물체 궤도의 기하학적 계산만을 이용한 Geometric filter인 Perigee-Apogee filter와 Orbit Path filter, 시간에 따른 계산이 포함된 Time filter로 이루어져 있다.

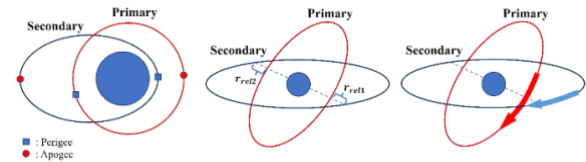


Fig. 1. Filters of Three filter Algorithm

Smart Sieve

Smart sieve는 Screening filter 기법인 Classical sieve를 개선한 방법이다. Classical sieve는 남은 시간 간격에 대해 두 우주 물체 사이의 최소 거리를 추정하고 위험 거리보다 크면 충돌 위험이 없다는 것을 보장하는 방법이다. 여기에 탈출 속도를 고려하여 개선한 알고리즘이 Smart sieve이다.

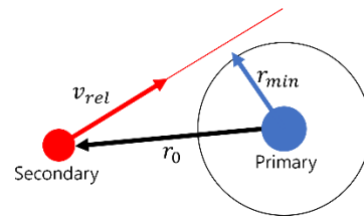


Fig. 2. Minimum distance sieve of Smart sieve

Bucket Hashing

Bucket hashing 은 공간을 일정한 크기의 셀로 나누어 물체를 해시 함수를 통해 셀에 매핑한다. 물체들이 주어지면 일정한 크기로 셀을 나누어 공간을 분할한다. 한 셀의 크기는 Filter threshold distance 로 정의한다. Query point 가 주어지면 Query point 가 속한 셀을 해시 함수를 사용해 탐색한다. Query point 를 중심으로 반지름이 Filter threshold distance 인 원을

그러보면 인접한 셀도 포함되는 것을 알 수 있다. 따라서 인접한 셀까지 탐색 영역에 포함한다.

kd-tree

kd-tree 는 Binary search tree 중 하나로 k-차원 공간의 점을 각 축을 순서대로 따라가며 데이터를 분할하여 저장한다. 2 차원의 경우 X, Y 를 순서대로 반복하며 사용해서 트리를 생성한다. 데이터를 축 X 에 대해 정렬하고 중앙값의 노드를 루트로 사용하며 남은 데이터들은 루트를 기준으로 루트보다 작은 집합, 루트보다 큰 집합으로 분할한다. 나뉜 집합을 Y 축에 대해 정렬한 후 중앙값을 선택하고 위의 과정을 반복한다. 더 이상 분할할 데이터가 없으면 kd-tree 의 생성을 종료한다. 3 차원의 경우라면 X, Y, Z 세 축을 순서대로 사용하여 트리를 생성하게 된다.

실험

알고리즘의 진행은 크게 Preprocessing 과 Query 부분으로 나뉜다. Preprocessing 작업은 전체 Input data 에 대해서 한 번만 수행한다.

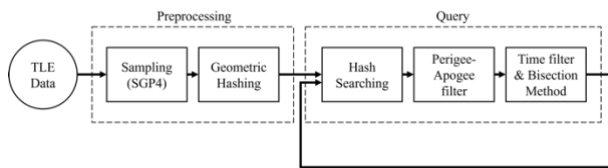


Fig. 3. Algorithm of the Experimental Process

실험 장비와 실험 조건은 다음과 같다: AMD Ryzen Threadripper PRO 3995WX (2.7GHz); 512GB RAM; Ubuntu 20.04. CPU 1 Thread 를 사용해 실험하였다.

Table 1. Conditions of Experimental Process

Input data	TLE from space-track (2023-07-30)
Propagator	Simplified General Perturbations4 (SGP4)
Time window	24 hours (2023-07-30T12:00:00-2023-07-31T12:00:00)UTC
Time step Δt (s)	5 ~ 60
#Objects	1,000 ~ 20,800 (LEO)
Filter threshold distance D_f (km)	110 ~ 1,210
Critical distance (km)	10

Primary 는 Kompsat-5 이며 Time Step 을 변경하며 실험한다.

Table 2. Preprocessing time

Time step (s)	Filter threshold (km)	Preprocessing			Memory (GB)
		Sampling (SGP4 Propagation)	kd-tree construct time	Total preprocessing time	
5	110	118 s	215 s	333 s	130
10	210	61 s	141 s	202 s	65
20	410	30 s	85 s	115 s	33
30	610	20 s	61 s	81 s	22
60	1,210	10 s	31 s	41 s	11

Table 3. Query time

Time step (s)	Perigee-Apogee filter	Time filter			Total query time
		kd-tree searching time	Smart sieve	Bisection method	
5	2 ms	34 ms	0.2 ms	6.8 ms	43 ms
10	2 ms	34 ms	0.2 ms	11.3 ms	47.5 ms
20	2 ms	36 ms	0.3 ms	23.7 ms	62 ms
30	2 ms	41 ms	0.6 ms	39.4 ms	83 ms
60	2 ms	63 ms	1.7 ms	93.3 ms	160 ms

Time Step 이 줄어들면 Query Time 은 줄어들지만 필요한 Memory 가 증가하는 것을 알 수 있다.

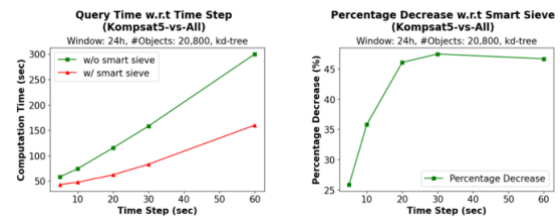


Fig. 4. Graph of computation time according to application of Smart sieve.

후 기

이 연구는 한국연구재단의 리더연구지원 (2017R1A3B1023591), IITP의 ITRC 연구지원(RS-2023-00259061), 중소벤처기업부의 창업성장기술개발(RS-2023-00283180) 및 미국공군(AFRL)의 연구지원(No.FA2386-22-1-4067)으로 수행되었습니다.

참고문헌

- 1) Hoots F. R., Crawford L. L., Roehrich R. L., "An analytic method to determine future close approaches between satellites" *Celestial mechanics*. 33(2) 1984, pp. 143-58
- 2) James W, Donald D, "Determination of Close Approaches for Constellations of Satellites" 1998
- 3) Alarcón Rodríguez J, Martínez Fadrique F, Klinkrad H, "Collision Risk Assessment with a Smart Sieve'Method." *ESA-NASA Space-Flight Safety Conference 2002*.
- 4) Saingyen P, Puttasuwan K, Channumsin S, Sreesawet S, Udomthanatheera P, Limna T, "Investigation of Screening Filter Methods to Enhance Computation Speed of Conjunction Assessment Analysis." *International Electrical Engineering Congress 2022*.