전체 LEO 위성의 충돌확률 분석을 위한 Time Filter의 계산 시간 단축

조상현[1*], 박상영[1], 임상호[2], 홍용준[2], 이원준[2], 윤상호[2], 서정직[2]

연세대학교[1], 국방과학연구소[2]

Reducing the Computation Time of a Time Filter for Collision Probability Analysis of All LEO Satellites

Sanghyeon Cho[1*], Sangyoung Park[1], Sanhgo Lim[2], Youngjun Hong[2], Wonjun Lee[2], Sang-Ho Yoon[2] Jeongjik Seo[2]

Key Words: Screening Filter(선별 필터), Time Filter(시간 필터), Conjunction Analysis(근접접근 분석), Collision Probability(충돌 확률), Low Earth Orbit(저궤도)

서 론

다수 위성의 근접접근 분석에서는 위성 쌍별 최근접 시각과 거리를 계산하므로, 분석 대상과 예측 기간이 증가할수록 계산 부담이 커진다. 이를 줄이기 위해 Hoots 등[(1)]은 두 위성이 동시에 상대 궤도면 근처에 위치해야 한다는 조건을 이용한 Time Filter를 제안하였다. Woodburn 등[(2)]은 예측된 노드(두 궤도면의 교선과 위성 궤도가 만나는 지점) 통과 시각을 주기적으로 검증하고 보정하여 신뢰성을 높였다. 그러나 대규모 위성에 적용하면 노드 통과 시각의 반복 탐색과 보정에 상당한 계산 시간이 소요된다. 특히 이러한 반복적 수치 탐색은 위성 쌍별 함수 평가가 필요하므로, 다수 위성 쌍을 동시에 처리하는 대규모 벡터화 및 GPU 병렬 연산에 제약이 있다.

본 연구에서는 계산 시간 단축을 위해 coarse/refine 궤도 전파와 선형보간 및 선형 상대운동을 이용한 Time Filter를 개발하였다. Coarse 전파로 얻은 상대 궤도면 거리의 부호 변화를 이용하여 노드 통과 시각을 추정하고, 두 위성의 시간창이 겹치는 구간에서 refine 전파를 수행한다. 또한 시간창 경계에서의 근접접근 사건 누락을 방지하고 최소거리 계산의 정확도를 높이기 위해, 거리 증감 추세에 따른 시간창 확장과 선형 상대운동 기반 최근접 시각 및 최소거리 보정을 적용하였다. 이를 벡터화 및 GPU 병렬 연산으로 구현하고, 넓은 탐색 범위에서 확보한 후보 event에 대해 SGP4와 수치 최적화를 이용하여 생성한 정밀 기준값과 비교함으로써 제안 방법의 검출 성능, 최근접 시각 및 최소거리 정확도와 계산 성능을 평가하였다.

본 론

Time Filter 알고리즘

본 연구의 시간 필터는 선행 필터를 통과한 비공면 위성 쌍을 대상으로 한다. 분석 대상 위성의 최소 공전주기의 1/18을 공통 시간 간격으로 설정하고, SGP4를 이용하여 coarse 전파를 수행하였다. 이 간격은 전체 분석 구간을 정밀하게 전파하지 않으면서 노드 통과 전후의 부호 변화를 탐색하기 위한 coarse sampling 간격으로 사용하였다. Secondary 위성의 순간 궤도면 단위 법선벡터, $\hat{h}_S$ 와 primary 위성의 signed plane distance, d_P는

$$\hat{h}_S = \frac{\vec{r}_S \times \vec{v}_S}{|\vec{r}_S \times \vec{v}_S|} \tag{1}$$

$$d_p = \vec{r}_P \cdot \hat{h}_S \tag{2}$$

로 계산하였다. 연속한 샘플 t_i , t_{i+1} 에서 d_i 와 d_{i+1} 의 부호가 변하는 경우, 식(3)의 선형보간식으로 노드 통과 시각을 추정하였다. 이 과정은 Fig. 1에 나타내었다.

$$t_{node} = t_i - \frac{d_i \times (t_{i+1} - t_i)}{d_{i+1} - d_i} \tag{3}$$

동일한 절차를 양 위성에 적용하고, 각 노드 통과 시각 전후 30초의 시간창을 생성한 후, 두 시간창이 겹치는 구간에 대해서만 1초 간격의 refine 전파를 수행하였다. 이를 통해 전체 7일 구간을 1초 간격으로 전파하지 않고, 실제 근접접근 가능성이 있는 제한된 시간 구간에 대해서만 촘촘한 전파를 수행하도록 하였다.

최소거리 샘플이 시간창 경계 부근에 있고 해당 방향으로 거리가 감소하는 경우 시간창을 확장하여 재탐색하였다. 이는 초기 시간창 외부에 실제 최근접 시각이 존재하는 경우 경계의 샘플값을 최소거리로 잘못 채택하는 것을 방지하기 위한 것이다. 이후 1초 간격 refine 결과의 최소거리 샘플에서 상대 위치와 상대 속도를 각각 $\vec{r}_{rel}$, $\vec{v}_{rel}$ 이라 하고, 일정한 상대 속도를 가정하여

$$\tau_* = -\frac{r_{rel} \cdot v_{rel}}{\|v_{rel}\|^2} \tag{4}$$

$$d_{min} = \|r_{rel} + v_{rel}\tau_*\| \tag{5}$$

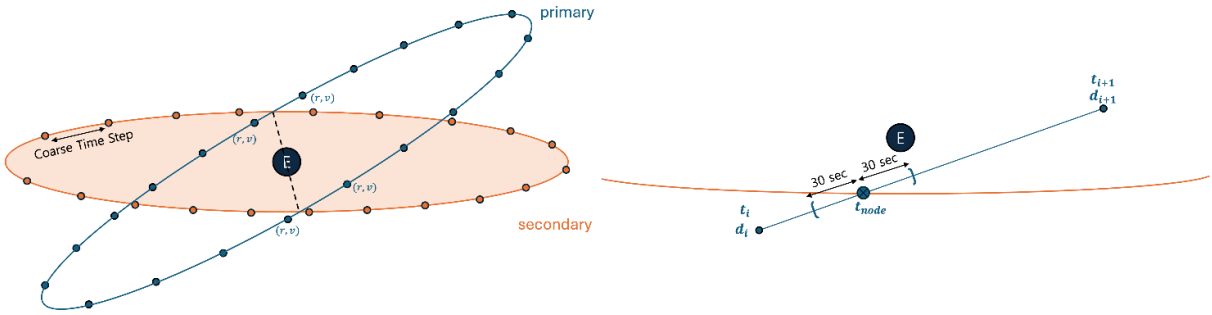


Fig. 1. Coarse orbit propagation and node-crossing time estimation: (left) state sampling and (right) linear interpolation with a time window.

로 샘플 사이의 최근접 시각(TCA)와 최소거리를 보정하였다. 제안 방법은 반복적인 root finding이나 연속시간 최적화 대신 일정한 시간격의 궤도 전파와 선형 연산으로 구성하여 다수 위성 쌍을 배열 단위로 처리할 수 있도록 하였다. 이를 기반으로 전체 계산을 벡터화하고 GPU 병렬 연산으로 구현하였다.

적용 결과 및 검증

제안한 방법을 2026년 5월 10일 TLE 데이터를 이용한 저궤도 위성의 7일간 근접접근 분석에 적용하였다. 동일한 사전 선별 절차를 적용한 비공면 위성 쌍을 대상으로 35km의 넓은 탐색 범위에서 근접접근 후보 event를 확보하고, 이 중 최소거리가 5-35km인 15,129,873개의 event에 대해 동일한 GP 데이터를 이용한 SGP4와 수치 최적화 함수 fminbnd로 최소거리를 정밀 재계산하였다. 5km보다 넓은 범위를 검증함으로써, 제안 방법에서 5km 밖으로 계산된 후보가 정밀 계산 후 판정 임계값 내부로 이동하는 경우도 함께 확인하였다. 이를 통해 제안 Time Filter의 최근접 시각 및 최소거리 정확도와 5km 판정 임계값 부근의 안정성을 평가하였다.

정밀 계산 결과, 최소거리 절대오차의 평균은 0.033m, 95백분위와 99백분위는 각각 0.059m와 0.838m였으며, 최대 오차는 11.245m였다. 10m를 초과한 사례는 4건 있었으나, 정밀 최소거리는 모두 14.94km 이상으로 5km 판정 임계값과 충분히 떨어져 있어 5km 근접접근 판정에는 영향을 주지 않았다. 한편, 제안 방법의 최소거리가 5km를 약간 초과하였으나 정밀 계산 후 5km 이하로 이동한 사례는 2건이었다. NORAD ID 57338-58501의 경우 최소거리가 5.001859km에서 4.998286km로, NORAD ID 57669-31686의 경우 5.001875km에서 4.998161km로 변화하였으며, 각각 3.573m와 3.714m의 차이를 보였다. 두 사례 모두 5km 임계값 부근에서 발생한 수 m 수준의 경계 사례였으며, 전체 검증 event의 약 0.0000132%에 해당하였다. 최근접 시각의 절대오차는 99백분위에서 0.000361초였으며, 일부 event에서는 최대 7.613초의 차이가 나타났다. 이러한 사례는 상대운동이 완만하여 TCA가 이동하더라도 최소거리 변화가 작은 경우로 나타났다. 계산은 NVIDIA RTX 5070 Ti GPU를 이용하여 수행하였으며, 제안 Time Filter의 7일간 비공면 위성쌍 분석에는 약 2.98시간이 소요되었다.

결 론

본 연구에서는 대규모 LEO 위성의 근접접근 분석에서 Time Filter의 계산 시간을 단축하기 위해 coarse/refine 궤도 전파, 노드 통과 시각의 선형보간, 선형 상대운동 기반 최근접 시각 및 최소거리 보정과 GPU 병렬 연산을 이용한 방법을 제안하였다. 제안 방법은 5-35km 범위의 15,129,873개 비공면 후보 event에 대해 SGP4와 fminbnd 기반 정밀 계산 결과와 비교하여 검증하였다. 최소거리 오차의 99백분위는 0.838m 이하였으며 최대 오차는 11.245m였다. 또한 5km 판정 임계값을 교차한 사례는 2건으로, 모두 수 m 수준의 경계 사례였다. 제안 Time Filter의 7일간 근접접근 분석 실행시간은 약 2.98시간으로 나타났으며, 이를 통해 제안 방법이 정밀 계산과 유사한 최소거리 정확도를 유지하면서 대규모 LEO 근접접근 분석의 계산 부담을 줄일 수 있음을 확인하였다.

후 기

본 연구는 대한민국 정부(산업통산자원부, 과학기술정보통신부 및 방위사업청)의 재원으로 민군협력진흥원에서 수행하는 민군기술협력사업의 연구비 지원으로 수행되었습니다. (과제번호 23-CM-RS-12)

참고문헌

1) Hoots, F. R., Crawford, L. L., and Roehrich, R. L., “An Analytic Method to Determine Future Close Approaches Between Satellites,” *Celestial Mechanics*, Vol. 33, 1984, pp. 143-158.

2) Woodburn, J., Coppola, V., and Stoner, F., “A Description of Filters for Minimizing the Time Required for Orbital Conjunction Computations,” *Proceedings of the 2009 AAS/AIAA Astrodynamics Specialist Conference*, Pittsburgh, PA, 2009, pp. 1157-1173.