

다중 우주쓰레기 제거 임무를 위한 은닉 벡터 차분 진화 알고리즘

최진행^{1*}, 박찬덕¹

연세대학교¹

Hidden-Vector Differential Evolution for Multiple Space Debris Removal Mission

Jin Haeng Choi^{1*}, Chandeok Park¹

Key Words : Differential Evolution (차분 진화), Space Debris Removal (우주쓰레기 제거), Trajectory Optimization (궤적 최적화)

서 론

NASA 보고서에 따르면 2014년 기준으로 약 6,300톤의 우주쓰레기가 존재하며, 이들 중 약 2,000톤 이상이 우리나라 위성이 많이 분포하는 고도 700~800km 사이에 존재한다⁽¹⁾. 이들로 인한 충돌 피해를 막기 위해 해외 우주 기관들에서는 우주쓰레기를 제거하기 위한 임무를 계획하고 있으며, 다양한 궤적 설계 방식을 통해 기술적 한계를 극복하고 있다⁽²⁾. 우주쓰레기 제거 임무를 설계하기 위해서는 제거 대상물의 선별과 방문 순서를 탐색하고, 근접운용이나 랑데뷰를 위한 우주비행체의 추력 크기와 비행시간들을 고려해야 한다. 기존 연구에서는 제거 대상물의 선별과 방문 순서를 미리 결정하고 우주비행체의 궤적을 설계하는 방식이 제시되어왔다^{(2)~(4)}. 이와 같은 방식은 쉽게 적용이 가능하지만, 다양한 구성이 가능한 임무 시나리오를 사전에 고정시키고, 변수들의 탐색 범위 또한 제한하기 때문에, 최적화 관점에서 비효율적일 수 있다.

본 연구에서는 다중 우주쓰레기 제거 임무를 위한 은닉 벡터 기반의 차분 진화 알고리즘을 제시한다. 효과적인 제거 대상의 탐색과 궤적 설계를 위해 행성간 탐사 임무 설계에서 사용되는 은닉 벡터 기법을 활용하여 다중 우주쓰레기 제거 임무를 설계한다⁽⁵⁾. 제거 대상물의 선별과 방문 순서 및 우주비행체의 궤적을 알고리즘 내부에서 동시에 탐색하고, 차분 진화 알고리즘에 적용하여 전역적인 탐색을 수행한다. 다중 우주쓰레기 제거 예제로서 경사각 60°~95°의 저궤도에 분포하는 실제 우주쓰레기들을 대상으로 임무를 설계한다. 최적의 제거 대상물을 선정하여 방문 순서를 결정하고 이를 구현하는 우주비행체의 궤적을 제시한다.

본 론

차분 진화알고리즘 (Differential Evolution; DE)은 무작위로 생성된 표본들을 변이(Mutation), 교배(Crossover), 채택(Selection)의 진화과정을 통해 최적해를 탐색한다. DE는 최적화 문제의 특성과 정보를 사전에 파악하지 않아도 되며, 통상 초기 추정치에 민감한 궤적 최적화 문제에서 뛰어난 성능을 보인다⁽⁵⁾.

차분 진화알고리즘의 표본 모집단은 하나의 해집합을 나타내는 개체로 구성되어 있으며, 개체는 설계 변수들을 나타내는 벡터들로 구성되어 있다. 일반적으로 설정된 벡터(설계 변수)만 탐색을 수행하지만, 제거 대상물의 선별과 방문 순서 및 궤적 생성을 동시에 탐색

하도록 문제를 정식화하면 선별된 제거 대상물의 개수에 따라 방문 궤적의 개수가 달라지고 이를 위한 설계 변수 또한 추가되거나 제거되어 차분 진화알고리즘을 실행할 수 없다.

이를 해결하기 위해 본 연구에서는 문제 정식화 과정에서 은닉 벡터 방법을 적용하였다. 은닉 벡터 방법은 Fig.1와 같이 태그를 적용하여 목적함수에 직접 계산되는 활성화 변수와 계산되지 않는 은닉 변수를 구분하며 최적해를 탐색한다. 은닉 변수를 적용하기 위해 설계 변수의 개수를 임무 시나리오에서 최대치로 발생할 수 있는 최대치로 설정한다. 이러한 설정에서 On/Off 태그를 통해 최적의 개체 크기와 알맞은 설계 변수들을 구분하여 탐색을 수행한다.



Fig. 1. Concept of Hidden Vector

Fig.1에서 Tag가 1로 표현되어 있는 활성화 벡터 (x_1, x_4, x_5)들은 목적함수 계산에 사용이 되는 반면, 0으로 표현된 은닉 벡터 (x_2, x_3)들은 목적함수에 영향을 미치지 않는다. 모든 벡터들은 동일하게 진화과정을 겪으면서 더 나은 최적해로 진화해간다. 전체 설계 변수는 이산화 변수와 실수 변수로 나눌 수 있으며 Table.1에 정리되어 있다.

Table 1. Design Variables of Trajectory Optimization for Multiple Space Debris Removal

이산화 변수	실수 변수
제거 대상물의 개수	출발 시점
제거 순서	비행시간
	추력 방향/크기

은닉 벡터 기반 차분 진화 알고리즘을 이용하여 다중 우주쓰레기 제거에 대한 최적 천이 궤적의 목적함수는 식(1)과 같이 속도변화량의 총합을 최소화하도록

정의하였다.

$$\min J(x) = \sum_{i=1}^N \Delta v_i \quad (1)$$

$$X = [t_0, t_1, \dots, t_N] \quad (2)$$

N 은 우주쓰레기 제거물의 개수, Δv_i 은 제거물에 도달하기 위한 속도변화량, t_0 는 초기 출발시점, t 는 제거물까지의 비행시간을 나타낸다. 우주비행체의 궤적은 2체 문제에 기반한 람버트(Lambert) 방법을 궤도 연결 근사법에 적용하여 설계하였으며, 다른 섭동력들은 무시하였다. 탐사 예제로서 경사각 $60^\circ \sim 95^\circ$ 의 저궤도에 위치한 우주쓰레기를 제거하는 최적 천이 궤적을 설계하였으며, Table. 2에 선별된 실제 우주쓰레기의 궤도 정보를 정리하였다. 실제 우주쓰레기를 3개의 집단으로 분류하고 각 집단에서 1개씩의 우주쓰레기를 제거하는 최적 궤적을 설계하였다.

Table. 3은 본 연구에서 개발한 은닉 벡터 알고리즘을 이용하여 선별된 우주쓰레기 및 제거 순서, 그리고 이를 구현하기 위한 비행시간 및 속도변화량들을 나타낸다. Fig. 2는 히든 벡터 차분 진화 알고리즘 이용하여 얻은 다중 우주쓰레기 제거를 위한 최적 천이 궤적을 보여준다.

Table 2. Properties of Space Debris

분류	NAME	경사각($^\circ$)	원지점(km)	근지점(km)
1	ENVISAT	98.5	767	766
1	SL-16R/1	71.0	850	841
1	SL-16R/2	71.0	1008	844
1	SL-16R/3	99.1	852	985
1	SL-16R/4	71.0	814	831
2	SL-16R/5	98.3	847	801
2	SL-16R/6	71.0	846	839
2	SL-16R/7	71.0	855	841
2	SL-16R/8	71.0	851	834
2	SL-16R/9	71.0	844	835
3	SL-16R/10	70.9	864	841
3	SL-16R/11	71.0	852	838
3	SL-16R/12	71.0	844	833
3	SL-16R/13	71.0	844	834
3	SL-16R/14	71.0	852	827

Table 3. Optimization Results: Hidden Vector DE Algorithm for Multiple Space Debris Removal Mission

그룹	NAME	T (hours)	Δv (km/s)
2	SL-16R/8	0.9324	0.336
1	SL-16R/3	3.1908	4.739
3	SL-16R/13	7.4628	5.271
총합		11.5861	10.336

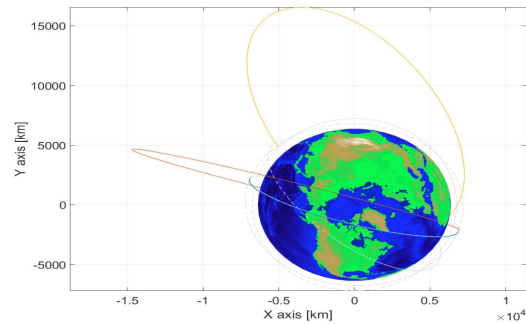


Fig. 2. Optimal Transfer Trajectories for Multiple Space Debris Removal Mission

결론

본 연구에서는 은닉 벡터 기반 차분 진화 알고리즘을 이용하여 다중 우주쓰레기 제거를 위한 최적 천이 궤적을 설계한다. 향후 이를 발전하여 성능을 개선하고, 유전/군집 알고리즘과의 비교 분석을 통하여 제시한 알고리즘의 효용성을 검증할 예정이다.

후기

본 논문은 2021년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초 연구사업임(No.2021R111A2048824)과 2022년 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단 스페이스챌린지사업(No. 2022M1A3B8073171)의 지원을 받아 수행된 연구입니다.

참고문헌

- 1) Olympio, J. T., & Frouvelle, N., "Space debris selection and optimal guidance for removal in the SSO with low-thrust propulsion," Acta Astronautica, 99, 2014, pp. 263-275.
- 2) Van der Pas, N., Lousada, J., Terhes, C., Bernabeu, M., and Bauer, W., "Target selection and comparison of mission design for space debris removal by DLR's advanced study group," Acta Astronautica, 102, 2014, pp. 241-248.
- 3) Cerf, M., "Multiple space debris collecting mission—debris selection and trajectory optimization," Journal of Optimization Theory and Applications, Vol. 156, No.3, 2013, pp.761-796.
- 4) Barea, A., Urrutxua, H., and Cadarso, L., "Large-scale object selection and trajectory planning for multi-target space debris removal missions," Acta Astronautica, 170, 2020, pp. 289-301.
- 5) Choi, J. H., Lee, G., and Park, C., "Design of Deep Space Transfer Trajectories using Differential Evolution Optimization Algorithm," Proceeding of the 2017 KSAS Fall Conference, 2017, pp. 370-271.