

국내 궤도상 서비스 GNC 서브시스템 설계 방안 연구

장윤정
한국항공우주연구원
yjjang@kari.re.kr

Research on Design Method of Domestic GNC Subsystem for On-Orbit Servicing

Yoon-Jeong Jang
Korea Aerospace Research Institute

요 약

궤도상 서비스(On-Orbit Servicing)이란, 우주 공간의 궤도에서 비행하는 인공 물체를 대상으로 상태를 점검 및 수리하거나 궤도 수정 또는 궤도 내 자세 유지, 연료 재급유, 부품 교체, 우주 쓰레기 제거 등을 제공하는 서비스이다. 이는 위성 수명 연장 및 재사용성 증대를 통한 인적, 시간적 비용 절감 결과를 가져온다. 이러한 임무를 수행하기 위해서는 대상이 되는 객체를 안전하게 고정하고 유지하는 캡처 및 도킹 과정이 필요하며 데이터는 실시간 모니터링으로 감지한다. 이때, GNC(유도, 항법, 제어) 시스템의 프레임워크는 항공우주 분야에서 우주 비행체가 임무를 수행할 때 필수적인 기능을 통합하고 관리하며 수행하는 구조적 틀을 제공한다. 센서, 알고리즘, 제어기, 항법 장치 등 연관된 하드웨어와 소프트웨어가 유기적으로 작동하도록 구성되어 있으며 비행체가 목표를 정확히 수행하도록 돕는 핵심적인 역할을 한다. 본 논문에서는 기존 궤도상 서비스의 해외 연구 현황을 파악하여 임무 사례를 통한 GNC 시스템 프레임워크의 분석을 토대로 추후 국내 궤도상 서비스 GNC 서브시스템 프레임워크 설계 시 적용 방안에는 어떤 것이 있을지에 대하여 연구한 내용을 서술하고자 한다.

1. 서론

최근 항공우주 산업에서는 경제적, 기술적 효율성을 높이기 위한 위성 수명 연장 및 궤도상 잔해인 우주 쓰레기 경감 연구가 활발히 진행되고 있는 중이다. 이는 궤도상 서비스(On-Orbit Servicing, OOS)라 불리는데, 우주 공간에서 인공위성을 포함한 다양한 우주 탐사선과 같은 우주 물체에 대해 각종 서비스를 제공하는 기술을 의미한다. 대표적으로는 우주 공간에서 우주 물체를 수리, 기능 업그레이드, 궤도 수정 및 자세 제어, 새로운 탑재물 장착 등의 기능을 수행한다. 임무를 수행하기 위해서는 대상이 되는 객체를 안전하게 고정하고 유지하는 캡처 및 도킹 과정이 필요한데, 이때 GNC(Guidance, Navigation, and Control) 과정을 통해 비행체를 조정하게 된다. 여기서 GNC 시스템의 프레임워크는 센서, 알고리즘, 제어기, 항법 장치 등 다양한 소프트웨어와 하드웨어가 유기적으로 작동하도록 구성되어 있으며 비행체가 목표를 정확히 수행하도록 하는 핵심 역할을 한다. GNC 프레임워크는 유도, 항법,

제어 각 분야에서 비행체가 임무를 수행할 시 비행체의 상태 및 환경을 감지하는 역할이 핵심 요소이다. 다양한 변화를 실시간으로 감지할 뿐 아니라 여러 센서로부터 얻은 데이터를 융합해 비행체의 정확한 상태를 추정 및 최적의 경로 설정 기능과 자세 및 궤도를 유지하는 것 등으로 구성된다. 궤도상 서비스에서 GNC 시스템의 구성 동작은 해당 임무 수행을 위해 대상체를 발견 후 반드시 캡처 및 도킹 과정을 거쳐 서비스를 제공하는 절차가 나뉜다는 점에서 기존과는 다르게 적용[1]된다.

본 논문에서는, GNC 시스템의 주요 구성 요소 및 프레임워크의 구성을 살펴보기에 앞서 각 GNC 구조가 가지는 특징점을 파악하고 해외의 성공적인 개발 사례를 통해 적용된 기술의 유형에 대하여 조사하고 상세히 분석하였다. 이를 토대로 국내 궤도상 서비스 GNC 시스템을 개발하게 됐을 시에 설계 단계에서의 뼈대는 어떤 방식으로 구축하는 것이 적합할지에 대하여 논의해볼 수 있는 내용, 나아가 앞으로의 방향성에 대해 연구한 결과를 서술하였다.

2. GNC 시스템의 설계 시 요구사항: 사례 분석

궤도상 서비스의 GNC 프레임워크 사례로는 주로 해당 시스템이 자율적으로 비행하며 궤도에서 서비스 대상 위성체에 접근, 캡처, 도킹하는 임무를 수행하는 기능 수행을 위한 기술이 포함된다.

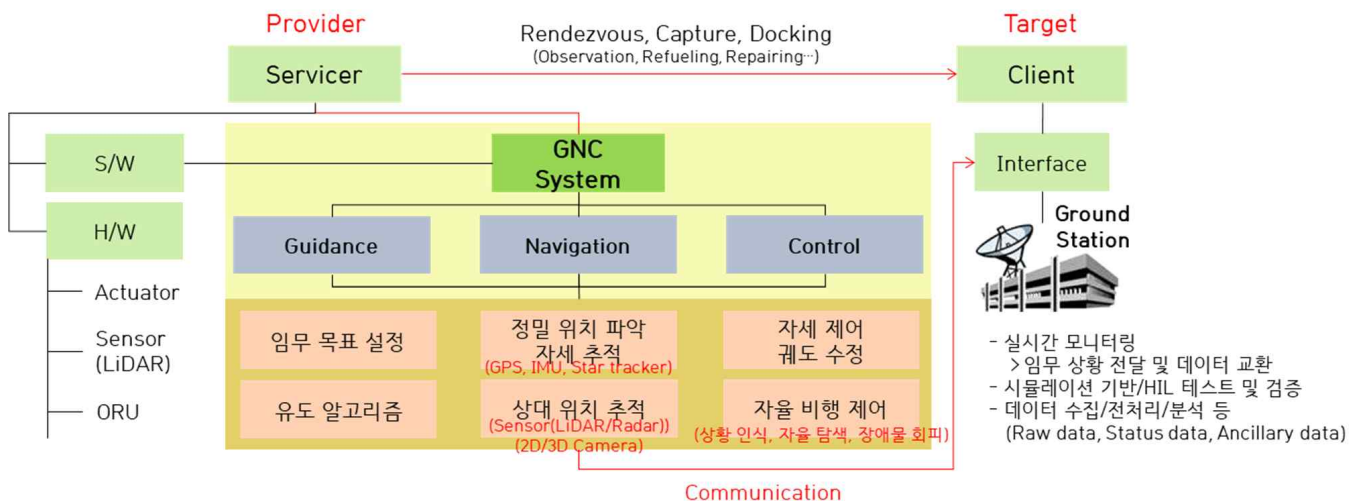
대표적인 사례로는 미국 NASA의 Restore-L 미션, DARPA의 RSGS(Robotic Servicing of Geosynchronous Satellites) 미션, Northrop Grumman사의 MEV(Mission Extension Vehicle) 미션 등이 있다. 본 대표 임무의 기술들은 모두 궤도에서 위성을 추적하고 세밀하게 접근하여 도킹하고 서비스하는 기능 시연 부분에 집중되어 있다. 또한, 감지 기술을 이용해 위성체의 위치 지형을 실시간으로 파악하고 위치 및 자세를 제어 및 미세 조정한다. 여기서 궤도상 서비스 GNC 시스템 중 하위 개념의 서브시스템 역할은 전반적인 임무 수행 관련 데이터를 수집 및 처리하고 검증하는 일련의 과정을 제공[2]한다. 단, 사례의 기술 문서에 포함된 GNC 서브시스템은 하드웨어를 중심으로 설명하였고 본 논문에서는 소프트웨어를 중심으로 설명하였다.

특히나 GNC 시스템의 주요 제어 모드로는 관성(Inertial) 모드와 상대(Relative) 모드가 있다. 관성 모드는 Servicer가 위치와 속도를 기준으로 움직이는 모드로써 GNSS의 GPS, 자이로스코프 등을 사용하여 현재 궤도를 유지하려는 성질을 지닌다. 반대로 상대 모드는 목표 위성체인 Client를 기준으로 Servicer가 움직이는 모드로써 근접 비행 및 도킹 시 사용된다. 상대 위치는 비전 기반 시스템, LiDAR 센서 등을 통해 추적한다. 산출되는 각 모드의 데이터

는 CSV, JSON, XML, HDF5와 같은 형식으로 위치, 속도, 자세, 시간, 가속도의 속성이 숫자 데이터로 저장된다. 상대 모드는 관성 모드와 같은 데이터 형식이 사용되지만 시간을 제외한 데이터에 상대적인 값이 부여된다는 특징이 있다.

아래의 그림 1은 궤도상 서비스 GNC 시스템의 전체적인 구성의 관계와 해당 프로세스에 대해 나타낸다. GNC 시스템의 각 역할로는 목표 위성체인 Client까지의 접근 경로 계획, 위치 파악 및 추적, 자율 비행, 자세 측정, 최적화 과정 등이 있다. 최종 임무 수행 후에는 지상국에서는 원거리 위성체와 통신하여 얻은 데이터를 기반으로 한 다양한 임무 데이터로 실시간 모니터링을 통해 임무 상황을 파악 및 전달하고 데이터를 해당 경로에 구축하게 된다. 데이터에는 처리되지 않은 미가공 데이터, 상태 데이터, 각종 관측 정보가 담긴 보조 데이터가 포함된다. 이는 모두 전처리, 분석, 검증하는 과정을 통해 궤도상 서비스 운용과 그 신호처리 과정에 문제가 없다고 판단할 수 있게 된다. 구조화된 데이터는 임무를 자율적으로 수행하고 처리할 때 유용하게 사용 가능하다.

GNC 시스템의 기능을 자율로 수행하는 부분에서는 자율 유도로 자율 경로 계획과 탐색, 자율 항법으로 자율 실시간 위치 추적, 자율 제어로 자율 자세 제어와 궤도 수정을 계획할 수도 있다. 다만, 다음과 같은 수행 능력이 필수로 작용할 것이다. 첫째로 시스템 자체 그리고 산출물에 대한 신뢰성 확보, 두 번째로 복잡한 환경에 대응하고 다양한 시나리오에 대비할 수 있는 유연성, 마지막으로 통신이 원활하지 않아도 자율적으로 작업을 마무리하는 것과 같다.



(그림 1) 궤도상 서비스 GNC 시스템: 전체 구성도

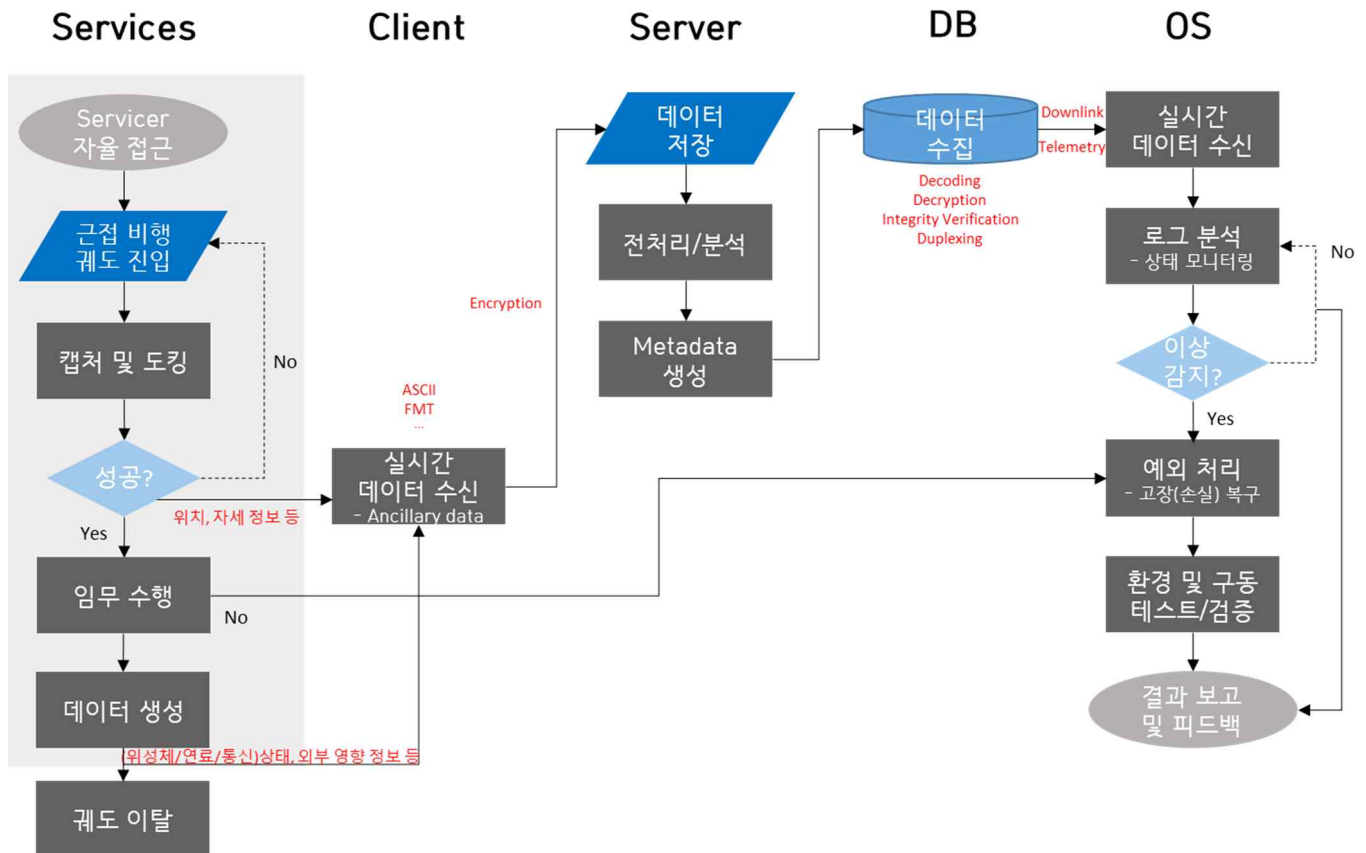
3. 사례 분석을 통한 국내 시스템 설계 적용 방안

국내 궤도상 서비스 개발에서 GNC 서브시스템의 설계를 위해서는 먼저 시스템 객체 간 관계를 명확히 하고 전체 흐름을 파악하는 것이 중요하다. 설계 시에는 시스템 산출물을 통해 위험 요소를 줄여 검증된 데이터로 대상의 성능을 최적화하고 상태를 파악하는 것이 기본이다. 궤도상 서비스 데이터로는 위성체 상태 데이터, 캡처 및 도킹 작업 관련 데이터, 임무 성능 데이터, 위성 수리 및 업그레이드 데이터, 환경 및 외부 영향에 관한 데이터 등이 있다.

그림 2는 궤도상 서비스 시스템의 하위 개념인 GNC 서브시스템의 전체 흐름도에 대한 내용이다. Servicer가 Client로 접근하여 임무를 수행하면 결과 데이터가 생성되고 예외적인 경우를 제외하고는 순서대로 데이터 생성, 송/수신, 저장, 처리, 분석, 필요에 따라 추가 테스트, 검증 과정을 거친다. 데이터는 보안성을 높이기 위해 반드시 암호/복호화 되어야 하며 유효화 및 무결성 검증과 높은 신뢰성 유지를 위해 이중화 작업도 필요하다. 이를 바탕으로 예외 처리나 손실된 데이터는 복구를 위한 과정에 빠른 속도로 적용 및 처리된다. 파일 구성 방식과 데이터 유형은 처음 설계하는 방식에 따라 달라질 수 있다.

보통 임무 당 하나의 텍스트 파일에 포맷 데이터, 라벨 데이터, 때에 따라서는 상태 정보를 카메라로 촬영해 수신한 경우라면 사용자가 원본 이미지 파일, 이미지 속성 정보를 포함하는 등의 각종 데이터를 지정하고 하나의 틀로 구조화하게 된다.

국내 궤도상 서비스의 독자적인 기술 개발이 중요하게 대두된 가운데 수집된 데이터를 어떻게 관리하고 활용할 것인지도 매우 중요하다. 해당 데이터로 준실시간 상태 점검 및 진단이 가능해져 성능 및 효율 개선과 수명 연장에 기여하기 때문이다. 진단 데이터에는 Servicer와 Client 위성체의 현 상태를 점검한 경과로 얻는 데이터로써 장비 상황, 전력 및 배터리 수준, 연료 잔량, 온도 및 진동 상태가 포함된다. 이 뿐만 아니라, 미래의 또 다른 우주 탐사선 서비스를 구성하는 데 있어 GNC 시스템 초기 설계 준비 단계에 도움이 되는 역할과 다양한 우주 환경 연구 등의 수행에 발판을 마련할 수 있다. 고장, 오작동, 데이터 손실 발생 시에도 예외 처리 과정에서 단계적으로 단위, 통합, 시스템 테스트 및 검증을 거치고 수신된 결과물을 다시 분석하는 과정에서 추후 발생하는 예외적인 사항에 대비, 최적의 리소스 활용을 위한 전략도 세울 수 있다.



(그림 2) 궤도상 서비스 GNC 서브시스템: Flow chart

4. 결론 및 향후 연구방안

국내 궤도상 서비스 기술은 아직 초기 단계이지만, 우주 산업의 발전과 더불어 향후 주요 연구 분야로 부각될 전망에 있다. 위성의 수명 연장, 우주 폐기물 처리와 같은 여러 용도로 활용되는 서비스이기 때문에 성공 사례를 통해 기초 기술을 확보하고 단계별로 적용하는 절차가 필요하다. 본 논문에서 다루는 GNC 서브시스템의 전체 구성도와 그 흐름을 기반으로 구조화하는 작업도 초기 기술 개발 단계에서 중점적인 역할로 작용할 수 있다.

추가로 더 연구해야 할 방향에 대해서는 목표물 접근처럼 기본 작업 수행을 위한 AI 기반의 자율 GNC 알고리즘 개발을 가장 먼저 예로 들 수 있다. 인간의 개입 없이도 작동이 가능하여 인적, 시간적 비용 절감 효과를 더 극대화시킬 수 있기 때문이다. 장애물 인식 및 회피 구동을 실시간으로 하는 자율 회피 알고리즘 개발도 이와 마찬가지로 할 것이다. 마지막 시뮬레이션 검증 환경은 디지털 트윈 기술을 활용하여 가상 환경을 구축하면 임무 수행 전 예상되는 모든 시나리오를 미리 테스트하고 최적화할 수 있어 큰 이점을 가져다준다. 초기 요구사항 수립 및 결정, 분석, 설계 및 구현 과정을 통한 전반적인 산출물 검토, 이벤트 해소 등의 작업을 거치면서 점차 신뢰성 높은 시스템으로 완성될 수 있을 것이다.

후 기

본 연구는 한국항공우주연구원 주요사업 (FR24M01) “궤도상 서비스 임무 및 운용 기술 개발” 과제의 일환으로 진행되었습니다.

참고문헌

- [1] <https://www.nasa.gov>, NASA, “Guidance, Navigation, and Control (GN&C)”, 2015.
- [2] <https://www.nasa.gov>, NASA, “GNC SubSystems”, 2021.