

미소중력 환경에서의 위성간 랑데뷰 구현을 위한 산업용 로봇의 어드미턴스 제어

우희진, 김준식, 최영진*

한양대학교 대학원 전자공학과

{whj03319, scott9569, cyj}@hanyang.ac.kr

Admittance Control Realization of Industrial Robot for Satellites Rendez-Vous Implementation in Microgravity Environment

Hee Jin Woo, Junsik Kim, and Youngjin Choi

Electrical and Electronic Engineering, Hanyang University

요약

위성이 우주 환경에서 자율적으로 주어진 임무를 수행하기 위해서는 실제 우주환경을 모사한 지상 환경에서 철저하게 사전 검증을 수행하는 단계가 필요하다. 본 논문에서는 우주 환경 조건인 미소중력 환경 구현을 위한 지상 시험장치로 사용되는 산업용 로봇의 힘 제어 방법을 설명한다. 먼저 지상 시험장치인 HILS (hardware-in-the-loop system)에 대해서 설명하고, HILS의 일부로 사용되는 산업용 로봇 제어에서 접촉 시 발생하는 불안정성을 해소하기 위해 힘 제어방식 중 어드미턴스 제어방법을 적용한다.

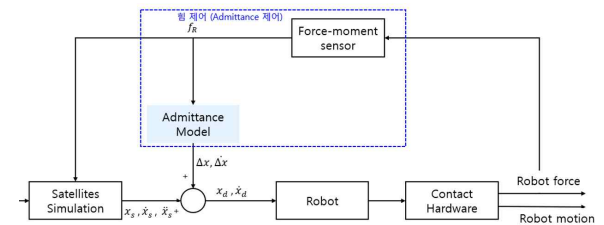
I. 서론

우주에서 위성이 주어진 임무를 수행하기에 앞서, 지상에서 미소중력 환경을 구현하여 위성의 움직임을 모사할 필요가 있다. 특히 위성간 랑데뷰가 일어나는 경우 위성간 힘의 상호작용이 발생하여 위성의 자세가 불안정해 질 수 있다. 이를 방지할 목적으로 지상에서 미소중력 환경을 구현해야 하는데, 이를 위해서 공압으로 미소중력 환경을 구현하는 방법, 산업용 로봇으로 미소중력환경을 구현하는 방법 등 다양한 방법들이 제안되고 있다. 본 논문에서는 미소중력 환경 구현을 위해 대형 산업용 로봇을 채택하고, 이를 이용하여 위성 지상 시험장치인 HILS(hardware-in-the-loop system)를 시뮬레이션으로 구현한다. 특히, 본 논문에서는 HILS에서 위성간 안정한 랑데뷰 모사를 위해 적용가능한 힘 제어 방법을 설명한다. 대부분 로봇의 힘 제어에 사용되는 방법은 임피던스 제어인데, 이의 구현을 위해서는 정밀한 토크 제어가 필요하다. 토크 제어는 토크 센서를 장착하고 모터 토크 생성을 위한 모터 전류 제어를 사용하여 가능하게 하는 방법이지만, 대부분의 산업용 로봇은 토크 제어 인터페이스를 제공하지 않는다. 토크 제어를 사용하지 않고 산업용 로봇 끝단에 랑데뷰와 같은 접촉이 생겼을 경우 미소중력 환경처럼 위성의 동작을 모사하는 것을 목표로 한다.

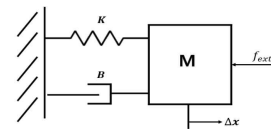
II. 본론

지상에서의 미소중력 환경 모사장치인 HILS(Hardware-in-the-loop system)는 수학 모델 기반 소프트웨어와 하드웨어 기반 테스트베드를 실시간으로 통합한 제어시스템을 의미한다.[1] 소프트웨어와 하드웨어를 결합한 프로세스는 두 가지 장점을 모두 활용할 수 있다. 소프트웨어에서는 접촉 시 발생할 임팩트 시퀀스 현상을 모사 하는 동역학 모델링 시뮬레이션을 구현한다. [Fig. 1]과 같이 동역학 모델링 시뮬레이션과 실제 하드웨어 상의 차이를 구현하기 위함이다. 토크 제어가 가능한 하드웨어 로봇이라면 미소중력 환경 움직임을 만들기는 어려움이 없다. 토크 제어가 가능한 모델은 동역학을 수학적으로 계산하여 중력 보상하면 접촉 시 미소중력 환경처럼 움직임을 구현하는 것이 가능하다.

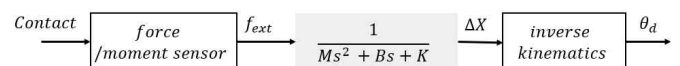
그러나 산업용 로봇은 토크 제어를 통한 제어를 사용할 수 없다. 산업용 로봇은 내부 전류 제어 루프에 접근하여 수정할 수 없고, 산업용 로봇 관절 토크 제어 기능이 없는 경우가 대부분이다. 로봇 관절 토크 제어 기능을 사용하지 않고 힘 제어가 가능하도록 하는 방법이 어드미턴스 제어이다.[2] 어드미턴스 제어를 사용하면 산업용 로봇 사이의 접촉 시 미소중력에서의 위성의 움직임을 구현할 수 있다.



[Fig. 1] HILS 시스템



[Fig. 2] 어드미턴스 제어



[Fig. 3] 어드미턴스 제어 블록 다이어그램

[Fig. 2]와 같이 어드미턴스 제어를 위한 로봇의 상대 운동 임피던스 모델을 가정할 수 있다. 산업용 로봇간 충돌시 발생하는 힘과 로봇 끝단의 변위 사이의

임피던스 모델은 다음식과 같다.

$$f_{ext} = M\ddot{\Delta x} + B\dot{\Delta x} + K\Delta x \quad (1)$$

여기서 $f_{ext} \in R^6$ 는 로봇 끝단에 장착된 힘/토크 센서에서 측정된 힘과 모멘트로 구성된 벡터이고, $B \in R^{6 \times 6}$ 는 안정성 증가를 위한 감쇠 행렬, $K \in R^{6 \times 6}$ 는 정밀도 향상을 위한 강성 행렬, $\Delta x \in R^6$ 는 초기 위치로부터 위치 변화 벡터이다. 이때 질량 행렬은 $M = 0^{6 \times 6}$ 으로 가정한다. 식 (1)을 속도변화량에 대해서 다시 기술하면 다음과 같은 식을 얻을 수 있다.

$$\Delta \dot{x}_d = B^{-1}(f_{ext} - K\Delta x) \quad (2)$$

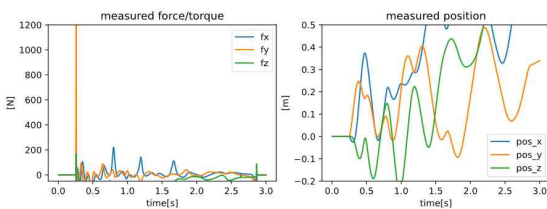
위의 식을 통해 현재 로봇 끝단의 위치변화량과 감쇠 행렬, 강성 행렬을 사용하여 산업용 로봇의 관절 속도변화량을 다음과 같이 산출할 수 있다.

$$\Delta \dot{\theta}_d = J^{-1}(\Delta \dot{x}_d) \quad (3)$$

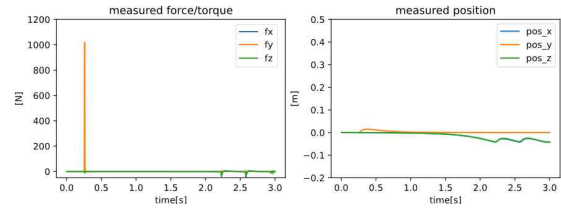
여기서 $J(\theta) \in R^{6 \times 6}$ 는 산업용 로봇 매니퓰레이터의 관절 속도와 로봇 끝단 속도 사이의 관계를 나타낸다. 관절 속도를 적분하면 관절 위치를 산출할 수 있으며, [Fig. 3]에서 블록다이어그램으로 정리하였다. 위와 같이 힘/모멘트 벡터로부터 관절 위치/속도를 얻어내는 제어 구조를 어드미턴스 제어라고 부르며, 이의 설계 인자로서 사용되는 감쇠 행렬 $B \in R^{6 \times 6}$ 와 강성 $K \in R^{6 \times 6}$ 는 사용자에 의해 설정한다.

산업용 로봇 시뮬레이터를 사용하여 외력이 인가될 때 로봇의 거동이 불안정해 질 수 있음을 먼저 보인다. [Fig. 4]는 로봇 끝단에서 y축으로 접촉하여 외력 1,000[N]이 발생했다고 가정하여 얻은 결과이다. 외력을 가한 순간 로봇은 초기 자세에서 벗어나 불안정한 결과를 보이고 있다. [Fig. 5]는 어드미턴스 제어를 인가하면서 $B = \text{diag}(330, 330, 330, 330, 330, 330)$, $K = \text{diag}(1000, 1000, 1000, 1000, 1000, 1000)$ 를 사용하여 얻은 결과이다. [Fig. 4]와 비교했을 때 외력을 가한 순간 스프링이 걸린 것과 같이 초기 위치에서 흔들리며 다시 초기 위치로 돌아오는 결과를 확인할 수 있다. [Fig. 6]는 $B = \text{diag}(500, 500, 500, 500, 500, 500)$

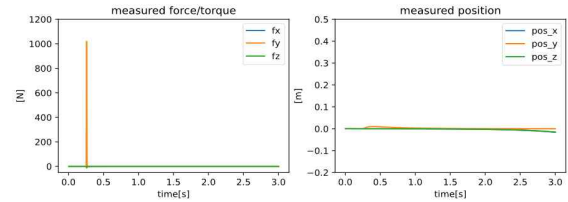
$K = \text{diag}(1000, 1000, 1000, 1000, 1000, 1000)$ 을 사용하여 얻은 결과이다. [Fig 5]와 비교했을 때보다 외력을 가했을 때의 움직임이 적고 단단한 스프링이 걸린 것과 같은 결과를 볼 수 있다. [Fig. 5]와 [Fig. 6]에서 제시된 결과와 같이 외력이 인가될 때, B, K 를 조절하여 산업용 로봇의 거동을 생성할 수 있다. 어드미턴스 제어는 접촉 작업 중에 산업용 로봇이 미소중력 환경에 있는 위성처럼 동작하기 위한 것이다. 따라서 설계 인자인 B, K 값을 잘 설정하면 지상에서도 미소중력 환경에서 위성간 접촉을 한 듯한 거동을 산업용 로봇을 사용하여 생성할 수 있다. 식 (3)에서 얻은 위치 값은 HILS 하드웨어 모사용 시뮬레이션 상의 로봇 끝단의 위치이다. 실제 하드웨어 물리 환경은 예상치 못한 외관과 노이즈로 인한 원하는 로봇 끝단의 거동을 얻지 못할 수 있다. 로봇 끝단에서 위치 궤적을 보다 정확하게 추정할 수 있다면 로봇 끝단 위치 피드백을 사용하여 더 나은 성능을 가질 수 있다.[3]



[Fig. 4] y축 방향 외력 1000N이 가해졌을 경우, 산업용 로봇의 거동



[Fig. 5] 어드미턴스 제어 ($B=330, K=1000$ 인 대각 행렬)를 사용할 경우, 로봇 끝단의 거동



[Fig. 6] 어드미턴스 제어 ($B=500, K=1000$ 인 대각 행렬)를 사용할 경우, 로봇 끝단의 거동

III. 결론

미소 중력 환경에서의 위성간 접촉에 기인한 거동을 모사하기 위해서 산업용 로봇을 사용하였다. 위성간 접촉 시 거동을 실제 구현하기 위해서는 HILS 시스템의 하드웨어인 산업용 로봇을 통한 제어가 필요하다. 제안된 어드미턴스 제어는 내부 전류 제어루프를 접근하지 않고도, 접촉이 발생 시 미소중력 상 위성처럼 움직임을 구현하는 것이 가능하다.

그러나 하드웨어 시뮬레이터에 힘/토크 센서와 하드웨어 시뮬레이터 모사용 시뮬레이션의 힘/토크 센서의 값은 다르다는 문제가 있다. 하드웨어 시뮬레이터 모사용 시뮬레이션에서 힘/토크 센서를 측정할 때는 bias가 측정되지 않는다. 그러나 HILS 시뮬레이터 하드웨어의 환경에서 힘/토크 센서는 bias가 발생한다. 실제로 HILS는 하드웨어 시뮬레이터 환경에서 측정된 힘/토크 센서 값을 사용해야 해야 한다. 이러한 힘/토크 센서에서 발생 될 bias는 추가적인 보상이 필요하다. 이는 로봇 자세에 따른 bias 분석 및 보상 알고리즘을 추가할 필요가 있다.

ACKNOWLEDGMENT

본 논문은 교육부 및 한국연구재단의 4단계 두뇌한국21사업(4단계 BK21사업)과 국방부의 우주 잔해물 포획을 위한 전개형 및 로봇팔형 탑재체 기술개발 사업의 지원을 받아 수행되었습니다(22CM0068).

참 고 문 헌

- [1] R. Krenn and B. Schaefer, "Limitations of hardware-in-the-loop simulations of space robotics dynamics using industrial robots", European Space Agency, ESA SP-440, Aug. 1999, pp. 681-686.
- [2] T. Boge and O. Ma, "Using advanced industrial robotics for spacecraft Rendezvous and Docking simulation," 2011 IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2011, pp. 1-4, doi: 10.1109/ICRA.2011.5980583.
- [3] R. Bell et al., "Hardware-in-the-loop tests of an autonomous gn & c system for on-orbit servicing", AIAA-LA Section/SSTC Responsive Space Conference 2003.