

큐브 위성 통신 및 Sun-Pointing Mode 제어 모델 연구

김규선¹, 김종현^{2*}

인하대학교¹, 고려대학교^{2*}

kingdom0545@inha.edu¹, joongheon@korea.ac.kr^{2*}

Communication & Sun-Pointing Mode Control Model For Cube Satellite

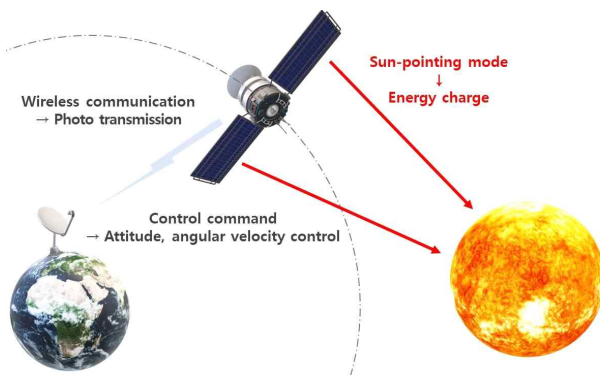
Gyu Seon Kim¹, Joongheon Kim^{2*}

Inha Univ¹, Korea Univ^{2*}

요약

위성은 “머리 위 감시자”로 불리며, 각국은 최근 안보를 위해 소리 없는 “위성 전쟁”을 하고 있다. 특히 큐브 위성은 보다 쉽게 목표 궤도에 안착시킬 수 있어 통신, 정찰, 관측 등 다양한 분야에서 연구되고 있다. 그러나 큐브 위성은 크기가 작아 많은 통신장비를 실을 수 없어 통신에 어려움이 있고, 추진기가 들어갈 공간이 마땅치 않아 제어 또한 쉽지 않다. 또한 큰 용량의 배터리가 들어가지 못 하기 때문에, 임무수행 시간에 제한이 있다. 이에, 본 논문에서는 이와 같은 큐브 위성의 치명적인 단점을 보완하기 위해 개선된 무선 통신을 통해 위성의 자세각 및 속도 제어를 원활히 하고, 태양을 바라보아 전력을 생산할 수 있는 sun-pointing mode 큐브 위성 모델을 제안한다. 2개의 조도센서가 태양의 위치를 파악하고, 무선 통신 시스템을 통해 위성이 촬영한 사진 및 위성 데이터를 지상 관제국으로 전송함과 동시에 지상 관제국에서 위성으로 제어명령을 송신하는 것을 목표로 한다. 아두이노 보드로 큐브 위성을 제작하고 실제 실험을 통해 성능을 평가하면서, 제안된 큐브 위성 모델의 통신/제어 우수성과 실용가능성을 제시한다.

I. 서론



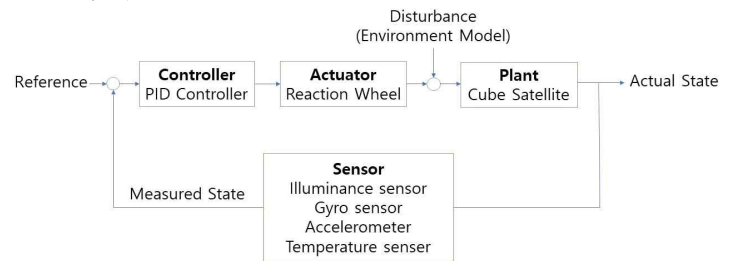
[그림 1] Overview of system

큐브 위성(Cubesat)은 10cm×10cm×10cm의 소형 위성으로, 2000년 이후로 약 750기 이상이 발사되며 계속해서 성장해 나가고 있다. 한 개의 발사체에 여러 개의 사출 형태 큐브 위성을 띄울 수 있기 때문에 통신용, 우주 탐사, 지구관측 등 다양한 목적으로 큐브 위성이 사용 되어지고 있다 [1]. 그러나 활용성이 좋은 큐브 위성은 작은 크기로 인해 통신 및 자세각 제어가 어렵다는 단점이 있다. 실제로 누리호 2차 발사 때 실린 4개의 큐브 위성 중 2대는 통신 두절, 2대는 제어 불안정으로 임무를 수행하지 못 하였다. 이처럼 큐브 위성에 있어, 통신과 제어는 굉장히 중요한 분야이다. 뿐만 아니라, 큐브 위성에는 큰 배터리가 들어가지 못 하기 때문에, 배터리 이외에 다른 방식의 전력공급이 필수적이다.

본 논문에서는 무선 통신 시스템을 통해 지상 관제소에서 위성의 자세각 및 각속도를 정확히 제어하고, 사진 및 인공위성 데이터를 송수신하면서 큐브 위성의 핵심인 “통신”과 “제어” 문제를 원만히 해결하였다. 또한 큐브 위성이 지상 관제소의 명령에 따라 임무수행시간 외에는 광원을 바라보아, 전력을 충전하는 sun-pointing mode를 구현하였다. 이로 인해 큐브 위성의 전력 생산성을 획기적으로 향상시키고, 위성 태양광 발전의 가능성을 확인하였다. [그림 1]은 전체적인 시스템 구성도로, 우주에서 위성의 통신/제어와 태양을 바라보아 전력을 충전하는 모습을 나타낸다 [2].

II. 본론

II. 1. 시스템 모델



[그림 2] 시스템의 block diagram

[그림 2]는 제어 시스템의 block diagram을 나타낸다. 큐브위성과 반작용휠에 대한 동역학적 모델링을 매트랩 시뮬링크에 입력하여 K_p , K_r , K_D 를 계산한다. 큐브 위성은 작은 크기로 인해 추진기가 들어갈 자리가 없고 큰 임펄스에 취약하기 때문에, actuator로는 반작용 휠을 사용하여 연료를 절약하였다. Plant는 큐브 위성이다. 자이로/가속도 센서에서 얻은 각속도 값과 가속도 값을 각각 시간에 대해 적분하고 기하학적 형상을 통해 각도로 변환하여 상보필터 처리를 통해 자세각을 정확히 얻을 수 있다. 온도 센서는 태양을 바라보는 면과 반대편의 극심한 온도차를 측정하며 현재 큐브 위성의 열적 안정성을 확인한다. 조도센서(CdS)는 빛의 양이 많아지면 저항 값이 줄어드는데, 센서값이 작아지는 방향으로 자세를 잡으며 광원을 탐색한다.

II. 2. 모델링

반작용 휠은 모터의 토크조절을 통해 작용/반작용의 원리로 위성의 자세를 제어한다. 토크(τ)의 정의는 식 (1)과 같이 모멘트 암(r)과 힘(F)의 외적으로 정의되며, 이는 식 (2)와 같이 t_1 , t_2 사이의 각운동량(L)의 변화량으로 표현된다.

$$\tau = r \times F = \frac{dL}{dt} = I\alpha = I \frac{d^2\theta}{dt^2} \quad (1)$$

$$\int_{t_1}^{t_2} \tau dt = L_{t_2} - L_{t_1} = 2(r \times mv_{t_2} - r \times mv_{t_1}) \quad (2)$$

모터의 전기적 모델링은 식(3)과 같이 키리호프의 법칙과 동일한데, 전압(V_a), 저항(R), i_a (전류), 인덕터(L_a), 역기전력전압(e_{emf})으로 표현된다.

기계적 모델링은 식(4)와 같이 모터 토크(τ), 마찰에 의한 토크($b\frac{d\theta_m}{dt}$), 모터의 관성 모멘트(J_m), 모터 회전각(θ_m)으로 표현할 수 있다. 여기서, $\tau = K_t i_a$, $e_{cmf} = K_e \frac{d\theta_m}{dt}$, $K_t = K_e$ 이기 때문에 반작용 휠 모터 시스템의 운동방정식은 다음과 같이 정리된다.

$$L_a \frac{di_a}{dt} + R_a i_a = V_a - K_e \frac{d\theta_m}{dt} \quad (3)$$

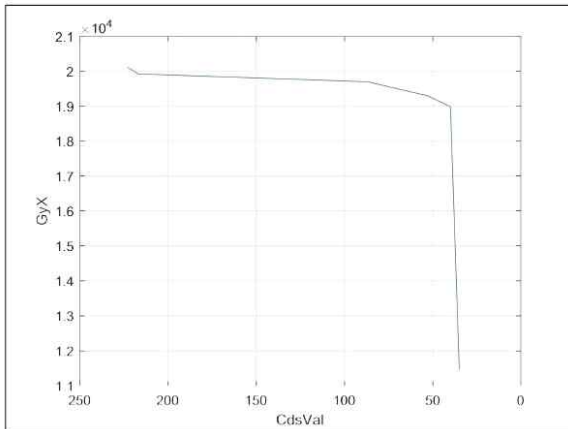
$$\sum M = I\alpha, \quad J_m \frac{d^2\theta_m}{dt^2} + b \frac{d\theta_m}{dt} = K_t i_a \quad (4)$$

물체에 가해지는 토크가 없기 때문에 위성의 각운동량은 보존되고, 이를 이용해 원하는 자세방향과 반대되는 회전방향으로 운동량 변화를 발생시킨다. 여기서 인공위성의 운동방정식은 반작용 휠과 크기가 같기 때문에 이는 식(5)와 같이 표현된다. I_{sat} 은 위성의 관성 모멘트를 의미한다.

$$J_m \frac{d^2\theta_m}{dt^2} + b \frac{d\theta_m}{dt} = I_{sat} \frac{d^2\theta_{sat}}{dt^2} + b \frac{d\theta_{sat}}{dt} \quad (5)$$

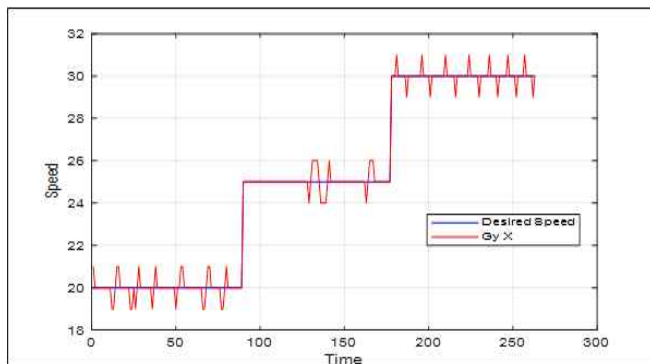
$$= K_t i_a = K_e i_a = \tau$$

II. 3. 성능평가



[그림 3] 조도센서 값에 따른 자이로 값

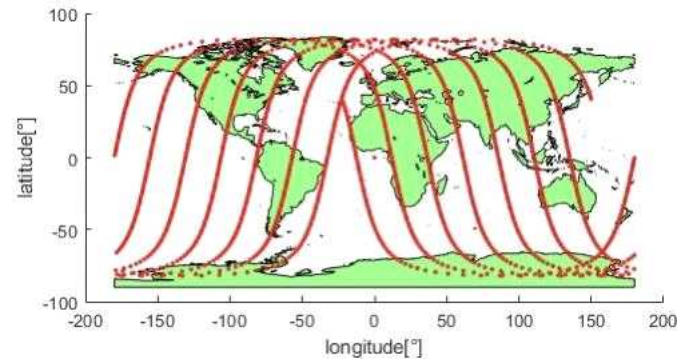
[그림 3]은 조도센서 값과 x축 자이로센서 값의 관계를 나타낸다. 큐브 위성의 태양광 패널이 태양을 향할수록 조도센서 값은 작아진다. 큐브 위성은 임무 수행시간 외에 태양 위치를 파악하고 멈추어야 하기 때문에, 자이로(각속도) 값은 광원에 가까워질수록, 즉 조도센서 값이 작아질수록 0에 가까이 급속도로 수렴한다. 조도센서 값이 50이하로 떨어지면 큐브 위성은 회전을 멈추고 태양을 바라보아 전력 충전을 하게 된다.



[그림 4] 목표 속도와 실제 속도

[그림 4]는 목표 각속도(Desired Speed)와 현재 위성의 실제 각속도(Gy X)의 관계로, 지상 관제국에서 제어한대로 위성이 정확히 회전함을 보여준다. 위성의 임무 수행을 위해 원하는 방향으로의 제어는 필수적이다. 지

상 관제국에서 각각 20rad/s, 25rad/s, 30rad/s로 회전하라는 제어 명령을 내린 후, 위성이 빠르게 해당 제어 명령에 맞춰 회전하는 것은 개선된 통신시스템과 강력한 제어기의 성능을 의미한다.



[그림 5] Ground track

[그림 5]는 큐브 위성의 ground track을 나타낸다. 큐브 위성이 목표 고도에서 궤도운동을 할 때, [그림 5]와 같이 빨간색 선을 따라 운용됨을 의미한다. 통신위성을 위한 저고도 위성(LEO, Low Earth Orbit) 구현을 목표로, 위성이 지구를 넓게 훑고 지나갈 수 있도록, 즉 위성의 활용도를 극대화 할 수 있도록 경사각/근점편각 등의 궤도요소들을 설정하였다. 큐브 위성이 밤인 지역을 지나갈 때는 태양을 바라보아 에너지를 충전하고, 낮인 지역을 지나갈 때는 통신 및 특정 지역 촬영 등의 다양한 임무를 수행할 수 있다. 본 논문에서 구현한 sun-pointing모드와 강력한 회전속도 제어를 통해 큐브 위성은 스스로 전력을 충전하고, 에너지를 효율적으로 관리하며, 위도 -90°부터 90°까지의 넓은 통신 및 탐색 영역을 가진다.

III. 결론

본 논문에서는 큐브 위성의 통신 및 자세각/속도 제어에서 더 나아가 전력 생산에 필수적인 sun-pointing모드를 구현하여 큐브 위성의 향후 활용 가능성에 대해 연구하였다. 강력한 제어기와 향상된 통신시스템을 통해 위성이 지상 관제국의 제어명령에 따라 빠르고 정확하게 움직이는 것을 실험을 통해 확인하였다.

우주발사체 및 인공위성은 국가의 안보에 직접적인 영향을 끼쳐, 기술 선진국들의 기술이전이 매우 제한되는 분야이다. 본 논문은 독자적인 기술 개발이 필수적인 방위산업에 대한 연구로, 이와 같은 연구가 국내에 활발히 진행되어야 한다는 시사점을 제시함과 동시에 큐브 위성 제어/통신 산업의 발전 가능성을 보여준다.

ACKNOWLEDGMENT

이 논문은 2022년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 정보통신기획평가원의 지원을 받아 수행된 연구임 (No.2022-0-00907, (2세부) AI Bots 협업 플랫폼 및 자기조직 인공지능 기술개발). 본 논문의 교신저자는 김중현임.

참 고 문 헌

- [1] Han, S. H. & Choi, Y. J & Cho, D. H. & Choi, W. S. & Gong, H. C. & Kim, H. D. & Choi, G. H. Analysis of Cubesat Development Status in Korea. Journal of the Korean Society for Aeronautical & Space Sciences Vol45, 975-988 (2017)
- [2] N. M. N. Khamsah, A. Z. Ribah, W. Abdurrohman, Hidayah and S. Utama, "Star Sensor Availability of Equatorial Satellite based on LAPAN-A2 Satellite Observation," 2021 IEEE International Conference on Aerospace Electronics and Remote Sensing Technology (ICARES), Bali, Indonesia, 2021, pp. 1-6