

인공 위성 구동기 모듈의 고장 검출

위성 구동기 고장을 검출하는 문제를 살펴보기 위하여, 최근에 발표된 논문을 분석하였다. 구동기에 발생하는 고장은 그 영향이, 위성의 동역학을 거쳐서 센서의 출력으로 나타나기 때문에, 고장 검출은 기본적으로 상태추정이 수반되어야 한다. 다양한 상태추정기법이 적용될 수 있는데, 가장 많이 사용되는 기법은 Kalman 필터 및 유사 필터들이다. 위성의 고장에 적시에 대응한다면 피해를 최소화할 수 있기 때문에, 자율성 높은 탑재형(on-board)의 고장 진단 및 대응 시스템이 주요 연구목표가 된다.

■ 진재현
(순천대학교)

I. 서론

인공위성은 장시간 자율적으로 동작해야 하므로, 전체 시스템은 높은 신뢰도가 요구된다. 신뢰도를 높이기 위하여, 신뢰성 높은 부품의 선정, 모듈의 중복, 고장 진단 및 대응 등을 필요로 한다. 간혹 발생하는 위성의 기능 고장은 장기간의 개발 노력과 비용의 손실을 초래할 수 있다.

그림 1은 미국의 지구정지궤도 위성의 고장율(failure rate)에 대한 자료이다. 이 자료에 의하면 6% 정도의 고장율을 기록한다(www.applicationstrategy.com 자료).

Lee 등은 고장의 현상과 원인에 대해 좀 더 자세한 해석결과를 제시하였다[1]. 88건의 위성 사고에 대해서, 다음과 같은 부위별 고장을 식별하였다.

제어의 관점에서, ACS (attitude control system)에 대한 고장은 흥미로운 과제이며, 많은 연구결과가 발표되었다. 여기에서는 고장검출과 관련하여 그 동안의 발표된 연구결과를 살펴보도록 한다.

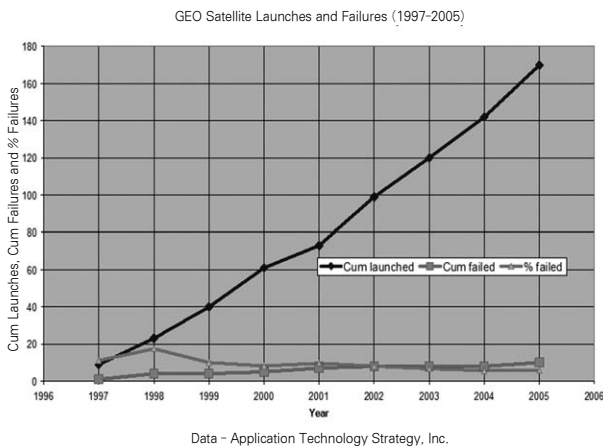


그림 1. 정지궤도 위성의 발사회수와 고장율.

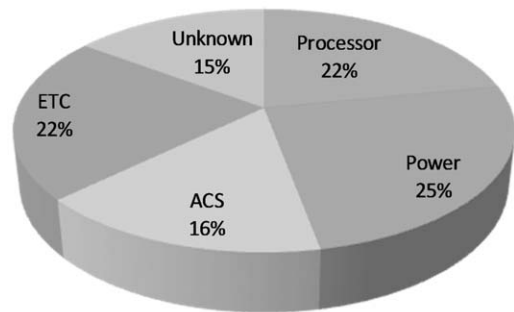


그림 2. 정지궤도 위성의 고장 요인.

II. 고장검출

위성 ACS의 구성요소로, 구동기에는 반작용 휠, CMG, 마그네틱 토커, 추력기 등이 있으며, 센서로는 자이로와 별센서 등이 있다. 일반적으로, 앞서 언급한 것처럼 여유 모듈을 장착하여 고장에 대응하게 된다. 또한, 텔레메트리 데이터를 이용해서 지상에서 고장을 분석하고 이에 대응하는 로직을 구성하는 것보다는, 고장 검출 및 대응의 방법을 탑재하여(on-board) 자율적으로 판단하여 대응하는 방법을 목표로 한다.

고장에 대응하기 위해서는, 먼저 고장의 발생 유무를 판단하여야 한다. 이런 것과 관련된 주제로는, 고장 검출(fault detection), 고장 식별(fault identification), 고장 진단(fault diagnosis) 등이 있다.

이를 위해서, 위성의 움직임에 대한 정보를 필요로 하는데, 위성의 자세, 각속도, 구동기의 상태(휠 각속도, 짐벌 각도 등)에 관한 것들이 사용된다.

고장 검출은, 기준이 되는 출력($\bar{y}(t)$)과 실제 출력($y(t)$)의 차이(잔차, residual)를 이용한다.

$$r(t) = \bar{y}(t) - y(t) \quad (1)$$

이 잔차의 크기가 일정한 값(threshold) 이상이 되면, 고장이 발생한 것으로 간주한다.

센서의 고장은, 중복된 센서의 출력을 비교하여 검출할 수 있다. 즉, 같은 축으로 이중화한 자이로 센서의 경우, 두 출력이 서로 비슷해야 한다. 만약 출력의 차이가 크면, 둘 중 하나가 고장이 난 것으로 판단한다. 그러나 어떤 것이 고장인지는 알 수 없다. 그렇다고 출력의 평균을 사용할 수는 없을 것이다. 삼중화한 경우에는 voting 방식으로 고장 난 것을 찾아낼 수 있다. 이 경우에, 서로 비슷한 두 출력이 기준출력이 된다.

구동기는 위성의 동적 거동에 영향을 주고, 다시 센서 출력에 영향을 준다. 그러므로 센서 출력과 위성의 동적 거동에 대한 정보를 결합하여 구동기의 고장 여부를 판단한다. 주로 위성의 동역학 방정식을 이용한다.

$$\begin{aligned} \dot{x} &= Ax + B(u + f) \\ y &= Cx \end{aligned} \quad (2)$$

여기서, u 는 정상적인 입력이며, f 는 고장을 의미한다. 구동기의 고장은 외란과 같이 시스템의 동특성에 영향을 미치지만, 임

의로 조종할 수 없으며, 언제 발생하는지도 모른다. 고장 f 의 유무에 따라서 출력 y 가 다르게 나타날 것이다. 기준 출력은 $f=0$ 일 때의 출력이다. 이는 실제로 측정할 수 없으며, 계산상으로 구해진다.

계산상으로 기준 출력을 구하는 것이, 구동기 고장 검출의 핵심 주제가 된다. 보통은 관측기(observer) 혹은 추정기(estimator) 기법을 많이 이용한다. 기존의 다른 분야에서 연구한 추정기법을 모두 이용할 수 있다.

Grenaille [2]은 추력기 고장을 검출하는데 $H\infty$ 추정기를 적용하였다. $H\infty$ 추정기는, 기존의 Kalman 필터는, 프로세스 잡음과 측정 잡음이 Gaussian이라는 가정하에서, 최적의 성능을 제공한다. 그러나 이러한 가정이 성립되지 않으면, 최적의 추정이 아닐 수 있다. 위성의 동역학을 비선형으로 모델링 하거나, 작용하는 외란 등이 Gaussian이 아닌 다른 분포를 갖는다고 가정하는 경우에는, 다른 추정 기법을 필요로 한다. 이러한 관점에서 $H\infty$ 추정기를 적용하였다.

Khorasani 연구팀에서는 다양한 추정기법을 이용하여 위성의 구동기 고장 검출 문제를 다루었다[3-6, 8-12, 17]. 문헌 [3]에서는 fault-tree analysis를 이용하여, 다양한 고장모드에 대한 데이터베이스를 확보하여, 고장의 식별 및 분류(identifying and classifying)이 가능한 방법을 제안하였다.

문헌 [4-6, 12]에서는 다중 필터를 이용한 IMM 추정기법을 제시하였다. 다양한 조건의 고장(각 구동기의 고장 상태 혹은 둘 이상의 고장 등)을 모델링 하여 검출하는데 효과적이지만, 그만큼 많은 모델을 필요로 하기 때문에 메모리의 한계를 고려하여야 한다.

일반적으로, 3축 안정화 방식의 위성은 기준 좌표에 대한 자세 각도와 각속도가 작은 범위에서 동작한다고 가정할 때, 선형시스템으로 모델링 하게 된다. 그러나 빠른 각속도로 회전하는 위성은 비선형성을 포함하게 된다. 다음은 위성의 비선형 동역학 방정식 예시이다.

$$\dot{\omega} = J^{-1}\omega \times J\omega + Bu \quad (3)$$

비선형 시스템에 대한 상태추정은 확장형 Kalman 필터(Extended Kalman Filter)를 적용하는 것이 일반적이지만, 더 좋은 성능을 위해서 unscented Kalman 필터(UKF)나 particle filter (PF) 등을 사용하기도 한다. 문헌 [6,7,16]에서는 unscented Kalman 필터(UKF)를 적용하였다. UKF는 비선형 시스템에 대한 추정기법이 EKF의 단점을 보완하는 것으로 알려져 있다. 일반적으로

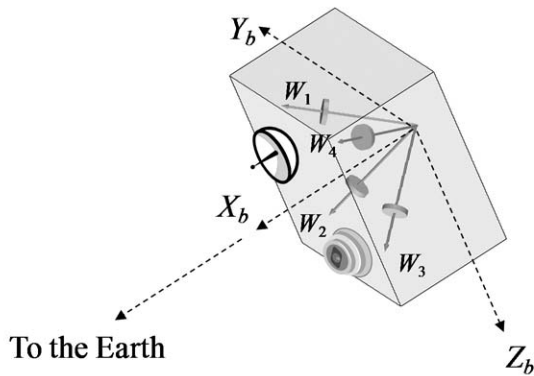


그림 3. 여유 구동기를 장착한 위성의 개념도.

EKF, UKF, PF(particle filter)를 비교할 때, 성능에서는 PF, UKF, EKF의 순으로 우수하며, 계산량에서는 EKF, UKF, PF 순으로 우수하다고 알려져 있다.

Sliding mode 제어이론에서 나온 sliding mode observer는 matching 조건을 만족하는 구조적인 외란이 있더라도, 시스템의 상태를 추정할 수 있다. 문헌 [14,15,20]에서는 이러한 sliding mode observer를 적용하여 구동기 고장 검출에 적용하였다. Sliding mode 이론에서 중요한 것은 switching 항의 크기인데, 이 크기는 일반적으로 소거하고자 하는 외란의 항보다 커야 한다. 그러나 이 항을 크게 하면, 채터링 등의 문제로 추정성능이 저하하게 된다. 문헌 [14]에서는 switching 항을 고장의 크기에 따라 적응적으로 변화시키는 방법을 제안하였다. Sliding mode 관측기는 일반적으로, 추정 오차의 엄밀한 확률적 특성(최소성 등)보다는 이론적인 오차의 수렴성에 더 많은 관심을 둔다.

위성의 구동기는 여분의 모듈을 포함하게 된다. 배치하는 방식 혹은 형상은 위성의 설계조건에 따라 다양하다. 이런 경우에, 특정 구동기의 입력을 다른 것들의 조합으로 동일하게 만들어 낼 수 있다. 역으로, 특정 구동기가 고장인지 다른 것들이 모두 고장인지를 판별해야 한다. 문헌 [10]에서는 여유 구동기가 있는 위성에 대해서, 구동기의 고장 검출문제를 다루고 있다. 한 개의 특정 추정기로는 판별이 불가능하며, 다중필터를 사용하고, 각 구동기의 고장이 나타나는 필터의 조합으로 판단하게 된다.

III. 결론

최근에 발표된 논문을 위주로, 위성의 구동기 고장 검출기법에 대하여 알아보았다. 연구자에 따라 다양한 방법을 제안하고

있으며, 기본적으로 상태 추정기법을 바탕으로 한다. 그러나 이러한 방법들이 모두 적용되고 있는 것은 아니다.

고장의 모드를 좀 더 자세히 분석하고, 이를 고장 검출 및 대응 방안에 활용할 필요가 있다. 그러나 실제 위성에 발생하는 고장의 원인을 분석하는 것이 쉬운 일이 아니다. 여러 상황에 대한 시나리오를 가정하고, 시뮬레이션을 통해서 검출 및 대응 가능성을 검증하는 것이 최선이라고 판단된다.

참고문헌

- [1] J. Lee, H. Choi, K. Cho, and I. Cho, "Analysis on the anomalies of geosynchronous satellites," *KSAS 2009 Spring Conference Proceedings*, pp.779-782, 2009.
- [2] S. Grenaille, D. Henry, A. Zolghadri, "Fault diagnosis in satellites using H^∞ estimators," *2004 IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics*, pp.5195-5200, 2004.
- [3] A. Barua, P. Sinha, K. Khorasani, S. Tafazoli, "A novel fault-tree approach for identifying potential causes of satellite reaction wheel failure," *Proc. of the 2005 IEEE Conference on Control Applications*, Toronto, Canada, Aug. 2005.
- [4] N. Tudoroiu and K. Khorasani, "Fault detection and diagnosis for satellite's attitude control system (ACS) using an interactive multiple model (IMM) approach," *Proc. of the 2005 IEEE Conference on Control Applications*, Toronto, Canada, Aug. 2005.
- [5] N. Tudoroiu and K. Khorasani, "Fault detection and diagnosis for reaction wheels of satellite's attitude control system using a bank of Kalman filters," *International Symposium on Signals, Circuits and Systems*, 2005.
- [6] N. Tudoroiu, E. Sobhani-Tehrani, and K. Khorasani, "Interactive bank of unscented Kalman filters for fault detection and isolation in reaction wheel actuators of satellite attitude control system," *32nd Annual Conference on IEEE Industrial Electronics*, 2006.
- [7] K. Xiong, C. Chan, H. Zhang, "Detection of satellite attitude sensor faults using the UKF," *IEEE Transactions on Aerospace and Electronics Systems*, vol.43, no. 2, pp.480-491, 2007.
- [8] N. Meskin and K. Khorasani, "Fault detection and isolation in a redundant reaction wheels configuration of a satellite," *IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics*, pp. 3153-3158, 2007.
- [9] H. Talebi and K. Khorasani, "A robust fault detection and isolation scheme with application to magnetorquer type actuators for

- satellites," *IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics*, pp.3165-3170, 2007.
- [10] T. Jiang and K. Khorasani, "A fault detection, isolation and reconstruction strategy for a satellite's attitude control subsystem with redundant reaction wheels," *IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics*, pp.3146-3152, 2007.
- [11] H. Talebi, R. Patel, and K. Khorasani, "Fault detection and isolation for uncertain nonlinear systems with application to a satellite reaction wheel actuator," *IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics*, pp.3140-3146, 2007.
- [12] N. Tudoroiu and K. Khorasani, "Satellite fault diagnosis using a bank of interacting Kalman filters," *IEEE Transactions on Aerospace and Electronics Systems*, vol.43, no. 4, pp.1334-1350, 2007.
- [13] J. Wang, B. Jiang and P. Shi, "Adaptive observer based fault diagnosis for satellite attitude control systems," *International Journal of Innovative Computing, Information and Control*, vol.4, no.8, pp.1921-1929, 2008.
- [14] Q. Wu and M. Saif, "Model-based robust fault diagnosis for satellite control systems using learning and sliding mode approaches," *Journal of Computers*, vol.4, no.10, pp.1022-1032, 2009.
- [15] L. Wu, Y. Zhang, and H. Li, "Research on fault detection for satellite attitude control systems based on sliding mode observers," *Proc. of the 2009 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation*, Changchun, China, Aug. 2009.
- [16] J. Bae and Y. Kim, "Attitude estimation for satellite fault tolerant system using federated unscented Kalman filter," *International Journal of Aeronautical and Space Science*, vol.11, no.2, pp.80-86, 2010.
- [17] N. Tudoroiu, E. Sobhani-Tehrani, K. Khorasani, T. Letia, R. Tudoroiu, "Real-time embedded fault detection estimators in a satellite's reaction wheels," *Proc. of the International Multiconference on Computer Science and Information Technology*, pp.759-766, 2010.
- [18] T. Mercker and M. Akella, "Rigid-body attitude tracking with vector measurements and unknown gyro bias," *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, vol.34, no.5, pp.1474-1484, 2011.
- [19] W. Liu, C. Liu, and N. Wang, "Fault detection for satellite attitude control system with computation constraint," The 18th IFAC World Congress, Milano (Italy), Aug.- Sep. 2011.
- [20] I. Nagesh and C. Edwards, "A sliding mode observer based FDI scheme for a nonlinear satellite systems," *2011 IEEE International Conference on Control Applications, Part of 2011 IEEE Multi-Conference on Systems and Control*, Denver, CO, USA. Sep. 2011.