

미끄럼방식관측기를 리용한 위성수감부고장검출 및 분리방법

윤금일, 박은순

경애하는 최고령도자 김정은동지께서는 다음과 같이 말씀하시였다.

《우리는 우주과학기술을 계속 발전시키고 우주개발사업을 더욱 본격적으로 벌려나가야 합니다.》

위성체계에서 나타나는 고장을 제때에 검출하고 어디서 어떤 형태의 고장이 나타났는가를 제때에 분리하여 해당한 대책을 세우는것은 위성이 자기의 사명을 원만히 수행할 수 있게 하는 중요한 문제이다.

선행연구[1]에서는 비선형관측기를 리용하여 위성수감부의 고장을 검출하고 고장허용조종을 실현하는 방법을 제기하였지만 고장을 검출만 하고 어디서 발생하였는지 분리하는 방법을 론의하지 못하였다.

선행연구[2]에서는 고장형태와 영향분석(FMEA)을 진행하고 미지입력관측기묵음과 루적합(CUSUM)알고리즘을 리용하여 위성수감부와 수행기구의 고장을 검출하고 분리하는 방법을 제기하였지만 CUSUM알고리즘을 실현하는 구체적인 방법론이 없고 실현하기가 힘든 부족점이 있다.

론문에서는 미끄럼방식관측기를 리용하여 자이로스코프의 고장을 검출하고 분리하는 방법을 제안하고 모의실험을 통하여 제안한 방법의 효과성을 검증하였다.

1. 자이로스코프의 고장검출

위성의 동력학방정식은 다음과 같이 표현된다.

$$\dot{w} = J^{-1}(T - w^x Jw) \quad (1)$$

여기서 $J \in R^{3 \times 3}$ 은 위성의 관성모멘트행렬, $T \in R^3$ 은 수행기구인 반작용바퀴의 출력모멘트벡터이다.

한편 위성의 수감부출력은

$$y = Cw + n + f \quad (2)$$

로 표현된다. 여기서 $w \in R^3$ 은 위성의 각속도, $y \in R^4$ 는 수감부출력, $C \in R^{4 \times 3}$ 은 출력분포행렬(행렬 C 의 i 째 행은 i 째 자이로스코프에 대응하는 행), $n \in R^4$ 는 잡음, $f \in R^4$ 는 고장을 표현한다.

수감부측정값 y 로부터 상태 w 는 f , n 이 항상 령이라는 가정하에서 최소2제곱법에 의하여 $\tilde{w} = (C^T C)^{-1} C^T y$ 로 추정된다.

한편 고장검출을 위하여 다음과 같은 여유신호를 고찰한다.

$$r_s = \|(I - C(C^T C)^{-1} C^T)y\|_2 \quad (3)$$

만일 잡음과 고장이 없으면 $r_s = 0$ 이다.

그러나 잡음과 고장이 존재할 때 식 (3)은 다음과 같이 된다.

$$r_s = \|(I - C(C^T C)^{-1} C^T)(n + f)\|_2 \quad (4)$$

식 (4)로부터 r_s 에 고장과 잡음이 그대로 반영된다는것을 알수 있으며 r_s 가 잡음의 영향만을 고려한 어떤 턱값보다 크면 수감부에 고장이 존재한다고 판단할수 있다.

그러므로 다음의 조건을 만족하면 고장이라고 선언한다.

$$r_s > \varepsilon$$

여기서 ε 은 잡음의 영향을 고려한 고장검출턱값이다.

2. 미끄럼방식관측기를 리용한 자이로스코프의 고장분리

고장검출단계에서 고장이 발생했다는것이 선언되면 4개의 미끄럼방식관측기를 리용하여 고장난 수감부를 분리한다.

① 미끄럼방식관측기 묶음설계

우선 고장분리를 위해서 다음과 같은 형식의 미끄럼방식관측기를 고찰하자.

$$\dot{\hat{w}}_i = J^{-1}(T_c - \hat{w}_i^x J \hat{w}_i) + v_i \quad (5)$$

웃식에서 v_i 는 i 째 관측기의 등가입력신호로서 다음과 같다.

$$v_i = \begin{cases} \rho_i \frac{e_i}{\|e_i\|}, & e_i \neq 0 \\ 0, & e_i = 0 \end{cases} \quad (6)$$

여기서 $e_i = \tilde{w}_i - \hat{w}_i$ 이고 ρ_i 는 정인 설계스칼라량이다. 그리고 T_c 는 조종기로부터 받은 지령모멘트, \hat{w}_i 은 i 째 자이로스코프를 제외한 나머지 측정값으로부터 LS법으로 추정 한 $\tilde{w}_i = \tilde{C}_i^{-1} y_i$ 의 상태추정량으로서 여기서 \tilde{C}_i 은 수감부배치행렬 C 의 i 째 행을 삭제한 행렬, y_i 는 y 의 i 째 성분을 삭제하여 얻어진 벡토르이다.

동력학방정식 (1)로부터 상태 \tilde{w}_i 은 다음의 미분방정식을 만족시킨다.

$$\dot{\tilde{w}}_i = J^{-1}(T - \tilde{w}_i^x J \tilde{w}_i) + \zeta_i(n, \dot{n}, f, \dot{f}) \quad (7)$$

여기서

$$\begin{aligned} \zeta_i(n, \dot{n}, f, \dot{f}) = & J^{-1}(-(\tilde{C}_i^{-1} n_i + \tilde{C}_i^{-1} \dot{f}_i)^x J(\tilde{C}_i^{-1} n_i + \tilde{C}_i^{-1} \dot{f}_i) - \tilde{w}_i^x J(\tilde{C}_i^{-1} n_i + \tilde{C}_i^{-1} \dot{f}_i) - \\ & - (\tilde{C}_i^{-1} n_i + \tilde{C}_i^{-1} \dot{f}_i)^x J \tilde{w}_i) - (\tilde{C}_i^{-1} \dot{n}_i + \tilde{C}_i^{-1} \dot{f}_i) \end{aligned} \quad (8)$$

이다.

이때 미끄럼방식관측기는 고장이 발생하여도 유한시간내에 $e_i = 0$ 이 되게 하고 그후 부터 항상 $e_i = 0$ 을 담보한다.

한편 식 (5)와 (7)로부터 오차 e_i 는

$$\dot{e}_i = -J^{-1}(\tilde{w}_i^x J \tilde{w}_i - \hat{w}_i^x J \hat{w}_i) + J^{-1}(T - T_c) - v_i + \zeta_i \quad (9)$$

를 만족시킨다. 미끄럼방식관측기가 미끄럼운동하는 동안 $e_i = 0$, $\dot{e}_i = 0$ 이므로 식 (9)는

$$0 = \zeta_i - v_{ieq} + J^{-1}(T - T_c) \quad (10)$$

로 된다. 여기서 v_{ieq} 는 미끄럼운동을 유지하기 위하여 요구되는 등가입력신호이다.

만일 $T = T_c$ 이면 식 (10)으로부터 등가입력신호는

$$\begin{aligned} v_{ieq} = & \zeta_i(n, \dot{n}, f, \dot{f}) = J^{-1}(-(\tilde{C}_i^{-1} n_i + \tilde{C}_i^{-1} \dot{f}_i)^x J(\tilde{C}_i^{-1} n_i + \tilde{C}_i^{-1} \dot{f}_i) - \\ & - \tilde{w}_i^x J(\tilde{C}_i^{-1} n_i + \tilde{C}_i^{-1} \dot{f}_i) - (\tilde{C}_i^{-1} n_i + \tilde{C}_i^{-1} \dot{f}_i)^x J \tilde{w}_i) - (\tilde{C}_i^{-1} \dot{n}_i + \tilde{C}_i^{-1} \dot{f}_i) \end{aligned} \quad (11)$$

로 된다.

다음으로 우에서 고찰한 미끄럼방식관측기의 도달가능성을 분석하자.

상태오차벡터가 미끄럼면에 도달한다는것을 담보하기 위해서는 도달조건 $e^T \dot{e} < 0$ 이 만족되어야 한다.

이를 위해 다음과 같은 립쉬츠조건 $\|\tilde{w}_i^x J \tilde{w}_i - \hat{w}_i^x J \hat{w}_i\| \leq \eta \|\tilde{w}_i - \hat{w}_i\|$ 이 만족된다고 가정하자. 여기서 η 는 정의 스칼라량이다.

식 (9)로부터

$$e_i^T \dot{e}_i = e_i^T [-J^{-1}(\tilde{w}_i^x J \tilde{w}_i - \hat{w}_i^x J \hat{w}_i) + \zeta_i - v_i + J^{-1}(T - T_c)] \quad (12)$$

가 만족되며 우의 가정과 노름의 성질을 리용하면 식 (12)로부터

$$e_i^T \dot{e}_i \leq \|e_i\|^2 \cdot \|J^{-1}\| \eta + \|e_i\| \cdot \|\zeta_i\| + \|e_i\| \cdot \|J^{-1}\| \cdot \|T - T_c\| - \rho_i \|e_i\| \quad (13)$$

가 만족된다.

따라서 적당한 $\xi_i > 0$ 에 대해

$$\rho_i > \|e_i\| \cdot \|J^{-1}\| \eta + \|\zeta_i\| + \|J^{-1}\| \cdot \|T - T_c\| + \xi_i \quad (14)$$

인 ρ_i 를 선택하면 식 (13)으로부터 $e_i^T \dot{e}_i \leq -\xi_i \|e_i\|$ 로 되며 도달가능성조건이 만족된다.

② 고장분리

일반적으로 반작용바퀴에서

$$\frac{1}{t_{i+1} - t_i} \int_{t_i}^{t_{i+1}} T(\tau) d\tau = T_{c_i} \quad (15)$$

가 만족된다. 여기서 상수 T_{c_i} 는 시간구간 $[t_i, t_{i+1}]$ 에서 조종기에 의해 계산된 모멘트이다.

식 (10)을 시간구간 $[t_i, t_{i+1}]$ 에서 적분하면 식 (15)로부터

$$\int_{t_i}^{t_{i+1}} v_{ieq}(\tau) d\tau = \int_{t_i}^{t_{i+1}} \zeta_i(n, \dot{n}, f, \dot{f}) d\tau \quad (16)$$

이다.

한편

$$v_{iavg} = \int_{t_i}^{t_{i+1}} v_{ieq}(\tau) d\tau$$

라고 하면 식 (11)로부터

$$\begin{aligned} v_{iavg} = & - \int_{t_i}^{t_{i+1}} J^{-1}(\tilde{C}_i^{-1} n_i + \tilde{C}_i^{-1} f_i)^x J(\tilde{C}_i^{-1} n_i + \tilde{C}_i^{-1} f_i) d\tau + \int_{t_i}^{t_{i+1}} J^{-1} \tilde{w}_i^x J(\tilde{C}_i^{-1} n_i + \tilde{C}_i^{-1} f_i) d\tau + \\ & + \int_{t_i}^{t_{i+1}} J^{-1}(\tilde{C}_i^{-1} n_i + \tilde{C}_i^{-1} f_i)^x J \tilde{w}_i d\tau + \int_{t_i}^{t_{i+1}} \tilde{C}_i^{-1} \dot{n}_i d\tau + \int_{t_i}^{t_{i+1}} \tilde{C}_i^{-1} \dot{f}_i d\tau \end{aligned} \quad (17)$$

가 만족된다.

식 (17)로부터 매 관측기들의 v_{iavg} 가 시간구간 $[t_i, t_{i+1}]$ 에서 고장의 평균효과를 준다 는것을 알수 있다.

그러므로 v_{iavg} 의 노름은 고장난 수감부를 분리하기 위해 리용할수 있다.

하나의 자이로스코프에만 고장이 존재하는 경우 4개의 관측기들의 $\|v_{iavg}\|$ 중에서 하나만이 고장이 없는 측정값들에 의하여 계산되며 나머지 3개는 고장난 수감부의 측정값에 의해 계산된다. 이때 고장이 없는 측정값들에 의하여 계산된 값은 거의 평이고 고장난 수감부의 측정값에 의하여 계산된 값은 평보다 훨씬 크다.

따라서 4개의 관측기들중에서 $\|v_{iavg}\|$ 가 최소인 자이로스코프가 고장이다. 즉 고장난 자이로스코프는 다음과 같다.

$$i_f = \arg \min_{i=1, 4} \|v_{iavg}\| \quad (18)$$

3. 모의실험 및 결과분석

모의는 궤도경사각 97.4° , 리심률 0.053 9, 장축반경 6 888km, 승교점적경 -54° , 근지점인수 -39° 인 LEO위성에 대해 진행하였다.

수감부로는 1축자이로스코프 4개를 리용하고 수행기구로는 4개의 반작용바퀴를 리용하였다.

모의에서 $\varepsilon = 0.005$, $\rho = 0.005$ 로 선택하였다.

자이로스코프 2에 모의시작후 1 000s부터 4 000s 사이에 편차고장을 주었을 때 모의결과 그래프들은 그림 1-4와 같다.

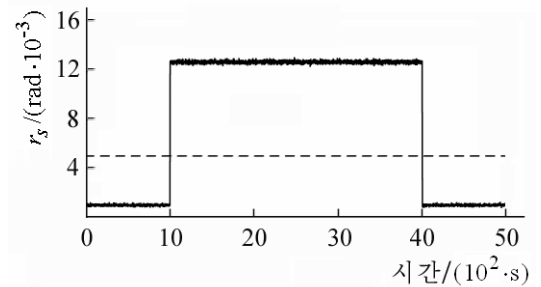


그림 1. 고장검출을 위한 턱값과 여유신호

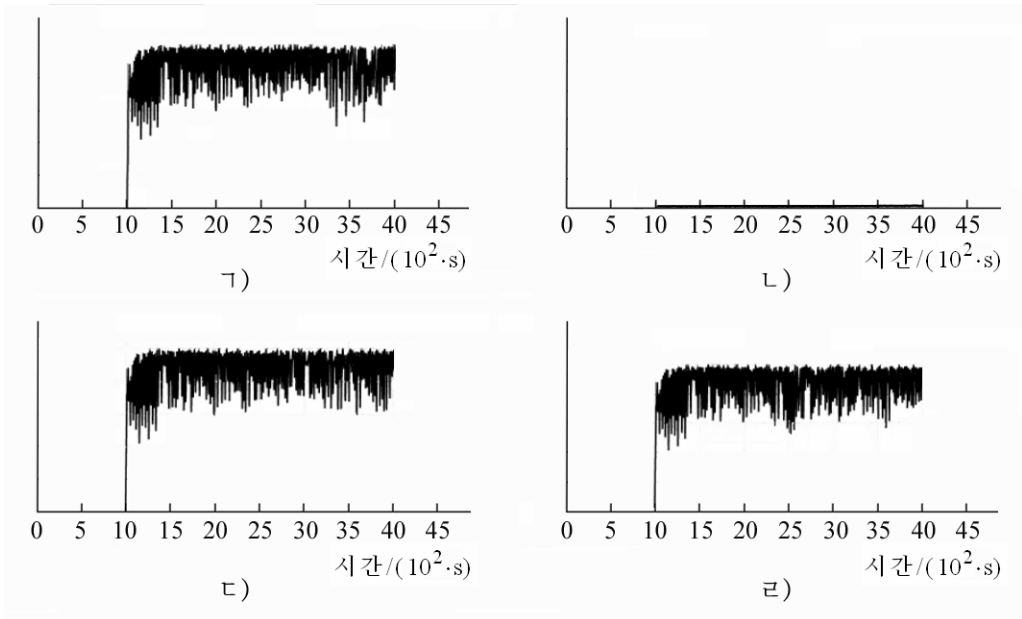


그림 2. 고장분리를 위한 여유신호

ㄱ) 1번수감부, ㄴ) 2번수감부, ㄷ) 3번수감부, ㄹ) 4번수감부

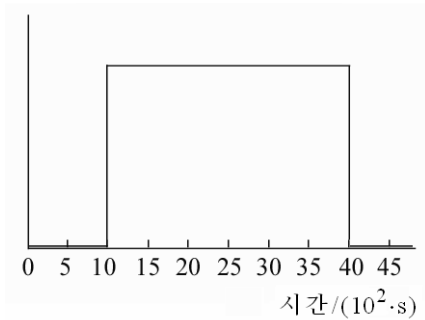


그림 3. 고장검출기발

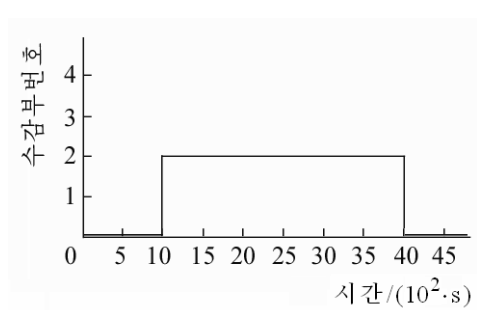


그림 4. 고장분리기발

그림 1은 고장검출턱값과 고장검출을 위한 여유신호를 보여주는 그래프로서 고장이 없는 경우에는 여유신호가 턱값보다 작으며 1 000s부터 4 000s구간에서 여유신호가 턱값보다 커져서 그림 3에서 보는바와 같이 고장검출기발이 1로 설정되어 자이로스코프에 고장이 발생하였다는것이 선언된다.

그림 2는 고장분리를 위한 여유신호로서 고장이 선언된 후 그림 2의 1)의 값이 최소로 되고 따라서 그림 4의 고장분리기발이 2로 설정되어 자이로스코프 2가 고장이라는 것이 선언된다.

모의실험을 편차고장뿐아니라 최대값고장, 최소값고장, 상수값고장, 효과성상실, 표류 등 여러가지 고장형태들에 대하여 반복하여도 고장검출과 분리가 정확히 진행되었다.

맺 는 말

미끄럼방식관측기를 리용하여 위성자세조종에서 자이로스코프의 고장을 검출하고 분리하는 한가지 방법을 제안하고 모의실험을 통하여 제안한 방법의 효과성을 검증하였다.

참 고 문 헌

- [1] R. Wang et al.; Journal of the Franklin Institute, 352, 5, 1906, 2015.
- [2] M. Tipaldi et al.; Journal of Aerospace Information Systems, 12, 2, 235, 2015.

주체109(2020)년 5월 5일 원고접수

Satellite Sensor Fault Detection and Isolation Method Using Sliding Mode Observer

Yun Kum Il, Pak Un Sun

We proposed satellite sensor fault detection and isolation method using sliding mode observer(SMO) and inspected effectiveness through simulation.

Keywords: sliding mode observer(SMO), gyro, fault detection, fault isolation, satellite sensor