

반작용바퀴구동에 의한 편요자세로바스트 조종의 한가지 설계방법

김정룡, 윤정남

경애하는 김정은동지께서는 다음과 같이 말씀하시였다.

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

반작용바퀴에 의한 회전동체의 구동은 극소형인공지구위성의 정밀자세조종에서 많이 리용하는 방식이다. 이 구동방식은 반작용바퀴와 위성동체로 이루어진 력학계에서 바퀴를 구동하는 전동기의 회전힘에 의하여 회전속도변화가 발생하면 전동기의 고정자가 설치된 위성동체에 그것에 반대로 작용하는 힘이 유도되어 동체가 회전하는 원리에 기초하고있다.

한편 인공지구위성이 궤도를 따라 비행할 때 태양복사압력, 지구자기마당힘, 궤도상에 존재하는 대기립자들에 의한 항공력학적힘, 중력에 의한 회전작용 등과 같은 외란을 받게 된다. 이러한 외란들의 영향은 전통적인 비례미분조종만으로 원만히 보상할수 없으며 이것은 외란관측기(DOB: Disturbance Observer)에 의한 로바스트조종을 도입하여 해결할수 있다.

론문에서는 반작용바퀴를 리용하여 편요축방향의 회전을 보장하는 자세조종체계에서 외란관측기에 의한 로바스트편요자세조종을 실현하고 모의실험과 장치실험을 통하여 그 효과성을 검증하였다.

1. 편요자세조종체계의 동력학적모형화와 조종문제의 설정

그림 1에 편요자세조종체계의 장치적구성을 보여주었다.

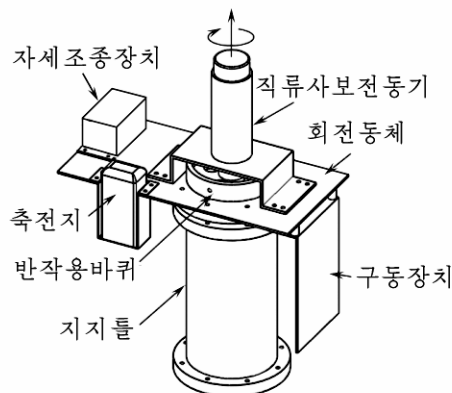


그림 1. 편요자세조종체계의 장치적구성

장치는 크게 직류사보전동기와 그 축에 고정시킨 반작용바퀴, 직류전동기구동장치, 자세조종장치와 축전지로 구성되었다. 이 모든 장치들은 회전동체우에 설치되어있으며 회전동체는 거기에 가해진 힘모멘트에 의하여 자유롭게 회전할수 있도록 밀틀과 베어링을 통하여 기계적으로 련결되어있다. 자세조종장치에는 자세조종을 위한 극소형조종기와 편요자세수감을 위한 지구자기마당수감부 및 관성수감부가 설치되어있다.

그림 2에 편요자세조종을 위한 종속조종체계를 보여주었다.

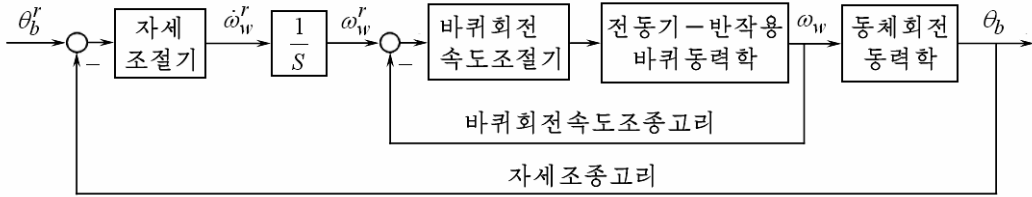


그림 2. 편요자세조종을 위한 종속조종체계

그림 2에서 θ_b^r 는 자세목표값, $\dot{\omega}_w^r$ 와 ω_w^r 는 각각 자세조절기에서 계산된 전동기-반작용바퀴계의 회전각속도목표값과 회전각속도목표값, ω_w 는 바퀴의 회전각속도, θ_b 는 동체의 회전각도이다.

목표편요자세각과 지구자기마당수감부에 의하여 수감된 편요각사이의 오차와 관성수감부에 의하여 수감된 오차변화속도에 기초하여 자세조절기능을 수행하는 조종장치는 이 오차를 줄이기 위한 조작량인 바퀴회전각속도목표값 $\dot{\omega}_w^r$ 를 계산하고 이 조작량을 적분하여 바퀴회전각속도목표량 ω_w^r 를 얻고 속도조절기능을 가진 전동기구동장치에 전송한다.

전동기구동장치에서는 이 각속도목표값을 달성하기 위하여 전동기-반작용바퀴계에 대한 속도조종을 실현한다.

전동기-반작용바퀴계의 동력학모형은 일반직류전동기모형으로서 전압평형식과 회전모멘트평형식에 의하여 다음과 같이 표시할수 있다.

$$\begin{aligned} L \cdot \dot{I}(t) + R \cdot I(t) + K_e \omega_w(t) &= U(t) \\ J_w \dot{\omega}_w(t) &= K_t I(t) + d_{\text{fric}}(t) \end{aligned} \quad (1)$$

여기서 결수들인 L , R , K_e , J_w , K_t 는 각각 직류사보전동기의 회전자권선유도도, 유효저항, 역기전력상수, 회전자와 반작용바퀴의 관성모멘트의 합, 모멘트결수이며 변수들인 $I(t)$, $U(t)$, $\omega_w(t)$, $d_{\text{fric}}(t)$ 는 각각 회전자권선에 흐르는 전류, 권선단자전압, 회전자의 회전각속도, 솔과 정류자사이의 마찰력이다.

식 (1)로부터 만일 회전자의 권선유도도가 무시된다면 전동기-반작용바퀴계는 1차 관성요소에 외란이 작용하는 대상으로 모형화된다는것을 알수 있다.

전동기-반작용바퀴계의 회전각속도는 동체회전동력학모형의 조종입력신호로 작용하는데 이것을 반영한 동체의 회전동력학모형은 다음과 같이 표시된다.[1]

$$J_b \ddot{\theta}_b(t) = -J_w \dot{\omega}_w(t) + d_{\text{ext}}(t) \quad (2)$$

여기서 J_b 는 동체의 관성모멘트이며 $d_{\text{ext}}(t)$ 는 장치의 기울어짐에 의하여 나타나는 불평형중력부하와 베어링마찰 등을 포함한 외란이다.

조종목적은 식 (1)과 (2)와 같이 표시된 구동장치 및 자세조종대상에 대하여 외란이

작용하는 조건에서 그 영향을 극복하면서 동체의 회전각도를 지정된 과도특성으로 목표값에 정확히 추종하도록 하는것이다.

2. 외란관측기에 의한 로바스트조종체계설계

그림 2에서 보는바와 같이 편요자세조종체계는 2개의 조종고리를 가진 종속조종체계로 구성된다. 조종체계의 내부고리는 반작용바퀴구동을 위한 직류전동기의 회전속도조종고리이며 외부고리는 동체의 편요회전자세각도조종고리이다. 종속조종고리설계의 기본원칙은 내부고리의 조종대역을 외부고리조종대역의 5~10배로 취함으로써 외부고리에서 볼 때 내부고리의 전달특성이 거의 1로 되도록 하는것이다.

① 외부고리의 설계

종속조종고리의 설계는 외부고리인 자세각도조종고리로부터 진행한다.

내부고리의 전달특성이 1에 가깝게 설계된다는 조건하에서 식 (2)와 그림 2의 체계구성도로부터 자세각도조종고리의 조종대상은 관성모멘트 J_b 를 가지는 2중적분대상으로 모형화된다는것을 알수 있다. 그러므로 자세조절기를 다음과 같은 PD보상기로 실현하면 계단형목표값에 대하여 정상오차없는 조종체계를 구성할수 있다.

$$C_{att}(s) = K_{p, att} + K_{d, att} \cdot s \quad (3)$$

여기서 $K_{p, att}$ 는 자세조종고리의 비례조절결수이고 $K_{d, att}$ 는 미분조절결수이다.

그러면 자세각도조종의 닫힌체계전달함수는 다음과 같이 된다.

$$G_{att}(s) = \frac{P_{att}(s)G_w(s)C_{att}(s)}{1 + P_{att}(s)G_w(s)C_{att}(s)} = \frac{G_w(s)(K_{d, att} \cdot s + K_{p, att})}{J_b s^2 + G_w(s)(K_{d, att} \cdot s + K_{p, att})} \quad (4)$$

여기서 $G_w(s)$ 는 반작용바퀴회전속도조종을 위한 내부고리의 전달함수이며

$$P_{att}(s) = 1/(J_b \cdot s)^2$$

은 식 (2)와 적분기의 적으로 이루어진 자세조종고리의 조종대상공칭모형이다.

만일 $G_w(s) \approx 1$ 이라면 식 (4)는 근사적으로 다음과 같이 된다.

$$G_{att}(s) \approx \frac{P_{att}(s)C_{att}(s)}{1 + P_{att}(s)C_{att}(s)} = \frac{K_{d, att}s + K_{p, att}}{J_b s^2 + K_{d, att}s + K_{p, att}} = \frac{\frac{K_{d, att}}{J_b}s + \frac{K_{p, att}}{J_b}}{s^2 + \frac{K_{d, att}}{J_b}s + \frac{K_{p, att}}{J_b}} \quad (5)$$

식 (5)의 분자다항식과 분모다항식의 비교로부터 자세조종의 부고리는 2형2차체계로서 계단형목표신호뿐만아니라 경사형목표신호에도 오차없이 추종할수 있다는것을 알수 있다.

실지 계산하여야 할 파라메터인 $K_{p, att}$ 와 $K_{d, att}$ 의 값은 2항결수모형과 같은 2차체계의 표준응답모형에 따라 결정할수 있는데 이때 응답모형의 대역폭은 외부고리의 설계지표인 목표값추종대역을 고려하여 정한다.

② 내부고리의 설계

반작용바퀴의 회전속도조종을 위한 내부고리는 조종대상인 전동기-반작용바퀴계와 전동기구동장치에 내장된 바퀴회전속도조절기로 구성되어있다. 바퀴가 설치된 직류전동기의 조종대상입출력모형은 회전자권선유도도와 외란을 무시하는 경우 식 (1)로부터 다

음과 같이 쓸수 있다.

$$P_w(s) = \frac{K_t}{LJ_w s^2 + RJ_w s + K_t K_e} \approx \frac{K_t}{RJ_w s + K_t K_e} \quad (6)$$

식 (6)은 조종대상이 정위성을 가지는 1차관성요소로 모형화되며 따라서 계단형목표값에 대하여 정상오차가 없는 조종체계를 구성하려면 회전속도조절기로서 다음과 같은 비례적분조절기를 리용해야 한다는것을 보여준다.

$$C_w(s) = K_{p, w} + K_{i, w} \frac{1}{s} \quad (7)$$

식 (6)과 (7)을 리용하면 반작용바퀴회전각속도조종의 닫힌계제전달함수는

$$G_w(s) = \frac{P_w(s)C_w(s)}{1 + P_w(s)C_w(s)} = \frac{\frac{K_t K_{p, w}}{R \cdot J_w} s + \frac{K_t K_{i, w}}{R \cdot J_w}}{s^2 + \left(\frac{K_t K_e}{R \cdot J_w} + \frac{K_t K_{p, w}}{R \cdot J_w} \right) s + \frac{K_t K_{i, w}}{R \cdot J_w}} \quad (8)$$

와 같이 표시되는데 이것은 회전속도조종내부고리가 1형2차체제로서 계단형회전속도목표값에 편차없이 추종할수 있다는것을 의미한다.

비례조절결수 $K_{p, w}$ 와 적분조절결수 $K_{i, w}$ 도 역시 표준응답모형비교로부터 얻을수 있는데 이때 표준응답모형의 대역폭은 바깥고리의 대역폭보다 5~10배 되도록 취하여야 한다.

③ 외란관측기에 의한 로바스트조종설계

자세조종체제는 경사형목표값에까지도 정상오차없이 추종할수 있지만 이것은 지속적인 외란이 가해지지 않는 경우에만 가능하다. 그러므로 정밀자세조종을 실현하기 위해서는 실험장치의 설치조건에 따라 결정되는 중력외란과 베어링에서의 마찰외란을 보상할수 있는 대책이 취해져야 한다. 조종체제가 이러한 외란들에 대한 억제기능을 가지도록 하기 위하여 그림 3에 보여준 외란관측기에 의한 로바스트조종체제를 설계한다.

그림 3에서 P 와 C 는 조종대상과 조종기이고 P_n 은 조종대상의 공칭모형이며 Q 는 P_n^{-1} 의 실현가능성문제와 고주파검출잡음억제문제를 해결하기 위하여 설치되는 저역통과 려파로서 Q -려파기라고 한다.

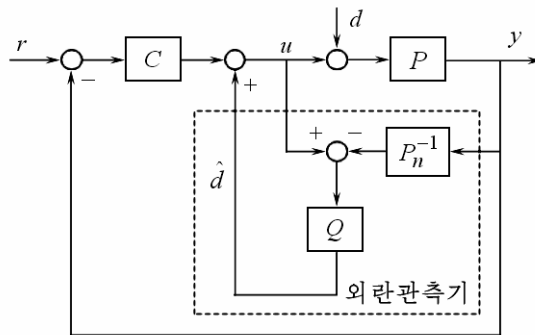


그림 3. 외란관측기에 의한 로바스트조종체제

이 체제에서 외란관측기에 의하여 추정된 외란추정신호 \hat{d} 이 반결합되어 실제외란

d 를 상쇄시킴으로써 체계는 전체적으로 외란을 받지 않는 공칭상태에서처럼 동작하게 된다.

외란관측기는 또한 조종대상과 모형사이의 불일치로 인하여 발생하는 등가외란도 추정정보상하므로 이 체계는 모형불확정성과 외란의 영향을 종합적으로 보상한다.

외란관측기에 의한 로바스트조종에서 외란억제성과 검출잡음억제성은 Q -러파기에 결정적으로 관계되므로 이 러파기를 잘 설계하는것이 중요하다.

식 (5)로부터 자세조종체계의 조종대상상대차수는 2이므로 외란관측기설계의 기본요구로부터 Q -러파기를 차수가 2, 상대차수가 2가 되도록 2항결수법에 따라서 다음과 같이 설계한다.[2]

$$Q(s) = \frac{1}{(\sigma \cdot s)^2 + 2(\sigma \cdot s) + 1} \quad (9)$$

여기서 σ 는 외란관측기의 대역폭을 결정하는 결수로서 그 값을 작게 할수록 외란보상대역이 넓어져 조종정확도가 높아지지만 검출잡음도 함께 증폭되므로 외란대역과 잡음대역사이의 절충방안에 따라 결정하여야 한다.[3]

론문에서는 편요자세조종에서 리용되는 지구자기마당수감부의 수감신호잡음주파수특성을 고려하여 $\sigma=0.2$ 로 선택하였다.

3. 실험 및 결과분석

① 모의실험 및 결과분석

그림 4에서 편요자세조종모의를 위한 MATLAB Simulink모의체계의 구성도를 보여주었다.

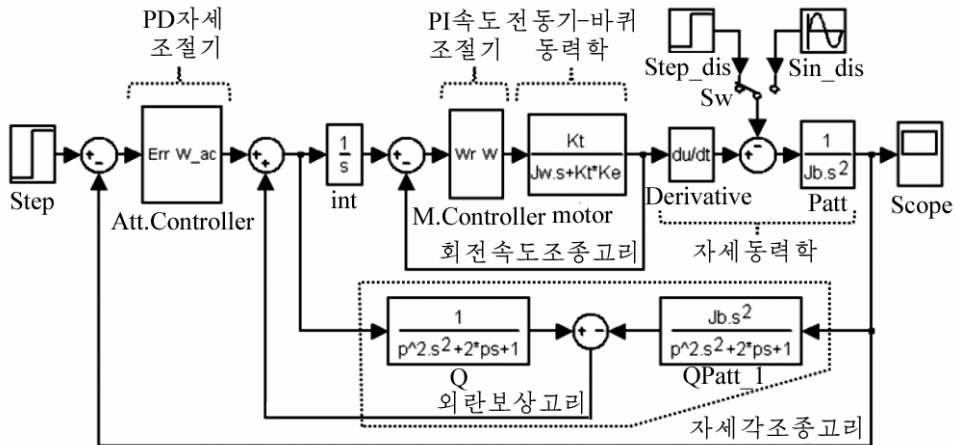


그림 4. MATLAB Simulink모의체계의 구성도

모의체계는 그림 2에서 보여준 자세조종체계의 구성도에 로바스트조종을 실현하기 위한 외란보상고리가 추가되었다. 조화신호외란이 작용할 때의 편요자세조종모의결과를 그림 5에 보여주었다. 이때 외란으로 진폭이 0.8인 조화신호로 작용시켰다.

그림 5로부터 외란관측기의 Q -러파기의 대역을 결정하는 파라메터인 σ 를 작게 할수록 외란의 영향은 점점 더 작아지고 체계의 응답은 외란을 받지 않는 체계의 응답으로

수렴해 간다는 것을 알 수 있다.

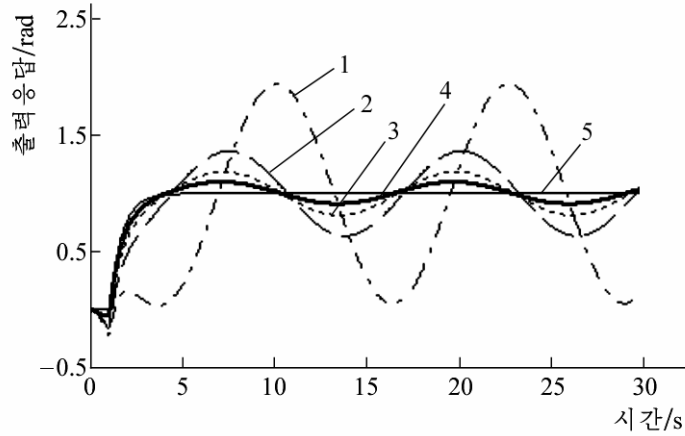


그림 5. 조화신호외란이 작용할 때의 편요자세조종모의결과

1-보상이 없을 때, 2- $\sigma=0.4$ 일 때, 3- $\sigma=0.2$ 일 때, 4- $\sigma=0.1$ 일 때, 5-표준응답

② 장치실험 및 결과분석

충분한 교정을 거친 지구자기마당수감부를 리용하여 4ms의 갱신주기로 보장되는 편요자세정보에 기초하여 편요자세조종을 실험장치에서 실현한 결과를 그림 6에 보여 주었다.

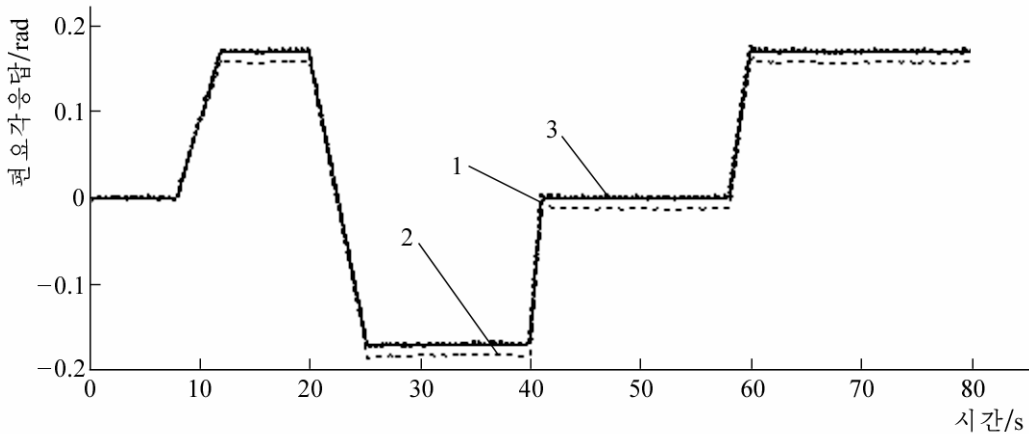


그림 6. 편요자세조종의 장치실험결과

1-목표값, 2-보상이 없을 때, 3-외란을 보상하였을 때

편요자세목표값은 $\pm 10^\circ (0.17\text{rad})$ 의 각도범위에서 계단신호가 아니라 각이한 물매의 경사신호를 주었다. 중력편심효과가 나타나도록 실험장치를 약 2° 정도의 경사도를 주었으므로 축에는 항상 장치의 기구학적불평형으로 인한 중력외란이 작용하고있다.

그림 6에서 가는 점선으로 표시한 곡선은 PD보상만으로 조종을 진행한 경우이고 굵은 점선으로 표시한 부분이 PD+DOB에 의한 조종결과이다. 외란관측기에 의한 보상이 없는 경우 중력편심외란으로 정상오차가 발생하지만 보상이 있는 경우에는 정상오차가

없어진다는것을 알수 있다. 곡선들로부터 론문에서 제안한 조종방법이 효과적인 외란억제 성능을 가진다는것을 알수 있다.

맺 는 말

반작용바퀴에 의한 편요자세조종실험장치에서의 자세조종을 실현하기 위하여 외란관측기에 의한 로바스트조종체계를 구성하고 모의실험과 장치실험을 통하여 그 효과성을 확증하였다.

참 고 문 헌

- [1] 윤정남; 로바스트운동조종, 고등교육도서출판사, 20~80, 주체108(2019).
- [2] Yun Jong Nam et al.; IEEE Transactions on Industrial Electronics, 60, 7, 2701, 2013.
- [3] Yun Jong Nam et al.; IEEE Transactions on Control Systems Technology, 22, 2, 809, 2014.

주체110(2021)년 2월 5일 원고접수

A Design Method of Yaw Attitude Robust Control by Driving Reaction Wheel

Kim Jong Ryong, Yun Jong Nam

We induce the dynamical model of a yaw attitude control plant driven by reaction wheel and realize the yaw attitude robust control that suppresses the disturbance caused by gravity and friction, using disturbance observer.

Keywords: reaction wheel, attitude control, disturbance observer