

논문 99-8-2-07

동조자이로스코프의 새로운 각속도 검출 방법

마진석*, 이광일*, 김우현*, 권우현*, 임성운**, 변승완***, 천호정***

New Angular Velocity Pick-off Method for Dynamically Tuned Gyroscope

Jin Suk Ma*, Kwang il Lee*, Woo Hyun Kim*, Woo Hyen Kwon*, Sung Woon Im**,

Seung Whan Byun***, Ho Jeong Cheon***

요약

본 논문에서는 관성 항법 장치 및 동작 제어 장치 등에서 회전 각속도를 검출하기 위하여 널리 사용되는 동조 자이로스코프의 새로운 각속도 검출방법을 제시하였다. 제안된 방법은 자이로스코프의 모델을 사용하여 개평형 루프의 설계를 수행함으로써 기존의 PI제어 방법만을 사용하였을 경우보다 외부 입력에 대하여 속도 검출을 위한 픽업단의 회전각도가 과도 및 정상 상태에서 작은 검출각을 유지시킨 상태에서 입력 각속도를 검출할 수 있으며 이에 따라 자유 자이로스코프의 기계적인 변경 없이도 시스템의 동작 범위를 매우 넓히는 것이 가능함을 보였다. 제안된 방법을 사용한 동조자이로스코프 시스템의 모델 및 전달 특성을 제시하였으며 최종적으로 컴퓨터 모의실험 모델 및 그 결과를 제시하여 그 타당성을 확인하였다.

Abstract

In this paper, we present the new angular velocity pick-off method for DTG (dynamically tuned gyroscope) which is widely used in various inertial navigation systems and motion control systems. In case of the external angular velocity input, the proposed scheme can make a smaller tilt-angle rather than that of conventional PI method in the transient and steady state because it has an additional inner rebalance loop with a mathematical model of the real gyroscope. So, without any mechanical redesign of the DTG, its dynamic range can be enlarged by the proposed method. The theoretical analysis and simulation model of DTG with the proposed scheme are given. Finally, the proposed scheme is verified

1. 서론

* 경북대학교 전자전기공학부(School of Electronic and Electrical Eng., Kyungpook Nat'l Univ.)

** 경일대학교 제어계측공학과(Dept. of Control & Instrumentation Eng., Kyungil Univ.)

*** 삼성전자 정보통신본부 기간네트웍 사업부, 전략시스템 사업팀 개발 1그룹(Samsung Electronics. Co. LTD. Information Systems Business, Infra Network Systems Division, Advanced Systems Technology Team, R&D 1 group)

<접수일자 : 1999년 1월 14일>

자이로스코프는 항체에 부착되어 관성 좌표계에서 그 항체의 회전각도 또는 회전각속도 정보를 제공하여 항체의 위치, 자세 제어에 사용할 수 있는 관성 센서의 하나이다. 실용화된 자이로스코프에는 크게 기계식 자이로스코프와 광학적 자이로스코프가 있다. 기계식 자이로스코프는 뉴턴의 제2법칙인 각운동량 보존 법칙을 이용한 것이며, 정밀도가 높은 시스템에 사용되는 FRIG (Floated Rate Integrating Gyroscope)와 입력이 클 때 척도 계수가 선형성을 유지할 수 있는 동조자이로스코프 (Dynamically Tuned Gyroscope:이하 DTG)

등이 있다. 광학적 자이로스코프는 일반 상대성 이론을 이용한 것으로 링 레이저 자이로스코프 (Ring Laser Gyroscope:RLG)와 광섬유 자이로스코프 (Fiber Optic Gyroscope:FOG)등이 있다. 이러한 자이로스코프 중에서 DTG는 기계적으로 간단하며, 부피가 적고 가격이 상대적으로 저렴하기 때문에 단거리 및 중거리용 항법 시스템에 널리 사용되고 있다¹¹⁻²⁾.

DTG는 짐발에 대하여 회전이 가능한 두 개의 축을 가지고 있으며 동조상태에서 회전자의 회전축이 원래의 자세를 유지하려는 성질을 이용하여 항체의 회전각도를 직접 측정할 수 있도록 한 속도적분 모드(rate-integrating mode)와 회전각도 출력을 토크 입력으로 변환시켜 회전축을 원래 위치로 환원시키는 재평형루프를 구성하여 항체의 회전 각속도를 측정할 수 있는 속도 모드(rate mode)로 사용 가능하다. 또한 DTG는 회전자와 케이스사이의 편각이 일정한 각도 이상 되지 않도록 해야 선형성을 확보할 수 있는 특성을 가지며 일정 이상의 외부 입력에 대하여 회전자가 규정 이상의 각도를 가지면 자체 시스템 보호를 위하여 자동으로 다운되게 되며 이를 케이지 모드(cage mode)라고 한다. DTG의 이러한 특성으로 인하여 재평형루프의 성능과 과도 상태에서의 검출각의 크기는 전체 시스템의 동적 오차의 크기 및 동작 범위에 직접적인 영향을 주게된다. 재평형루프를 설계하는 방법은 PI제어 방법이 실제적으로 가장 일반적으로 사용되고 있으면 최근에는 H_{∞} 제어 방법, LQG 또는 LQG-LTR을 이용하는 방법 등이 발표되고 있다¹²⁾³⁾.

본 논문에서는 자이로스코프의 수학적 모델을 사용하여 속도 모드 DTG에서 2자유도 재평형 루프의 설계를 수행함으로써 기존의 PI제어 방법만을 사용하는 방식보다 외부 입력에 대하여 출력단에서는 보다 우수한 속도 검출 특성을 보이고 과도 및 정상 상태에서 보다 작은 검출부의 검출각을 유지시킴으로써 기계적인 시스템의 구조 변경 없이도 외부입력에 대한 동작 범위를 넓히는 것이 가능함을 보인다.

II. 본 론

1. DTG의 동작 원리

2축 DTG는 그림 1와 같이 회전자가 유니버설 결합으로 된 서스펜션에 매달려 있어 자이로스코프의 회전축에 따라 회전하게 된다. 따라서 회전자와 짐발은 스

핀모터의 회전 속도와 그들의 관성에 의해 결정되는 각 운동량을 갖게 된다. 고정된 케이스의 기준 입력축에 입력 각속도가 있을 경우 회전자는 그의 각 운동량 때문에 원래의 자세를 유지하려고 한다. 그러나 짐발은 각 운동량과 입력 각속도의 크기에 따라 결정되는 진폭 크기로 기울게 된다. 이와 같은 효과를 다이내믹 효과 (Dynamic Effect)라 한다. 이 다이내믹 효과에 의한 비틀림자의 음의 스프링 계수와 양의 스프링 계수가 같아지게 되면 회전자와 회전축 사이의 스프링 결합률이 영(Zero)이 되는데 이와 같은 상태를 동조 상태라 하고, 이때의 주파수를 동조주파수(Tuning Frequency)라 한다. 동조된 상태에서는 회전자와 회전축이 서로 비 결합되어 있으므로, 자이로스코프 케이스와 회전자는 서로 자유상태가 된다. 그러므로 자이로스코프 케이스와 회전자 간의 편각은 입력 각도에 비례하게 되어 자유 자이로스코프로 동작하게 된다.

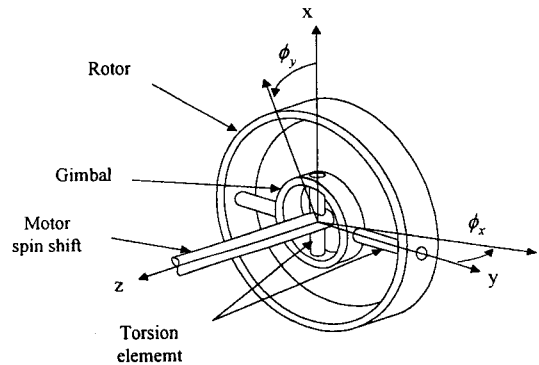


그림 1. 회전자와 서스펜션의 구조.

Fig. 1. The Structure of rotor and suspension.

DTG의 케이스가 관성 좌표계에 대하여 x축을 중심으로 ϕ_x 만큼 회전했을 경우에 회전자가 받는 토크는 식 (1) 및 식 (2)와 같다.

$$M_x = \frac{1}{2} [(K_x + K_y) - (J_x + J_y - J_z)N^2] \phi_x + \frac{1}{2} [(K_x - K_y) + (J_x + J_y - J_z)N^2] \phi_x \cos(2Nt) \quad (1)$$

$$M_y = \frac{1}{2} [(K_x - K_y) + (J_x + J_y - J_z)N^2 - K_y] \phi_x \sin(2Nt) \quad (2)$$

여기에서 K_x, K_y : 비틀림자의 x, y축 탄성 계수
 J_x, J_y, J_z : 짐발의 x, y, z축 방향의 관성

모멘트

N : 회전자의 z 축 방향 회전속도

M_x, M_y : 회전자가 케이스에 대하여 ϕ_x 기

울어질때 회전자가 받는 토크성분

을 나타낸다.

식 (1)과 식 (2)에서 $(K_x+K_y)\phi_x/2$ 는 비틀림자의 스프링 계수에 의하여 회전자에 가해지는 토크를 나타내고 $-(J_x+J_y-J_z)N^2\phi_x/2$ 는 음의 스프링 효과에 의하여 회전자에 가해지는 토크를 나타낸다. 이 두 종류의 스프링효과에 의한 토크가 영이 되려면 회전자의 각속도 N 을 식 (3)과 같이 함으로써 이루어진다.

$$N_0 = \sqrt{\frac{K_x+K_y}{J_x+J_y-J_z}} \quad (3)$$

식 (3)으로 주어지는 각속도 N_0 를 동조 주파수라고 하고 회전자가 이 속도를 유지할 때를 DTG가 동조되었다고 하며 동조 상태에 있는 DTG의 간략화된 운동방정식을 그림 2의 좌측 점선 안에 블록도로 나타내었다. DTG의 상세한 운동방정식은 참고 문헌을 참조하면 된다.^{16, 81}

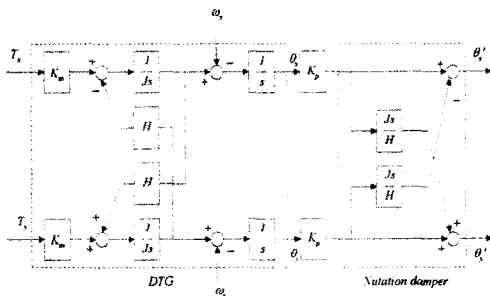


그림 2. DTG와 뉴테이션 댐퍼의 블록도.

Fig. 2. Block diagram of DTG and nutation damper.

그림 2의 DTG 부분에 대한 주파수 영역에서의 전달함수는 식 (4) 및 식 (5)와 같다.

$$\theta_x = \frac{JK_m}{(J^2s^2+H^2)} T_x - \frac{HK_m}{s(J^2s^2+H^2)} T_y - \frac{1}{s} \omega_x \quad (4)$$

$$\theta_y = \frac{HK_m}{s(J^2s^2+H^2)} T_x + \frac{JK_m}{(J^2s^2+H^2)} T_y - \frac{1}{s} \omega_y \quad (5)$$

그림 2와 식 (4)와 식 (5)에서 알 수 있는바와 같이

DTG는 외부의 각속도 입력에 대해서는 각검출부 출력이 서로 분리되어 나타나지만 토크 입력에 대해서는 두 축의 입력이 서로 결합되어 각검출부 출력으로 나타남을 알 수 있다. 재평형루프는 외부 각속도 입력이 존재할 경우 각검출부가 외부 각속도 입력에 대하여 각속도 정보를 출력한 후 원래의 각검출부가 존재한 절대 영점으로 복원시킬 수 있도록 입력 T_x, T_y 를 제어해주는 루프이다. 그림 2 내부의 DTG 부분은 두 개의 입력과 두 개의 출력을 가지는 다변수 입출력 시스템이며, 입출력이 상호 결합되어 나타난다. 다변수 플랜트의 제어방법은 다변수 제어 이론 등에 바탕을 둔 여러가지 제어 기법이 존재하지만 일반적인 DTG 시스템에서는 다변수 입출력 시스템을 별도의 결합을 제거할 수 있는 루프를 삽입함으로써 단일 입출력 시스템으로 분리한 다음 재평형루프를 설계하는 방법을 사용한다. 특별히 DTG에서 이러한 결합현상을 뉴테이션이라 부르며 이 현상의 물리적인 원인은 2축 DTG에서 한쪽 축의 에너지가 다른 축에 전달되었다가 이 에너지가 다시 반사되어 전달되는 에너지 전달에 의한 자체진동으로 회전축이 떨리는 현상이다.

이러한 자이로스코프 내부의 진동을 외부에서 전기적으로 감쇠시켜주는 기능을 수행하는 회로를 뉴테이션 댐퍼(Nutation damper)라 하며 그림 2의 우측의 점선 속의 블록도와 같은 회로를 DTG의 출력단에 삽입함으로써 해결할 수 있으며 그 전달 특성은 식 (6) 및 식 (7)로 주어진다.

$$\theta_x' = K_b\theta_x - \frac{JK_p s}{H} \theta_y \quad (6)$$

$$\theta_y' = \frac{JK_p s}{H} \theta_x + K_b\theta_y \quad (7)$$

단, 수식에서 K_b 는 DTG의 출력단에 삽입되는 복조기의 비레이득을 나타낸 것이며 상수로 나타내어지는 값이다.

식 (6)과 식 (7)의 의하여 토크입력과 외부 속도입력에 대한 출력의 함수는 다음의 식 (8)과 식 (9)로 주어진다. 식 (4)와 식 (8)을 비교하여보면 뉴테이션 댐퍼에 의하여 토크입력의 결합은 분리되었지만 x 축의 출력이 y 축의 외부속도 입력에 의하여 다시 결합되는 특성을 가지게 된다. 그러나 y 축을 통한 입력 ω_y 의 이득이 x 축의 외부 속도 입력 ω_x 에 대한 이득에 비해 매우 작은 값을 가지므로 이 영향은 무시할 수 있다.

$$\theta_x' = \frac{K_m K_p / H}{s} T_y - \frac{K_p}{s} \omega_x + \frac{JK_p}{H} \omega_y \quad (8)$$

$$\approx \frac{K_m K_p / H}{s} T_y - \frac{K_p}{s} \omega_x$$

$$\theta_y' = \frac{K_m K_p / H}{s} T_x - \frac{K_p}{s} \omega_y - \frac{JK_p}{H} \omega_x \quad (9)$$

$$\approx \frac{K_m K_p / H}{s} T_x - \frac{K_p}{s} \omega_y$$

그림 2에서 보면 뉴테이션 감쇠제어기는 수학적으로 는 순수 미분기로 구성됨을 알 수 있다. 그러나 실제 시스템에서 순수한 미분기는 고주파 잡음을 증폭시켜 전체 폐루프 시스템을 불안정하게 만들 수 있으므로, DTG의 동작 주파수 내에서는 미분기로 동작하고 그 이상의 주파수 영역에서는 신호를 통과시키는 고역통과 필터로 설계하는 것이 일반적이며, 본 연구에서 사용된 구체적인 계수는 다음의 식 (10)과 같다.

$$\frac{I}{H} s \approx \frac{s / (2\pi \cdot 550)}{1 + s / (2\pi \cdot 2560)} \quad (10)$$

이제 뉴테이션 댐퍼가 포함된 DTG는 두 개의 단일 입출력 시스템으로 간주할 수 있고 따라서 기존의 단일 입출력 시스템에 대한 여러 제어기 설계 기법을 적용할 수 있다. 그러나 뉴테이션 댐퍼는 완전한 미분기 구현이 불가능하므로 뉴테이션을 완전히 제거하는 것이 아니라 그 크기를 감소시킬 뿐이며 미분 가능한 주파수 영역 이상에서는 미분 효과가 없어지는 문제점으로 인하여 두 축의 결합 특성이 나타나며 이로 인하여 전체 시스템의 동작 특성이 완전히 분리되지 못하므로 정밀한 모의실험을 위해서는 두 축을 동시에 고려하여 그 결과를 얻는 것이 바람직하다. 그러나 실제로 두 축의 결합현상이 나타나는 주파수 대역은 DTG의 사용 주파수보다 매우 높은 영역이므로 실제 DTG의 사용상에는 별다른 문제점이 없다.

2. 기존의 각속도 검출 방법

속도 모드 DTG에서는 정확한 외부 입력을 검출하기 위해서는 회전자와 회전각도를 선형동작 범위 내에서 유지하여야하며 이는 DTG의 동작 범위를 결정하는 주요인이 된다. 즉, 큰 외부 입력에 대해서는 회전자와 회전각도가 선형동작 범위를 벗어나게 되면 DTG는 기계적 시스템을 보호하기 위해 회전자와 회전을 멈추고 더 이상 작동하지 않게 되고 이를 장착한 응용 시스템의 동작도 정지하게 된다. 그러나 회전자와 회전각도를 작게 유지하

기 위해 재평형 루프의 이득을 어느 이상으로 높일 경우 전체 시스템의 위상여유가 줄어들게 되며 이는 출력부의 진동 현상으로 나타나게 된다. 기존의 PI제어 방법을 사용한 속도 검출 방법에서는 외부의 속도 입력이 DTG에 외란으로써 작용하고 재평형이 제대로 이루어 질 경우 정상상태에서 재평형루프의 토크 입력이 외란과 같아지는 원리를 이용하여 토크 입력단의 토크 코일 전류를 검출하고 이를 변환 상수로 승산하여 외부 속도 입력을 검출하게 된다. 따라서 재평형루프의 위상여유가 작아서 각도검출 부분이 진동할 경우 이는 토크 입력의 진동으로 연계되고 외부 입력 속도가 진동하는 것처럼 보일 수 있다. 이러한 이유로 기존의 제어 방법에서는 위상여유를 충분히 확보하여 안정된 동작을 하도록 하는데 이는 DTG의 재평형루프의 이득 제한의 주요인이 된다. 그림 3에는 기존의 PI제어 방법을 사용한 DTG의 속도 검출 블록도이다.

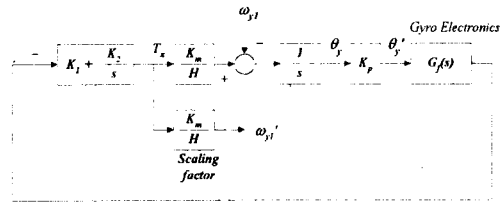


그림 3. 기존의 PI제어기를 사용한 각속도 검출 방식
Fig. 3. The conventional angular velocity pick-off method with PI controller.

그림 3에서 K_1 , K_2 는 비례 및 적분 제어 계수, $G_f(s)$ 는 DTG의 회전자와 회전각 변위를 전달함수로 얻기 위한 전자부의 등가모델로써 저역 통과 필터의 형태를 가지며 전체 시스템의 대역폭 제한의 주원인이 되며 본 연구에 사용된 구체적인 전달함수는 식 (11)과 같다. 식 (11)에서 보면 전자부는 약 50Hz의 대역폭의 가진 것을 알 수 있다.

$$G_f(s) = \frac{1}{1 + 2.494 \left(\frac{s}{100\pi} \right) + \left(\frac{s}{100\pi} \right)^2} \quad (11)$$

PI 제어기를 사용할 경우의 뉴테이션 감쇠제어기가 포함된 DTG의 y축의 외부 속도 입력에 대한 속도 검출 출력의 전달함수는 다음의 식 (12)로 주어진다.

$$\frac{\omega_{y1}'(s)}{\omega_{y1}(s)} = -\frac{K_m}{H} \left\{ \frac{\frac{K_p}{s} \left(\frac{K_1 s + K_2}{s} \right) G_f(s)}{1 + \frac{K_p K_m / H}{s} \left(\frac{K_1 s + K_2}{s} \right) G_f(s)} \right\} \quad (12)$$

여기에서 PI 제어계수의 의미를 살펴보기 위하여 사용주파수 영역에서는 $G_f(s)$ 를 1로 놓으면 식 (13)을 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} \frac{\omega_{y1}'(s)}{\omega_{y1}(s)} &= -\frac{K_m}{H} \left\{ \frac{K_1 K_p s + K_2 K_p}{s^2 + K_1 K_p \frac{K_m}{H} s + K_2 K_p \frac{K_m}{H}} \right\} \\ &= -\frac{(K_1 K_p \frac{K_m}{H} s + K_2 K_p \frac{K_m}{H})}{s^2 + K_1 K_p \frac{K_m}{H} s + K_2 K_p \frac{K_m}{H}} \\ &= -\frac{(2\xi\omega_n s + \omega_n^2)}{s^2 + 2\xi\omega_n s + \omega_n^2} \end{aligned} \quad (13)$$

여기서

$$\omega_n = \sqrt{\frac{K_p K_m K_2}{H}} \quad (14)$$

$$\xi = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{K_p K_m}{H K_2}} K_1 \quad (15)$$

이다.

식 (14)와 식 (15)를 사용하여 제어 변수값의 설계 값을 식 (16) 및 식 (17)과 같이 정할 수 있다. 즉 식 (16)을 사용하여 요구되었던 대역폭에 대한 조건을 사용하여 적분이득 K_2 를 결정하고 식 (17)을 사용하여 감쇠상수를 결정하면 비례이득 K_1 값을 결정할 수 있게 된다.

$$K_2 = \frac{H}{K_p K_m} \omega_n^2 \quad (16)$$

$$K_1 = 2\xi \sqrt{\frac{H K_2}{K_p K_m}} \quad (17)$$

또한 외부 속도 입력에 대한 회전자 회전각도 θ_y 에 대한 전달함수는 다음의 식 (18)과 같다.

$$\begin{aligned} \frac{\theta_y(s)}{\omega_{y1}(s)} &= -\frac{s}{s^2 + K_1 K_p \frac{K_m}{H} s + K_2 K_p \frac{K_m}{H}} \\ &= -\frac{s}{s^2 + 2\xi\omega_n s + \omega_n^2} \end{aligned} \quad (18)$$

이때 식 (13)과 식 (18)을 비교하여 보면 식 (13)에 의해 제어변수가 고정되면 식 (18)로 나타내어지는 회전자의 회전각도 또한 고정된다는 사실이다. 이는 후에 제안된 방법에서 유도된 수식과 비교될 것이다.

3. 제안된 각속도 검출 방법

제안된 각속도 검출방법을 사용한 DTG 시스템의 블록도를 그림 4에 나타내었다. 그림 4의 점선 부분이 본 논문에서 사용한 2자유도 제어 루프를 나타낸 것이다.

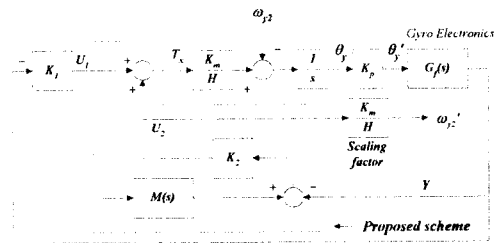


그림 4. 제안된 방법을 사용한 각속도 검출 방식

Fig. 4. The proposed angular velocity pick-off method.

그림 4에서 K_1 , K_2 는 모두 비례 제어를 나타낸다. $M(s)$ 를 결정하기 위하여 아래의 관계를 유도한다. 그림 5에서 입력 U_1 , U_2 와 외부 입력 ω_{y2} , 출력 Y 에 대한 관계는 식 (19), (20)과 같다.

$$Y(s) = \frac{K_p}{s} G_f(s) \left\{ \omega_{y2} + \frac{K_m}{H} (U_1(s) + U_2(s)) \right\} \quad (19)$$

$$U_2(s) = K_2 \{ M(s) U_1(s) - Y(s) \} \quad (20)$$

식 (19)과 식 (20)를 ω_{y2} 에 대해 정리하면 식 (21)과 같다.

$$\begin{aligned} \omega_{y2}(s) &= \frac{s}{K_p G_f(s)} \left\{ \left(\frac{K_p K_m / H}{s} G_f(s) - M(s) \right) U_1(s) \right. \\ &\quad \left. + \left(\frac{K_p K_m / H}{s} G_f(s) + \frac{1}{K_2} \right) U_2(s) \right\} \end{aligned} \quad (21)$$

여기에서 $M(s)$ 를 식 (22)와 같이 설정한다.

$$M(s) = \frac{K_p K_m / H}{s} G_f(s) \quad (22)$$

따라서 식 (22)를 식 (21)에 대입하여 U_2 에 대해

정리하면 식 (23)과 같다.

$$\frac{U_2(s)}{\omega_{y2}(s)} = \frac{K_2 K_p G(s)}{s + K_2 K_p K_m / H G_f(s)} \quad (23)$$

DTG의 사용 주파수영역에서 $G_f(s) \approx 1$ 임을 가정할 수 있으므로 결과적으로 식 (24)를 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} \frac{U_2(s)}{\omega_{y2}(s)} &= \frac{H}{K_m} \left(\frac{K_2 K_p K_m / H}{s + K_2 K_p K_m / H} \right) \\ &= \frac{H}{K_m} \left(\frac{1}{\tau s + 1} \right) \end{aligned} \quad (24)$$

여기서

$$\tau = \frac{1}{p_1} = \frac{1}{K_2 K_p K_m / H}$$

이다.

식 (24)에서 보면 동작 영역에서 외부 입력 ω_{y2} 가 U_2 를 통하여 토크 입력으로 변환됨을 알 수 있다. 즉, ω_{y2} 가 K_2 에 의해 차단주파수가 결정되는 저역통과 필터를 통과하여 U_2 에 나타나게 된다. 이 신호가 토크 입력에 포함됨으로 수렴 속도 τ 의 시간으로 외란으로써의 외부 입력을 상쇄시켜 회전자의 회전각도를 최소로 유지할 수 있다. 또한 U_2 제어 입력에 변환 상수를 증산함으로써 외부 입력을 검출할 수 있음을 의미한다. 따라서 시스템이 안정한 범위 내에서 이득을 최대화할 수 있으며 과도 상태에서 회전자의 최대 회전각도를 작게 만들 수 있고 이것은 DTG의 동작영역이 넓어짐을 의미한다. 최종적으로 제안된 방법의 외부입력에 대한 속도출력의 전달함수를 메이슨의 이득 공식을 사용하여 유도하면 다음의 식 (25)로 주어진다.

$$\begin{aligned} \frac{\omega_{y2}'(s)}{\omega_{y2}(s)} &= - \frac{\frac{K_2 K_p K_m / H}{s} \left(1 + \frac{K_1 K_p K_m / H}{s} \right)}{1 + \frac{K_1 K_p K_m / H}{s} + \frac{K_2 K_p K_m / H}{s} + K_1 K_2 \frac{(K_p K_m / H)^2}{s^2}} \\ &= - \frac{K_2 K_p K_m / H (s + K_1 K_p K_m / H)}{s^2 + K_p K_m / H (K_1 + K_2) s + K_1 K_2 (K_p K_m / H)^2} \\ &= - \frac{K_2 K_p K_m / H (s + K_1 K_p K_m / H)}{(s + K_1 K_p K_m / H) (s + K_2 K_p K_m / H)} \\ &= - \frac{K_2 K_p K_m / H}{s + K_2 K_p K_m / H} \\ &= - \frac{1}{\tau s + 1} \end{aligned} \quad (25)$$

식 (25)에 의하여 제안된 방법은 수렴 속도 τ 를 가

짐을 알 수 있고 수렴 속도는 제어 변수 K_2 를 조정함으로써 가변시킬 수 있음을 알 수 있다. 또한 이러한 결과는 앞에서 유도한 결과와 일치한다는 것을 알 수 있다.

외부 속도 입력에 대한 회전자의 회전각 θ_y 에 대한 전달함수는 식 (26)과 같다.

$$\begin{aligned} \frac{\theta_y(s)}{\omega_{y2}(s)} &= - \frac{s}{s^2 + (K_1 + K_2)(K_p K_m / H)s + K_1 K_2 (K_p K_m / H)^2} \\ &= - \frac{s}{(s + p_1)(s + p_2)} \end{aligned} \quad (26)$$

여기에서

$$p_2 = K_1 K_p K_m / H$$

를 나타낸다.

식 (25)과 식 (26)을 비교하여보면 제안된 방법은 외부 속도 검출 성능과 회전자의 회전각도에 대한 성능을 각각 독립적으로 설계 가능함을 알 수 있다. 즉 외부 속도 검출 성능은 K_2 에 의하여 그 수렴 속도를 조절할 수 있고 회전자의 회전각도는 K_1 에 의하여 조절이 가능하다. 앞에서 구한 식 (18)과 식 (26) 및 표 1 및 표 2의 회로변수 값을 사용하여 주파수 영역에서 그 크기를 나타내면 그림 5와 같다. 즉 제안된 방법에서의 외란에 대한 회전자의 회전각의 변위가 기존의 방법보다 우수한 특성을 가짐으로써 제안된 방법을 사용하면 회전자의 변위를 매우 줄일 수 있고 따라서 큰 외부 속도 입력에 의해 DTG가 케이지 모드로 전환되는 것을 방지할 수 있음을 알 수 있다. 이러한 결과는 DTG가 여러가지 다른 응용 시스템에 적용될 시 가장 문제점으로 지적되고있는 DTG의 케이지 모드시 시스템의 운용이 중단되는 단점을 보완할 수 있는 해결책이 될 수 있다.

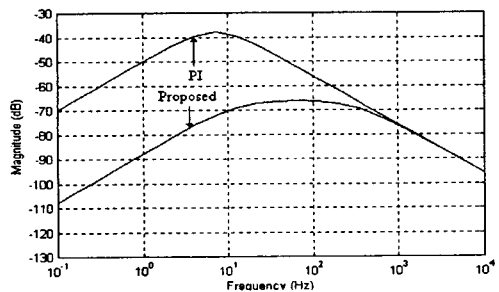


그림 5. ω_y 에 대한 θ_y 의 주파수영역 응답 특성 비교

Fig. 5. Comparison of frequency response of θ_y for ω_y .

4. 모의실험

위의 3장까지의 결과를 사용하여 모의실험을 실시하였다. 모의 실험에는 그림 6에 나타난 바와 같이 프랑스 SAGEM사의 DTG 및 전자부의 기계적 상수 및 회로 변수를 사용하였다.

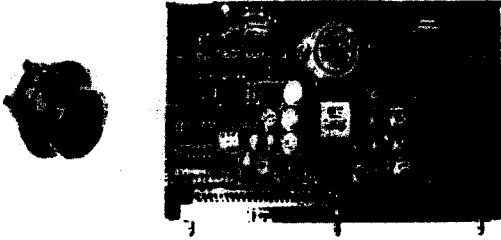


그림 6. DTG와 전자부(SAGEM GSL82-21, 20BM00)
Fig. 6. DTG and gyro electronics(SAGEM GSL82-21, 20BM00).

표 1에는 본 논문에서 사용한 DTG 및 전자부의 회로변수 정의 및 변수값을 나타내었다.

표 1. 회로변수 및 변수값.

Table 1. Various parameters and their value

변수	물리량	변수값
T_x, T_y	토크 코일에 의한 토크 입력	
ω_x, ω_y	외부 각속도 입력	
θ_x, θ_y	각검출부 출력	
H	각운동량	$8.42 \times 10^{-4} (\text{kg} \cdot \text{m}^2/\text{s})$
J	결합 관성	$2.44 \times 10^{-7} (\text{kg} \cdot \text{m}^2)$
K_m	토크 이득 상수	$6.4 \times 10^3 (\text{kg} \cdot \text{m}^2/\text{amp})$
K_p	검출부 이득 상수	$6.876 \times 10^2 (\text{volt}/\text{rad}/\text{s})$

표 2에는 본 연구에서 사용된 제어기의 제어 변수값을 나타내었다.

표 2. 제어기의 제어 변수값.

Table 2. Parameters of controller.

	K_1	K_2
기존의 PI제어시 계수	0.015	0.38
제안된 방법의 계수	0.8	0.01

그림 7은 기존의 PI제어 방법과 제안된 방법을 사용하였을 경우의 단위 계단 과형 형태의 외부 각속도 입력에 대한 각속도 출력 및 회전자의 회전각의 변화폭

을 모의실험한 결과이다. 그림 에서 보는 바와 같이 제안된 방법은 약 0.05초내에 수렴하지만 기존의 방법은 0.1초정도의 수렴시간을 가지며 회전자의 회전각도 또한 제안된 방법이 더 작은 변위를 보이는 것을 알 수 있다.

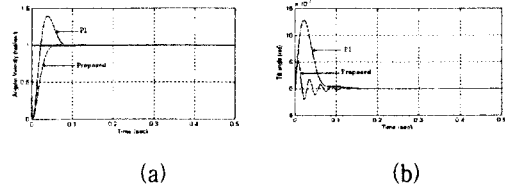


그림 7. 계단입력 응답 (a) 속도입력에 대한 속도출력 (b) 회전자의 회전각

Fig. 7. Step response. (a) Velocity output for velocity input. (b) Tilt angle of rotor.

그림 8은 정현파 입력에 대한 응답특성을 나타내었다. 그림 8의 (a), (b), (c)는 1Hz의 정현파입력에 대한 모의실험결과이며 (d), (e), (f)는 5Hz의 입력신호에 대한 응답결과이다.

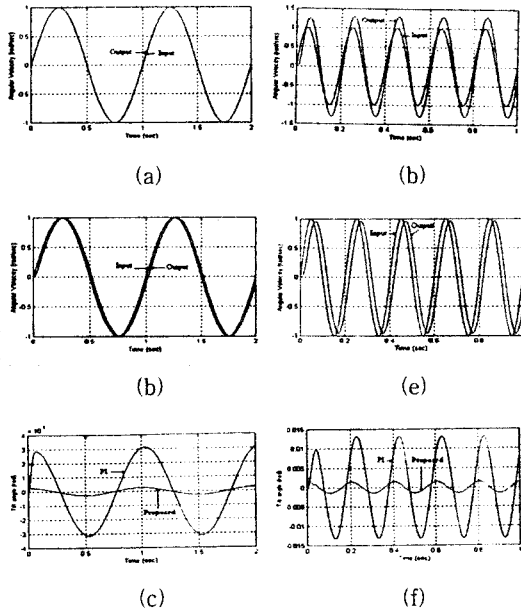


그림 8. 정현파 응답 (a) PI (b) 제안된 방법 (c) 회전자의 회전각 (d) PI (e) 제안된 방법 (f) 회전자의 회전각

Fig. 8. Sine wave response.

(a) PI (b) The proposed. (c) Tilt angle of rotor. (d) PI (e) The proposed. (f) Tilt angle of rotor.

그림 8의 (a), (b), (c)에서 보는 바와 같이 1Hz 정현파 입력에 대한 출력의 특성에서는 명령 추종 성능에서는 기존의 방법이 약간 우수하지만 회전각의 변위는 제안된 방법이 기존의 방법보다 매우 우수하며 (d), (e), (f)에서 보는 바와 같이 5Hz 신호에 대해서도 제안된 방법이 전반적으로 우수한 특성을 보인다.

그림 9에는 2Hz 구형파 입력에 대한 응답을 나타내었다. PI 제어기의 경우는 토크 입력이 외부 속도 입력에 비례하므로 재평형이 이루어 졌을 경우 외부 속도 입력과 토크 입력이 비례하는 원리를 이용하여 토크 입력에 변환 인자를 곱하여 속도 출력을 얻게 된다. 따라서 그림 9 (a)에서 볼 수 있듯이 빠른 회전자의 회전각도 복원을 위해서 오버슈트가 발생한다. 그러나 그림 9 (b)의 제안된 방법은 기존의 제어기와는 다른 검출 방법을 가짐으로써 오버슈트가 없이 외부 입력을 검출할 수 있다. 그림 9 (c)는 회전자의 회전각을 나타내었다. PI 제어기의 경우 초기 1rad/sec의 외부 속도 입력에 대해 회전자의 최대 회전각이 25mrad인 반면 제안된 방법은 약간의 진동이 있지만 회전자의 최대 회전각이 10mrad에 불과하며 PI 제어기 보다 빨리 회전자가 복원됨을 알 수 있다. 따라서 PI 제어기 보다 훨씬 큰 외부 속도 입력에 대해서도 회전자의 회전각이 선형 동작 범위 내에 있게 되어 DTG의 동작범위를 넓히는 것이 가능함을 알 수 있다.

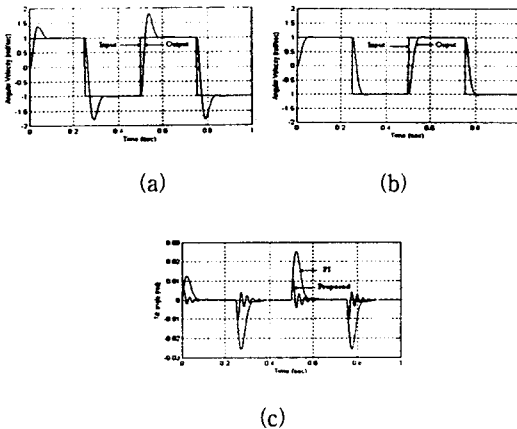


그림 9. 구형파 응답(2Hz)

(a) PI (b) 제안된 방법 (c) 회전자의 회전각

Fig.10. Square wave response(2Hz).

(a) PI. (b) The proposed. (c) Tilt angle of rotor.

III. 결론

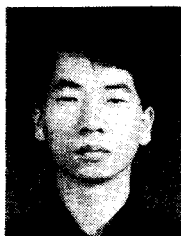
본 논문에서는 속도 모드 DTG의 새로운 각속도 검출 방법을 제시하였다. 이를 위하여 우선 DTG의 일반적인 전달 특성 및 물리적 특성을 소개하고 기존의 각속도 검출 방법의 문제점을 알아보았다. 제안된 각속도 검출 방법은 자이로스코프의 수학적 모델을 사용하여 재평형루프를 설계하였으며 모의 실험을 통해 기존의 PI제어 방법과 비교하여 제안된 방법의 속도 검출 특성이 향상됨을 보였다. 제안된 방법은 기존의 각속도 검출 체계와는 다른 외부 속도 입력 검출 체계를 가짐으로써 오버슈트가 없는 속도 출력을 얻을 수 있으며 또 같은 크기의 외부 속도 입력에 대해서 기존의 방법에 비해 훨씬 작은 회전자의 회전각을 유지하게 되어 보다 큰 외부 속도 입력에 대해서도 회전자가 선형 동작 범위 내에 유지됨으로 자유 자이로스코프의 기구적인 설계 변경없이도 넓은 동작범위를 확보할 수 있음을 보였다. 이러한 결과는 자이로스코프의 기계적 특성이 비록 그다지 우수하지않더라도 기존의 방법보다는 더 넓은 동작영역을 확보하게 되는 결과를 얻을 수 있음과 동시에 우수한 기계적 특성을 지닌 자이로스코프의 경우에는 매우 넓은 사용 동작영역을 확보하게 하는 것으로써 동조 자이로스코프의 최대단점인 케이지 현상을 극복하는 효과적인 방법으로 사료된다. 향후 실제적 가치를 확인하기 위하여 진동 테이블 및 초정밀 각속도 센서를 확보하여 실험을 실시함으로써 제안된 방법의 실제적 유용성을 확인하여야 할 것이다.

참고문헌

- [1] 임성운, 마진석, 권우현, "EOTS에서의 동조자이로스코프의 동작모드에 따른 특성비교," 제어·자동화·시스템 공학회 논문지, Vol. 3, No. 3, pp. 311-317, 6. 1997.
- [2] 임성운, "동조자이로스코프의 해석 및 응용," 센서학회지, 제5권, 제4호, pp. 47-56, 7. 1996.
- [3] 윤석영, 임성운, 권우현, "동조자이로스코프의 재평형 제어루프 설계," 전자기술연구지, 경북대 공대, Vol. 17-2, pp. 22-29, 1996.
- [4] 이장규, 강태삼, "입력보상기를 이용한 동조자이로스코프 성능 개선," 제1차 유도무기 유도조종 학술대회, pp. 1-34, 8. 1991.

- [5] 송진우, 이장규, 강태삼, 김진원, "동조자이로를 위한 디지털 재평형루프 설계," 제7차 유도무기 학술대회 논문집, pp. 149-153, 9. 1997.
- [6] Robert J. G. Craig, "Theory of Operation of an Elastically Supported, Tuned Gyroscope," *IEEE Trans. on Aerospace and Electronic Systems*, Vol. AES-8, No. 3, pp. 280-288, May, 1972.
- [7] Robert J. G. Craig, "Theory of Errors of a Multigimbal, Elastically Supported, Tuned Gyroscope," *IEEE Trans. on Aerospace and Electronic Systems*, Vol. AES-8, No. 3, pp. 289-297, May, 1972.
- [8] Robert J. G. Craig, "Theory of Operation of a Two-Axis-Rate Gyro," *IEEE Trans. on Aerospace and Electronic Systems*, Vol. 26, No. 5, pp. 722-731, September, 1990.

著 者 紹 介



마진석(馬鎮碩)

1971년 6월 26일생. 1995년 경북대학교 전자공학과 공학사 학위취득. 1997년 경북대학교 대학원 전자공학과 공학석사 학위취득. 1997년 ~ 동대학원 박사과정 재학중. 주관심 분야: 시선 안정화

시스템, 서보제어, 전력전자.



임성운(任成雲)

1964년 10월 24일생. 1987년 경북대학교 전자공학과 공학사 학위취득. 1995년 경북대학교 대학원 전자공학과 공학박사 학위취득. 1995년 ~ 현재 경일대학교 제어계측공학과 조교수. 주관심 분야: 센서

시스템 해석 및 응용.



이광일(李光一)

1971년 6월 30일생. 1997년 경북대학교 전자공학과 공학사 학위취득. 1997년 ~ 현재 동대학원 석사과정 재학중. 주관심 분야: 서보제어, 센서 응용 시스템



변승완(邊承完)

1956년 3월 11일생. 1979년 서울대학교 기계공학과 공학사 학위취득. 1981년 한국과학기술원 생산공학과 공학석사 학위취득. 1988년 한국과학기술원 기계공학과 공학박사 학위취득. 1979년 ~ 현재 삼성

전자 전략시스템 개발 1그룹 수석연구원. 주관심 분야: 시선안정화 시스템, 서보제어 및 기구체 설계.



김우현(金佑鉉)

1969년 3월 14일생. 1994년 경북대학교 전자공학과 공학사 학위취득. 1996년 경북대학교 대학원 전자공학과 공학석사 학위취득. 1996년 ~ 동대학원 박사과정 재학중. 주관심 분야: 센서응용시스템, 전력전자.

천호정(千昊廷)

1963년 10월 20일생. 1988년 전북대학교 대학원 전자공학과 공학석사학위취득. 1993년 ~ 현재 삼성전자 전략시스템 개발 1그룹 선임연구원. 주관심 분야: 시선안정화 시스템, 서보제어 및 기구체 설계.

권우현(權宇鉉)

『센서학회지 제2권 제2호』 논문93-2-2-05, p.31, 참조. 현재 경북대학교 전자·전기공학부 교수