자이로 원리를 응용한 관성센서에 의한 비행체의 안정성 향상

정 인 성 · 이 기 형

A Stability Improvement of Spacecraft by Inertial Sensor Using Gyro Principle

In-Sung Chung · Kee-Hyung Lee

● 정인성(전북대 기계공학과)
● 1939년생
● 기계설계를 전공하였으며, 베어링 설계 및 접촉기구 구명에 관심을 가지고 있다.

● 이기형(전북대 기계공학과)
● 1961년생
● 기계설계를 전공하였으며, 회전체 진동 및 기구설계에 관심을 가지고 있다.

1. 머리말

원격 조정식 비익체(이하 RPV : Remoteloted Vehicle)의 안정성을 향상시키고 조정을 간략화하기 위하여 사용되고있는 관성센서에 관해서 알아본다.

관성센서의 기본 원리는 뉴톤의 운동 제3법칙인 관성의 법칙이고, 특징은 외부 측정 기준을 필요로 하지 않은 점에 있으므로, 관성센서를 탑재한 RPV는 공중에서 운동 상태를 외부의 정보 없이 검토할 수 있다.[1]

실제적으로 기계용으로 실용화되고 있는 센서는 관성항법장치(INS : Inertial Navigation System)라고 불리워지는 매우 고급 자립형 장치로부터 자이로 컴파스로 불리워지는 방위 자이로와 자기 방위 센서를 조합한 방법까지 여러가지가 있지만, 여기에서는 산업용 소형 RPV의 크기, 가격 및 입수성에서 이용이 가능하다고 생각되는 센서를 중심으로 원리, 종류 및 응용예를 설명한다.

2. 자이로의 종류와 원리

자이로(자이로 스코프)라는 말은 정확하게 정의가 되지 않은 상태로 사용되고 있는 것 같다. 일반적으로는 회전을 의미하며, 회전을 의미하는 자이로와 '보다'를 의미하는 스코프가 복합된 말로서, '지구의 회전을 보는 물건'으로부터 파생했다고 한다. 그러나 물체의 회전을 검출하는 것에는 무엇보다도 회전체가 필요하고, 여러가지 물리현상이 응용되며 자이로(자이로 스코프)에도 여러가지 형식이 존재한다.[1]

본 절에서는 실용화되고 있는 세차(Precession)를 이용한 회전식 자이로와 코리올리힘을 이용한 진동식 자이로를 중심으로 종류와 원리의 개략을 조사해보기로 한다. 최근에는 새그낵(Sagnac)효과를 이용한 광학식 자이로가 실용화되고 있으나 아직은 가

격, 크기 및 환경에 견디는 성질(내환경성) 면에서 RPV용으로서 실용화가 충분하다고 말하기는 어렵지만, 여기서는 그 원리에 대하여 알아보기로 하자.

2.1 2축 자유도 자이로

자이로의 기본적 성질을 이해하기 위해서 2축 자유도 자이로에 관해서 설명한다. 자이로 스코프(자이로)는 스핀축이라고 불리워지는 축을 중심으로 고속회전하고 있는 로터를 스핀축 이외의 축에서 회전 자재로 지지하는 것처럼 구성된다.

그림 1에 나타낸 것처럼, 직교하는 2축 주위에 회전 자재로 지지되어 있는 형식의 자이로를 2축 자유도 자이로라고 부른다.

이와 같이 2개의 2축 주위에 마찰과 불균형 등에 의한 교란 토크 없이 지지된 로터를 가지고 있는 자이로를 자유 자이로라고 부르고 다음에 조사하는 2개의 특성을 가지고 있다.

2.1.1 방향 보지성

방향 보지성이라고 하는 것은 자이로의 스핀 축에 외부로부터 토크를 가하지 않는 한 일정방향을 유지하려고 하는 성질을 말한다.

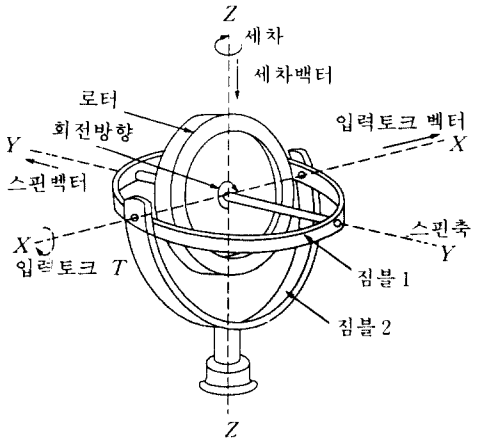


그림 1 2축 자유도 자이로

반면에 이와 같은 성질을 가진 자유 자이로의 스핀축을 태양을 향해서 기동한 후, 스핀축의 방향을 지구 위에서 관찰하면, 스핀축은 태양을 가리키지만 지표에 대해서는 기울어져 있는 것과 같이 보인다.

따라서 지구의 자전에 따라 지표는 공간에 대해서 선회하지만, 자이로는 방향 보지성에 따라 공간의 일정 방향을 계속 가리키므로, 관찰자에게는 자이로의 스핀축이 경사져 있는 것과 같이 보인다. 이와 같이 자이로를 이용해서 지구의 자전을 알 수 있다.

방향 보지력의 크기를 나타내는 로터의 각운동량에 관해서 설명되어 있다. 각운동량 H(dyne cm sec)는 식 (1)로 나타난다.

$$H = I\omega \tag{1}$$

여기서, I는 스핀축 주위의 로터의 관성 모멘트, ω(rad/sec)는 로터 회전 각속도이다.

로터의 반경을 r(cm), 두께를 t(cm), 재료 밀도를 ρ(gr/cm^3)로 하면, 관성 모멘트 I는 식 (2)로 된다.

$$I = \pi\rho t r^4/2 \tag{2}$$

따라서 방향 보지력 및 각운동량을 2배로 하면 로터의 회전수가 2배로 되므로 로터의 직경을 1.189배(로터질량은 1.414배로 됨)로 하면 좋다.

2.1.2 세차

다음으로 세차에 관해서 설명한다. 그림 1에 나타낸 것과 같이 각운동량 H로 회전하고 있는 로터에 관해서, X축 주위에 입력토크 T(dyne cm)를 주면(스핀축 Y_b측의 짐복(Gimball)1을 아래 방향으로 누름) 스핀축은 X축 주위로 기울어지지 않고 Z축 주위로 회전을 시작한다.

회전 방향은 Z축을 위에서 볼 때 우측 방향이고, 회전 속도는 가해진 토크에 비례한다. 이와 같이 자이로에 외부로부터 토크를 가하면, 스핀축은 힘의 방향과 90° 다른 방

향으로 회전한다고 하는 특성을 세차라고 한다.

세차 각속도 P(rad/sec)와 입력 토크 T 및 각운동량 H의 관계식은 식 (3)으로 나타낸다.

$$P = T/H \tag{3}$$

즉 세차 각속도는 입력 토크 T에 비례하고, 각운동량 H에 반비례한다. 따라서 H가 큰 만큼 같은 크기 T에 대한 P가 작다. 바꾸어 말하면, 방향 보지력이 큰 것이다.

이상과 같이 2축 자이로는 자이로의 특징은 잘 나타내고 있고, 기기로서 옛날부터 실용화되고 있다.

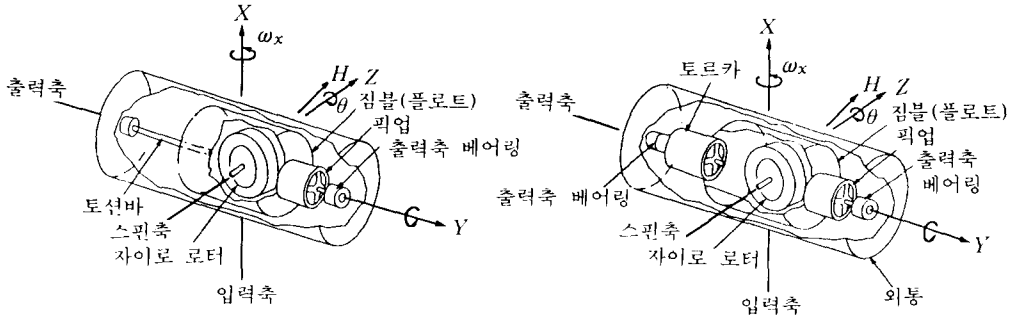
2축 자유도 자이로는 사용법에 있어서 세 가지의 형식이 있다. 제1형식은 자유 자이로이고, 스핀축을 임의의 방향으로 설정하며, 스핀축에 대한 기체의 운동을 지지축(X, Y 축)에 갖춘 편각 검출기에 따라 출력하도록 구성되어 있다. 다른 형식은 지지축 주위에 제어 토크를 주는 것에 따르고, 스핀축을 어떤 방향으로 구속하려고 하는 것이며, 스핀축을 수직으로 설정해서 기체의 수평면으로부터의 경사를 계측하는 것을 수직 자이로, 스핀축을 수평으로 설정해서 기체의 수직축 주위의 선회각(방위)을 계측하는 것을 방위 자위로라고 부른다.

다음으로 2축 자유도 자이로의 양력에 관해서 알아본다. 자이로의 방향 보지성은 외부로부터 토크를 가한다고 하는 조건에서 이루어진 것이고, 기기로서 구성된 경우에는 지지축으로 사용하고 있는 베어링과 로터를 돌리기 위한 모터용 전노의 마찰 토크, 더 나아가 짐볼기구의 불균형 토크 등의 교란 토크가 작용하고 양력을 발생시키는 것이며, 보지해야 하는 방향으로부터 떨어져 있다. 이 떨어져 있는 속도를 양력비라고 부르고, 자이로의 성능을 표시하는 기본적 수치이다.[5]

식 (3)에 있어서 T를 교란 토크로 하면, P에 의해서 양력비가 주어진다. 단순히 생각한다면, 양력비율 $10/h$ 자이로는 1시간당 1° 각도가 떨어진 것이 된다. 이 종류의 자이로는 일반적으로 항공기의 자세 기준에 사용되어지고 있다.

2.2 1축 자유도 자이로

스핀축 외에는 다만 한 개의 제어축(출력축)을 가지고 있고, 이 출력축과 스핀축의 양방향에 직각인 축(입력축)의 주위의 가속도 또는 선회각을 외통에 대한 짐볼의 출력축 주위의 편각으로서 출력하는 형식의 자이로를 1축 자유도 자이로라고 부르며, 그림 2에 구조를 나타냈다. 자이로 로터를 내장하는 짐볼을 스핀축과 직교하는 출력축 베어링



(a) 레이트 자이로　　(b) 레이트 적분 자이로

그림 2 1축 자유도 자이로

에 의해서 외통내에 지지한다. 외통에 대한 짐볼의 출력축 주위의 회전각을 픽업이 검출하여 출력시킨다.

고정밀도형의 경우에는 댐핑을 부여하거나, 짐볼을 뜨게 해서 베어링 마찰을 감소시키기 위하여 외통과 짐볼 사이에 오일을 충진한 것도 있다. 픽업 대신에 짐볼에 지침을 설정하고, 편각 출력을 직접 눈금판 등에 지시하는 선회계 같은 것도 있다. 이 경우에 댐핑 기구로서 대쉬포트 같은 댐퍼가 사용되고 있다.

짐볼의 외통에 대해서 출력축 주위의 편각을 θ로 하면, θ에 관한 근사점 특성식은 식 (4)로 표현된다.

$$I_y\ddot{\theta}+C\dot{\theta}+K\theta=H\omega_x+I_y\omega_y+T_y \quad (4)$$

여기서, I_y는 짐볼의 출력축 주위의 관성 모멘트 C는 외통과 짐볼과의 사이의 점성 저항 계수, K는 출력축 주위의 스프링 상수, H는 자이로 로터의 각운동량, ω_x는 외통 입력 축 주위의 각가속도 즉, 자이로 방향으로의 입력, ω_y는 외통 출력 주위의 각가속도, T_y는 출력축 베어링의 마찰과 짐볼의 불균형 등에 의한 교란 토크이다.

좌변은 짐볼의 출력축 주위에 대한 자유진동을 의미하고, 우변은 이 진동계 방향으로의 토크 입력을 의미하고 있다. 우변 제1항이 1축 자유도 자이로 방향으로의 입력 각가속도로부터 생기는 세차 토크를 나타내고 있고, 이 토크가 짐볼에 편각 θ를 출력시킨다.

우변 제2항은 출력축 주위의 회전 운동이 외통에 가해지는 경우, 짐볼이 각가속도계로서 작용하여 오차 신호를 발생하는 것을 나타내고 있다. 우변 제3항은 교란 토크이고, 출력 신호에 옵셋과 볼감대를 발생시키며, 양력의 원인이 된다.

1축 자유도 자이로의 양력은 T_y/H로 나타난다. 1축 자유도 자이로는, 스프링 상수 K와 점성 저항 계수 C를 적당히 설정하는 것에 의하여 각속도를 검출하는 레이트(rate)자이로로서의 성질을 갖기도 하고, 회전각을 검출하는 레이트(rate)접근 자이로로서의 성질을 갖게 할 수도 있다.

2.2.1 레이트(rate)자이로

1축 자유도 자이로의 응용의 하나로서 레이트자이로가 있고, 이것은 주로 항공기의 선회속도의 검출과 안정성 증강 장치(sas : stability augumentation system)의 센서, 수평 안정대의 센서로서 사용되고 있다.[6] 자이로의 기본 구조는 그림 2에 나타난 것과 같이 짐볼을 외통에 대해서 탄성적으로 구속하는 스프링(토션바)를 갖고 있다.

댐핑 기구로서는 전술했던 것과 같이 짐볼을 오일 속에 뜨게 한 혼식형, 대쉬포트와 전자 댐퍼를 설치한 건식형 등이 있다. 근년에 RC막형용으로서 판매되고 있는 간이 레이트자이로는 특별한 댐핑기구를 사용하지 않고 출력축의 마찰을 이용해서 댐핑효과를 갖게 하고 있다. 그러나 이 방식에서는 이력(Hysterisis)이 크게 되기 쉽고, 제로점(bias)의 재연성이 나쁘게 된다는 결점이 있다.

토션바에 스프링 상수 K와 짐볼의 관성모멘트 I_y로 결정하는 공진 주파수는 보통 30 Hz 이상의 높은 값으로 설계되어 있고, 이 값 이하의 주파수 영역에서는 식 (4)에서 좌변의 $I_y\ddot{\theta}$의 항 및 $C\dot{\theta}$의 항은 어느 것이나 토션바의 토크에 비교해서 생략하는 것이 가능하며, 입력 각속도 ω_x에 대해서 다음 식을 얻을 수 있다.

$$\theta=H\omega_x/K \quad (5)$$

즉 자이로는 짐볼의 출력축 주위의 편각 θ가 입력축 주위에 가해지고 있는 각속도에 비례하는 장치라고 할 수 있다.

2.2.2 레이트 적분 자이로

레이트 적분 자이로의 기본 구조는 레이트

자이로와 유사하지만, 고 정밀도와 때문에 여러가지 연구가 수행되고 있으며, 용도는 고급스런 레이트 자이로를 비롯하여 시스템화 하기에 따라 관성 항법 장치, 로켓 유도, 정밀 자이로 콤파스 등 광범위하게 사용된다.

레이트 자이로와의 차이는 토션바 등의 스프링 토크를 감소시키고, 대신에 점성 토크의 항을 크게 하고 있다. 또한 출력축 주위에 제어 토크를 가하기 위한 토르카를 갖추고 있다. 식 (4)의 $K\theta$항을 0으로 하고, 단순화하면 다음식을 얻을 수 있다.

$$I_y\ddot{\theta}+C\dot{\theta}=H\omega_x \tag{6}$$

양변을 시간으로 적분하면 다음식이 된다.

$$I_y\dot{\theta}+C\theta=H\int\omega_x\,dt \tag{7}$$

$$\tau\dot{\theta}+\theta=\frac{H}{C}\int\omega_x\,dt \tag{8}$$

다만

$$\tau=I_y/C \tag{9}$$

I_y에 비해서 C를 충분히 크게 설정하는 것에 따라서 시정수 τ를 작게 하면, 편각 θ는 입력 축 주위의 각속도 ω_x의 적분에 비례하게 된다. 이러한 방법으로 레이트 자이로를 구성하면, 분해능은 0.001°/s 이하로 되는 것이 가능하게 된다. 고급스런 1축 자유도 레이트 적분 자이로의 양력 비율은 0.001°/h의 크기이다.

2.3 진동 자이로

회전체(로터)가 없는 각속도 센서로서 진동 자이로를 채용하는 것으로 한다.[2] 회전체(로터)가 없는 레이트 자이로로서는 그 외에도 가스 레이트 자이로가 있으며, 코리올리힘을 검출 원리로 하고 있다. 이들 자이로는 회전체를 사용하지 않기 때문에 수명이 길고 기동시간이 짧다는 특징을 가지고 있지만, 일반적으로 온도에 의한 양력이 크다고 하는 결점이 있다. 그러나 최근의 제품에서는 여러가지 개량이 계속되어서, 동경 계기의 진동 자이로 TFG160과 같이 RPV의 자세 제어용으로 시판되고 있는 것이 나타나게 되었다.

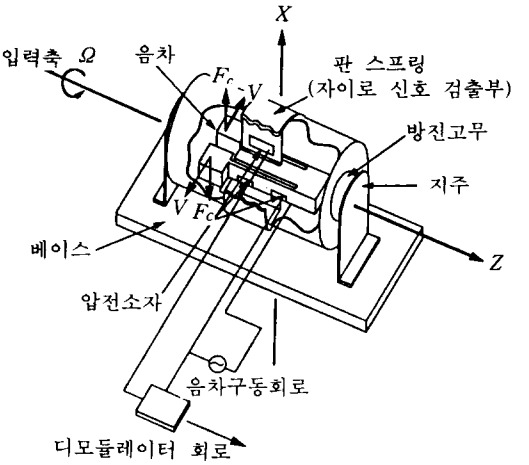


그림 3 진동 자이로 구성

여기서는 TFG160에 채용되고 있는 음차(音叉) 진동 자이로의 원리에 관해서 설명하고, 그림 3에 구성을 나타냈다.[2] 각속도를 검출하는 센서부는 압전 소자에 따라 음차부와 음차에 걸리는 코리올리힘을 받아서 전기신호를 힘으로 변환하는 압전소자를 붙인 판 스프링에 의해 구성되어 있다. 주변 회로로서 음차 구동 회로(디모듈레이터)가 있다. 이와 같이 구성된 진동 자이로가 Z축 주위에 있는 각속도 Ω로 선회하고, 진동하고 있는 음차에 영향을 주며, 코리올리힘 F_c에 따라 판 스프링에 굽힘 모멘트가 작용하여, 판 스프링에 굽힘이 발생한다. 이 휨 각은 입력 각속도에 비례한다. 판 스프링에 붙은 압력 소자가 발생하는 전압은 휨 각에 비례하기 때문에, 이 발생 전압은 검출하는 것에 따라 입력 각속도를 알 수가 있다.[3]

이 발생 전압은 음차의 진동수로서 변조되어지기 때문에, 디모듈레이터 회로에 의해 동기 정류를 하고, 입력 각속도의 크기와 방향을 직류 전압으로 변환해서 출력한다. 진

동 자이로의 특성식을 간단하게 적용하는 것으로 한다.

그림 4에 음차부를 모델화한 것을 나타낸다. 선단에 질량 M을 갖고 있는 진동자를 갖춘 음차를 토션바에 의해 지지한 계를 고려한다. 음차는 X축 방향의 진폭 ΔR로 진동하고 있고, Z축방향에 각속도 Ω가 입력되는 것으로 한다. 이때 발생하는 코리올리힘 F_c는 서로 반대 방향에 있기 때문에, 토션바에는 비틀림 토크 T가 작용한다.

이 토크에 의해 센서부의 비틀림 진동부에 발생하는 운동은 다음 식으로 나타낸다.

$$I\ddot{\theta}+C\dot{\theta}+K\theta=T \tag{10}$$

$$T=-2MR\ \Delta R\ \omega\Omega\cos\omega t \tag{11}$$

여기서, C는 감쇠 계수, I는 음차의 Z축 주위의 관성 모멘트, K는 토션바의 스프링 정수, R는 음차 진동자의 중립 위치에 있어서 팔의 길이, θ는 토션바의 비틀림 각, ω는 음차의 진동 각속도이며, 이것에 의하여 다음식을 얻는다.

$$\theta=A\Omega\sin(\omega t+\phi)/B \tag{12}$$

식 (12)에서 A와 B는 아래와 같다.

$$A=-2MR\ \Delta R\ \omega \tag{13}$$

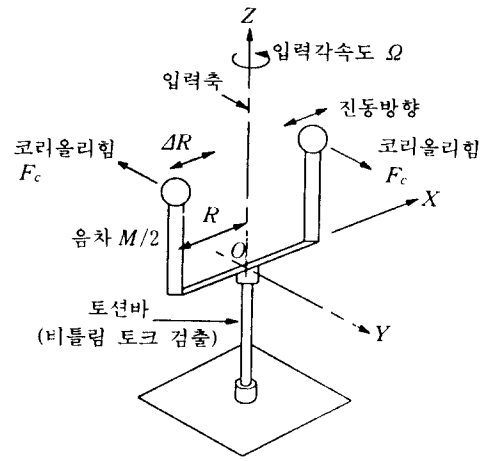


그림 4 음차 모델

$$B=\{(K-\omega^2 I)^2+C^2\omega^2\}^{\frac{1}{2}} \tag{14}$$

비틀림 각 θ는 음차의 진동 주파수($\omega/2\pi$)에 의하여 변조되어져 있지만, 입력 각속도 Ω에 비례하고 있다.

진동 자이로의 분해능은 회전식 레이트 자이로에 필적할 만하고, 이력이 없으며 선형성이 우수하고, 출력으로부터 편중을 제거한 후에 적분하여 회전각을 구하는 용도에서 레이트 자이로보다 우수하여 일부는 레이트 적분 자이로의 대용으로 사용되는 것도 있다.

2.4 광학식 자이로

빛을 이용한 자이로는 링 레이저 자이로의 방식과 수동 간섭계의 방식으로 분류할 수 있다. 기본 원리는 두 방식에 공통되고, 새그낵(sagnac)효과를 이용하고 있다. 여기에서는 그림 5에 나타난 새그낵 간섭계의 원리에 관해서 설명하고, 단순화를 위하여 광로 굴절률은 1로 생각할 수 있다. 환상 광로가 그것을 포함한 내면에서 각속도 ω로 회전하고 있는 경우, A점으로부터 입사한 시계방향 및 반시계 방향회전의 두 개 빛이 광로상을 1회전하는데 필요한 시간차 Δt는 다음식으로 표현된다.

$$\begin{aligned}\Delta t &= t_{cw}-t_{ccw}\\ &=4\pi R^2\omega/(C^2-R^2\omega^2)\\ &=4S\omega/C^2\end{aligned} \tag{15}$$

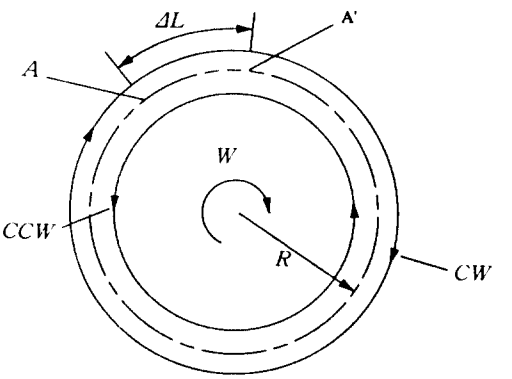


그림 5 새그낵 간섭계

여기서, C는 광속이고 $C>>R\omega$이고, S는 환상 광로가 둘러싼 면적이 된다. 먼저 기술한 전반 시간의 차 Δt는 식 (16)의 광로차를 발생하는 것이 된다.

$$\Delta L = C\ \Delta t = 4S\omega/C \tag{16}$$

2.4.1 링 레이저 자이로(RLG)

RLG의 개념을 그림 6에 나타냈다. 광로 레이저 매질은 He-Ne으로 발진 파장 0.6328 m와 1.15 m의 두 종류가 실용화되고 있다. RLG의 각속도 검출은 앞의 식 ΔL로 나타나는 광로차에 따라서 발진 주파수의 차를 피드(feed) 주파수로서 검출함에 따라 달성된다. 입력 각속도 ω와 출력 주파수 관계는 다음식으로 주어진다.

$$\Delta f = 4S\omega/\lambda L \tag{17}$$

여기서, λ는 발진 파장, L은 레이저 관의 광로 길이이다. 즉 RLG는 출력에 피드 주파수를 측정하는 것으로써 각속도가 얻어지고, 피드수를 카운터함으로써 회전각을 얻을 수가 있다. 현재는 광로 길이가 30 cm 정도로 0.001°/hour 정도의 성능이 달성되어 있고, 보잉 B767 등의 여객기의 관성 항법 장치(INS)에 사용되어지고 있다.

2.4.2 광섬유 자이로

현재 세계 각국에서 연구 개발되고 있는 것으로서, 그 개념을 그림 7에 나타냈고, 원리는 전술한 새그낵간섭계이다. 시계방향과 반시계방향의 빛 사이에 발생하는 위상차는 전술의 광로차 ΔL로부터 식 (18)로 되고, 길이가 긴 모드 광섬유를 복수로 삼아서, 로프 상태로 감음에 따라서 감도를 향상시키고 있다.

$$\Delta\theta = 4KS\omega/C \tag{18}$$

(K : 주파수$=2\pi/\lambda$)

감은수를 A, 권수를 n, 길이를 l로 하면

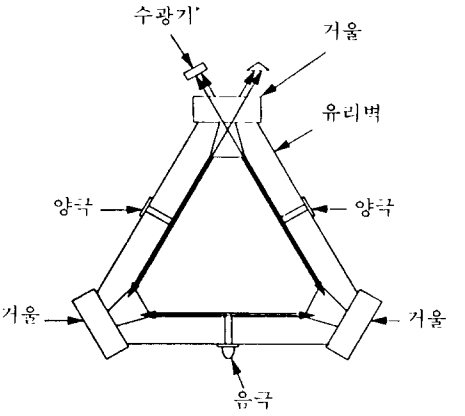


그림 6 링 레이저 자이로

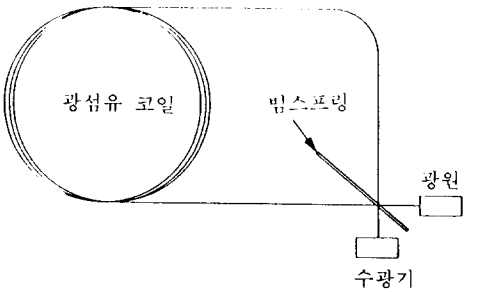


그림 7 광섬유 자이로

다음식이 얻어진다.

$$\Delta\theta = 4KSN\omega/C = 4\pi LR\omega/C\lambda \tag{19}$$

현재 광섬유 자이로는 환경에 강한 내환경성 면에서 문제가 있고, 실용화까지는 시간을 조금 필요로 한다.

2.5 3축 자이로

기체의 자세(roll, pitch)각, 방위(yaw)각을 일정하게 유지하기 위하여 이들의 각도를 검출하는 센서가 필요하게 된다. 종래 이들의 센서로서 자세각의 검출에는 수직 자이로(수평의, 연직 자이로라고도 불림), 방위각의 검출에는 방위 자이로라고 하는 3축 자유도 자이로가 사용되어 왔다. 그러나 근년에

CPU(계산기용 소자)가 발달함에 따라서 스트랩 다운(strap down)방식이라고 불리워지는 시스템 구성이 가능하게 되었고, 센서부가 간단화·소형화되어 왔으며, 그 결과 3축 자이로라고 부르는 장치가 개발되어 왔다. 3축 자이로라고 하는 명칭에 관해서는 정식 정의는 없지만, 일반적으로는 다음 여섯 종류의 검출량을 출력하는 자이로 장치로 생각되어 진다.

(1) 롤(roll) 각속도 신호
(2) 피치(pitch) 각속도 신호
(3) 요(yaw)각속도 신호
(4) 롤 경사각 신호
(5) 피치 경사각 신호
(6) 기수 방위 신호

(1)~(3)에 관해서는 레이트 자이로를 세 개, (4)~(5)에 관해서는 수직 자이로, (6)에 관해서는 방위 자이로를 사용하고 있는 것에 해당한다. 즉, 3축 자이로를 사용함에 따라, 한 대로 다섯 대 분의 기능을 하는 것이 된다.

TMOS(Tokyo Keiki Multi Output Sensor)는 3축 자이로로서의 기능 외에 기체에서 발생하고 있는 전후/좌우/상하 3방향의 가속도를 검출하는 것이 가능하다. 이 가속도 신호를 사용함에 의해 헬리콥터의 배회(hovering) 안정성을 비약적으로 향상시키는 것이 가능하지만, 구체적인 사용법에 관해서는 다음에 기술한다.

2.5.1 수평 기립 루프

CTM에 오차가 있으면, 기립 토크 계산부에서 CTM오차가 0이 되도록 피드백(feedback)한다.

2.5.2 방위 구속 루프

CTM 연산부내의 방위각 신호와 자기 방위 센서 신호를 방위 구속 토크 연산부에서 비교하고, 양자의 차가 0이 되도록 CTM 연산부에 피드백한다. 자이로 양력이 있으면, 수평 성분 연산부 및 방위 구속 토크 연산부의 출력이 0이 되지 않기 때문에, 이 출력을 자이로 바이어스(bias) 계산부로 CTM 신호와 함께 입력하고 연산한 바이어스 수정 신호를 각 자이로의 바이어스 수정기로 입력하며, 자이로 양력이 0이 되도록 수정한다.

TMOS에 있어서는 이상의 연산 처리를 통해서 기체의 3축에 관한 자세각, 각속도, 가속도의 총 9종류의 신호를 출력한다.

2.6 가속도계

자이로라고 하는 것은 좀 이상하지만, 관성 센서 중간이고 자이로와 함께 사용되는 기회가 많은 센서로서, 가속도계에 대하여 설명을 해보자. 그림 8에 서보 가속도계의 구성을 나타냈다. 서보 가속도계의 특징은 중력 가속도(직류 성분에 상당) 및 진동 가속도(교류 성분에 상당)를 측정할 수 있고 고정밀도(직류성이 뛰어나고 분해능도 높음)를 갖고 있는 것이다.

그림을 참조하면서 기본 원리를 설명해보면, 여기에 나타난 가속도계는 추(토크 코일과 빔으로 구성)를 힌지로써 지지한 진자부와 빔의 운동을 검출하는 편위 픽업을 기본 요소로 하고, 전자의 위치를 보통 픽업의 제로 위치로 구속하기 위하여 토르카용 마그네트 및 서보 엠프로 구성되어 있고, 다음에서 원리를 조사한다.

전자에 가속도가 작용하면, 진자는 평형점

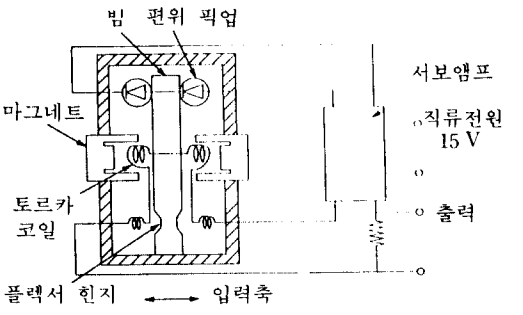


그림 8 서보 가속계 구조

으로부터 벗어난다. 그 편위량을 픽업으로서 전기 신호로 교환하는 도중에, 서보 엠프를 끼워서 토르카 코일에 피드백하고 진자를 원래의 위치로 유지하도록 한다. 이때, 코일에 흐르는 피드백 전류는 작용하고 있는 가속도의 크기에 비례하므로, 전류값을 계측하면 가속도를 알 수 있다. 이와 같이 해서 얻어진 가속도 신호는 자이로 시스템 속에서 처리되고, 기체의 경사와 가속도를 산출하는 것에 사용되고 있다.

비행체 제어에 가속도 제어가 단체로 사용되어지는 것은 거의 없다고 생각되지만(중력과 선회 가속도 등의 영향을 제거할 필요가 있기 때문에), 헬리콥터의 상하 운동을 감쇠시키는 것에는 유효하다.

3. 자이로의 응용

본 절에서는 RPV의 안정화에 대한 자이로의 응용 방법에 관해서 조사하기로 한다. 먼저 라디오 제어기(RC)막형에 있어서, 헬리콥터에는 레이트 자이로가 사용되고 있고, 효과의 크기는 이미 알고 있는 것이다. 비행기에 있어서도 롤 시스템(roll system)의 동안정성에 결점이 있는 기체에 레이트 자이로를 탑재하고 양호한 결과를 얻고 있는 것이다. 이들의 예로서는 기체의 구동을 멈추기 위하여 감쇠 요소로서 레이트 자이로를 사용하고 있으며, 여기에서는 먼저 기체의 안정성에 관해서 생각해 보기로 한다.

3.1 기체의 안정성

안정성이라고 하는 것은 트림 조정이 되는 조합 상태에 있는 기체에 대해서 돌풍 등의 외부적인 영향이 작용해서, 조합 상태가 파괴될 때에 원래의 상태로 복원하려고 하는 성질이다.

안정성에는 정적 안정과 동적 안정이 있으며, 정적 안정은 파괴된 상태로부터 원래의 조합 상태로 회복하려고 하는 복원력을 발생하는 성질이고, 동적 안정이라는 것은 복원력의 크기와 타이밍이 조합 회복에 유효하게 작용하는 정도를 표시하고 있다.

동적 안정성이 작은 기체의 경우, 조합 상태로 회복하려고 해도 조합위치를 중심으로 유동을 반복하고, 조합이 회복하기까지 장시간을 필요로 하게 된다. 동적으로 불안정한 경우에는 요동을 반복하면서, 이따금 그 진폭이 증대해가고, 조합 상태는 회복하지 않는 것이다.

3.2 동적 안정성의 영향

레이트 자이로에 의한 동적 안정성의 향상에 관해서 조사해본다. 레이트 자이로의 중요한 용도는 기체의 구동 각속도를 검출하고, 그 신호를 조타계에 피드백하는 것에 따라서 구동을 빠르게 정지시키려고 하는 것이다.

따라서, 돌풍 등의 외란으로부터 기체가 급속하게 방향과 자세를 변화시키려고 선회와 경사를 시작하면, 그 운동에 제동을 거는 방향의 조타를 하는 것이되고, 레이트 자이로를 갖추고 있지 않은 경우에 비교하면, 방위와 자세의 변화를 폭넓게 받아들일 수 있다. 이와 같은 작용을 하는 장치를 안정성 증가 장치(SAS : stability augmentation system)로 부른다.

조종 경험이 없는 조종사의 일반적인 조종 형태의 특징은 살펴보면, 자세각의 변화에 대응한 조작밖에 할 수 없는 것이다. 자세 변화를 계속 발생시키고 자세 변화의 속도에 따른 조작이 불가능하며(늦음) 결과적으로 발생하는 변화를 수정하기 위하여 조종을 하는 것이 된다.

이 현상은 논리적으로 보면 감쇠가 없는 진자의 운동에 유사하고, 식으로 표시할 때 관성(질량)과 스프링 강성의 복원력이 있는 2차 진동계를 구성하는 것이 된다. 따라서 기체는 요동을 계속하는 것이 되고 불안정하다.

더욱 나쁜 것은 경험이 없는 조종사가 하는 조작은 그 양과 타이밍이 부적절한 경우가 많고, 정적 동적 안정성이 나쁜 기체의 경우에는 조종에 의해서 자세를 무너뜨리는 것이 된다.

다음으로 레이트 자이로를 사용한 경우에 관해서 조사한다. 레이트 자이로에 의한 감쇠(요동 감쇠)작용에서 특징은 자세가 변화해가는 각속도를 검출하고 그 속도가 제로로 되도록 제어 루프를 구성하는 것이다. 따라서, 전술한 조종사에 의한 조종에 비하면, 빠른 단계(자세각은 각속도를 누적한 결과임)로 수정타를 치는 것이 된다. 또 물리적으로도 1차 지연계를 갖은 것으로 기본적으로 안정한 특징을 갖는 것이 된다. 따라서 레이트 자이로를 사용한 제어계에 있어서는 보통 자세 변화를 억제하려고 한 이상 조타에 동반하는 요동도 발생하지 않는다.

레이트 자이로를 사용하는 것에 의하여 동적 안정성이 나쁜 기체라고 해도 안정화하는 것이 가능하고, 외란에 따른 자세 변화도 줄일 수가 있다.

이상과 같은 특징을 갖는 레이트 자이로이지만, 검출 대상이 각속도이기 때문에 변화해버린 자세를 원래대로 하는 작용은 없다. 즉 동적 안정성의 향상은 가능해도, 무너져버린 기체의 자세각을 원래의 자세각(수평 등)으로 되돌리는 작용은 없다. 따라서 자세각을 원래대로 되돌려 놓는 조종이 필요하게 된다.

3.3 정적 안정성 향상

여기서는 먼저 기술했던 레이트 자이로에 의한 정적 안정성의 향상에 첨가해서, 기체 자세를 검출하는 자이로 장치를 사용하는 것에 의하여 기체를 수평으로 보지하고, 동시에 기수를 설정된 방위로 유지하는 방식에 관해서 설명한다. 이와 같은 목적에 맞는 자이로 장치로서는 수직 자이로와 방위 자이로의 조합이 고려될 수 있지만, RPV용으로서 시판되고 있는 것은 없다.

그러나 최근에 전술한 티모스 1000을 시작으로 해서, 산업용 RC 헬리콥터에 탑재 가능한 자이로 장치가 시판되게 되었다.

여기서는 다음에 상술되는 6가지 종류의 신호를 사용한 경우에 관해서 조사해보기로 한다.

(1) 롤(roll) 각속도 신호
(2) 피치(pitch) 각속도 신호
(3) 요(yaw)각속도 신호
(4) 롤 경사각 신호
(5) 피치 경사각 신호
(6) 기수 방위 신호

3축 자이로를 사용한 조타계에서는 롤, 피치, 요의 각 축중에서 한축을 취해서 표시하고 있고, 조종사에 의한 자세 유지 작용을 자이로가 하고 있다. 따라서 조종사의 일은 방위, 자세, 속도의 설정으로 끝나는 것이 되고, 조종이 크게 간소화된다. 특별히 헬리콥터에 관해서는 기수 방위의 변화가 자이로의 방위 유지 작용에 의하여 효과가 크다.

이와 같이 자이로에 따른 정적 안정성의 향상은 특수한 기량을 필요로 하지 않고, 헬리콥터를 공중에 뜨우는 것을 가능하게 한다. 그 결과 산업적 목적으로 헬리콥터를 장시간 비행시킬 경우에 조종사의 피로를 크게 감소시킬 수가 있고, 조종사의 양성도 단기간으로 할 수가 있다.

3.4 가속도 신호의 이용

여기에서는 가속도 신호를 헬리콥터의 안정화에 사용하는 경우에 관해서 설명하고, 예로서 티모스의 가속도 신호의 이용에 관해서 조사한다.

헬리콥터의 큰 특징은 배회를 하는 것이 가능하다는 것이지만, 이 배회 상태를 발생시키기 위해 헬리콥터는 미묘한 힘의 조합을 유지하지 않으면 안된다. 따라서 어떤 외력(바람 등에 의한 외란)만이 작용하더라도, 방위각, 자세각 및 위치의 변화가 생긴다.

방위각, 자세각의 안정화는 전술한 3축 자이로의 사용으로 달성할 수 있지만, 위치의 변화를 저감하는 것에는 어떤 고안이 필요하다. 가속도 신호의 이용은 이와 같은 위치의 보지성을 향상시키기 위하여 생각해낸 것이다.

외력이 기체에 작용하면, 가속도가 발생해서 기체의 속도에 변화를 주고, 결과적으로 위치가 벗어나는 것이 된다. 그래서 위치의 변화를 이동시키는 원천인 가속도의 발생을 검출해서, 이것이 0으로 되도록 헬리콥터를 제어하는 것에 의하여 위치의 보지성은 비약적으로 향상한다.

자이로, 가속도계 등의 센서에 따른 안정화를 이 단계까지 계속하면, 헬리콥터를 조종한 경험이 없어도 콜렉티브 피치만으로 헬리콥터를 공중에 띄우는 것이 가능할 정도로 조종이 용이하게 되어 있다.

조종사의 일은 기본적인 트림 조종, 이착륙과 고도 조종을 위한 콜렉티브 피치의 조작, 기체를 원하는 위치에 유지하기 위한 주기적인 피치의 조작으로 되고, 종래의 RC 헬리콥터의 조종과는 비교가 되지 않을 정도로 용이한 것으로 된다.

가속도계 하나를 사용한 경우에는 기체의 경사에 따른 중력 가속도의 영향이 제거되어 있지 않기 때문에, 오히려 불안정측으로 작용한다. 따라서 기체의 전후, 좌우의 운동을 억제하기 위하여 가속도계를 하나로 사용해서는 안 된다. 상하 방향에 관해서만 큰 경사를 주지 않으면, 가속도계의 단체 사용도 가능하게 되고 이 경우에는 돌풍을 받을 때 기체의 고도 변화를 감속시키는 것이 가능하다.

4. 맺음말

이상에서 자이로 등의 관성 센서에 관해서 조사해 왔지만, 일반적인 주의 사항을 알아본다.

SAS에 의한 안정화를 실행함에 따라 조종사(operator)에 요구되는 자질이 종전과는 다르게 되었고, 종전의 조종사에 요구되는 것은 조정능력 중심이었으며, 조금 정비가 나쁜 기체라도 조정간으로 비행해왔다. 안정성을 생각한다면, 정비 불량의 기체에 있어서는 많은 문제를 일으킬 가능성을 가지고 있고, 현실적으로 추락에 따른 부상도 발생하고 있다.

그러나 산업용은 기체의 치수와 중량도 크고, 추락시의 위험성도 보다 높게 되어 있으며, 조종이라는 것은 센서의 이용에 의해 간략화할 수 있으므로 조종사에게 요구되는 자질은 조종 기술보다는 정비 능력의 우수함이다.

기체의 상황을 파악하고, 비행에 동반하는 위험성을 예측하며, 비행 여부를 판단하는 능력에 관해서는 기체가 자기판단 기능을 가질 때까지는 조종사에게 의존하게 된다. 안정성을 유지해주는 정비판단 능력을 중시하지 않고, 산업용 RPV가 세계적으로 받아들여진다고 하는 것은 생각하기 어렵고, 이와 같은 요구에 대한 시스템(교육, 검사 등)을 구축해가는 것이 필요하다.

참고문헌

(1) 河田伸一, 1983, "ジヤイロとその應用," 精密工學會誌 49卷 12號, pp. 3~8.

(2) 佐藤一煇, 1988, "音叉刑振動ジヤイロについて," 日本航空宇宙學會誌 36卷 408號, pp. 21~27.

(3) 北條武他編著, 1988, "電子ナビゲーションシステムの設計技術とそ展開例," 應用技術出版, pp. 7~18.

(4) Sahjendra N. S., 1983, "Stability of Gyro with Harmonic Nonlinearity in Spinning Vehicle," IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems Vol. Aes-19, No. 2, pp. 182~189.

(5) Sahjendra N. and Ashok I., 1987, "Transient Perfomance of Gyro in Spinning Spacecraft," IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems Vol. Aes-23, No. 5, pp. 620~624.

(6) Sahjendra N. S., 1982, "Asymptotically Stable Motions of a Gyro in a Spinning Vehicle,," IEEE Trans. Aerospace and Electronic Sys. Vol. Aes-18, No. 1, pp. 76~81.