

DTG 및 DTG-Based 가속도계 제작 (A Fabrication of a DTG and a DTG-Based Accelerometer)

°이장규* 원중수** 이동녕*** 이장무**** 김원찬*****
(Jang Gyu Lee, Jong-Soo Won, Dong-Nyung Lee, Jang Moo Lee, Won Chan Kim)

- * 서울대학교 제어계측공학과 (Dept. of Control and Inst. Engr., Seoul Nat'l Univ.)
- ** 서울대학교 전기공학과 (Dept. of Electrical Engr., Seoul Nat'l Univ.)
- *** 서울대학교 금속공학과 (Dept. of Metal. Engr., Seoul Nat'l Univ.)
- **** 서울대학교 기계설계학과 (Dept. of Mech. Design and Prod. Engr., Seoul Nat'l Univ.)
- ***** 서울대학교 전자공학과 (Dept. of Electronics Engr., Seoul Nat'l Univ.)

ABSTRACT

In this paper, a DTG(Dynamically Tuned Gyroscope) and a DTG-based accelerometer designed and fabricated in the Seoul National University are described. For the purpose of the design, the functions and properties of DTG and accelerometer are investigated. The performance of the DTG is tested with the help of a single - degree - of - freedom rate table and a computer. The test result shows that the standard deviation of the DTG's random drift is 9.2 dcg/(20 min). The error model of the accelerometer is shown also.

1. 서론

관성항법장치는 자이로스코프와 가속도계를 이용하여 항체의 위치나 자세를 알아내는 장치이다. 이 관성항법장치는 센서를 플랫폼(platform)에 장치하느냐 아니면 항체에 직접 부착하느냐에 따라 김블드 시스템(gimballed system)과 스트랩다운 시스템(strapdown system)으로 나뉜다.

본 논문에서는 이 스트랩다운 시스템에 쓰이는 센서로 DTG(Dynamically Tuned Gyroscope)와 가속도계를 개발하고 성능을 평가하였다. DTG는 2자유도 자이로스코프로서 비틀림자(tortion bar)의 탄성과 회전하는 김블(gimbal)의 역학적 효과로 나타나는 음의 스프링 효과(negative spring effect)를 이용한다[1]. 이러한 DTG는 미국에서 1960년대에 개념이 정립되고 1970년대에 개발되기 시작하여 1980년대에 본격적으로 실용화된 기기로 현재는 관성항법장치 및 유도제어용 센서로 널리 채택되고 있다. 최근 고속 컴퓨터의 발달로 스트랩다운(strapdown) 방식이 항법장치에 도입되면서 동작범위가 넓은 DTG가 많이 이용되고 있다[2].

그리고 이 DTG는 그 기능별 구성 부분이 기존의 유체 지평 방법을 이용한 자이로스코프에 비해 간단하여 고장날 확률이 작으며 또 유체를 사용하지 않기 때문에 자이로스코프 시스템이 정상상태에 도달하기까지 걸리는 시간이 작고(30초 미만), 자이로스코프의 동작범위(dynamic range)가 넓은 장점이 있다[3].

가속도계는 물체의 관성을 이용하여 물체에 작용하는 힘을

측정함으로써 뉴턴의 운동법칙을 이용하여 물체에 작용하는 가속도를 측정하는 장치이다. 이 가속도계는 모터가 없는 것을 제외하면 DTG와 그 구성이 거의 유사하다.

본 논문에서는 이 DTG와 가속도계의 제작 및 그 결과를 논한다. 2장에서 DTG의 제작에 관하여 설명하고 3장에서 가속도계의 제작을 논하며 4장에서 결론을 맺는다.

2. DTG 제작

DTG는 그림1과 같이 자이로스코프 케이스(case)를 기준으로 윗 부분에는 외부의 각속도 입력을 감지하는 인지부, 인지부에 큰 각운동량(angular momentum)을 제공하기 위한 모터부, 그리고 인지부와 모터부의 전선 및 신호처리를 위한 구동부로 구성되어 있다.

그림2에서와 같이 중심이 두 비틀림자의 교차점에 있고 케이스에 고정된 좌표계를 케이스 좌표계라한다. 입력 각속도에 의해서 회전자가 케이스에 대하여 상대적으로 기울어진 각을 검출각이라하며 이 각을 감지하는 장치가 각검출기이다. 한편 스트랩다운 시스템에 응용하기 위해서는 항상 검출각이 영으로가도록 제어해 주어야 하는데 이 역할을 하는 것이 재평형루프이다. 재평형루프에서 회전자에 직접 힘을 가하는 부분이 토크인데 이 토크의 출력을 M_x, M_y 라 하고 입력각을 ϕ_x, ϕ_y 라 하면 검출각 θ_x, θ_y 는 식(2-1), 식(2-2)와 같이 주어진다[3].

$$\theta_x = \frac{(M_x(s) - M_{ex}(s))s - (M_y(s) - M_{ey}(s))\omega_{nu}}{As(s^2 + \omega_{nu}^2)} - \phi_x(s) \quad (2-1)$$

$$\theta_y = \frac{(M_y(s) - M_{ey}(s))s + (M_x(s) - M_{ex}(s))\omega_{nu}}{As(s^2 + \omega_{nu}^2)} - \phi_y(s) \quad (2-2)$$

여기서 M_{ex} , M_{ey} 는 질량 불균형, 가속도, 모터의 역학 등으로부터 유발되는 오차 모멘트를 말한다. A는 회전자의 X, Y축 관성모멘트이고 ω_{nu} 는 뉴테이션 주파수인데 이것은 뉴테이션 댐핑회로(nutation damping circuit)를 이용하여 없애준다. 실제 시스템에서 입력 가속도의 측정은 회전자의 검출각이 영으로 되도록 하기 위하여 가하여진 모멘트를 측정함으로써 이루어 지는데 이는 토크에 가하여지는 전류로부터 구한다. 이제 각 부분의 기능 및 구조를 살펴 보자.

감지부는 서스펜션, 회전자, 축, 스토퍼, 각검출기 등으로 구성된다. DTG의 구성부품 중에서 가장 중요한 부분의 하나인 서스펜션은 회전축과 김블 그리고 회전자가 비틀림자(torsional element)에 의해서 후크스 결합으로 구성되어 있다. 그림2에 도시된 바와 같이 두개의 비틀림자는 김블과 회전축에 연결되어 있고, 또 다른 두개의 비틀림자는 회전자와 김블간에 연결되어 있다. 이들 비틀림자 축은 동일 평면 상에서 서로 직각되도록 설계되어 있다. 서스펜션 조립부의 주요 기능은 회전자와 회전축이 서로 같이 회전하도록 지탱해주며, 회전자와 케이스사이의 커플링(coupling)을 막아 주는 것이다. 비틀림자의 재질 특성은 항복점보다 대단히 작은 범위에서도 동작이 잘되고 강도가 클수록, 그리고 김블의 판성은 회전자의 판성에 비하여 작을수록 좋다. 회전자는 커다란 관성모멘트를 가지고 회전하는 부품으로, 케이스의 상대적인 회전에 관계없이 판성공간에 대하여 일정한 자세를 유지하는 역할을 한다. 따라서 케이스가 판성공간에 대하여 회전하게 되면 케이스와 회전자 사이에는 회전한 만큼의 기울어진 각도가 나타나는데 이것이 검출각이다. 회전자에는 영구자석과 공간대(spacer) 그리고 각검출기의 C-코어에 자기통로(magnetic pass)를 제공하는 하부링이 함께 붙게 된다. 회전자는 큰 판성을 유지하기 위하여 밀도가 높아야하고, 또 토크의 일부인 자석의 회귀통로(return path)를 구성하므로 자성이 좋아야한다. 판성

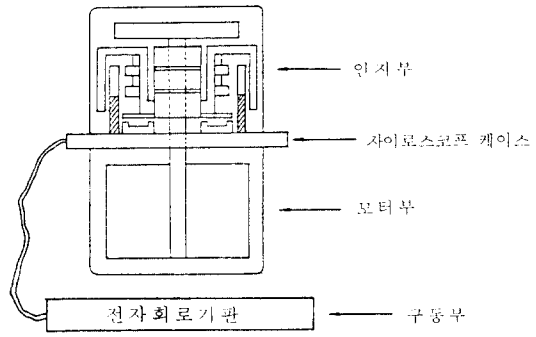


그림1. DTG의 개략도

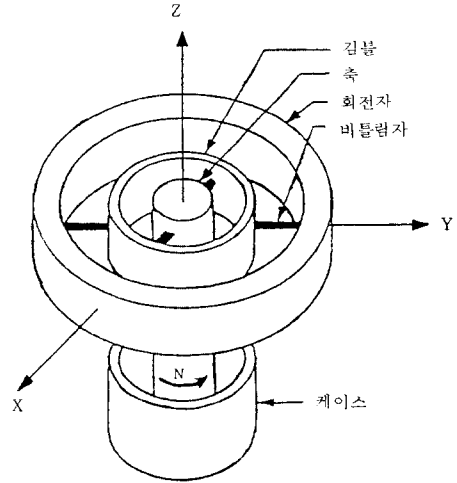


그림2. 감지부의 구성 및 좌표계의 정의

모멘트는 클수록 좋지만 대개 김블의 100 - 1000배 정도로 구성한다. 구성된 회전자의 질량중심은 비틀림자의 축과 일치되어야 하며, 김블과 회전자가 동조된 상태에서는 자유회전자(free rotor)로서 동작한다. 회전축은 모터의 회전을 인자부로 전달시키는 매체로서 고속회전시에도 진동이 발생하지 않도록 모터에 고속 베어링으로 물려 있게 된다. 스토퍼는 회전자가 재평형루프에서 허용하는 범위를 넘어서는 경우에 회전자와 회전축이 인자부 상하는 것을 막기 위하여 회전자의 편각을 제한하는 부품이다. 각검출기는 가변 리럭턴스(variable reluctance)를 이용하여 회전자와 케이스사이의 기울어진 각도를 측정하는 장치이다. 덮개는 DTG시스템 전체를 덮어 줌으로써 보호기능을 담당하고, 내부에 채워지는 수소나 헬륨을 밀봉하며 외부 자장을 차단하는 역할을 한다.

모터는 자이로스코프의 부하에 대하여 충분한 토크를 가져야하며,

고속의 일정한 회전속도를 가져야한다. 구체적으로(1)시간, 온도, 가속도에 대한 질량 및 크기의 불안정성이 작아야한다. (2)동적균형(dynamic balance)이 정확히 이루어져야 한다. 균형이 안맞을 경우 원심력에 의하여 입력축에 외란으로 작용한다. (3)질량과 크기의 불안정에 의한 편류(drift)를 줄이려면 각운동량이 질량에 비하여 클수록 좋다. 즉 같은 각운동량일때 질량이 작을수록 좋다. (4)기동토크가 커서 정상속도까지의 시간을 단축시키는 것이 좋다. (5)회전부의 베어링은 고속회전에 적합한 것이어야 하고 컴플라이언스(compliance)가 매우 작아야 한다. 본 연구에서는 코깅(cogging)과 진동이 적고 자기동(self-starting)이 가능하며 특히 동기모터이므로 속도를 일정하게 유지할 수 있는 히스테리시스(hysteresis) 모터를 사용하였다. 히스테리시스 모터는 이외에도 구조가 간단하고 견고하다는 장점이 있다. 이 히스테리시스 모터는 용량이 같은 다른 종류의 모터에 비하여 효율 및 역률이 떨어지는 결점은 있으나 DTG의 구동에 소요되는 전력이 작기 때문에 크게 문제될 것은 없다. 동기속도는 다른 교류모터와 마찬가지로 다음과 같이 정해진다.

$$n = \frac{120}{p} f \quad (2-3)$$

여기서,

n = 회전수(rpm)

p = 상당 극수

f = 전원 주파수(Hz)

위 식에서 전원의 주파수를 조정하여 회전수를 바꿀 수 있음을 알 수 있다. 본 연구에서는 12000 rpm의 고속 모터를 필요로 하였는데 시판되지 않는 관계로 1800 rpm의 모델을 개조하여 사용하였다.

구동부는 인버터회로와 재평형루프, 그리고 A/F 변환기로 구성된다. 인버터회로는 자이로스코프를 구동하기 위한 모든 신호를 발생시켜주는 역할을 한다. 즉 모터구동신호, 각검출기의 1차 측에 제공되는 기준교류전압, 그리고 재평형루프와 A/F 변환기를 동작시키기 위한 모든 신호 등을 발생시켜 줌으로써 DTG를 구동시키는 가장 기본적인 기능을 담당한다. 재평형루프는 검출각을 입력으로 받아서 이 검출각이 항상 영이 되도록 토크를 이용하여 회전자의 자세를 제어하는 역할을 한다. 재평형루프는 PID제어기와

저역통과필터, notch필터(notch filter), 전류구동부 및 토크로 구성되는데 여기서 저역통과필터는 고주파수의 잡음을 제거할뿐 아니라 진체 재평형루프의 대역폭을 결정하게 되며 notch필터는 모터의 주파수에 해당하는 잡음을 제거하고, 전류구동부는 제어기의 신호에 비례하는 전류를 발생시켜 토크에 전류를 공급하며 토크는 전류에 비례하는 토크를 발생시킴으로써 회전자의 자세를 제어하게 된다. 여기서 토크는 각각 9개의 조각으로 이루어진 2열의 원형 영구자석과 토크 코일로 이루어진 일종의 토크 모터이다. A/F 변환기는 토크코일에 가하여지는 전류를 측정하는 장치이다. 이 A/F 변환 방식은 A/D 변환기에 비하여 속도는 느리지만 양자화에 따른 절삭 오차를 크게 줄일 수 있다는 장점이 있다. 본 연구에서는 A/F를 컴퓨터에 인터페이스하여 컴퓨터에서 자료를 분석할 수 있게 하였다. 그림3은 제작된 DTG시스템이 레이트테이블 위에 올려져 있는 모습이다. 이 시스템에 전기적으로 회전자에 모멘트를 주거나 레이트테이블을 이용하여 각속도 입력을 가하면서 실험을 하였다.

DTG시스템은 정밀계측장치이므로 설계, 가공, 조립에 세심한 주의를 기울여야한다. 또 제작된 DTG시스템은 항상 오차를 포함하고 있게 마련인데 여러 오차 인자(parameter)를 측정하여 보상해주어야 한다. 본 연구에서는 1자유도 레이트테이블을 이용하여 시험을 하고 최소승자법을 이용하여 오차인자를 구하였다. 그림4는 여러 입력에 따른 DTG의 보상되지 않은 출력과 실제 값을 비교하여 나타낸 것이다. 여기서 보면 실제 값과 DTG의 보상되지

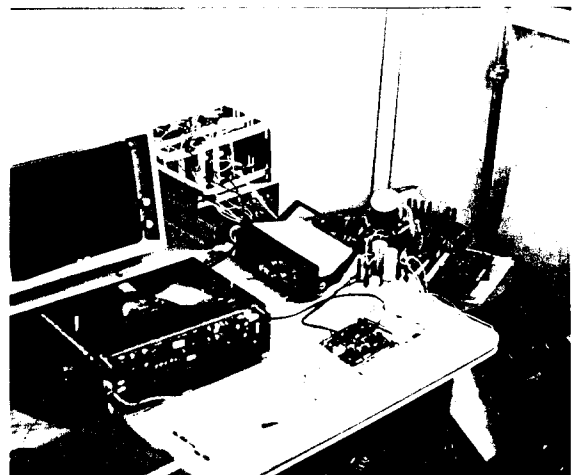


그림3. 제작된 DTG 및 시험장치의 모습

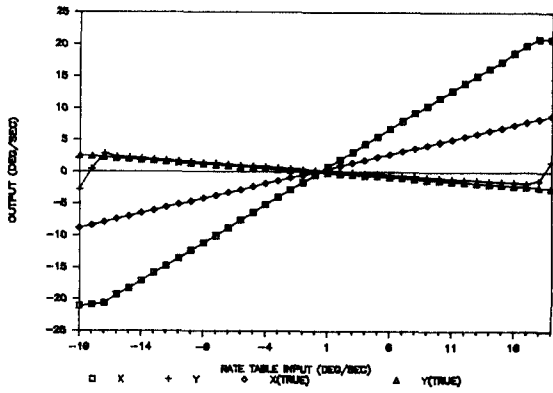


그림4. 보상되지 않은 DTG의 출력과 실제 값의 비교

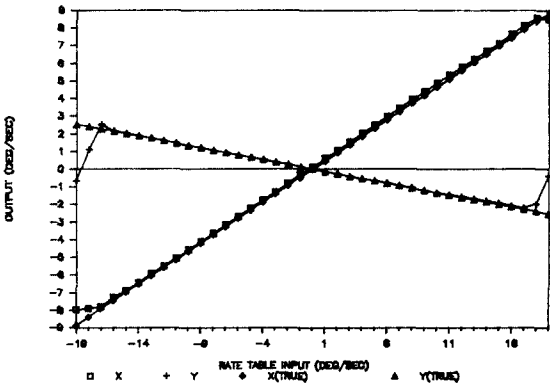


그림5. 보상된 DTG의 출력과 실제 값의 비교

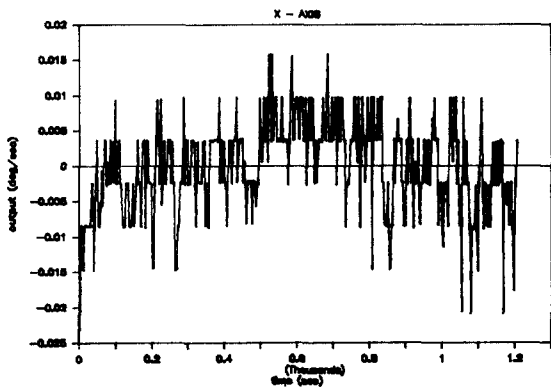


그림6. 영입력 응답 (1)

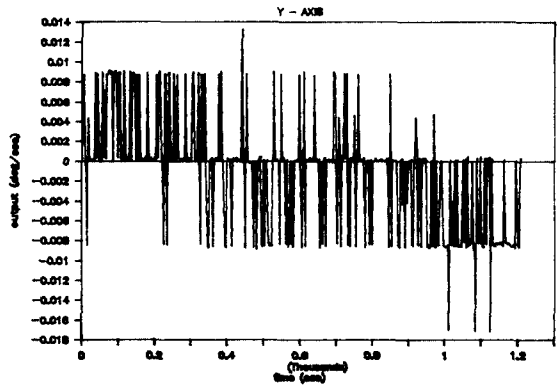


그림6. 영입력 응답 (2)

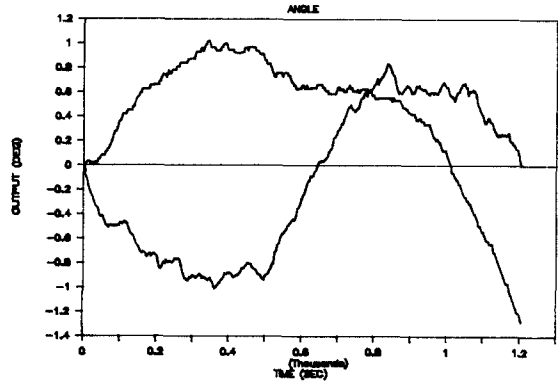


그림7. 영입력 응답의 적분치

실험 장비의 정밀도와 한계에 따른 오차이다. DTG의 랜덤편이를 측정하기 위하여 DTG를 20분씩 반복 시험하여 데이터를 측정하였다. 그림6은 영입력시의 각속도 출력이고 그림7은 이의 적분을 나타낸 것이다. 이 실험을 통해서 본 연구에서 제작된 DTG의 랜덤편이는 표준편차가 9.2 deg/(20 min)임을 알 수 있었다.

3. 가속도계의 제작

본 연구에서 제작한 가속도계는 DTG와 구조가 거의 유사하다. DTG와의 차이점은 가속도계는 회전자가 회전하지 않으므로 DTG에서와 같이 동조조건을 고려할 필요가 없고 무게중심의 위치가 서스펜션의 중심과 일치하지 않는 점이다. 그러므로 가속도계는 외부에서 가속도가 가해지면 회전자는 서스펜션을 기준으로 기울어지게 된다. 이때 회전자를 재평형루프를 이용하여 가속도계의 케이스표면에 일치하도록 토크를 가하고 이 토크를 가하기 위한 전류를 측정하여 회전자가 기울어진 각도를 측정하면

많은 출력 사이에는 많은 차이가 있음을 알 수 있다. 그림5는 DTG의 보상된 출력과 실제값을 비교하여 나타낸 것이다. 여기에서 보면 $-10 \text{ deg/sec} \sim +10 \text{ deg/sec}$ 사이에서는 실제값과 보상된 DTG의 출력이 거의 일치함을 알 수 있다. 약간의 오차가 있는 것은

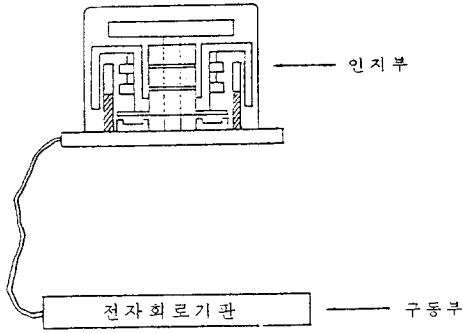


그림8. 가속도계의 개략도

뉴우튼의 운동법칙으로부터 가속도의 크기를 측정할 수 있다.

가속도계의 구조는 그림8과 같다. 외관상 DTG와 흡사하나 모터가 없으므로 크기는 DTG에 비하여 작다. 그러나 외부에서 가해지는 힘에 의해서 운동을 일으키는 부분과 이 운동량을 측정하기 위한 기계적인 부분으로 나뉘어져 있는것은 DTG와 마찬가지로이다. 기계적인 부분은 회전자, 서스펜션, 축, 스톱퍼, 케이스 등으로 이루어져 있고 전기적인 부분은 전원부, 토크, 각검출기, 영구자석 등으로 이루어져 있다.

각 부분의 조립이 끝나면 시험과정을 거쳐 스프링의 탄성계수를 결정하고 각검출기와 토크의 환산계수를 측정한다. 이 값들은 가속도계의 성능 및 정밀도를 결정하는데 핵심적인 역할을 하는 값들이다.

이와같은 과정이 끝나도 가속도계는 약간의 오차를 갖고있고 이 오차는 보정(calibration) 과정을 통하여 오차계수를 구한 후 이 계수를 이용하여 가속도계출력을 보정하여야 더욱 정확한 값을 얻을 수 있다. 보정은 식(3-1), 식(3-2)의 가속도계 입력력 모델에서 환산계수 오차, 토크축 비정렬(misalignment), 가속도 제곱항(g^2 dependent term) 계수, 바이어스를 구하는 과정이다.

$$\frac{U_x}{SF_x} = (1 + D_x)(a_x \epsilon_{xx} a_y - \epsilon_{xy} a_z + K_x a_x^2 + b_x) \quad (3-1)$$

$$\frac{U_y}{SF_y} = (1 + D_y)(a_y \epsilon_{yx} a_z - \epsilon_{yz} a_x + K_y a_y^2 + b_y) \quad (3-2)$$

여기서

U_i : i 축 토크 출력

SF_i : i 축 환산계수

D_i : i 축 환산계수 오차

a_i : i 축방향 가속도

ϵ_i : ij 축방향 토크축 비정렬

K_i : 가속도 제곱항 계수

b_i : i 축 토크 바이어스

이 계수들을 구하기 위하여 가속도계를 NED 좌표계에 대하여 여러가지 자세로 놓은 후 출력을 측정하여 독립된 식들을 구하면 이로부터 위의 계수들을 얻는다. NED 좌표계를 이용하는 것은 가속도계가 중력가속도를 측정하며 또한 중력가속도 외에는 마땅히 가속도를 가할 장치가 없기 때문이다.

4. 결론

본 논문에서 스트랩다운 관성항법 시스템에 쓰이는 DTG와 가속도계의 제작, 오차보상 및 성능시험을 논하였다. 이를 위하여 DTG와 가속도계의 각 부분이 갖추어야 할 조건을 연구하였으며, 이에 기초하여 실제로 DTG와 가속도계를 제작하였고 레이트 테이블과 A/F 및 컴퓨터 인터페이스를 이용하여 오차 인자를 규명하고 오차보상을 실시하였으며, 제작된 시스템의 성능을 평가하였다. DTG의 시험결과 랜덤편이의 표준편차가 $9.2^\circ/(20 \text{ min})$ 이었으며 오차의 주 원인은 기동모터에 기인한 것이었다. 따라서 DTG 전용모터가 개발되면 매우 정밀한 스트랩다운 시스템을 구성할 수 있을 것이다.

참고문헌

- [1]. Edwin W. Howe and Paul H. Savet, "The Dynamically Tuned Free Rotor Gyro, " *Control Engineering*, June 1964.
- [2]. S.C.Garg, L.D.Morrow, and R.Mamen, " Strapdown Navigation Technology: A Literature survey," *J. Guidance and control*, May - June, 1978.
- [3]. Robert J.G.Craig, "Theory of Operation of an Elastically Supported, Tuned Gyroscope," *IEEE Transaction on Aerospace and Electronic Systems*, NO.3, May 1972.