

모우드 측정을 이용한 관성 모우먼트 도출

박은식 정경렬 홍성욱 전혁수 이종원
한국과학기술원 기계공학과

A method to determine moment of inertia properties of an arbitrary shape body by modal testing

Youn-Sik Park Kyung-Ryul Chung Seong-Wook Hong Hyuck-Soo Jeon Chong-Won Lee
Department of Mechanical Engineering, KAIST

ABSTRACT

This paper presents a new idea to obtain moment of inertia values of an arbitrary shape body by applying inverse modal transformation technique. A multi-axes inertia pendulum apparatus was designed to measure 6 rigid body modes of a test body. A software was developed to calculate inertia properties as well as the location of center of gravity and total mass of the test body from the measured modal data. The developed method was applied to a simple body of which the inertia properties are known then the obtained values were compared with the known values.

1. 서론

임의의 형상을 갖는 물체에 대한 관성 모우먼트는 기하학적 복잡성에 따른 한계 때문에 이론적인 계산의 실현이 어려우므로 실험적인 측정을 필요로 하는 경우가 많다.

진자원리를 이용한 관성 모우먼트 측정은 가장 고전적인 방법으로서 널리 사용되어 오고 있으나 결과가 측정오차에 매우 민감하여 대부분의 경우 큰 오차를 수반하고, 질량이 커지면 주변장치의 실비가 어려워지는 단점이 있어 근때에는 모우드해석을 이용한 측정법이 제안되고 있다. [1-4].

본 연구에서는 역모우드변환(Inverse Modal Transformation) 방법을 응용한 관성 모우먼트 측정법을 제시하였다. 실험을 통한 실현을 위해 관성 모우먼트 측정장치로서 다축관성진자(Multiaxes Inertia Pendulum)를 고안, 제작하였다. 다축관성진자를 이용한 역모우드변환법은 실험적 모우드해석에서 구해지는 모우드 매개변수를 통해 간접적이지만 동시에 모든 관성모우먼트를 얻어낼 수 있고, 질량 및 무게중심 까지도 구할 수 있다.

실험은 다축관성진자를 이용하여 관성 모우먼트를 구하는 과정을 예시하기 위해 간단한 시험모델에 대해 실행하였다.

2. 다축관성진자 (Multiaxes Inertia Pendulum)

강체의 관성 모우먼트를 측정하기 위해 Fig. 1과 같은 다축관성진자를 제작하였다. 다축관성진자는 대상 물체를 고정시키는 원판과 원판을 지지하는 세개의 코일 스프링으로 구성된다. 여기서 원판은 충분한 강성을 가져 관심있는 주파수 영역, 즉 여섯개의 강체모우드가 있는 영역으로 부터 자체의 모우드가 분리되어 있어야 함은 물론, 대상물체를 견고하게 지지할 수 있어야 한다. 또한 세개의 코일스프링은 실험 및 해석상의 단순화를 위해 같은 특성을 가지는 것이 바람직하고, 스프링상수는 측정대상물체와 센서등의 주변장치 특성고 고려해 선정함 필요가 있다.

먼저 관성모우먼트의 측정을 위해 기본적으로 필요한 다축관성진자계에 대한 동적모델을 유도하도록 한다.

동적모델 [5,6]

다축관성진자계는 6 자유도의 강체운동을 가지므로 임의의 점에 대한 6 개의 변위, 즉 3 개의 병진운동변위와 회전운동변위로 그 운동을 기술할 수 있다. 임의의 점 d 에 대한 동적모델식은 감쇠를 무시할 때 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$[M_d] \ddot{X}_c^d + [K_d] X_c^d = F_c^d \quad \text{-----}(1)$$

여기서

$$X_c^d = (x^d, y^d, z^d, \theta_x^d, \theta_y^d, \theta_z^d)$$

이때 $[M_d]$ 는 관성행렬로서 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$[M_d] = \begin{bmatrix} M & & & & & \\ 0 & M & & & & \\ 0 & 0 & M & & & \\ 0 & -G_3 & G_2 & I_{11} & & \\ G_3 & 0 & -G_1 & -I_{21} & I_{22} & \\ -G_2 & G_1 & 0 & -I_{31} & -I_{32} & I_{33} \end{bmatrix} \quad \text{-----}(2)$$

여기서

$$(x^G, y^G, z^G)$$

$$(x^d, y^d, z^d)$$

$$G_1 : M \cdot (x^G - x^d)$$

$$G_2 : M \cdot (y^G - y^d)$$

$$G_3 : M \cdot (z^G - z^d)$$

$$I_{11} : I_{xx} + M \cdot \{(y^G - y^d)^2 + (z^G - z^d)^2\}$$

$$I_{21} : I_{yx} - M \cdot (x^G - x^d) \cdot (y^G - y^d)$$

$$I_{22} : I_{yy} + M \cdot \{(x^G - x^d)^2 + (z^G - z^d)^2\}$$

$$I_{31} : I_{zx} - M \cdot (z^G - z^d) \cdot (x^G - x^d)$$

$$I_{32} : I_{xy} - M \cdot (z^G - z^d) \cdot (y^G - y^d)$$

$$I_{33} : I_{zz} + M \cdot \{(x^G - x^d)^2 + (y^G - y^d)^2\}$$

I_{xx}, \dots, I_{zz} : 전체 무게중심에 대한 관성 모우먼트

I_{11}, \dots, I_{33} : d 에 대한 관성 모우먼트

또 $[K_d]$ 는 강성행렬로서 각 코일스프링에 의해 형성되며 일반적으로 각 스프링에 대해 구해진 요소행렬을 d 에 대한 것으로 변환하여 조합함으로써 얻게 된다. 따라서 스프링의 위치와 크기에 따른 함수로 나타나게 되는데, i 번째 스프링의 위치 및 세축방향 강성을 각각

$(P_i, Q_i, R_i), (k_{xi}, k_{yi}, k_{zi})$ 라 두면 강성행렬은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$[K_d] = \sum_i \begin{bmatrix} [G_i]^T [K_i] [G_i] \end{bmatrix} \quad \text{---(3)}$$

6x6 6x3 3x3 3x6

여기서

$$[G_i] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & R_i - z^d & -Q_i + y^d \\ 0 & 1 & 0 & -R_i + z^d & 0 & P_i - x^d \\ 0 & 0 & 1 & Q_i - y^d & -P_i + x^d & 0 \end{bmatrix}$$

$$[K_i] = \begin{bmatrix} k_{xi} & & \\ 0 & k_{yi} & \\ 0 & 0 & k_{zi} \end{bmatrix}$$

이상과 같은 모델식은 다축관성진자계를 이용한 실험 및 이의 해석을 위한 기본식으로 사용된다.

다축관성진자의 동특성

다축관성진자 자체의 동특성은 대상물체를 장착시키기 이전에 예비 실험을 통해 정확히 규명되어야 한다. Fig. 1 과 같은 다축관성진자의 관성 모우먼트는 이론적으로 쉽게 얻어낼 수 있으므로 모우드해석을 통해 추출한 모우드형상과 이론적인 관성행렬을 이용하여 다음절에서 설명할 역모우드변환으로 강성행렬을 계산하면 편리하다. 이렇게 구해진 강성행렬은 장착되는 물체와는 무관하므로 이 강성행렬과 장착 후의 모우드형상벡터를 이용하여 관성행렬을 계산하면 보다 쉽게 관성 모우먼트를 구할 수 있다.

3. 역모우드 변환(Inverse Modal Transform) 에 의한 관성모우먼트 측정

강체의 관성행렬에는 Eq.(2) 예서와 같이 질량, 관성모우먼트 여섯항, 그리고 무게중심 좌표 세개의 전체 10 개 미지수가 포함되어 있다. 관성행렬은 모우드의 직교성에 의해 실험 또는 이론적으로 결정된 모우드형상벡터와 다음과 같은 관계식을 갖는다.

$$[\phi_d]^T [M_d] [\phi_d] = [I] \quad \text{-----}(4)$$

여기서 $[\phi_d]$: d 에서의 모우드벡터

$[I]$: 단위 행렬

따라서 관성행렬은 모우드형상벡터가 결정되어 있는 경우 다음과 같은 역모우드변환을 통해 구할 수 있다.

$$[M_d] = [[\phi_d][\phi_d]^T]^{-1} \quad \text{-----}(5)$$

이와 비슷하게 강성행렬은 모우드형상벡터와 고유진동수를 이용하여 다음과 같이 얻어진다.

$$[k_d] = [\phi_d]^{-T} [\omega_i^{-2}] [\phi_d]^{-1} \quad \text{-----}(6)$$

모우드형상벡터의 결정

이론적인 모우드벡터들은 Eq.(1) 에 대한 고유치문제에서 구해지는 고유벡터로 구성되는데 이때의 성분들은 임의의 점 d 에 대한 6 자유도 운동, 즉 세개의 병진운동변위와 세개의 회전운동변위로 이루어진다. 그러나 실험적으로는 세개의 회전운동변위의 성분을 직접 측정하기 어렵기 때문에 두개 이상의 측정점을 선정하여 이들의 병진운동만을 측정한 후 기하학적 관계식을 이용하여 간접적으로 얻는다. 이때 측정점을 보다 많이 취하면 평균적인 값으로 결정되므로 측정에 의한 오차를 줄일 수 있다.

측정위치를 (u_i, v_i, w_i) 로 선정하고 그때의 각 모우드 이득 (Modal Gain) 을 센서 방향에 따라 $\psi_{xi} \psi_{yi} \psi_{zi}$ 로 표시하면 d 에 대한 모우드 벡터는 일반적인 역행렬의 정의에 따라 다음과 같이 결정된다.

$$[\phi_d] = [G_R]^T [G_R]^{-1} [G_R]^{-1} [G_R]^T [\psi] \dots (7)$$

$$[G_R] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & w_1 - z^d & -v_1 + y^d \\ 0 & 1 & 0 & -w_1 + z^d & 0 & u_1 - x^d \\ 0 & 0 & 1 & v_1 - y^d & -u_1 + x^d & 0 \\ & & & \vdots & & \\ 1 & 0 & 0 & 0 & w_t - z^d & -u_t + y^d \\ 0 & 1 & 0 & -w_t + z^d & 0 & u_t - x^d \\ 0 & 0 & 1 & v_t - y^d & -u_t + x^d & 0 \end{bmatrix}$$

$$[\psi] = \begin{bmatrix} \psi_{x1}^T \\ \psi_{y1}^T \\ \psi_{z1}^T \\ \vdots \\ \psi_{xt}^T \\ \psi_{yt}^T \\ \psi_{zt}^T \end{bmatrix}$$

실험적으로 구해지는 $[\phi_d]$ 는 행에 관한 상대적인 값에 의미를 가지므로 Eq.(4) 를 만족시키는 모우드형상벡터를 결정하기 위해서는 Eq.(7) 에서 구해진 $[\phi_d]$ 를 적절히 Scale 하여야 한다. 이를 위해서 본 시스템에서는 대상물체를 장착하여도 강성특성에는 변화가 없다는 점을 염두에 두고 강성행렬에 관한 직교성을 이용하면 편리하다. 즉

$$[\phi_d]^T [K_d] [\phi_d] = [\omega_i^2] \dots (8)$$

의 관계식을 이용한다.

직교조건에 의한 모우드형상벡터의 수정

실험적으로 결정한 모우드형상벡터는 실험상의 오차에

의해 그 직교성을 보장하지 못한다. 따라서 실험적인 모우드형상벡터를 적절히 보정하여 직교성을 유지하도록 하는 여러 방안이 제시되고 있다 [7,8]. 본 연구에서는 다축관성진자의 동특성규명을 위해 실험적으로 구한 모우드 벡터를 관성행렬에 대한 직교조건을 도입하여 다음과 같은 방법으로 수정하였다. 즉 원판에 대한 관성 행렬은 잘 알려져 있으므로 이론적인 값이 정확하다고 보고, 다음과 같은 관계식을 도입한다.

$$[\phi^T + \Delta\phi^T] [M] [\phi^T + \Delta\phi] = [I] \dots (9)$$

여기서 ϕ : 실험적으로 결정된 모우드형상벡터
 M : 원판의 관성행렬
 $\Delta\phi$: 보정벡터
 I : 단위행렬

따라서 $\Delta\phi$ 가 작다고 하고 이에 관한 이차항을 무시하면

$$[[M][\phi]]^T [\Delta\phi] + [\Delta\phi]^T [[M][\phi]] = [I] - [\phi]^T [M] [\phi] \dots (10)$$

의 비선형 관계식을 얻게 되므로 이를 풀면 보정량을 얻게 된다.

4. 실험 및 결과

다축관성진자를 이용한 관성 모우먼트 측정은 실험적인 모우드해석을 그 기본으로 한다. 여기서는 실험을 위하여 Fig. 2 의 실험장치를 구성하였다. 가진기로는 Magnetic Exciter 를 이용하였고, Random Generator 를 통해 50Hz Bandwidth 들 갖는 Gauss Random Noise 로 가진하도록 하였다. 그리고 실제 가해지는 힘은 Exciter 의 끝부분에 설치된 Piezo Type 의 Load Cell로 추출하여 주파수 응답함수의 Input 으로 두었다. Exciter의 방향은 모든 모우드를 가진할 수 있도록 원판에 대해 각도를 두고 설치하였다. 응답은 선정된 위치에 대해 Piezo Type 삼축 가속도계를 이용하여 차례로 얻어내었고, 이를 주파수 응답함수의 Output 으로 두었다. 주파수 응답함수는 Zonic 6080, 6081 multichannel FFT analyzer 를 이용하여 얻었으며, 이들을 다시 Curve fitting하여 원하는 모우드 매개변수들을 추출하여 모우드형상벡터를 결정하였다. 이때 모우드형상벡터들은 감쇠가 충분히 적으므로 실수모우드로 가정하여 결정하였다. 실험은 두 단계로 먼저 관성 다축진자 자체에 대한 동특성 해석을 위한 예비실험을 통해 관성진자계의 강성행렬을 추출한 후 대상물체를 장착하고, 실험하여 얻어지는 모우드형상벡터와 이미 구해진 강성행렬을 이용해 관성행렬을 구하는 과정으로 구성된다.

다축관성진자의 동특성 해석

다축관성진자 자체에 대한 동특성 해석은 최종결과에 큰 영향을 주게 되므로 정확히 실행되어야 한다. 여기서는 모우드해석을 통해 특성을 파악 하였는데, 제작된 원판의 질량 및 관성은 쉽게 구할 수 있으므로 이를 이용해 구해진 모우드벡터를 scale 하고 이를 다시 역모우드 변환식에

대입하여 강성행렬을 추출하였다. Fig. 3은 전형적인 주파수 특성함수로, 다축진자의 영상은 대칭형이지만 스프링특성이 제작상의 오차 때문에 다소의 차이를 보이고 있어 실제 고유주파수는 중첩되지 않고 서로 떨어져 있음을 확인할 수 있다. 따라서 각 모드에의 영향에 심하게 간섭이 있게되고 측정점의 위치에 따라 그 영향이 나타나지 않는 모드도 있게 된다. Fig. 4는 같은 경우에 대해 주파수 영역을 좁혀서 구한 주파수 응답함수로서, Fig. 3과 비교하면 특히 정점의 값들이 큰 차이를 보이고 있다. 따라서 Curve fitting 없이 직접 그 값을 읽게 되면, 모드형상벡터의 오차가 클 것임을 알 수 있다. 모드간의 간섭이 심하면 Curve Fitting 오차도 크므로 여기서는 본 실험 이전에 센서위치를 이동시켜며 대략적인 모드형상을 미리 파악하여 간섭이 적도록 센서 위치를 선정하였다. 실험에서는 10개의 측정점에서 3축방향 성분을 모두 측정하여 모드형상벡터를 구하였다. 실험적으로 결정된 모드형상벡터는 관성행렬에 대한 직교조건에 따라 보정하였다. Table 1과 2는 각각 보정 전후의 모드형상벡터와 그때의 직교 조건식이다. 구해진 모드형상벡터와 고유진동수를 이용해 최종적으로 구해진 강성행렬은 Table 3과 같다.

관성모우먼트의 측정

다축관성진자를 이용한 관성모우먼트 측정 방법의 응용을 위하여 Fig. 5의 모델을 시험모델로 선정하였다. 시험모델을 장착한 후에는 앞에서와 마찬가지로 모드형상벡터를 실험적으로 구한다. 실험을 통해 결정된 모드형상벡터는 Table 4에 주어져 있다. 이를 이용하여 구해진 관성행렬에서 원판 자체의 관성행렬을 제거한 결과는 Table 5와 같다.

이결과는 관성주축과 선정된 좌표축이 어긋나 있음으로 인해 교차 관성모우먼트가 다소 크게 나타나고 있으나, 이들 관성좌표계를 옮기면 원하는 관성 모우먼트를 얻을 수 있다. 또한 2절에서 살펴본 바와 같이 관성행렬내에 포함된 질량 및 무게중심 좌표항도 찾을 수 있다. 그러나 여기에는 항상 오차를 가지고 있는데 그 오차의 주된 원인은 대체로 부정확한 데이터에 있는 것으로 보이며 일부 모델에 미처 고려하지 못한 항들도 영향을 줄 것으로 보인다.

5. 결론

임의의 형상을 갖는 강체에 대한 관성 모우먼트를 구하기 위하여 다축관성진자를 고안, 제작하였고 임의 응용으로 역모우드변환법을 이용한 측정방법을 적용하였다. 그 결과 다축관성진자를 이용하면 강체가 갖는 여섯개의 관성모우먼트를 구할 수 있을 뿐 아니라 질량 및 무게중심의 위치도 동시에 측정할 수 있고, 또한 종래의 방법에 비해 측정오차에 대한 영향도 월등히 적어 비교적 정확한 값을 알아낼 수 있는 방법임을 알 수 있었다.

참 고 문 헌

- (1) Yonezawa, T., Kanda, H., Okubo, M. "A study of Measuring Methods for Exciting Force and Inertia Moment of Reciprocating Internal Combustion Engine," ASME Paper No. 85-DET-160.
- (2) Okubo, N., Furukawa, T. "Measurement of Rigid Body Modes for Dynamic Design," The 2nd IMAC, 1984.
- (3) Lamontia, M.A. "On the Determination and Use of Residual Flexibilities, Inertia Restraints, and Rigid Body Modes," The 3rd IMAC, 1985.
- (4) Okubo, N., Miyazaki, M. "Development of Uncoupling Technique and Its Application," the 4th Imac, 1986.
- (5) Starkey, J.M. "Redesign Techniques for Improved Structural Dynamics," Ph.D. Dissertation Michigan State University, Department of Mechanical Engineering, 1982.
- (6) Butsuen, T., Ookuma, M., Nagamatsu, A. "Application of Direct System Identification Method for Engine Rigid Body Mount System," SAE Paper No. 860551
- (7) Baruch, M., Itzhack, I.Y.B. "Optimal Weighted Orthogonalization of Measured Modes," AIAA Journal, Vol.16, No.4, April, 1978, pp346-351.
- (8) Targoff, W.P. "Orthogonal Check and Correction of Measured Modes," AIAA Journal, Vol.14, Feb. 1976, ppl64-16

Table 1 Modal Matrices Before and After Correction

Before Correction					
-0.109E+00	-0.137E-01	0.133E-01	-0.193E-01	-0.240E-01	0.966E-01
0.142E-01	-0.116E+00	0.286E-02	-0.108E-01	0.676E-01	0.291E-01
0.119E-03	-0.197E-01	-0.139E+00	-0.264E-01	-0.243E-01	-0.429E-02
-0.536E-01	0.463E+00	-0.721E-01	0.244E+00	0.637E+00	0.193E+00
-0.819E+00	0.354E-02	-0.373E-01	-0.150E+00	0.276E+00	-0.602E+00
0.645E-01	0.422E-01	0.125E+00	-0.526E+00	0.367E-01	0.142E-01
After Correction					
-0.110E+00	-0.958E-02	0.914E-02	-0.157E-01	-0.249E-01	0.964E-01
0.151E-01	-0.118E+00	0.198E-02	-0.590E-02	0.753E-01	0.264E-01
0.114E-03	-0.100E-01	-0.139E+00	-0.289E-01	-0.158E-01	0.399E-02
-0.253E-01	0.437E+00	-0.126E+00	0.146E+00	0.523E+00	0.235E+00
-0.501E+00	-0.336E-01	-0.194E-01	-0.111E+00	0.246E+00	-0.589E+00
0.958E-01	0.954E-01	0.100E+00	-0.549E+00	0.699E-01	0.426E-01

Table 2 Orthogonality Relations Before and After Correction

$$([\mathbf{x}_d]^{-1}[\mathbf{M}_d][\mathbf{x}_d] = [\mathbf{I}])$$

Before Correction					
0.100E+01	-0.391E-01	-0.107E-01	0.901E-01	-0.932E-01	0.136E-01
-0.391E-01	0.100E+01	0.671E-01	0.199E+00	0.102E+00	-0.861E-01
-0.107E-01	0.671E-01	0.100E+01	-0.489E-01	0.900E-01	0.107E+00
0.901E-01	0.199E+00	-0.489E-01	0.100E+01	0.131E+00	-0.912E-01
-0.832E-01	0.102E+00	0.900E-01	0.131E+00	0.100E+01	-0.630E-01
0.136E-01	-0.861E-01	-0.107E+00	0.912E-01	-0.630E-01	0.100E+01
After Correction					
0.100E+01	0.131E-04	-0.913E-05	-0.293E-04	0.205E-04	0.107E-04
0.131E-04	0.100E+01	-0.211E-04	-0.393E-04	0.111E-04	0.303E-04
-0.913E-05	-0.211E-04	0.100E+01	0.358E-04	-0.216E-04	-0.408E-04
-0.293E-04	-0.393E-04	0.358E-04	0.100E+01	-0.239E-04	-0.408E-04
0.205E-04	0.111E-04	-0.216E-04	-0.239E-04	0.100E+01	0.213E-04
0.107E-04	0.303E-04	-0.316E-04	-0.408E-04	0.213E-04	0.100E+01

Table 3 Stiffness Matrix Obtained by Inverse Modal Transformation

Stiffness Matrix					
0.924E+06	0.206E+05	0.131E+05	0.443E+04	-0.562E+05	0.120E+05
0.206E+05	0.365E+06	-0.327E+05	0.480E+05	0.199E+04	0.143E+05
0.131E+05	-0.327E+05	0.925E+06	-0.321E+04	-0.352E+04	0.518E+03
0.443E+04	0.480E+05	-0.321E+04	0.335E+05	-0.756E+02	0.803E+03
-0.562E+05	0.199E+04	-0.352E+04	-0.756E+02	0.326E+05	0.956E+03
0.120E+05	0.143E+05	0.518E+03	0.803E+03	0.956E+03	0.569E+05

- * 1-3 Columns : unit N/m
- * 4-6 Columns : unit N

Table 4 Modal Matrix (with Test Model)

Modal Matrix					
-0.584E-01	-0.396E-01	-0.124E-02	0.103E-02	-0.201E-01	0.754E-01
0.407E-01	-0.542E-01	0.134E-02	-0.149E-03	0.729E-01	0.191E-01
0.222E-02	0.247E-02	-0.964E-01	-0.523E-03	0.467E-02	-0.373E-02
-0.397E-01	0.238E+00	-0.612E-02	-0.397E-02	0.573E+00	0.153E+00
-0.254E+00	-0.177E+00	0.151E-01	0.857E-02	0.119E+00	-0.584E+00
0.394E-02	0.925E-02	-0.387E-02	0.529E+00	0.128E-01	0.128E-02

Table 5 Inertia Matrix of Test Model
(w.r.t the Original Coordinates System)

Inertia Matrix					
0.574E+02	-0.396E+01	0.435E+01	0.288E+01	0.608E+01	-0.503E-01
-0.396E+01	0.754E+02	0.171E+01	-0.929E+01	-0.424E+00	0.117E-01
0.435E+01	0.171E+01	0.594E+02	-0.879E+00	0.799E-01	-0.477E-01
0.288E+01	-0.929E+01	-0.879E+00	0.175E+01	0.475E+00	-0.710E-01
0.608E+01	-0.424E+00	0.799E-01	0.475E+00	0.111E+01	-0.318E-01
-0.503E-01	0.117E-01	-0.477E-01	-0.710E-01	-0.318E-01	0.600E+00

- * unit : mass kg
- inertia kg-m²
- G kg-m

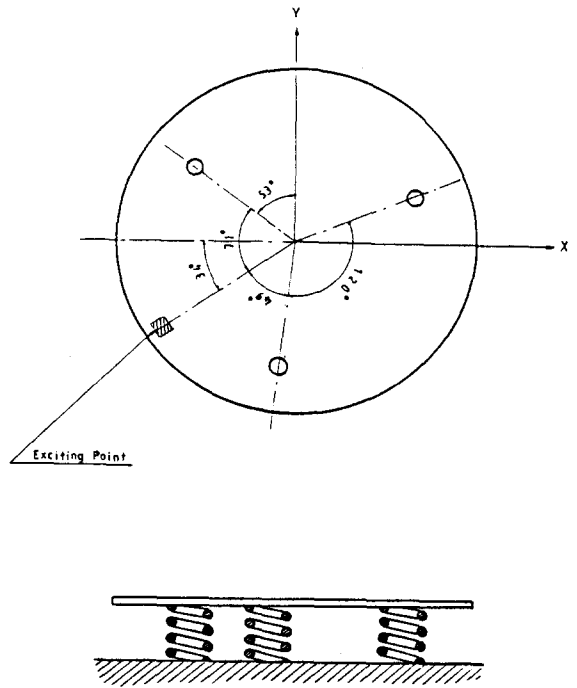


Fig.1 Configuration of Multiaxes Inertia Pendulum System

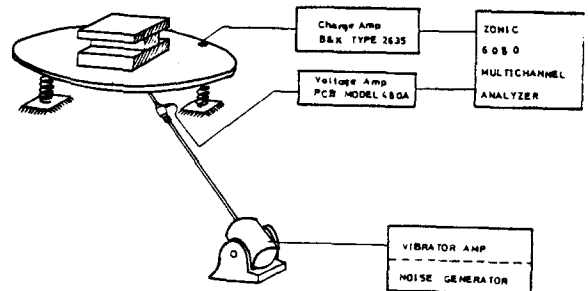


Fig.2 Experimental Set Up

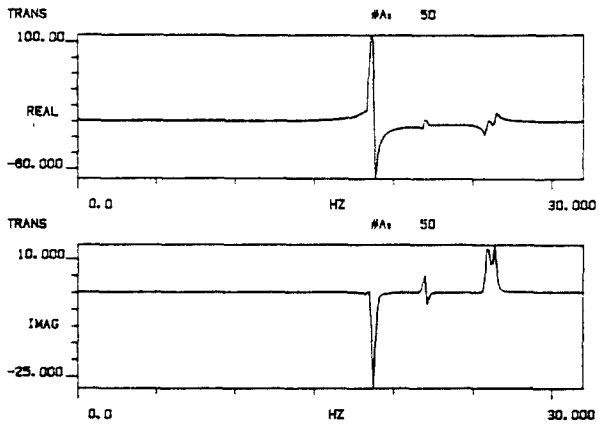


Fig.3 Typical Frequency Response Function of Multiaxes Inertia Pendulum System (Central Freq : none Bandwidth : 30 Hz)

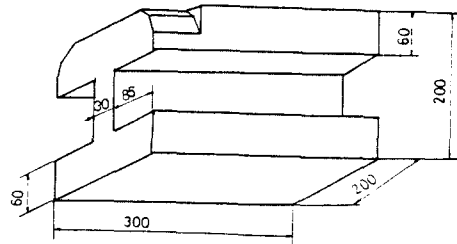


Fig.5 Test Model

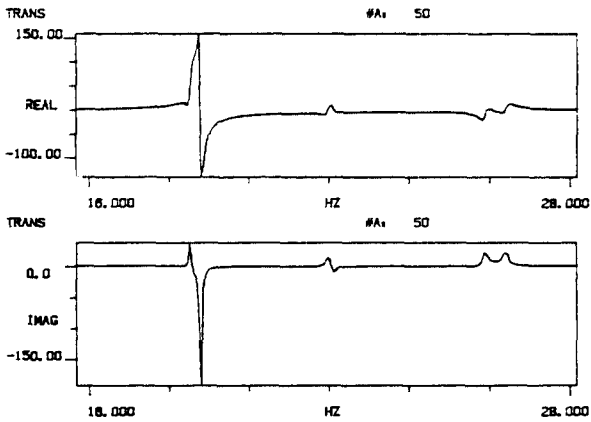


Fig.4 Typical Frequency Response Function of Multiaxes Inertia Pendulum System (Central Freq : 20 Hz Bandwidth : 12.5 Hz)