

<論 文>

# 마이크로 컴퓨터를 이용한 3차원 연쇄기구 운동의 자동측정 및 운동해석 장치에 관한 연구

김 호 룡\* · 홍 지 수\*\*

(1986년 4월 23일 접수)

## A Study on the Microcomputer Aided Measuring Device for the Motion Analysis of 3-D Linkages

Ho Ryong Kim and Jee Soo Hong

**Key Words:** Symbolic Equation(記號方程式), Floating Link(浮游링크), Transducer(變換器)  
Converter(轉換器), Differentiator(微分器)

### Abstract

A microcomputer aided motion measuring device is designed and built to automatically measure the motion of 3 dimensional linkages. The device includes a specially designed 3-D gauge that employs the spherical coordinates system to inform the motion of floating link which has been considered extremely difficult to measure.

To verify the accuracy of the built device, a series of experiments was carried out on the general type of 3-D linkages. In the experiment, the continuous displacement signals of output links are converted into digital signals to input the displacement data to the computer and visualized by means of X-Y plotter after a procedure of calibration. The velocities and accelerations are obtained by differentiating the displacement signals through the differentiator which is also built as a part of this study being composed of operational amplifiers.

The experimental results are compared with the numerical ones obtained from Hartenberg-Denavit symbolic equation. The experimental results are well agreed with the numerical ones indicating that the feasibility of the device with 3-D gauge is justified for measuring the motion of general 3-D linkages.

### 기 호 설 명

$A_i$  : 좌표변화행렬

$C$  : 원통대수

$D$  : 미지량  $d\theta_i$  의 벡터

$F$  : 패럿 (farad)

$LSB$  : 최소유효비트 (bit)

$M$  : 근사변위 방정식의 계수행렬

\* 정회원, 연세대학교 공과대학 기계공학과

\*\* 연세대학교 대학원

- $P$  : 직진대우
- $Q$  : 도함수의 변환행렬
- $R$  : 회전대우
- $S$  : 球대우
- $S_i$  : 축  $z_{i+1}$  방향의  $x_i$  축과  $x_{i+1}$  축 사이의 거리
- $T_i$  : 변위행렬
- $a_i$  : 축  $x_{i+1}$  방향의  $z_i$  축과  $z_{i+1}$  축 사이의 거리
- $f$  : 주파수
- $i$  : 대우 또는 조인트의 수
- $\dot{q}_i$  : 입력링크 속도
- $\alpha_i$  : 축  $x_{i+1}$  을 중심으로 한  $z_i$  축과  $z_{i+1}$  축 사이의 각도
- $\theta_i$  : 축  $z_i$  를 중심으로 한  $x_i$  축과  $x_{i+1}$  축 사이의 각도

### 1. 서 론

Reulaux<sup>(1)</sup>는 19C 末경 기구를 이루는 대우를 저차원과 고차원 대우로 구분하여 기호로 표시하였는데 이때부터 모든 기구에 적용될 수 있는 일반적인 해석방법에 대한 연구와 컴퓨터를 사용하는 수치해석방법에 대한 연구가 진행되었다<sup>(2)</sup>.

1955년 Denavit 와 Hartenberg 는 Reulaux 의 기호 표시법을 사용하여 폐연쇄를 이루는 2차원 및 3차원 기구를 기호방정식으로 나타내었으며 이 기호방정식에 의해 2차원은 물론 3차원 연쇄기구의 운동해석을 일반화시킬 수 있다<sup>(3)</sup>.

3차원 연쇄기구 운동에 대한 종래의 측정방법은 입력각에 대한 출력각의 변위를 측정하고 이 자료(data)를 수치미분 하므로써 속도나 가속도를 간접적으로 구하였다.

그러나 이러한 수동에 의한 간접측정 방법은 측정도구의 부정확성, 적은 변위량 측정시에 요구되는 많은 시간과 노력이 문제점으로 발생하며 더욱, 공간상에서 3차원 운동을 하는 浮游링크(floating-link)에 대해서는 그 측정이 대단히 어려워 거의 불가능하였다.

따라서 본 연구에서는 측정자가 시간과 노력을 소비하면서 3차원 연쇄기구의 공간운동을 유추적으로 측정할 현재까지의 실험측정을 지양하고, 국내에서 구입 가능하고 열가인 Apple II와 같은 마이크로 컴퓨터 또는 마이크로프로세서를 이용, 3차원 연쇄기구의 공간운동을 신속하고 정확하게 측정분석하는 자동 실험장치를 설계 제작한 다음, 이 장치를 일반 3차원 연쇄기구 모델에 적용 측정된 결과를 기호방정식<sup>(3)</sup>을 이용

한 일반 연쇄기구 운동식의 이론 결과와 비교 검토하였다.

## 2. 3차원 연쇄기구 운동의 이론해석

### 2.1 연쇄기구 운동의 기호방정식

Fig. 1 과 같이 설정된 좌표계로부터 3차원 연쇄기구의 각 대우에 매개변수  $a_i, \alpha_i, \theta_i, S_i$  과 Euler 角을 이용하고 행렬의 직교성을 사용하면 식 (1)과 같은 좌표 변환 행렬을 얻는다.

$$\begin{matrix} \left\{ \begin{matrix} 1 \\ x_1 \\ y_1 \\ z_1 \end{matrix} \right\} = \begin{matrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ a_1 \cos \theta_1 & \cos \theta_1 & -\sin \theta_1 \cos \alpha_1 \\ a_1 \sin \theta_1 & \sin \theta_1 & \cos \theta_1 \cos \alpha_1 \\ S_1 & 0 & \sin \alpha_1 \end{pmatrix} \end{matrix} \end{matrix} \quad (1)$$

$n$ 개의 링크로 이루어진 폐연쇄 기구에 식 (1)을 적용시키면 식 (2)와 같다.

$$[A_{21}][A_{32}][A_{43}] \dots [A_{1n}] = [I] \quad (2)$$

식 (2)를 매개변수로 나타내면 식 (3)과 같은 연쇄기구 운동에 대한 일반 기호방정식을 얻는다.

$$R_1 \begin{matrix} \left| \begin{matrix} a_1 \\ \alpha_1 \\ \theta_1 \\ S_1 \end{matrix} \right| P_2 \begin{matrix} \left| \begin{matrix} a_2 \\ \alpha_2 \\ \theta_2 \\ S_2 \end{matrix} \right| \dots R_i \begin{matrix} \left| \begin{matrix} a_i \\ \alpha_i \\ \theta_i \\ S_i \end{matrix} \right| \dots P_n \begin{matrix} \left| \begin{matrix} a_n \\ \alpha_n \\ \theta_n \\ S_n \end{matrix} \right| \end{matrix} = I \quad (3)$$

### 2.2 대우 운동의 해석

Newton-Raphson 반복연산법을 사용하기 위해 대우

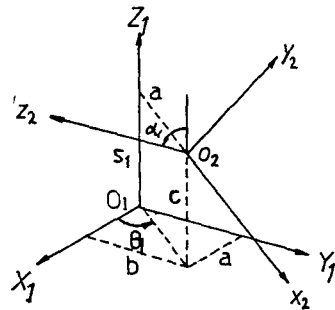


Fig. 1 Coordinate transformation for symbolic equation

변수의 초기추정값을 식 (1)에 대입하여 정리하면 식 (4)를 얻는다.

$$A_i(\theta_i) \cong \bar{A}_i + Q_0 \bar{A}_i d\theta_i \cong (I + Q_0 d\theta_i) \bar{A}_i \quad (4)$$

식 (4)를 식 (2)에 대입하여 정리하면 근사식인 변위에 대한 행렬운동방정식인 식 (5)를 얻는다.

$$B_2 + B_3 + \dots + B_i + \dots + B_n \cong I - B_1 \quad (5)$$

여기서,

$$B_1 = A_1 \bar{A}_2 \bar{A}_3 \dots \bar{A}_n$$

$$B_i = (A_1 \bar{A}_2 \dots \bar{A}_{i-1} Q_0 \bar{A}_i \dots \bar{A}_{n-1} \bar{A}_n) d\theta_i$$

식 (5)에 직교행렬과 비대칭행렬의 성질을 적용하면 식 (6)과 같은 변위에 대한 선형연립방정식을 얻는다.

$$MD \cong V \quad (6)$$

식 (6)을 미분하고 직교행렬과 비대칭행렬의 특성을 이용하여 정리하면 다음과 같은 속도방정식을 얻는다.

$$MD_v = C_v \dot{q}_1 \quad (7)$$

여기서,

$$M = \begin{pmatrix} B_{221} & B_{321} & \dots & B_{n21} \\ B_{231} & B_{331} & \dots & B_{n31} \\ B_{241} & B_{341} & \dots & B_{n41} \\ B_{232} & B_{332} & \dots & B_{n32} \\ B_{242} & B_{342} & \dots & B_{n42} \\ B_{243} & B_{343} & \dots & B_{n43} \end{pmatrix}, D_v = \begin{pmatrix} \dot{q}_2 \\ \dot{q}_3 \\ \vdots \\ \dot{q}_n \end{pmatrix}, C_v = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ -1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$$

대우의 상대가속도는, 속도방정식인 식 (7)을 미분하고 직교행렬과 비대칭행렬의 특성을 이용 정리하여 식 (8)과 같이 얻는다.

$$MD_a = C_a \ddot{q}_1 + C_a \dot{q}_1^2 \quad (8)$$

여기서,

$$C_a = \begin{pmatrix} -E_{21} \\ -E_{31} \\ -E_{41} \\ -E_{32} \\ -E_{42} \\ -E_{43} \end{pmatrix}, D_a = \begin{pmatrix} \ddot{q}_2 \\ \ddot{q}_3 \\ \vdots \\ \ddot{q}_n \end{pmatrix}$$

### 2.3 浮游링크 상의 임의의 점에 대한 변위 해석

공간상의 임의의 점에 대한 절대좌표는 다음과 같이 입력각에 따라 변화하는 상대좌표로부터 구한다.

링크의 각 대우에 두개의 상대좌표계  $O_2x_2y_2z_2$  와  $O_3x_3y_3z_3$  를 Fig. 1의 좌표변환과 일치하도록 Fig. 2와 같이 설정하였다.

대우 2와 3 사이에 존재하는 浮游링크상의 임의의 점 P의 상대좌표 z는 대우 축 z에 대해 회전하므로 항상 일정하다.

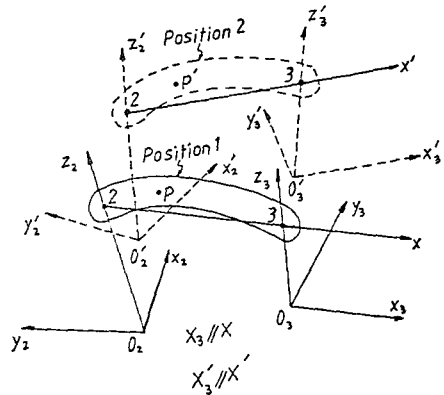


Fig. 2 Relative coordinates of a point on floating-link

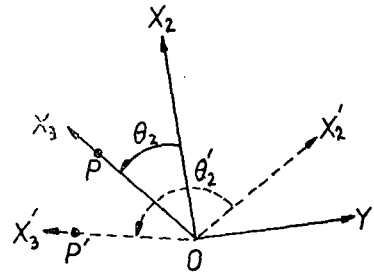


Fig. 3 Rotation of a vector with respect to a Fixed z-Axis

한편 점 P는  $z_2$ 와  $z_3$  축의 공통수선상의 한점이며,  $x_3$  축은  $z_2$ 와  $z_3$ 의 공통수선이므로  $z_2$  축을 따라 측정된 점 P와  $x_2$  축 사이의 각은  $x_2$ 와  $x_3$  축 사이의 각이다. 점 P의 상대좌표에서의 변위각  $\alpha$ 는 대우 2의 초기좌표축  $x_2$ 에 대한 각변위이므로 다음과 같이 구할 수 있다. (Fig. 3)

$$\alpha = \theta_2' - \theta_2 \quad (9)$$

따라서  $z_2$  축을 중심으로  $\alpha$  만큼 회전했을 때 임의의 점 P에 대한 상대좌표는 벡터회전형렬을 이용하여 다음과 같이 구한다.

$$\begin{pmatrix} x_2' \\ y_2' \\ z_2' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \alpha & -\sin \alpha & 0 \\ \sin \alpha & \cos \alpha & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_2 \\ y_2 \\ z_2 \end{pmatrix} \quad (10)$$

이때  $x_2$  축과  $x_3$  축이 이루는 각  $\theta_2$ 와  $\theta_2'$ 은 기호방정식을 이용한 3차원 연쇄기구운동의 시뮬레이션 프로그램<sup>(3)</sup>의 수치해로부터 구한다.

식 (10)에서 상대좌표를  $X_i$ , 절대좌표를  $\bar{X}_i$ 로 하여 식 (2)를 적용시키면

$$\bar{X}_i = A_1 A_2 \dots A_{i-1} X_i \quad (11)$$

식 (11)을 간단히 하면

$$\bar{X}_i = T_i X_i, \quad 2 \leq i \leq n \quad (12)$$

2.4 浮游링크 운동 측정장치의 좌표설정

공간상의 임의의 점 P의 운동은 다음과 같이 구면좌표계 (r, θ, λ)로 표시될 수 있으므로(Fig. 4)

$$\begin{aligned} x &= r \sin \theta \cos \lambda \\ y &= r \sin \theta \sin \lambda \\ z &= r \cos \theta \end{aligned} \quad (13)$$

측정장치의 상대좌표축 xyz를 측정 연쇄기구의 입력대우의 절대좌표축 XYZ와 같은 방향으로 δX, δZ만큼 떨어진 곳에 설정하였다(Fig. 5).

3. 마이크로 컴퓨터를 이용한 自動측정

3.1 실험장치

(1) 일반 3차원 운동의 측정장치

3차원 운동 측정장치는 Fig. 6과 같이 2개의 회전대우와 한개의 직진대우로 구성되어 있다.

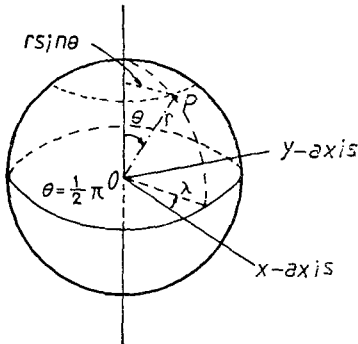


Fig. 4 Spherical coordinates

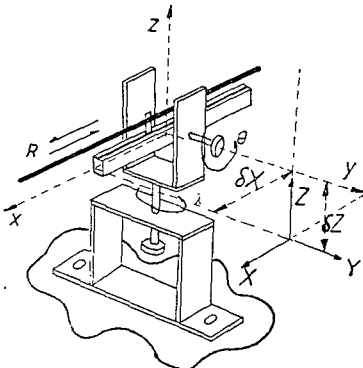


Fig. 5 Configuration of 3-D measurement device

회전대우에 B type 회전형 가변저항기<sup>(4)</sup>를 연결하여 球좌표계에서의 角 θ와 λ를 측정하고 황동봉에 B type 직선형 가변저항기를 부착하여 원점으로 부터의 거리 R을 측정한다.

측정장치는 최소한의 무게로 강성을 유지할 수 있도록 두께 5mm 아크릴판을 사용하였으며 상단과 하단의 높이가 조절이 용이하도록 설계하였다. 각각의 가변저항기는 互換性이 좋도록 설계하였고 회전 대우 부분은 마찰의 영향을 고려하여 소형 니들베어링 (needle-bearing)을 사용하였다.

(2) 출력링크의 변위 측정장치

회전대우로만 이루어진 3차원 기구의 출력축에 부착된 회전형 가변저항기는 최고 305°까지 회전이 가능하고 변위에 대한 출력전압이 선형인 B type 가변저항기를 사용하였다.

직진대우와 회전대우로 이루어진 출력축에는 최대거리 700mm를 움직일 수 있는 직선형 가변저항기에 회전형 가변저항기를 부착시켜 회전각 및 직진거리를 측정하였다.

가변저항기의 출력전압은 π 필터<sup>(5)</sup>로써 소음 (noise)을 제거하여 변화량에 대한 유연한 곡선을 표시하도록 하였으며, 이때 전원공급회로를 구성하여 정격 5V를 기준전압으로 공급하였다.

(3) 속도 및 가속도 측정을 위한 미분기의 제작

변위에 대한 전기 신호는 741μ 연산증폭기 (Op.-Amp.)<sup>(6)</sup>로 이루어진 미분회로를 이용하여 미분하였으며 이때의 출력전압은 다음과 같다.

$$V_0 = -R_f C \frac{dV_i}{dt} \quad (14)$$

여기서,

V<sub>0</sub>: 출력전압      C: 캐패시터

V<sub>i</sub>: 입력전압      - : 전환입력

이다.

이때 시간상수 R<sub>f</sub>C는 미분기의 입력신호와 일치하도록 하였고, C는 주파수에 반비례하므로 미분기로 작동시키기 위해 입력주파수를 1/2πR<sub>f</sub>C보다 작게 하였다<sup>(8,9)</sup>.

본 실험에서의 3차원 기구는 40rpm, 0.67Hz의 저속이므로 캐패시터의 용량이 커지게 되고 이로 인해 출력전압의 강하현상이 나타나게 된다. 따라서 이 현상을 방지하기 위해 증폭기를 사용하였다.

한편 증폭된 음과 양의 신호중, 음의 신호는 轉換器 (converter)에 의해 전환되지 못하므로 일정한 양(+)의 전압을 더해주는 加算回路를 첨가하였다. 가속도

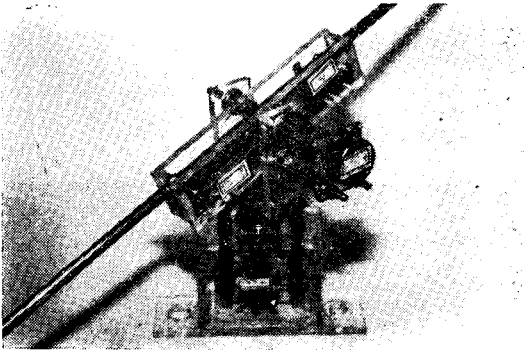


Fig. 6 3-D measurement device

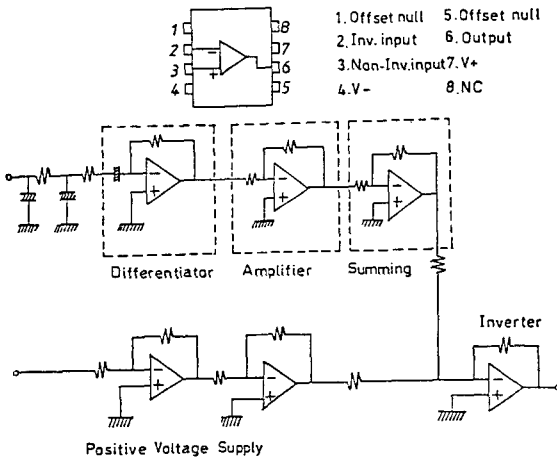


Fig. 7 Differentiating circuit using 741 Op.-Amp.

측정시에는 전술한 미분회로를 직렬연결 시켜 사용하였다(Fig. 7).

(4) A/D 전환기와 PIA

에널로그 신호를 디지털 신호로 변환시키는 A/D 전환기의 정밀도는 다음과 같다<sup>(10)</sup>.

$$A/D \text{ 전환기의 정밀도} = V_{FS}/2^n \text{ (V)} \quad (15)$$

여기서,

$V_{FS}$ : 입력전압,  $n$ : 전환기의 비트 수

본 실험에서 사용된 전환기는 8개의 다중입력단자를 가진 CMOS의 8비트용 0809 A/D 전환기로서 SA C(Successive Approximation Converter) 형식이며 전환시간(conversion time)은  $100\mu s$  이고 정밀도는 0.02 V이다.

전환기에는 LF398H Sample-holder 를 부착하여 고속 메카니즘의 경우에도 자료의 이송이 가능하도록 하였다.

샘플링비는 170/sec 로써 한주기 동안에 255개의 자료를 전환시켰다.

MPU(Micro Processing Unit)와 ADC를 연결시키기 위해 PIA(Peripheral Interfacing Adapter) 6821을 사용하였다.

PIA 6821은 2개의 8비트 쌍방향 데이터버스를 내장하고 있으며, 데이터라인은 기계어 프로그램을 사용하여 입력 혹은 출력 포트(port)의 기능을 부여하였다<sup>(11)</sup>.

3.2 실험방법

실험에 사용된 3차원 기구는 4R, RSSR, RCCC 기구로써 이들은 가장 많이 사용되는 기본 3차원 기구이다. 其他 일반기구들은 이들의 조합으로 표시할 수 있다.

본 연구는 기구의 운동을 운동학적(Kinematic)으로 측정하는 것을 목적으로 하므로 기구의 동역학적 특성을 제외시켰다. 구동장치는 2750rpm, 45W 전동기를 사용하였고, 감속장치로써 40rpm으로 감속하여 A형 벨트로 동력을 전달시켰다.

본 실험에서 출력축의 변위각은 입력축이 360° 회전하는 동안 가변저항기에서 나타나는 전압변화로 측정하였다.

전압변화량은 연속신호이므로 ADC 0809를 사용하여 1주기 동안 255개의 자료를 디지털 신호로 전환시킨 후 그 수치값들을 \$4000부터 \$4100번지의 메모리에 저장시켰다.

ADC 0809와 컴퓨터는 속도가 빠른 기계어 프로그램으로 작동되는 반면, 신호의 변화속도가 매우 느리므로 프로그램 내에 전환기에 대한 시간지연 subroutine을 첨가하였다.

한편 초기상태에서의 출력축의 변위는, 디지털 볼트

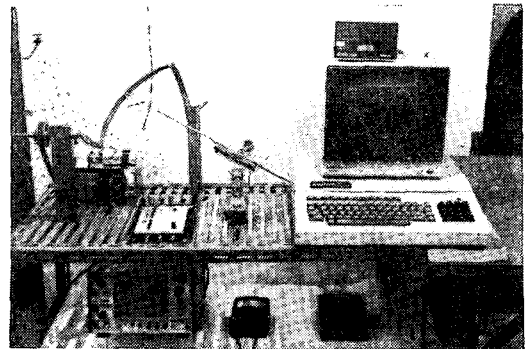


Fig. 8 Experimental set-up

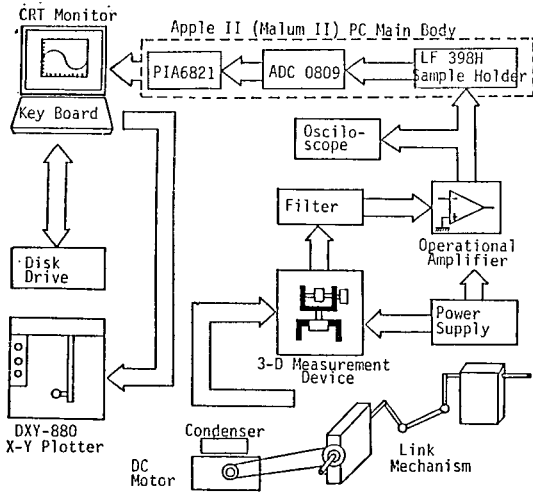


Fig. 9 Schematic diagram of experimental apparatus

미터로 측정 한 후, 컴퓨터 內의 계산과정에서 보정 값으로 삽입시켰다.

전환된 디지털 신호는 마이크로 컴퓨터 內에서 가변저항기의 측정범위에 대응하는 값으로 내삽되어 스캐링 및 배별화 된 후 XY-플로터에 입력시켜 도시하였다(Fig. 9).

浮游링크 상의 임의의 점에 대한 운동 측정은, 한주기 동안 변화되는 球면좌표  $R, \theta, \lambda$  가 연속적인 전기신호이므로 ADC 0809의 다중입력단자를 통해 입력시켜 디지털 신호로 전환 시킨 후, 지정된 메모리에 고속전송하여 운동자료로 저장한다. 浮游링크 상의 임의의 점에 대한 좌표인 이 자료들은, 球면좌표계 변환을 거쳐 운동측정장치에 대한 상대좌표로 변환시키고 다시 입력축에 대한 절대좌표로 변환시킨다.

미분회로의 저항과 캐패시터 용량은 본 실험에서 사용된 3차원 기구의 속도가 저속이므로 저주파 미분회로에 적합한 것을 선택하여야 하므로 브레드 보오드(bread-board) 위에서 function-generator로 저주파 신호를 발생시켜 수차례 실험한 결과,  $C$ 는  $1000\mu F$ ,  $R_f$ 는  $1470\Omega$ 이 가장 적당함을 발견하였다.

이때 임환(shunt) 저항은  $150\Omega$ 을 사용하였고 소음 제거를 위해 회로의 입력 및 출력축에  $\pi$ 필터를 부착하였다.

#### 4. 실험결과 및 고찰

##### 4.1 결 과

본 연구에서는 RSSR, 4R, 및 RCCC의 3개 3차원 연쇄기구를 실험하였으나 RCCC의 실험결과만 그 대표적 결과로 제시하였다 [RSSR, 4R에 대해서는 참고문헌(12) 참조].

Fig. 11은 RCCC 3차원 기구에 대한 변위곡선이다. 출력변위가 적은 RSSR과 RCCC 회전대우에서의 변위곡선은 불연속적인 계단형태를 나타내었고, 최대편차 6% 이내에서 이론치와 잘 일치하였다.

Fig. 12는 출력속도 곡선이다. 변위에 따른 전압변화량이 적은 RSSR과 RCCC의 회전대우에서는 속도곡선이 이론치와 잘 일치하고 있으나 전압변화량이 큰 4R에서는 적지않은 오차가 발생하고 있다. 이러한 현상은 RCCC 기구의 원통대우의 직진변위  $S_7$ 에 대한 속도 측정시에 더욱 크게 나타났다. 따라서  $S_7$ 에 대한 속도곡선은 변위자료를 수치미분한 뒤 least-square 방법을 적용하여 5차의 다항식으로 curve-fitting 하였다.

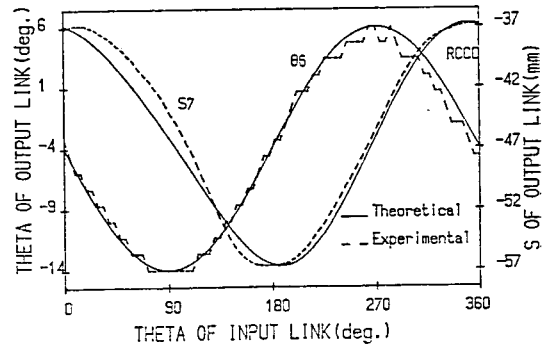


Fig. 10 Displacement of spatial RCCC mechanism

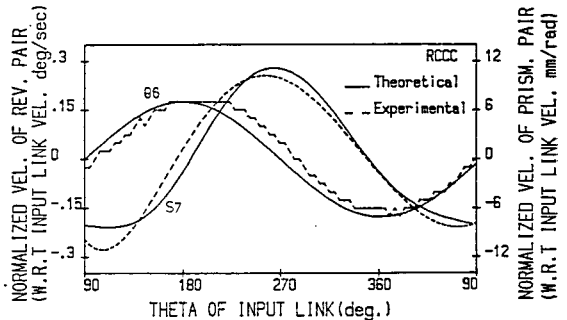


Fig. 11 Velocities of spatial RCCC mechanism

Fig. 13은 출력가속도 곡선이다. 출력변위가 큰 4R 기구의 경우에는 가속도 회로로 부터의 출력전압이 A/D 전환한계를 넘어서게 되므로 두번 미분된 신호를 감속시켰다. 가속도 측정시에도 미분되는 속도신호의 전압변화량이 크면 가속도회로의 작동에 큰 영향을 미치게 되어 오차발생의 원인이 된다.

Fig. 14는 4R 연쇄기구의 浮游링크상의 임의의 점에 대한 변위곡선이다. 임의의 점은 2번째 회전대우에서 浮游링크를 따라 3번째 회전대우로 40° 만큼 떨어진 점을 택하였다.

### 4.2 고찰

회전각의 변위가 미세한 위치에서는 3차원 기구에 의한 출력전압의 변화량이 A/D 전환기의 분해능보다 낮아지므로 이때 얻어지는 변위곡선은 불연속적인 계단형태를 띠게 된다. Fig. 14는 3비트 전환기의 특성곡선으로써 이러한 현상을 잘 설명하고 있다.

이러한 불연속적인 계단형태의 변위곡선 현상은 차체에 의한 기계식 증폭장치에 의해 적은 변위를 큰 전압변화량으로 전환시키므로써 제거할 수 있다.

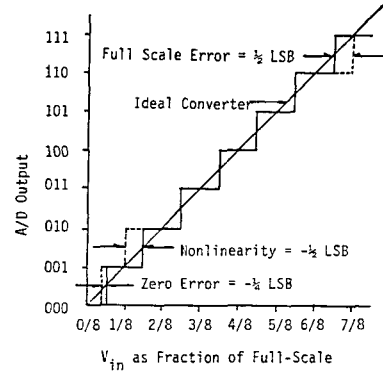


Fig. 14 Characteristic curve of 3-bit A/D converter

일반 미분회로의 입력신호는 고주파이며 교번성이나 본 실험에서 제작한 미분회로는 저주파용으로 식 (16)에 의해 캐패시터의 용량이 매우 크다.

$$\frac{1}{2\pi fC} = \text{const.} \quad (16)$$

따라서 미분될 전압변화량은 캐패시터에 의해 시간 지연의 영향을 받게 되어 빠른 전압변화는 정확한 미분신호로 전환되지 못하기 때문에 RCCC의 회전대우와 같이 입력전압의 변화율이 느릴수록 정확한 미분신호를 나타내게 된다.

### 5. 결론

(1) 본 연구에서 설계 제작된 3차원 운동 자동측정 및 해석장치를 3개의 3차원 연쇄기구에 적용하여 종래 측정이 대단히 어려웠던 浮游링크의 일반 3차원 운동을 측정할 바, 이론치와 최대편차 6% 이내에서 잘 일치하였다.

(2) 본 연구에서 고안된 3차원 운동 자동측정 및 해석장치는 일반 3차원 기구의 운동 측정에는 물론 3차원 형상의 digitizer로도 사용할 수 있다.

### References

- (1) J. Denavit and R.S. Hartenberg, Kinematic Synthesis of Linkages, McGraw-Hill, 1964
- (2) J. Denavit and R.S. Hartenberg, "A Kinematic Notation for Lower Pair Mechanisms based on Matrices," J. of Applied Mechanics, Vol. 22, Trans. ASME, pp.215~221, 1955

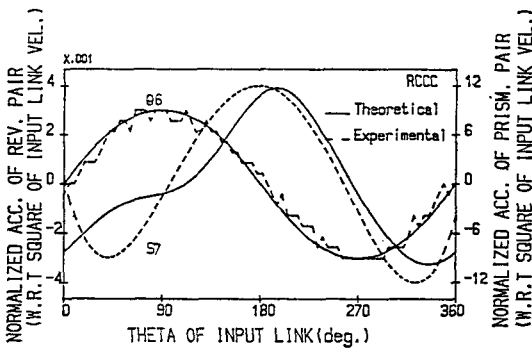


Fig. 12 Acceleration of spatial RCCC mechanism

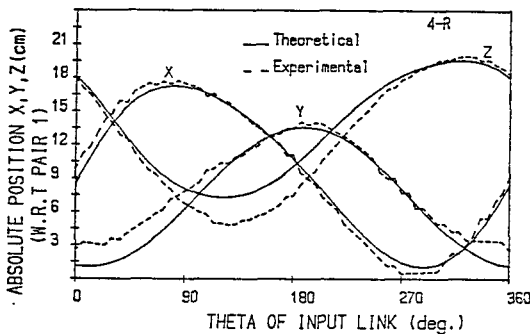


Fig. 13 Absolute position of a point on floating-link

- (3) 김호룡, “기호방정식을 이용한 3차원 연쇄기구 운동해석의 일반화”, 대한기계학회논문집, 제 10 권 제 1 호, pp.102~109, 1986
- (4) J.P. Holman, Experimental Methods for Engineers, McGraw-Hill, 1978
- (5) E.O. Doebelin, Measurement Systems, McGraw-Hill, 1966
- (6) H.M. Berlin, Design of Op-Amp Circuit with Experiments, Howard W. Sams & Co., 1977
- (7) W.G. Jung, IC Op-Amp Cookbook, Sams, 1976
- (8) R.C. Hallgren, Apple II 인터페이싱, 기다리편집부역, 기다리 출판사, 1984
- (9) F.M. Mims III, Engineers Notebook II, Tandy Corporation, 1982
- (10) D.M. Auslander and P. Sagues, Microcomputers for Measurement and Control, McGraw-Hill, 1981
- (11) J.J. Carr, Microprocessor Interfacing, Tab Books Inc., 1982
- (12) 김호룡, “마이크로 컴퓨터를 이용한 3차원 기구 운동의 자동측정 및 운동해석장치의 개발”, 아산재단연구보고서, 1986