

복수 DC모터 동기 제어

○윤재학* 서일홍* 신유식** 김기희**
* 한양 대학교 전자공학과 ** 한국 모트로닉스(주) 연구소

Synchronizing Control of Multiple DC Motors

○J.H.Yun* I.H.Suh* Y.S.Shin** G.H.Kim**

* Dept. of Electronic Eng. Hanyang Univ.

** Hankook Motronics, Co.LTD.

Abstract

Two control algorithms for synchronizing multiple DC motors are proposed to compensate load variation and gain mismatches.

Specifically, a mathematical model of a practical DC servo system is derived and analyzed to see synchronizing effect at the steady-state. Also a compensator is proposed to synchronize multiple motors at the transient-state.

As an experimental system, two-axis synchronizing control system is developed and tested to show the validities of our proposed method.

1. 서 문

DC 서보 모터를 제어한다는 것은 주어진 부하(Load)를 원하는 속도로 원하는 위치까지 구동하는 것을 말한다. 이 몇개의 모터들이 하나의 공작물을 원하는 속도와 위치로 이동 시키거나 가공하는 제어 장비를 구성한다고 가정 할 때 공작물과 모터 사이에는 부하 변동(Load Variation)이 피할 수 없는 외부 변수로 작용 하게 된다. 임의 하나의 모터에 변동이 생길 경우 이 변동은 결국 속도 변동이 되어 다른 모터와의 속도, 위치 관계에 의해 설정되는 공작물의 X-Y 이동경로(Path)에 변동(Deviation)을 유발하게 된다.

독립적인 위치 제어 시스템은 자신의 변동은 자체 피드백(Feedback)을 통하여 변동된 오차를 수정 하지만 그 수정되는 순간에 변동이 없는 다른 모터는 지령치대로 움직임을 계속 하므로 결국 양 축이 관련된 변동은 수정할 수가 없다.

부하 변동 외에도 오차를 일으키는 요소는 첫째, 각 축 모터의 시상수(Time Constant)와 둘째, 각 축의 시스템 이득(System Gain)이 완전이 같지 않음으로써 이동 경로에 변동을 일으키게 된다.

이러한 문제를 해결 하기 위해 Sarachik[1]은 주(Master)가 되는 X축 모터의 변동이 Y축 모터(Slave)에 고려 되도록 양 모터의 입출력 신호의 차를 변동

고려 대상 모터에 입력해주는 방법으로서 " 2차원 피드백 제어 시스템 (A Two-Dimensional Feedback System)"이라는 이름으로 비대칭 동기제어(Non-Symmetrical Synchronizing Control)의 원형을 제안하였다. Koren, David[2,3]은 X-Y 모터 상호간의 변동을 고려할 수 있는 방법을 제안 한 바 있다. 그러나 제안된 방법들은 X, Y 로 지칭한 두개의 모터가 그 적용 한계였다.

본 논문에서는 복수 N 개의 모터를 동기의 대상으로 임의 1 번째 모터에 부하 변동이 생길 경우, 1 번째 이후의 모터들에 대해 그 변동이 고려되는 직렬형 복수 모터 동기 제어(Serial Type Synchronizing Control of Multiple DC Motors)알고리즘과, 첫번째 모터의 부하 변동 만을 나머지 모터에 고려 하는 병렬형 복수 모터 동기 제어(Parallel Type Synchronizing Control of Multiple DC Motors)의 알고리즘을 제안 하고, 실험 시스템 해석을 통한 적절한 수학적 모델을 설정하여 부하 변동 시 속도 조종이 이루어지는 관계식을 유도 한 후, 2축동기 제어 시스템을 구성하여 실험을 수행 하므로써, 제안된 알고리즘의 타당성을 보이고, 과도 상태에서의 동기제어를 위한 보상기의 전달 함수를 제안 하기로 한다 .

2. 복수 DC 모터 동기제어

(1) 직렬형(Serial Type) 동기 제어 방식

모터들을 동기시키는 방법은 주(Master)가 되는 모터의 피드백 전압과 동기의 대상(Slave) 모터의 피드백 전압을 감산하여 그 오차량을 동기 대상 모터에 가산해 나가는 방식으로 이루어져 있다. 따라서 임의 i 축 앞단(i-1 축) 모터는 그 후단(i 축)의 주(Master)모터가 되며 마지막 N 번째 모터는 항상 동기 대상(Slave)모터가 된다.

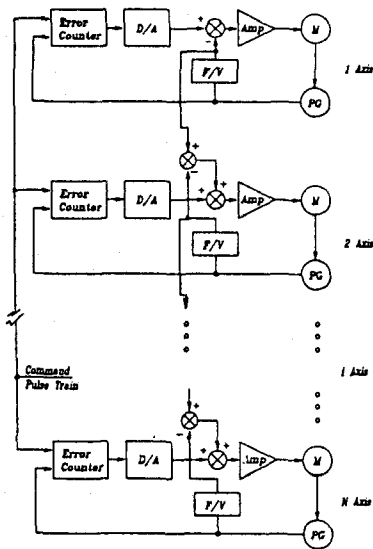


그림 2-1 직렬형 동기제어방식

(2) 병렬형(Parallel Type) 동기 제어 방식

그림 2-2 예서와 같이 1 축의 피드백 전압을 나머지 모든 축들의 피드백 전압과 비교하는 방식이다. 따라서 직렬형 동기제어 방식과는 달리 주(Master) 모터는 1 축만이 된다.

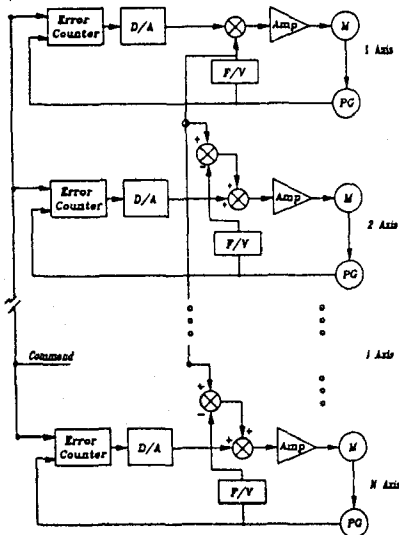


그림 2-2 병렬형 동기제어방식

(3) 구성 요소의 기능에 따른 블록도

앞절에서 제시한 제어 알고리즘의 부하 변동에 따른 속도 조종량을 유도 하기 위해 에러카운터, D/A 변환기와 같은 구성요소의 기능에 입각한 블록도가 그림 2-3에 나타나 있다. 간단히 서술하기 위해 2축 까지 만 하기로 한다.

(가) 양자화기(Quantizer)

위치에러(Position Error)는 D/A 변환기의 입력이 되기에 앞서 bit 단위로 양자화가 되어야 한다. 모터의 회전 방향에 따라서 CW(Clockwise)와 CCW(Counter Clockwise) 방향으로 적절한 위치 정밀도를 갖는 분해능(Resolution)이 되도록 bit 단위로 양자화 한다.

(나) D/A 변환기

D/A 변환기는 디지털 신호(Digital Signal)를 연속신호(Analog Signal)로 바꾸는 역할을 하며 단위는 volt/volt 이다.

(다) F/V 변환기

해석을 간단히 하기 위해 엔코더의 펄스 주파수를 전압으로 피드백 하는 것 대신 타코 발생기(Tacho Generator)의 출력 신호처럼 간주 하였다.

(라) 엔코더(Encoder)

각 축의 회전에 따른 위치 변화에 따라서 n개의 펄스를 발생시키며[5], 펄스의 주파수는 모터 축의 회전 속도에 따라서 변화 한다.

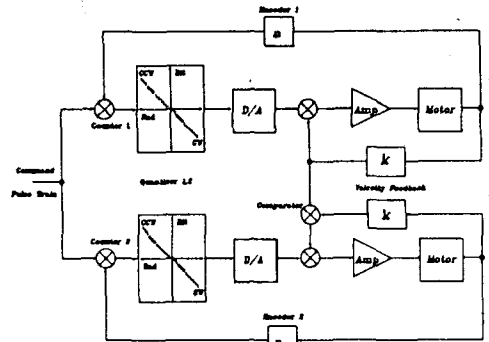


그림 2-3 구성요소의 기능에 따른 블록도

(4) 수학적 모델

그림 2-4 가 부하변동에 의한 속도 관계식을 유도하기 위한 수학적 모델이다. 디지털 회로와 아날로그 회로가 함께 공존하는 하므로, 모델 설정의 용이성을 위해 다음과 같은 가정을 하기로 한다.

첫째, 지령펄스와 엔코더 펄스는 주파수가 매우 높다.

둘째, 모터 구동을 위한 서보 앰프는 구동을 위해 적절이 설계되었다.

셋째, 모터의 수학적 모델은 간략화된 모델을 사용 하였다.

위의 가정에 의해

(i) 양자화기의 출력은 비 연속적 신호(Discrete Signal)이 아닌 연속 신호로 간주한다.

(ii) 따라서 D/A 변환기의 단위는 volt/rad가 된다

(5) 부하변동에 따른 속도 조종 관계식의 유도

(가) 직렬형 동기방식

그림 2-1 에 의해, T_m 은 T_L 과 균형을 이루게 되므로[6] 아래와 같은 식을 세울 수 있다.

$$V_{11} = V_{01} - V_{f1} \\ = Q_{01}K_{p1} - W_1K_{v1} \quad , \quad V_{f1} = W_1K_{v1}$$

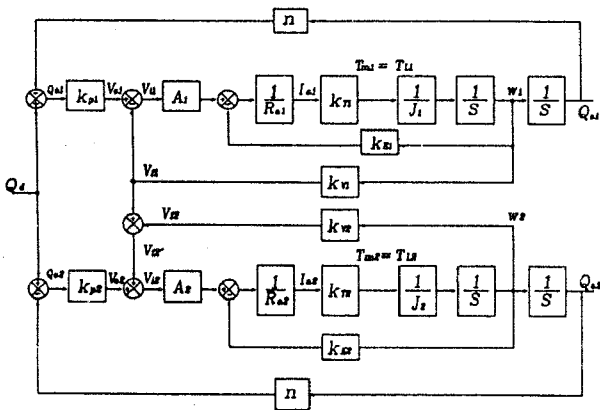


그림 2-4 2속 동기제어 시스템의 수학적 모델

$$= K_{P1} (Q_d - \frac{n T_{L1} W_1}{J_1 s^2}) - W_1 K_{V1}, \quad Q_{d1} = \frac{T_{L1} W_1}{J_1 s^2}$$

따라서,

$$\therefore V_{11} = K_{P1} Q_d - W_1 \left(\frac{n K_{P1} T_{L1}}{J_1 s^2} + K_{V1} \right) \quad (1)$$

모터 권선 전류는

$$I_{a1} = \frac{V_{11} A_1 - W_1 K_{E1}}{R_{a1}} \quad (2)$$

$$I_{a1} K_{T1} = T_{L1} = T_{m1} \quad (3)$$

$$V_{11} A_1 - W_1 K_{E1} = \frac{R_{a1} T_{L1}}{K_{T1}} \quad (4)$$

식 (1) 을 식 (4) 에 대입하면

$$\therefore W_1 = \frac{A_1 K_{P1} Q_d - \frac{R_{a1} T_{L1}}{K_{T1}}}{\frac{n A_1 K_{P1} T_{L1}}{J_1 s^2} + A_1 K_{V1} + K_{E1}}$$

$$W_1 = \frac{J_1 s^2 A_1 K_{P1} K_{T1} Q_d - J_1 s^2 R_{a1} T_{L1}}{K_{T1} (n A_1 K_{P1} T_{L1} + J_1 s^2 A_1 K_{V1} + J_1 s^2 K_{E1})} \quad (5)$$

마찬가지 방법으로 W_2, \dots, W_N 까지를 구하여 정리 해 보면,

$$W_2 = \frac{J_2 s^2 (A_2 K_{P2} Q_d + A_2 K_{V1} K_{T2} W_1 - R_{a1} T_{L2})}{K_{T2} (n A_2 T_{L2} K_{P2} + J_2 s^2 A_2 K_{V2} + J_2 s^2 K_{E2})}$$

$$W_3 = \frac{J_3 s^2 (A_3 K_{P3} Q_d + A_3 K_{V2} K_{T3} W_2 - R_{a3} T_{L3})}{K_{T3} (n A_3 T_{L3} K_{P3} + J_3 s^2 A_3 K_{V3} + J_3 s^2 K_{E3})}$$

W_1
.
.
.

$$W_N = \frac{J_N s^2 (n A_N K_{P1} K_{T1} Q_d + n A_N K_{V(N-1)} K_{T(N-1)} W_{N-1} - R_{aN} T_{L(N-1)})}{K_{T(N)} (n A_N T_{L(N)} K_{P(N)} + J_N s^2 A_N K_{V(N)} + J_N s^2 K_{E(N)})}$$

위 식에서 각 속의 자체 부하 변동은 없다고 보고, 1속(Master)의 부하 변동만을 고려한 속도 조종 (Speed Regulation) 량을 살펴보면,

$$\Delta W_1 = \frac{J_1 s^2 A_1 K_{P1} K_{T1} Q_d - J_1 s^2 R_{a1} \Delta T_{L1}}{K_{T1} (n A_1 K_{P1} \Delta T_{L1} + J_1 s^2 A_1 K_{V1} + J_1 s^2 K_{E1})}$$

$$\Delta W_2 = \frac{J_2 s^2 A_2 K_{V1} K_{T2} \Delta W_1}{K_{T2} (n A_2 T_{L2} K_{P2} + J_2 s^2 A_2 K_{V2} + J_2 s^2 K_{E2})}$$

$$\Delta W_3 = \frac{J_3 s^2 A_3 K_{V2} K_{T3} \Delta W_2}{K_{T3} (n A_3 T_{L3} K_{P3} + J_3 s^2 A_3 K_{V3} + J_3 s^2 K_{E3})}$$

..
.
.
.
.

$$\Delta W_N = \frac{J_N s^2 A_N K_{V(N-1)} K_{T(N-1)} \Delta W_{(N-1)}}{K_{T(N)} (n A_N T_{L(N)} K_{P(N)} + J_N s^2 A_N K_{V(N)} + J_N s^2 K_{E(N)})}$$

수식을 간단히 하기 위해

$$y_i = \frac{J_i s^2 A_i K_{V(i-1)} K_{T(i)}}{K_{T(i)} (n A_i T_{L(i)} K_{P(i)} + J_i s^2 A_i K_{V(i)} + J_i s^2 K_{E(i)})}$$

라고 하면,

$$\Delta W_1 = \frac{J_1 s^2 A_1 K_{P1} K_{T1} Q_d - J_1 s^2 R_{a1} \Delta T_{L1}}{K_{T1} (n A_1 K_{P1} \Delta T_{L1} + J_1 s^2 A_1 K_{V1} + J_1 s^2 K_{E1})}$$

$$\Delta W_2 = y_2 \Delta W_1$$

$$\Delta W_3 = y_3 \Delta W_2 = y_3 y_2 \Delta W_1$$

..
.
.

ΔW_1

$$\Delta W_N = y_N \Delta W_{N-1}$$

$$= y_N y_{N-1} \dots y_3 y_2 y_1 \Delta W_1 \quad (11)$$

속 1 단 모터에서 ΔW_1 만큼 부하 변동에 의한 속도 변동을 일으키면 N 단 모터에서는 각 속들의 파라미터(Parameter)들이 누적이 된다

따라서 부하변동 시 속도 조종을 해주기 위해서는 각 속 마다 y_i 를 상쇄 하는 보상을 달아 주어야만 한다.

(나) 병렬형 동기 제어 방식

그림 2-2 에서와 같이 병렬형 동기 제어방식은 1 축을 제외한 나머지 축들 간에 y_i 가 누적되는 현상이 없으므로

$$\Delta W_i = y_i \Delta W_i \quad (12)$$

가 된다.

2-4 보상기의 전달함수

직, 병렬 동기제어 알고리즘에서 y_i 의 효과를 제거하기 위한 보상기(Compensator)의 전달함수를 구하기 위해 먼저 1 축의 전달함수를 Mason의 이득 공식을 이용하여 식을 구해보면

$$\frac{Q_{a1}(s)}{Q_d(s)} = \frac{K_{p1} A_1 K_{m1}}{\tau_{m1}s^2 + (1+A_1K_{m1}K_{v1})s + n K_{p1} A_1 K_{m1}} \quad (13)$$

와 같이 구해짐을 알 수 있다.

이제 보상기를 2 축의 서보앰프(A_2) 앞단에 C(s)로 달았다고 하고 2축의 전달함수를 마찬가지로 구해보면 아래 식처럼 얻어진다.

$$\frac{Q_{a2}(s)}{Q_d(s)} = \frac{K_{p1} A_1 K_{m1} K_{v1} A_2 K_{m2} C(s)}{Y + J + L} \quad (14)$$

여기서

$$Y = s(\tau_{m1} + 1)(\tau_{m2} + 1)$$

$$J = s(\tau_{m1} + 1)(A_1 K_{m1} K_{v1} + A_2 K_{m2} K_{v2} C(s))$$

$$L = (\tau_{m2} s + 1) K_{p1} K_{m1} A_1 n$$

y_i 를 상쇄하는 보상기의 전달함수는 아래식을 만족하는 C(s)를 구하기 위하여

모델 추종기(Model Follower)의 개념을 이용 하면 아래와 같은 식을 구성할 수 있다.

$$\frac{Q_{a1}}{Q_d} = \frac{Q_{a2}}{Q_d} \quad (15)$$

식(13)과 식(14)을 식(15)에 대입 하여 C(s)의 항을 따로 모은 후, 식(15)를 만족하는 C(s)를 구하여 보면 보상기는 아래와 같은 형태를 가짐을 알 수 있다.

$$C(s) = \frac{A s^3 + B s^2 + D s + E}{F s^2 + G s + H} \quad (16)$$

여기서

$$A = \tau_{m1} \tau_{m2}, \quad B = 2\tau_{m1} \tau_{m2} + A_1 K_{m1} K_{v1} \tau_{m2}$$

$$D = 1 + K_{p1} K_{m1} A_1 n \tau_{m2} + A_1 K_{m1} K_{v1}$$

$$E = K_{p1} A_1 K_{m1} n$$

$$F = \tau_{m1} (K_{v1} - K_{v2}), \quad G = 1 - K_{v2} + A_1 K_{m1} K_{v1}$$

$$H = n K_{p1} K_{m1} K_{m2}$$

본 논문의 실험에서는 복수 모터, 즉 다수개의 모터의 파라미터를 실제 적용하여 제작하는 데에 어려움이 없으므로 보상기는 실험이 되지 않았다.

3. 시스템의 구성

그림 3-1 에서와 같이 시스템의 구성은 IBM PC를 Host Computer로 하여 하여 68000 CPU에 맞도록 작성된 프로그램을 Cross-Compiling 하여 RS-232C 단자를 통해 68000 CPU Board로 Down Loading을 하여 각 위치, 속도 제어 데이터를 Global bus를 통하여 위치 제어 Board로 주고 받을 수 있도록 이루어져 있고, 모터의 속도 및 위치의 변경은 전용 IC(PPMC102)의 레지스터 값을 사용자 요구에 따라 변경 함으로서 수행이 된다. Board를 제어 하고, 시험하기 위한 프로그램은 C-언어로 구성하였다.

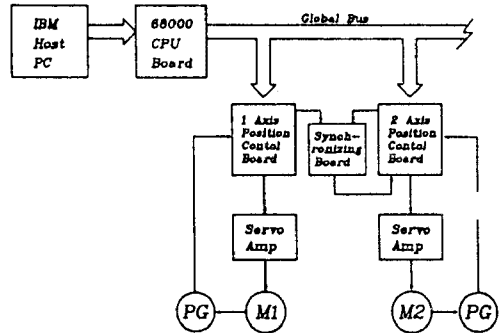


그림 3-1 전체 시스템의 구성도

시스템 분석

그림 3-2 는 회로로 구성된 그림이다. 구성된 회로도의 중요한 부분은 크게 펄스 발생기, 위치 및 속도 제어기, 동기 보드로 이루어져 있다.

(1) 펄스 발생기

펄스 발생기는 입력 데이터 값에 따라 서보 모터의 동작을 제어하는 펄스 열을 만들며, 펄스 열은 위치, 속도의 정보를 같이 포함한다. 따라서 펄스 발생기의 펄스 수와 주파수를 변화 함에 따라 모터를 제어 한다. 펄스 발생기는 모터전용 IC인 PPMC-102로 구성 됐다.

(2) 위치 및 속도 제어기

위치 및 속도 제어기는 입력 펄스 수와 피드백 펄스 수의 차를 구하는 여러 카운터와 입력 펄스, 피드백 펄스의 주파수를 F/V 변환 하여 아나로그 가산 회로를 거쳐 속도 차에 비례하는 전압을 구해내는 회로로 구성이 된다. 본 논문의 실험은

- (i) 여러 카운터
- (ii) 양자화기(D/A 변환기 입력용)
- (iii) F/V 변환기 입력용 펄스 출력 단자
- (iv) 엔코더 펄스 채배 모드

기능을 갖고 있는 서보 모터 전용의 IC 인 YM3562 를 사용하여 구성되어 있다.

(3) 동기 보드(Synchronizing Board)

기본적으로는 OP Amp로 구성된 가산기이며, 1 축의 피드백 전압과 2 축의 피드백 전압을 감산하기 위해 2 축의 피드백 전압은 인버팅 회로(Inverting Circuit)을 거쳐서 가산이 된다.

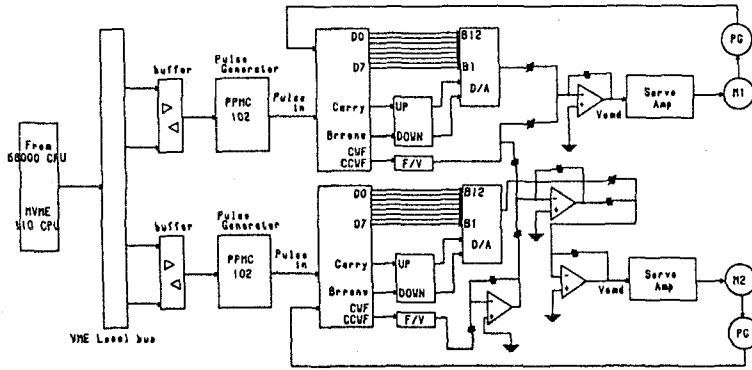


그림 3-2 시스템의 회로도

4. 실험 및 결과

1, 2 축이 정속도로 회전시에 임의의 부하변동을 1 축에만 주었을 때 1, 2 축의 Vcmd 단자(그림 3-2)의 출력 파형을 측정하였다.

그림 4-1(a)는 10 Kpps 로 정속도로 동작하고 있을 때의 파형으로서 서보 앰프의 입력이 거의 영(Zero)에 가까움을 알 수 있다.

그림 4-1(b)는 정속도 동작시에 임의의 부하변동을 1 축에 주었을 때의 출력 파형을 측정한 결과이다. 1 축의 부하변동에 의한 2축의 속도 조정이 잘 일어남을 알 수 있으며, 2 축 파형에서 속도 변동이 감소할 때 기울기가 1축에 비해 완만히 떨어지는 것은 식(12)에 나타난 것처럼 각 축 제어 시스템의 이득 차이에 의한 것임을 알 수 있다.

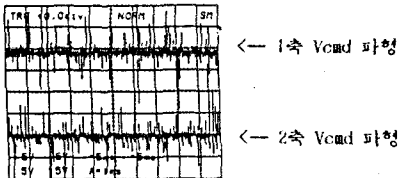


그림 4-1(a) 부하 변동이 없을 때 Vcmd출력파형

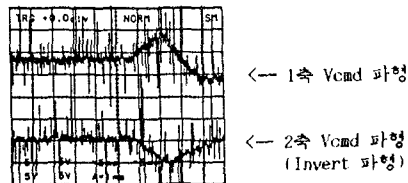


그림 4-1(b) 임의의 부하 변동시 Vcmd출력파형

5. 결론 및 추후 과제

첫째, 직렬 방식의 경우 임의의 i축에 변동이 있어도 다음 동기 대상 모터에 동기가 이루어 질 수 있다는 장점이 있으나, 각축의 y_i (식 12)가 누적되므로 식(15)를 토대로 한 보상기를 각축마다 추가 해야 할 것이다.

둘째, 병렬 방식의 경우는 실험결과에 나타난 바와 같이 정상 상태에서의 동기 제어에 용이하게 쓰여 질

수 있으며, 보상기를 추가하면 과도 상태의 변동까지도 추종 할 수 있다.

Nomenclature

- Q_d 명령치(pulse density), $Q_{o1,2}$ 위치 오차 (rad)
- $V_{o1,2}$ 위치 오차 전압(volt)
- $V_{i1,2}$ 서보 앰프 입력 전압 (volt)
- $V_{f1,2}$ 속도 피드백 전압 (volt)
- $V'_{f1,2}$ 속도 동기 전압 (volt)
- $W_{1,2}$ 모터 각속도 (rad/sec)
- $Q_{a1,2}$ 각위치 (rad)
- $k_{p1,2}$ D/A 변환기 이득 (volt/rad)
- $A_{1,2}$ 서보앰프이득 (volt/volt)
- $k_{v1,2}$ D/A변환기이득 (volt/(rad/sec))
- n 엔코더 이득 (pulse density/rad)

참고 문헌

- [1] Sarachick, P., and Ragazzini, J.R., "A Two Dimensional Feedback Control System" Trans. AIEE, Vol.76, Part II, May 1957, pp 55-61.
- [2] Koren, Y., "Cross-Coupled Biaxial Computer Control for Manufacturing Systems" Trans. ASEM, Vol.102, December 1980, pp 265-272
- [3] David M. Tome, and J. Tal., "Master/Slave Motion Synchronization for Industrial Processes" Fifteen Annual Symposium Incremental Motion Control System and Devices, 1986.
- [4] J. Tal, "Digital Position Control Systems", Proceedings Tenth Annual Symposium Incremental Motion Control System and Devices, June, 1981, pp 257-268
- [5] Borman, M. d., "Optical Shaft Angular Encoder for The Measurement and Control of Incremental Motion -Practical Design Consideration", Proceedings Fifth Annual Symposium Incremental Motion Control Systems and Devices, May, 1976, pp 24-27
- [6] K. Takashi, Permanent Magnet and Brushless DC Motors, Sogo Electronic Company, Tyko, 1984, pp 179-180