

M계열 신호에 의한 푸로세스의 동특성 추정

(Estimation of Process Dynamics by Correlation Method using Maximum Period Null Sequence Signal)

朴 相 疇* · 崔 京 三**
(Park, Sang Hui) (Choi, Kyung Sam)

요 약

통계적 상관법에 의하여 최대주기계열 신호를 시험신호로 2차 진동계의 임펄스 응답 추정에 관하여 이론적 및 실험적으로 검토 하였고, 그 측정 결과는 비교적 만족스러웠다.

이 방법은 실제 푸로세스에 적용시키는 경우 시험신호를 가하는 방법 및 지연신호의 검출 방법의 해결과 더불어 계통의 동정(同定)문제에 크게 기여될 것으로 전망한다.

ABSTRACT

The statistical correlation method for estimating impulse response using maximum period null sequence as test signal was studied and in describing some preliminary experimental work, the authors discussed the problems of mechanization supported by analytical considerations.

Experiments were performed on the 2nd order oscillatory system and the results were in good coincidence with the theoretical values.

1. 서 론

동작하고 있는 푸로세스로부터 동특성을 인지 하려는 연구는 오래 전 부터 요구되어 많은 발전을 이룩하여 왔다. 푸로세스의 임펄스 응답을 추정하기 위한 방법으로 불규칙잡음(random noise)을 사용한 상관법은 계산상의 난점과 합리적인 시간내에서 신뢰할만한 추정을 얻기 어려운 점등으로 푸로세스에 온-라인(on-line)으로 적용시키지 못하였다. 그러나 의불규칙 2진계열(擬不規則 2進系列)의 신호 개발로 이러한 난점을 해소

하고 용이하게 온-라인으로 적용 시킬 수 있게 되었다.¹⁾²⁾

의불규칙 2진계열중, Huffman에 의하여 제안된 최대주기계열(maximum period null sequence; M-sequence)을 시험신호로 해서 1차 및 2차 지연계의 동특성 상관측정³⁾에 이어, 본 논문에서는 2차 진동계를 대상으로 하중함수 추정을 위한 상관법의 이론적 근거를 해석하고, 측정 잡음 개입시에 임펄스 응답의 신뢰성을 규명한 다음, 신호의 퍼래미터(parameter) 선정문제를 포함한 실제 응용 문제를 검토하였다.

$\hat{g}(\tau)$ 의 추정장치는 M계열 신호발생기, 앤드 게이트(AND gate)회로, 동기신호발생기, 계수형 전압계(digital voltmeter) 등으로 구성하여 적응 제어등에 응용하는 경우, 패턴(pattern) 구성을

* 정회원. 연세대학교 전기공학과
Dept. of Electrical Eng., Yonsei Univ.

** 정회원. 홍익대학교 전기공학과
Dept. of Electrical Eng., Hongick Univ.

체계화하기 위하여 추정량을 계수로 표시할 수 있도록 고려하였다.

2. 시험신호에 의한 $\hat{g}(\tau)$ 추정⁴⁾⁵⁾

2.1 M계열 신호에 의한 추정

주기 ND 인 M 계열 신호를 선형계통의 입력에 가했을때 상호 상관함수와 자기 상관함수는 다음과 같다.

$$\phi_{yx}(\tau) = \frac{1}{ND} \int_0^{ND} y(t)x(t-\tau)dt \quad (1)$$

$$\phi_{xx}(\tau) = \frac{1}{ND} \int_0^{ND} x(t)x(t-\tau)dt \quad (2)$$

신호가 온(on) 되었을 때의 진폭이 A , 오프(off) 되었을 때의 진폭이 $-B$ 라면, $A/B=1 \pm 2/\sqrt{N+1}$ 일때의 자기 상관함수는 식 (3)과 같다.

$$\phi_{xx}(\tau) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} \phi_{xx}^0(\tau - nND) \quad (3)$$

$$\text{단, } \phi_{xx}^0(\tau) = \begin{cases} \phi_{xx}(\tau) & : |\tau| \leq ND/2 \\ 0 & : |\tau| > ND/2 \end{cases}$$

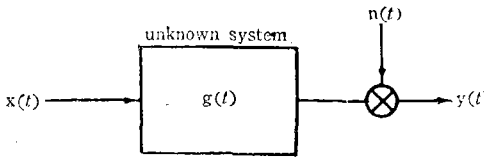


그림 1. 시불변 선형계통의 블럭선도
Fig. 1. Block diagram of time-invariant linear system

선형제어계의 출력은 하중함수를 $\hat{g}(\alpha)$ 라 할때에

$$y(t) = \int_0^{\infty} \hat{g}(\alpha)x(t-\alpha)d\alpha \quad (4)$$

이므로, 식 (1)에 식 (4)를 대입하면 식(5)가 성립한다.

$$\phi_{yx}(\tau) = \int_0^{\infty} \hat{g}(\alpha) \phi_{xx}(\tau-\alpha)d\alpha \quad (5)$$

식 (5)에 식 (3)을 대입하면,

$$\phi_{yx}(\tau) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \hat{g}(\alpha)\phi_{xx}^0(\tau-\alpha-nND)d\alpha \quad (6)$$

$$KC \frac{\omega_n}{\sqrt{1-\zeta^2}} e^{-\zeta\omega_n\tau} \sin(\omega_n\sqrt{1-\zeta^2}\tau + \theta) < \phi_{yx}(\tau) < KC \frac{\omega_n}{\sqrt{1-\zeta^2}} e^{-\zeta\omega_n\tau} (1 - e^{-\zeta\omega_nND})^{-1} \sin(\omega_n\tau\sqrt{1-\zeta^2} + \theta) \quad (13)$$

$$\text{단, } \begin{cases} C = [(\sin h\zeta\omega_n A/2)^2 + (\sin\sqrt{1-\zeta^2}\omega_n A/2)^2] / \left(\frac{\omega_n A}{2}\right)^2 \\ \theta = \tan^{-1} \frac{(1-2\zeta^2) \sin(\omega_n A\sqrt{1-\zeta^2}) \sinh(\zeta\omega_n A) + 2\zeta\sqrt{1-\zeta^2} [\cos(\sqrt{1-\zeta^2}\omega_n A) \cosh(\zeta\omega_n A) - 1]}{(2\zeta^2-1)[\cos(\sqrt{1-\zeta^2}\omega_n A) \cosh(\zeta\omega_n A) - 1] + 2\zeta\sqrt{1-\zeta^2} \sin(\sqrt{1-\zeta^2}\omega_n A) \sinh(\zeta\omega_n A)} \end{cases}$$

Δ 가 미소하여,

$$\int_{-\Delta}^{\Delta} \phi_{xx}(\tau)d\tau = K \quad (7)$$

단, K : 상수

식 (7)이 성립할때 추정량 $\hat{g}(\tau_1)$ 은 식 (8)과 같게 된다.

$$\hat{g}(\tau_1) = \phi_{yx}(\tau_1)/K \quad (8)$$

2.2 추정량 $\hat{g}(\tau)$ 의 성질

$\hat{g}(\tau)$ 의 통계적 성질을 검토하기 위하여 평균값과 분산(variance)을 구하면 각각 식(9), 식(10)과 같다.

$$E\{\hat{g}(\tau)\} = g(\tau) \quad (9)$$

$$\sigma g^2 = \frac{1}{K^2} \frac{1}{(ND)^2} \int_0^{ND} \int_0^{ND} x(t_1-\tau) x(t_2-\tau) \phi_N(t_1-t_2) dt_1 dt_2 \quad (10)$$

잡음 $N(t)$ 가 광대역의 백색성 불규칙 신호라면 $\phi_N(t_1-t_2) = K_N \delta(t_1-t_2)$

이고,

$$\frac{1}{ND} \int_0^{ND} x(t-\tau)dt = K/\Delta$$

이므로 σg^2 은 식 (11)과 같다.

$$\sigma g^2 = \frac{1}{ND} \frac{K_N}{KA} \quad (11)$$

따라서 Δ 가 상당히 적어 $g(\tau) \cong g(\tau \pm \Delta)$ 이고, ND 는 상당히 커서 $g(ND) \cong 0$ 이므로, 이 조건을 전제로 $\hat{g}(\tau)$ 는 불편성(不偏性), 일치 추정량임을 알 수 있다.

2.3 2차 제어계에 적용

(1) 임펄스 응답 해석

제어계의 전달함수가 $\omega_n^2/(S^2+2\zeta\omega_n S+\omega_n^2)$, 즉 하중함수가

$$g(t) = \frac{\omega_n}{\sqrt{1-\zeta^2}} \exp(-\zeta\omega_n t) \sin\sqrt{1-\zeta^2}\omega_n t \quad (12)$$

인 경우, $x(t)$ 와 $y(t)$ 의 상호 상관함수는, 식 (12)를 식 (6)에 대입하여, $\Delta \leq \tau \leq (N-1)\Delta$ 에서

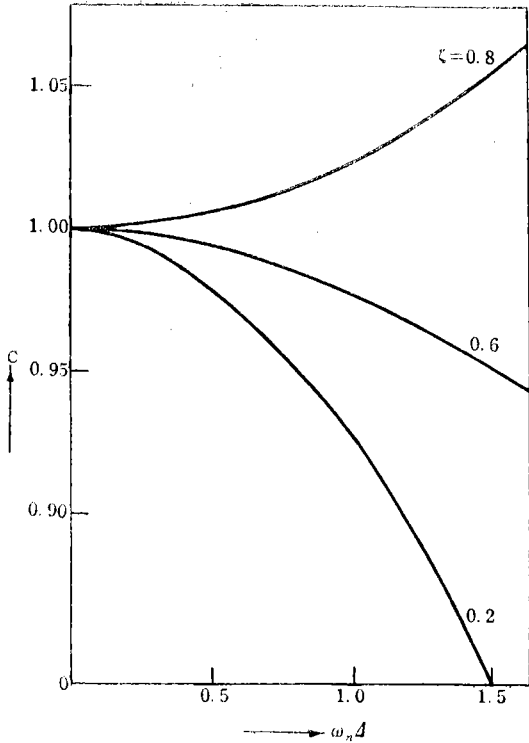


그림 2. 계수 C
Fig. 2. Coefficient C

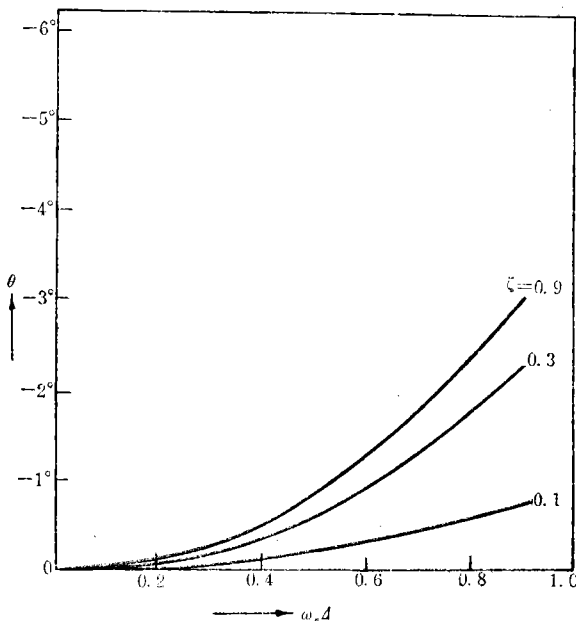


그림 3. 위상각 θ
Fig. 3. Phase angle error θ

이고 $NΔ$ 가 아주 크므로,

$$\exp(-\zeta\omega_n N\Delta) \cong 0 \quad (14)$$

따라서

$$\phi_{y_i}(\tau) \cong KC \frac{\omega_n}{\sqrt{1-\zeta^2}} \exp(-\zeta\omega_n \tau) \sin(\sqrt{1-\zeta^2} \omega_n \tau + \theta) \quad (15)$$

고로 식 (8)을 만족한다.

(2) 퍼라미터의 결정

실제 추정을 실험하기 위하여 결정하여야 할 중요한 퍼라미터는 펄스 폭 Δ , 최대주기 N 이다. 먼저 $N\Delta$ 의 크기는 보통 제어계의 정정시간(整定時間)의 1.5배 이상이 되어야 한다. 그 한계는 식 (14)로부터 1%이하를 영으로 간주한다면

$$4.6/\zeta\omega_n < N\Delta \quad (16)$$

의 조건을 만족하여야 할 것이다.

그림 2로부터

$$\omega_n \Delta \leq 0.5 \quad (17)$$

이고, 식 (17)을 만족하면 이득은 2%이내, 위상 지연은 1.3°이내의 오차가 예측된다.

ω_n 과 ζ 는 기지의 상수이므로 Δ 의 범위는

$$4.6/\omega_n \zeta N \leq \Delta \leq 0.5/\omega_n$$

임을 알 수 있다.

3. 실험장치의 구성

3.1 장치의 구성

$g(\tau)$ 의 추정문제는 N , Δ 및 K 가 결정되면 식 (8)에 의하여 곧 $\phi_{y_i}(\tau)$ 의 추정문제이므로 상관 함수를 구하기 위한 제 조건은 제어계의 입력인 시험신호와 그의 출력과의 승산 및 그의 평균문제이다.

시험신호 발생장치로 10개의 전이 레지스터(shift register)와 다이오드 매트릭스(diode matrix)에 의하여 외부에서 간단히 논리를 변경하여 모든 지연신호를 얻도록 하였다. 다이오드·매트릭스는 오어·앤드 논리(OR-AND logic)로 모듈러 2 가산(modulo two addition)을 하도록 구성하였으며, 클럭 펄스발생기는 단일 접합 트랜지스터 발진회로를 이용하여 클럭 펄스 주기의 가변으로 충분히 Δ 를 조절하도록 하였다.⁶⁾

출력과 지연신호와의 승산은 제전기를 이용하였다. $y(t)x^*(t-m\Delta)$ 의 적분 방법은

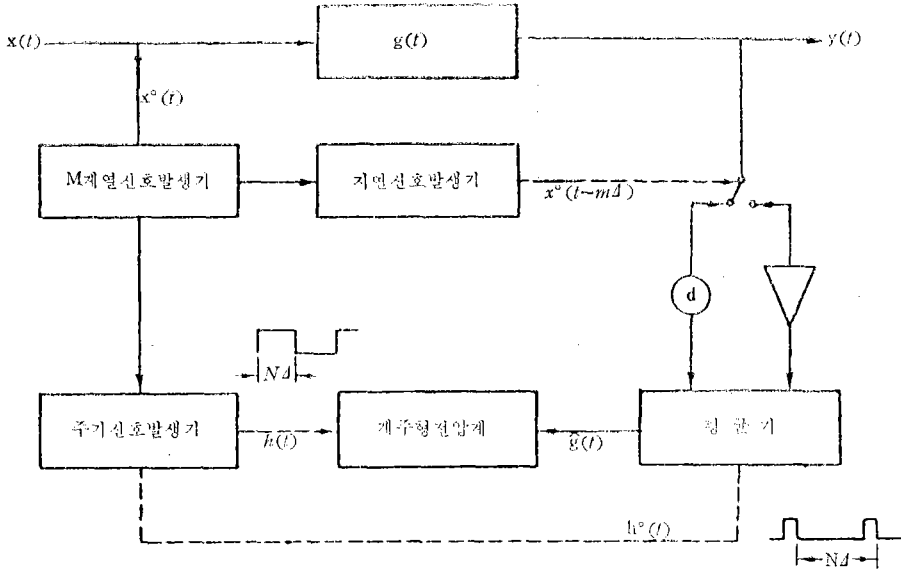


그림 4. 실험장치 개략도

Fig. 4. Schematic diagram of crosscorrelator

$$h(t) = \begin{cases} 1 & : 0 \leq t \leq ND \\ 0 & : 0 < t \text{ or } t > ND \end{cases}$$

인 주기신호를 발생시켜

$$\int_0^{ND} y(t)x^o(t-mD)dt$$

$$= \int_{-\infty}^{\infty} y(t)h(t)x(t-mD)dt$$

로 한다. $\hat{g}(\tau)$ 표시는 BCD 1248코오드와 10진법으로 나타낼 수 있는 계수형 전압계를 사용하여

$2ND$ 마다 트리거링(triggering)시켜 표시하도록 한다. 실험장치 구성은 그림 4와 같다.

3.2 $h(t)$ 발생기

최대주기계열 신호의 성질 중에 런 성질(run property)에 의하면 1주기 중에서 A 또는 B의 한개가 연속되는 런 수는 전런 중의 1/2이고, 두개가 연속되는 런 수는 전체의 1/4, 세개가 연속되는 경우는 전체의 1/8,이다. P차 M계열 신호의 경우 전 런수는 2^P-1 이고 l개의 동일한

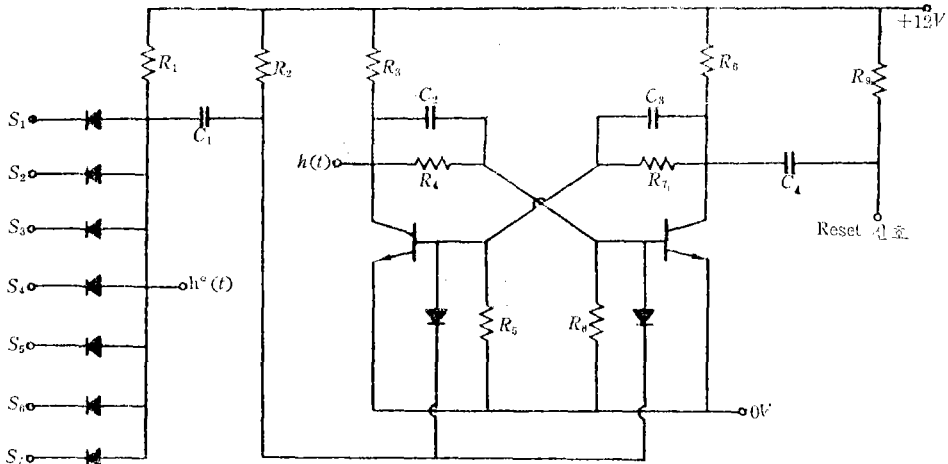


그림 5. 동기신호 발생회로

Fig. 5. Synchro signal generator circuit

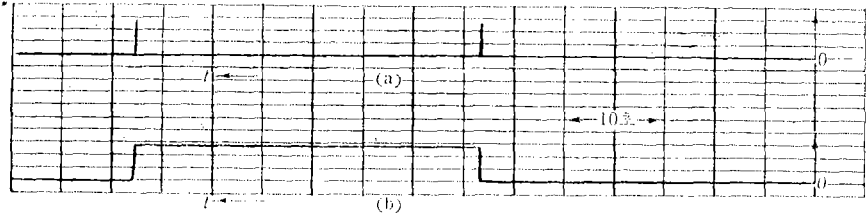


그림 6. $h^*(t)$ 와 $h(t)$
 Fig. 6. $h^*(t)$ & $h(t)$

것이 반복되는 수 $M(l)$ 은

$$M(l) = \begin{cases} 2^{p-l-1} & : p-l-1 \geq 0 \\ 1 & : p-l-1 < 0 \end{cases}$$

단, $0 < l \leq p$

이므로 p 개가 연속되는 런 수는 1 주기간에 오직 한번이 존재하므로 이 성질을 이용하여 동기 신호를 만들 수 있다.

구성은 7개의 ($p=7$) 입력을 갖는 앤드 게이트로

1 주기마다 펄스 $h^*(t)$ 를 발생하게 하고, 이 펄스로 플립·플롭(flip-flop)을 동작시켜 한쪽 출력은 평균기의 게이트 신호 $h(t)$ 로 사용하고, 다른 한쪽의 출력은 미분회로를 통하여 리셋(reset)신호로 사용하며, 펄스 $h^*(t)$ 를 계수형 전압계의 트리거링 신호로 사용한다. 회로는 그림 5와 같고, 기록기로 표시된 $h(t)$ 와 $h^*(t)$ 는 그림 6과 같다.

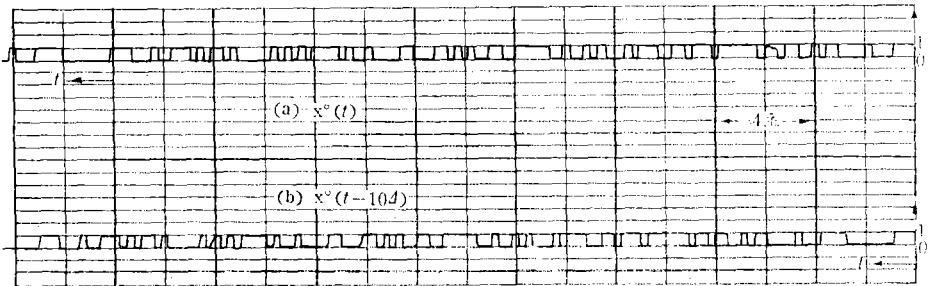


그림 7. M계열 신호와 그의 지연신호

Fig. 7. M-sequence signal and it's delay signal

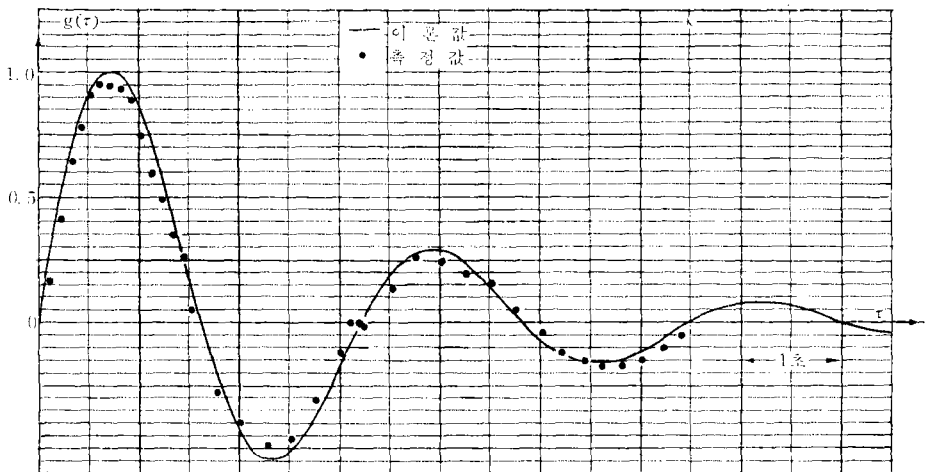


그림 8. 2차 진동계의 이론값과 실험값

Fig. 8. Experimental data and results of analog simulation

4. 실험 및 결과 고찰

추정 대상을 $\zeta=0.3$, $\omega_n=2$ 인 2차 진동계로 할때 d 가 $7.7/N \leq d \leq 0.25$ 이므로 하한을 0.1 이하로 하기 위하여 $N=127$ 로 선정하고, d 는 $0.061 \leq d \leq 0.25$ 가 된다. 본 실험에서는 $d=0.1$ 과 $d=0.25$ 을 사용하였다.

시험신호의 진폭은 자기 상관함수의 바이어스가 영(zero)이 되도록 $A=1.4[V]$, $B=-1.7[V]$ 로 하였고 이 경우에 $d=0.82325$, $K=2.267d$ 가 된다.

실험에 사용한 M 계열 신호와 그의 지연신호는 그림 7과 같다. 2차 진동계를 상사형 전자계산기로 시뮬레이트 하여 이를 모델로 추정된 $\hat{g}(t)$ 를 규준화 하여 도시하면 그림 8과 같다. 상사형 전자계산기로 기록한 응답곡선을 이론값으로 해서 실험값과 비교하였다. 계산에 의한 이론값과는 최대 10%의 오차를 보이고 있다.

5. 결 론

통계적 상관법에 의하여 최대주기계열 신호를 시험신호로 2차 진동계의 임펄스 응답 추정에 관하여 이론적 및 실험적으로 검토하였다. 측정 결과는 비교적 만족스러웠다. 그러나 실제적인 문제로서 직접 프로세스에 적용시키는 경우 시험신

호를 가하는 방법, 이로 부터 지연신호 검출법 및 이로 인한 측정 오차등의 문제가 있다.

그러나 본 방법은 이러한 문제의 개선과 아울러 한 걸음 더 나가 계통의 동정문제에 크게 기여할 것이다.

참 고 문 헌

- (1) M. T. G. Hughes & A. R. M. Noton: "The measurement of control system characteristics by means of a cross-correlator", Proc. IEE, Vol. 109, No. 43, Jan, 1962, pp. 77-83
- (2) A. D. G. Hazlerigg & A. R. M. Noton: "Application of cross correlating equipment to linear system identification", Proc. IEE, Vol. 112, No. 12, Dec., 1965, pp. 2385-2400
- (3) 한단춘, 최경삼, 박장춘: "의불규칙 2진 신호에 의한 프로세스의 동특성 상관추정", 대한전기학회지 제19권 제6호, 1970년 11월, pp. 1-7
- (4) E. Mishkin & L. Braun, Jr: *Adaptive control systems, Chap. 3 & 9*, McGraw-Mill, 1961
- (5) 박상희: M 계열 신호에 의한 휴먼·오퍼레이터의 동특성 추정, 연세대학교 대학원, 공학박사학위 논문, 1971년 1월
- (6) 박상희, 박장춘: "제어계통의 동특성 측정을 위한 M 계열 신호발생기", 대한전자공학회지, 제7권 제2호, 1970년 8월, pp. 84-90