

제어 계통의 동특성 측정을 위한 M 계열 신호발생기

(A Study of M-sequence Signal Generator for Determining System Dynamics)

박 상 희* 박 장 춘**
(Park, Sang Hui) (Park, Chang Choon)

요 약

제어계통의 동특성에 대한 상관계산이 가능하게 시험신호 발생장치를 연구하였다. 의사 랜덤 2진 신호 중 M 계열 신호에 대한 것을 중심으로 다뤘고, 구성된 신호발생기는 시험신호로서 만족할 수 있는 특성을 보였다.

ABSTRACT

Among the various methods used for determining control system dynamics, the method using cross-correlation function seems useful if the white noise can be available as a test signal.

In this paper, results are reported of a M-sequence generator which was built by means of IC shift register as it designed by the authors. This signal appears very useful and promises future applications in adaptive control systems.

1. 서 론

통계적 자동제어 이론의 발전에 따라 랜덤 신호를 발생하는 장치의 중요성이 강조되고 있다. 더우기 제어대상을 최적상태로 제어하기 위하여 제어대상의 동특성을 정확하게 측정하려는 필요성이 증대되고, 전자계산기는 이러한 요구를 더욱 확대시키고 있다.

제어계통의 동특성을 측정하는 방법이 여러가지 발표되어 있지만, ⁽¹⁾⁽²⁾ 작은 입력신호를 사용하여 신뢰도가 높은 측정을 할 수 있는 방법이

요즈음 활발히 연구되고 있다. ⁽³⁾ 특히 통계적인 방법을 도입한 상관법(correlation method)에 의한 것은 유망한 것으로 2진 랜덤신호(binary random signal)의 자기상관함수는 백색잡음(white noise)에 가까우므로 동특성 측정에 사용하면 입력 신호와 상관 계산이 간단히 되는 이점이 있다.

본 논문에서는 상관법을 적용해서 제어계통의 동특성에 대한 상관 계산이 가능하게 시험신호 발생장치를 구성 하였다. 여기서 선정한 신호는 2진 랜덤신호중 Huffman에 의하여 고안된 M 계열 신호⁽⁴⁾이며, 일차적으로 그 성질과 특성에 대한 고찰을 하고 신호발생 장치의 성능을 아나로그 컴퓨터⁽⁵⁾를 사용하여 검토하였다.

* ** 연세대학교 전기공학과

Dept. of Electrical Eng. Yonsei Univ.

接受日字 1970年 7月 18日

2. 기본 이론

(1) 상관법의 원리

하중함수 $h(t)$ 를 가진 선형 system의 입력신호를 $x(t)$, 출력신호를 $y(t)$ 라 하면 다음과 같은 식으로 $y(t)$ 가 표시된다.

$$y(t) = \int_{-\infty}^{\infty} h(t-\tau)x(\tau)d\tau \dots\dots\dots(1)$$

지금 $x(t)$ 를 가해서 $y(t)$ 가 정상적으로 변동하는 경우, 식 (1)의 양변에 $x(t-\alpha)$ 를 곱하여 시간평균을 하면 다음 식이 성립한다.

$$\phi_{xy}(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} h(\tau-\alpha)\phi_{xx}(\alpha)d\alpha \dots\dots\dots(2)$$

여기서 $\phi_{xy}(\tau)$ 는 입출력 신호간의 상호상관함수이고, $\phi_{xx}(\alpha)$ 는 입력신호의 자기상관함수를 나타내는데 다음 식으로 정의된다.

$$\left. \begin{aligned} \phi_{xy}(\tau) &= \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2T} \int_{-T}^T x(t-\tau)y(t)dt \\ \phi_{xx}(\alpha) &= \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2T} \int_{-T}^T x(t-\alpha)x(t)dt \end{aligned} \right\} \dots\dots(3)$$

다음에 식(2)의 양변을 Fourier 변환하면 다음과 같이 된다.

$$\Phi_{xy}(j\omega) = H(j\omega)\Phi_{xx}(j\omega) \dots\dots\dots(4)$$

여기서 $\Phi_{xx}(j\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} \phi_{xx}(\alpha)e^{-j\omega\alpha}d\alpha$

$$\Phi_{xy}(j\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} \phi_{xy}(\tau)e^{-j\omega\tau}d\tau$$

Dirac의 delta 함수로서 자기상관함수를 나타내면 다음 식과 같이 된다.

$$\phi_{xx}(\alpha) = K\delta(\alpha) \dots\dots\dots(5)$$

지금 식(5)가 성립하는 경우를 생각하면 식(2)와 식(4)는 다음 식과 같이 된다.

$$\phi_{xy}(\tau) = Kh(\tau) \dots\dots\dots(6)$$

$$\Phi_{xy}(j\omega) = KH(j\omega) \dots\dots\dots(7)$$

즉 이러한, 경우 $\phi_{xy}(\tau)$ 또는 $\Phi_{xy}(j\omega)$ 를 측정하면 식(6)과 식(7)에서 계통의 임펄스응답 $h(t)$ 또는 주파수 전달함수 $H(j\omega)$ 를 구할 수 있다.

(2) 의사 랜덤 2진 신호

정상변동을 하는 입력신호 $x(t)$ 및 출력신호 $y(t)$ 가 주기 $N\Delta$ 를 가진 경우에는 식(3)의 계산

에서 다음 식과 같이 되어 상관함수의 계산이 가능하여진다.

$$\left. \begin{aligned} \phi_{xy}(\tau) &= \frac{1}{N\Delta} \int_{t-N\Delta}^t x(\alpha-\tau)y(\alpha)d\alpha \\ \phi_{xx}(\alpha) &= \frac{1}{N\Delta} \int_{t-N\Delta}^t x(\tau-\alpha)x(\tau)d\tau \end{aligned} \right\} \dots\dots(8)$$

그러나 식(3)에서 상관함수를 구하는 경우 입력신호와 출력신호의 데이터가 T_I 시간 사이에서만 주어지는 경우에는 식(8)을 충실히 실행하는 것은 불가능하므로 다음 식에 의해 상관함수를 근사 계산하는 것이 보통이다.

$$\left. \begin{aligned} \phi_{xy}(\tau) &= \frac{1}{T_I - |\tau|} \int_{-(T_I-|\tau|)/2}^{(T_I-|\tau|)/2} x(t-\frac{\tau}{2}) \cdot y(t+\frac{\tau}{2})dt \\ \phi_{xx}(\alpha) &= \frac{1}{T_I - |\alpha|} \int_{-(T_I-|\alpha|)/2}^{(T_I-|\alpha|)/2} x(t-\frac{\alpha}{2}) \cdot x(t+\frac{\alpha}{2})dt \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots(9)$$

식(9)와 같이 시간에 관한 평균 연산을 유한 구간으로 행하기 때문에 이것에 의한 오차를 수반한다.

그림 1은 $N\Delta$ 의 주기를 가진 의사 랜덤 2진 신호(Pseudo-random binary signal) 중 M 계열 신호를 보인 것이다.

M 계열 신호는 2진 신호계열로 shift register D 와 1개 또는 그 이상의 modulo 2 adder에서 구성되는 귀환회로에서 발생된다.

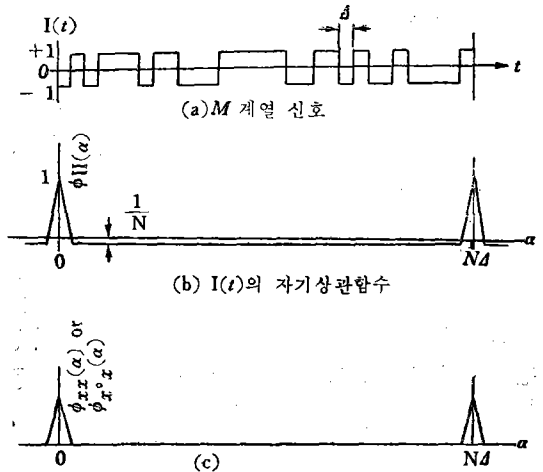


그림 1. M계열 신호와 자기상관함수
Fig. 1. M-sequence signal & autocorrelation function

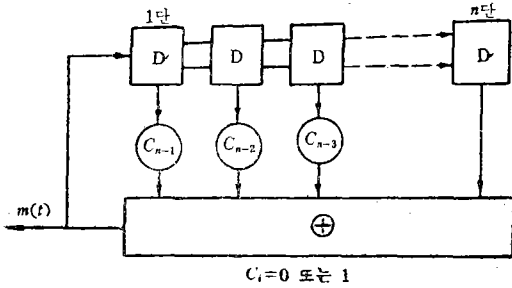


그림 2. M계열 신호 발생 원리
Fig. 2. Principle of M-sequence signal generating

그림 2는 n 단의 shift register 를 가진 경우에 있어서 주기신호 m 을 준다.

Shift register 를 기동하는 클록 펄스의 주기를 Δ 라 하면 이 회로에서 발생하는 신호 m 의 주기 NΔ 는 0 또는 1의 값을 가진 계수 {C_i}의 선택으로서 결정된다.

그러나

$$N \leq 2^n - 1$$

이므로 N가 최대값 2ⁿ-1을 갖게 {C_i}가 선택될 때 발생하는 신호 m을 M계열 신호라 한다. 이때 계열 <m>은

$$(D^n \oplus C_1 D^{n-1} \oplus C_2 D^{n-2} \oplus \dots \oplus C_{n-1} D) \langle m \rangle = \langle m \rangle \dots (10)$$

를 만족한다. 여기서 D^k<m>은 계열 <m>을 k만큼 지연시킨 것이고 ⊕는 modulo 2 addition을 나타낸다.

식(10)을 써서 임의의 Dⁱ<m>은 Dⁿ<m>~D<m>까지 n개의 신호에서 구해짐을 알게 된다.

그림 1(a)에 보인 M계열 신호 I(t)의 자기상관함수 ϕ_{xx}(α)의 값은 k를 정수로 하면(zero를 포함).

$$\phi_{II}(\alpha) = \begin{cases} 1; & \alpha = kN\Delta \\ -\frac{1}{N}; & kN\Delta + \Delta \leq \alpha \leq kN\Delta + (N-1)\Delta \end{cases} \dots (11)$$

이다.

System의 실제 입력신호 x(t)를

$$x(t) = AI(t) + B \dots (12)$$

와 같이 선택하면 자기상관함수 ϕ_{xx}(α)는

$$\phi_{xx}(\alpha) = A^2 \phi_{II}(\alpha) + 2ABI(t) + B^2 \dots (13)$$

이다. 여기서 I(t) = 1/N 을 고려하면

$$B = A \left\{ \frac{-1 \pm \sqrt{1+N}}{N} \right\} \dots (14)$$

을 만족해서 식(12)의 A와 B의 비율을 정해 주면 그 때 입력신호 x(t)의 자기상관함수는 kNΔ + Δ ≤ α ≤ kNΔ + (N-1)Δ 에 있어서 영(zero)이 되어 δ 함수에 근사하게 된다. 그래서 식(12)의 A 또는 B를 조정하여 식(14)를 만족하게 선택한 경우 새로운 보조변수 x°(t)를 도입한다.

$$x^\circ(t) = I(t) + C \dots (15)$$

C가 다음 식을 만족하면 x°(t)와 x(t)의 상호상관함수 ϕ_{xx}(α)는 그림 1(c)와 같이 된다.

$$C = \frac{A-B}{NB+A} \dots (16)$$

$$\phi_{x^\circ x}(\alpha) = \begin{cases} \frac{N+1}{N} A; & \alpha = kN\Delta \\ 0; & kN\Delta + \Delta \leq \alpha \leq kN\Delta + (N-1)\Delta \end{cases} \dots (17)$$

그리고 식(1)에서 식(2)에 이르는 과정과 같이 하여 주면

$$\phi_{x^\circ y}(\alpha) = \int_0^\infty h(\tau) \phi_{x^\circ x}(\alpha - \tau) d\tau \dots (18)$$

로 되어 의사(擬似)랜덤 2진신호의 N와 Δ를 적당히 선정하여 실용상 충분한 정확도를 나타내는

$$\phi_{x^\circ y}(\alpha) = \Phi^\circ_{x^\circ x}(0) h(\alpha) \dots (19)$$

이 된다. 여기서

$$\Phi^\circ_{x^\circ x}(0) = \phi^\circ_{x^\circ x}(0) \Delta$$

$$\phi^\circ_{x^\circ x}(0) = \frac{N+1}{N} A$$

M계열 신호는 의사 랜덤 신호의 일종이므로 randomness 성질을 만족하고, 다음과 같은 성질을 갖는다. (6)

(i) 지연된 M계열간의 mod 2에 의하여 얻어지는 계열은 역시 동일한 모양의 M계열이 된다. 즉 정(positive)의 정수 i, j, k에 의해서

$$(D^i + D^j)x = D^k x \dots (20)$$

가 성립하고 k는 M계열의 전달함수에 의하여

결정된다.

(ii) n 차 M 계열의 종류 $M'(P)$ 는 다음과 같다.

$$M'(P) = \phi(N)/n \dots\dots\dots(21)$$

여기서, $\phi(N)$; Euler의 Phi 함수
 그리고 $\phi(N)$ 은 N 이하의 N 과 서로 소(素)인 정수의 개수이고 $N=2^n-1$ 이다.

(iii) L 을 N 과 서로 소인 정수라고 하고 주기 $N\Delta$ 인 M 계열을 $L\Delta$ 마다 샘플링해서 얻은 계열은 역시 주기 $N\Delta$ 의 M 계열이 되고 L 을 적당히 취해서 주기 $N\Delta$ 의 모든 M 계열을 얻을 수 있다.

3. M계열 신호발생기의 구성

저주파 신호발생기에 대한 연구는 여러가지 문헌에서 발표되고 있으나,⁷⁾⁸⁾ 본 논문에서는 다음과 같은 방법으로 구성하고자 한다.

Shift register와 diode matrix를 이용하여 임의의 M 계열 신호 및 그 지연신호를 얻기 편리하게 하고, 1과 0을 취하는 수열은 flip-flop을 종접속하여 그 주기는 클록펄스 발생기의 주기를 변화시켜 조종하도록 한다. 이렇게 해서 순차적으로 이동되는 1과 0의 수열은 AND 및 OR의 논리회로로서 mod 2 가산을 행하여 shift register에 cycling 회로를 구성한다.

(1) Shift register

Shift register는 NEC 박막혼성직접회로의 풀립-플롭 MC-2621을 9단 종접속하여 구성하였고 풀립-플롭의 내부회로 및 buffer회로는 그림 3과 같다. 풀립-플롭회로의 출력은 일단 증폭회로, 즉 NOT 회로를 부가하여 임피던스 매칭을 이루게 한다.

(2) 다이오드 매트릭스

Mod 2 가산 연산으로 cycling 회로를 구성하기 위해 다이오드 매트릭스 회로는 그림 4와 같이 하고 다이오드를 외부에서 푸티그에 의하여 접속해서 임의의 주기를 갖는 M 계열 신호와 그

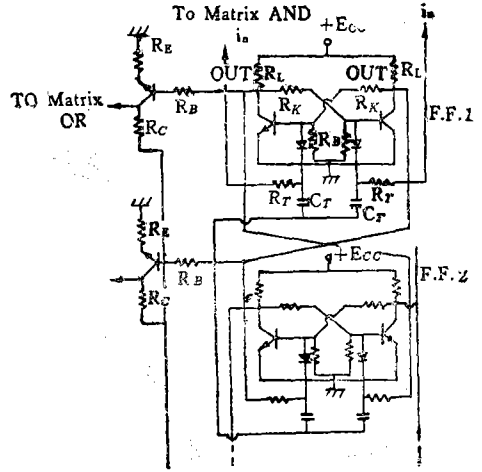


그림 3. 풀립-플롭의 내부회로 및 버퍼회로
 Fig. 3. Flip-flop circuit & buffer circuit

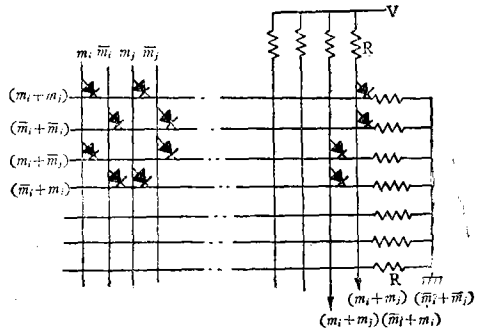
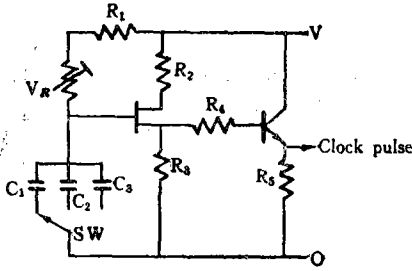


그림 4. OR-AND 논리 다이오드 매트릭스
 Fig. 4. OR-AND logic diode matrix

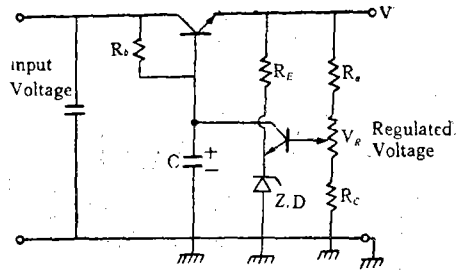
지연된 신호를 얻도록 하였다.

(3) 클록펄스 발생기

클록펄스는 unijunction 트랜지스터 발진기를 이용하였으며, 그 주기는 RC시정수를 변화하여 조종하도록 하였고, 그 출력은 emitter follower를 거쳐 임피던스 매칭을 시켰다. 펄스 주기의 안정을 위하여 트랜지스터 정전압 회로를 부



(a) 펄스회로



(b) 정전압 회로

그림 5. 클럭 펄스 발생기
Fig. 5. Circuit diagram of clock pulse generator

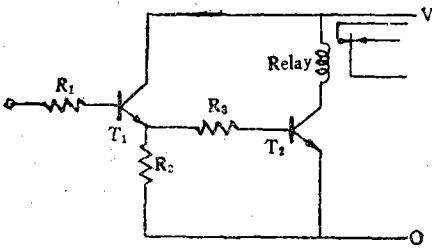


그림 6. 리레이 구동회로
Fig. 6. Relay driving circuit

가 하였으며 그림 5와 같이 구성하였다.

(4) 리레이 구동회로

M계열 신호를 system의 시험신호로 사용하려면 그 진폭의 크기는 물론 system과의 임피던스 매칭도 고려하여야 하므로 shift register의 출력 신호를 그대로 사용하는 것은 문제점이 많다. 그러나 M계열 신호는 0과 1을 갖는 연속적인 2치 신호이므로 shift register의 출력으로 리레이를 구동 시키어 이에 대응되는 신호를 쉽게 얻을 수 있다.

이렇게 해서 리레이의 단자를 이용하여 신호의 진폭과 임피던스 매칭을 하도록 하였다.

리레이 구동회로는 그림 6과 같으며 회로에서 트랜지스터 emitter follower는 임피던스 매칭을 위한 것이다.

이상의 회로를 연결하여 제작된 신호발생기의 개략도는 그림 7과 같으며, 이 그림에서 다이오드 매트릭스의 접속은 $m = m^5 \oplus m^2$ 인 전달함수를

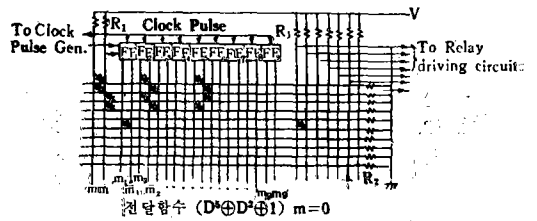


그림 7. M계열 신호발생기의 개략도
Fig. 7. Schematic diagram of M-sequence generator



사진 1. M계열 신호 발생기
Photo. 1. M-sequence signal generator

갖는 것을 나타 내고 있다.

사진 1은 그 외관을 보인 것이다.

4. M계열 신호발생기의 특성

제작된 신호발생기의 특성을 실험한 결과는 다음과 같다.

(1) 1 레벨

다이오드 매트릭스를 신호발생기에 $n=5$ 되도록 접속하여 주기를 $N=31$ 로 실험하였다.

그림 8 은 전달함수 $(D^5 + D^2 + 1)m=0$ 일때 그림 7 에 보인 m_1 을 기준으로 하여 $\tau=\Delta$ 만큼 지연된 신호 5 mm/sec 의 속도로 기록한 것인데, 정확히 지연된 신호를 보여 주고 있다.

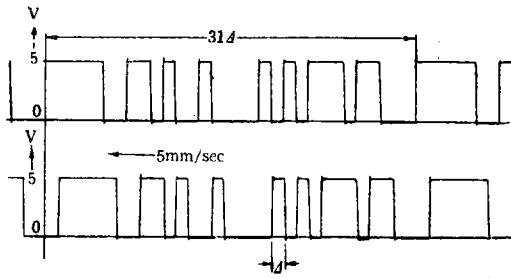


그림 8. $D^5 + D^2 + 1$, $N=31$, $\tau=\Delta$

Fig. 8. $D^5 + D^2 + 1$, $N=31$, $\tau=\Delta$

(2) 2 레벨

리레이의 양단에 각각 다른 전압을 가하여 2 레벨인 신호를 실험한 결과 그림 9 와 같이 기록되었다.

여기서는 조건을 $n=5$, $N=31$, $\tau=2\Delta$ 그리고 5 mm/sec 의 속도로 주었는데 만족할만한 결과를 나타내고 있다.

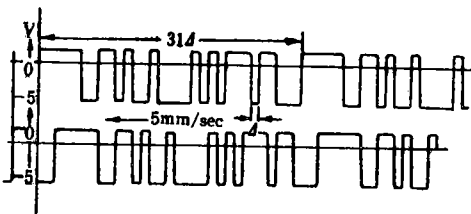


그림 9. 2 레벨 신호 ($\tau=2\Delta$)

Fig. 9. Two level signal

(3) 3 레벨

그림 10 과 같이 실험회로를 구성하여 신호발생기의 3 레벨 신호를 그림 11 과 같이 기록하였

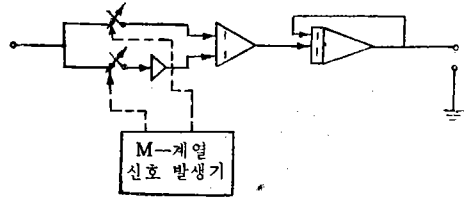
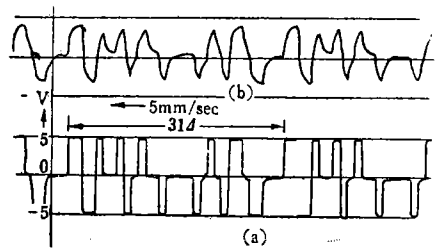


그림 10.

Fig. 10.



(a) 3 레벨 입력신호

(b) 1 차계의 출력신호

그림 11. 3 레벨 신호

Fig. 11. Three level signal

다.

5. 결 론

Shift register 를 사용한 M 계열 신호발생기 임의의 레벨을 가진 신호를 얻을 수 있고, 동시에 diode matrix 의 조합에 따라 지연된 신호를 자유로히 얻을 수 있음을 알 수 있다.

그러므로 이것은 앞으로 다음과 같은 자동제어계의 연구에 시험신호장치로서 사용 가능하리라 생각한다.

- (i) 생체공학에 있어서 불규칙 목표 장치
- (ii) Process 제어계의 외란 신호원
- (iii) Servomechanism 의 통계적 해석과 설계

참 고 문 헌

1. J.G. Truxal; Automatic Feedback Control System

- Synthesis, McGraw-Hill Book Co., 1955, pp. 454—499.
2. P.A.N. Briggs & K.R. Godfrey; Pseudorandom Signals for the Dynamic Analysis of Multivariable Systems, Proc. IEE Vol. 113 No. 7, 1966, pp. 1259~1267.
3. K. Furuta & K. Izawa; Method of determining Process Dynamics, Journal of SICE Vol. 3 No. 9, 1964, pp. 21~30.
4. D.A. Huffman; The Synthesis of Linear Sequential Coding Networks, Proc. 3rd London Symp. on Information Theory, Academic Press, 1956, pp. 77—95.
5. Han, Man Choon; Yonsei 101 Analog Computer, Yonsei Non-chong, 1965, pp. 373—387.
6. S.W. Golomb; Digital Communication with Space Applications, Prentice-Hall Co. 1964, pp. 33—46.
7. D.G.W. Ingram, P. Wells, P.R. Bryant & D. Everett; Digital Techniques in Carrier-Frequency Generation, Proc. IEE, Vol. 113 No. 2, 1966, pp. 243—254.
8. I. Kato, H. Matsuka, S. Matsushita & H. Takeji; The Mechanical Random Signal Generator using a Step-Motor, Journal of SICE, Vol. 7 No. 3, 1968, pp. 12—18.