

MIMIC 프로그램에 의한 동안계의 특성

論 文
30~5~1

Oculomotor System Characteristic by Using MIMIC Program

邊 潤 植* · 朴 相 曠**
(Youn-Shik Byun · Sang-Hui Park)

Abstract

In the paper, in order to get the characteristics of the saccadic and the smooth pursuit movements of the oculomotor systems, a revised stochastic sampled data model suggested by Young et. al. was simulated and analyzed by using the MIMIC language.

The results are summerized as follows;

- (1) The predictability to the sinusoidal inputs increased as the input frequency increased, but at the frequency of 1.0[Hz] the prediction started to decrease.
- (2) The responses of the system drifted when the system was open-looped.
- (3) The responses showed the transient state during the first period of the input waves, and then moved into the steady state.

1. 서 론

시각계는 중추신경계에 의하여 지배되는 매우 복잡한 시스템으로 알려져 있다.

이 시각계의 기능은 안구운동계에 의하여 수행된다.

Dodge는 처음으로 안구운동의 패턴을 분류하고 설명하였으며 특히, 안구운동에서의 빠른 위치변화를 Saccadic운동이라고 명명 하였다.

Westheimer는 안구운동계의 입출력관계에 근거한 선형 2계 모델을 제시하였고, 시표를 변위시킬때 일어나는 Saccadic 응답에 변칙성이 나타남을 관찰하고 이것을 샘플 데이터 시스템이라고 추정하였다.

Fender와 Nye는 안구운동계에 폐환 제어 이론을 적용하여 안구운동 모델을 구성하였다.^{1),2)}

한편, Young은 시스템이론을 생체제어에 응용해서 Saccadic 안구운동 모델을 제안 하였으며, 그 후 Young과 Stark에 의해 Saccadic 안구운동과 Smooth

Pursuit 안구운동을 동시에 고려한 샘플 데이터 모델'을 제시 하였다.³⁾

Dallos와 Jones는 잠음신호를 사용하여 소신호 해석을 함으로써 시스템 전체의 이득과 위상특성을 고찰할 수 있었다.

Robinson에 의해 Pursuit 시스템은 샘플 데이터 시스템이라기 보다는 연속 데이터 시스템이라는 의견이 발표되었다.

그러자 Young과 Forster와 Van Houtte등은 확률적인 샘플 데이터 모델을 개정 발표 하였다.⁴⁾

또한, Sugie는 주기입력에 대한 실험 데이터로부터 단순한 진상요소를 갖는 예측제어기를 제시하고 Smooth Pursuit운동의 주파수 한계를 정하였다.⁷⁾ 따라서 지금까지 알려진 안구운동의 모델들을 분석하고 고찰하여 안구운동의 특성을 규명하고 확인하는 것은 매우 필요한 일이라고 생각된다.

그러므로, 본 연구에서는 Young과 Forster와 Van Houtte등이 제안한 개정된 확률적인 샘플 데이터 모델을 MIMIC언어로 시뮬레이션해서 안구운동계의 입력에 대한 출력응답의 특성을 조사한 것을 보고하고자 한다.

*正會員 : 東洋工業專門大學 電氣科 專任講師
**正會員 : 延世大 工大 電氣工學科 教授 · 工博
接受日字 : 1981年 5月 6日

2. 동안계 모델

2.1 샘플 데이터 모델

샘플 데이터 모델의 가능성은 Vossius와 Rashbass 에 의하여 처음으로 언급되었다.⁵⁾

그후 Young과 Stark는 샘플 데이터 모델을 그림 1⁶⁾과 같이 표시하였다.

샘플 데이터 모델은 생체제어 즉, 인간의 안구운동 제어책을 설명하기 위해 발전되어 왔다. 일련의 실험이 피검자의 머리물 고정시키고 피검자의 눈이 수평적으로 움직이는 시표를 따라가도록 하면서 행해졌는데 이 안구운동 결과에 관한 연구는 샘플 데이터 모델의 기초를 이루는 세가지 원리를 알게 해 주었다. 첫째, 시스템은 입력이 예측할 수 있는 파형일때 예측성과 추적율의 향상을 나타내면서 입력에 적응을 잘하는 계통이 됨을 보여준다. 둘째, Smooth Pursuit 시스템과 빠른 Saccadic 시스템은 기능적으로 분리되는데, 전자는 속도 추적이로 작동하고 후자는 위치제어기로서 작동한다. 셋째, 예측할 수 없는 형태에 있어서 안구 추적의 불연속 성질은 적당한 설정을 위해서 샘플 데이터 모델을 필요로 한다.

이상과 같이 샘플 데이터 모델은 세가지 원리를 기초로 가능하게 되었다. 그림 1에 나타난 모델에서 시표각(c)과 실제의 안구위치(r) 사이에 오차(e)는 망막에서 검출되어진다. 이러한 오차는 샘플링 주기가 T 일때 임펄스 조절기(M)에 의해 샘플되는데, 여기서

T 는 Saccadic 점프 혹은, Pursuit 속도 변화 사이의 평균 불응기(약 0.2sec)이다. 만일 안구가 이전 0.2 sec동안에 어떤 Saccadic 점프도 만들지 않았다면 변환기의 동기화는 시표운동의 시작과 함께 일치한다고 가정된다.

Saccadic운동은 위치수정을 하기위해, 0.3° 인 불감대 보다 크게 샘플된 오차 임펄스는 한주기 반응시간(T)에 의해 지연되고, 안구 위치에 있어서 원하는 변화를 지시해주는 스텝 명령을 주기위해 적분 된다.

오차를 샘플은 샘플링 주기(T)에 의해 나누어진 2개의 위치(원하는 위치와 실제위치) 오차 샘플사이로 차이로 평가된다.

이 오차할 임펄스의 크기는 안구 속도에 있어서 원하는 변화인 스텝명령이고, 두번째 적분은 Pursuit 지로(枝路) 때문에 생기는 안구 속도 성분이다.

Pursuit지로는 2개의 제한기가 더 있는데, 첫번째 제한기는 Pursuit계통이 불연속시표나 또는 Saccadic 점프동안에 나타나는 높은 속도를 따르지 않는 것을 나타내고, 두번째 제한기는 Pursuit의 속도가 $25\sim30$ [$^\circ/\text{sec}$]에서 포화되는 것을 나타내 준다.

2.2 확률적 샘플 데이터 모델⁶⁾

확률적 샘플 데이터 모델은 샘플 데이터 모델의 결점을 수정한 모델로 smooth pursuit 운동이 연속적인데 그 특징이 있다.

Young의 본래 샘플 데이터 모델에서 Saccadic안구운동계는 모델의 훌륭한 Saccadic 응답특성을 유지하

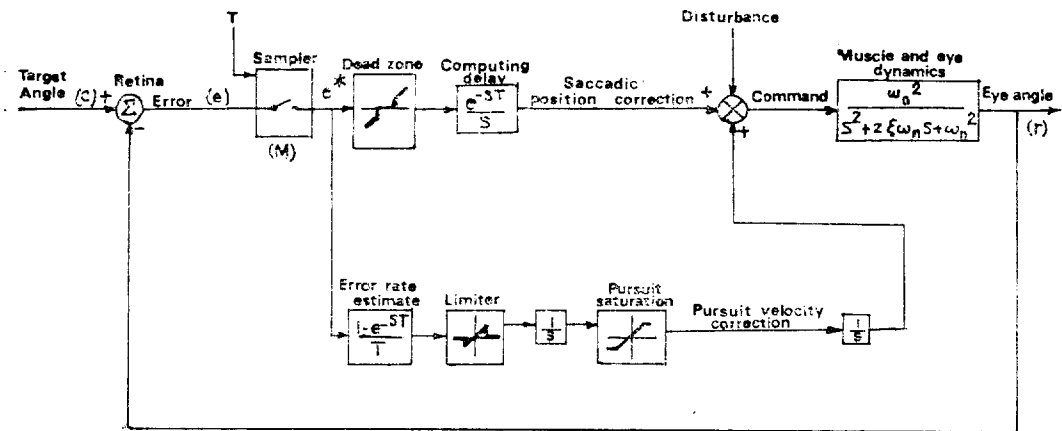


그림 1. 샘플 데이터 모델
Fig. 1. Sampled Data Model

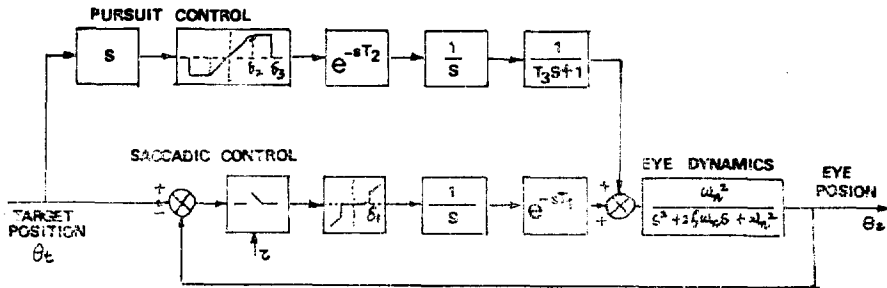


그림 2. 확률적 샘플데이터 모델
Fig. 2. A Stochastic Sampled data model

기 위하여, 단지 시간 지연만을 줄이고, Pursuit 안구 운동 제어계는 연속적으로 변화하도록 수정되었다.

그림 2는 확률적 샘플 데이터 모델을 나타낸 것이다 Pursuit안구제어계에 있어서 시표위치는 연속적으로 미분되고, 포화특성과 차단특성을 나타내는 비선형 요소를 통과한다. 신호는 그때의 위치명령을 형성하기 위하여 적분되고 안구 다이내믹스로 들어가기 전에 지연된다.

안구 위치는 오직 Saccadic안구운동계에서만 제한된다.

특별히 이 계통은 Rashbass의 결과 즉, Pursuit 시스템과 Saccadic 시스템이 독립적이며 Pursuit 시스템은 시표속도에 민감하다는 것에 일치했다. 또 이 시스템은 Pursuit 시스템은 연속적이라고 주장하는 Robinson의 견해와도 일치한다.

3. 시뮬레이션

3.1 MIMIC 언어에 의한 시뮬레이션

Young과 Forster와 Van Houtte등이 발표한 확률적인 샘플 데이터 모델을 선정하여 MIMIC 언어로 시뮬레이션을 하였다.

본 연구에서는 모델에 표시되어 있는 상수들 그대로 사용하였다.

- 1) Saccadic 응답지연 시간 $T_1=0.15\text{sec}$
- 2) Pursuit 응답지연 시간 $T_2=0.134\text{sec}$
- 3) Pursuit 위상지연 시간 $T_3=0.04\text{sec}$
- 4) 불감대 $\delta_1=0.3^\circ$
- 5) 포화 $\delta_2=30^\circ/\text{sec}$
- 6) 차단 $\delta_3=100^\circ/\text{sec}$
- 7) 샘플링 주기 $\tau=0.2\text{sec}$

- 8) 감쇠율 $\zeta=0.7$
- 9) 고유각 주파수 $\omega_n=120\text{rad/sec}$

샘플링주기에서 이 τ 가 확률적으로 변하는 값이지만 프로그램 편의상 $\tau=200\text{msec}$ 로 정했다.

MIMIC Program이 다른언어보다 나은점은 첫째 프로그램의 부피를 상당히 적게 줄일 수 있으며, 둘째 시뮬레이션 하고자하는 모델의 각 블록을 바꿔주는데 상당히 편리하게 쓸 수 있기 때문에 MIMIC 프로그램을 사용했다.

이와같이 각 블록의 MIMIC 언어를 정리하여 MIMIC 프로그램을 만들었다(부록 참조). 시표의 입력은 정현파로 정하고 변위는 5° 와 10° , 2가지로 정하였다.

변수는 주파수와 정현파의 주기와 러닝타임(Running Time)등 3가지로 정하고 주파수가 변할때 마다 값이 변하도록 하였다.

실험은 크게 두가지 형태로 나누어서 하였다.

첫째는 Smooth Pursuit 운동만을 관찰하기 위하여 제한을 없애고 개루우프로만 모델을 구성해서 실험하고, 둘째는 Smooth Pursuit 운동과 Saccadic 운동을 함께 보기 위하여 제한이 있는 본래의 모델 전체를 실험하였다. (그림 3 참조)

플랜트 다이내믹스는 모델에 나타나 있는 Westheimer의 다이내믹스와 Robinson의 플랜트 다이내믹스를 병행 사용하였다.

주파수는 $0.4[\text{Hz}] \sim 2[\text{Hz}]$ 범위로 제한하였고 $0.4[\text{Hz}]$ 의 결과의 보기는 그림 4-1과 4-2에 나타내진다.

이것을 정리하여 진폭비를 나타낸 것이 그림 4-3이고, 드리프트의 기울기를 나타낸 것이 그림 4-4이다.

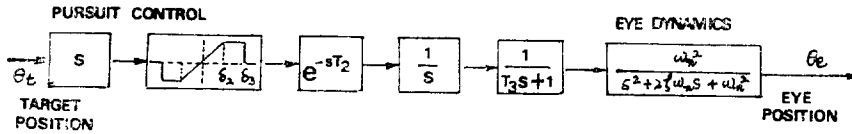


그림 3. 개루우프 시스템
Fig. 3. Open-loop system

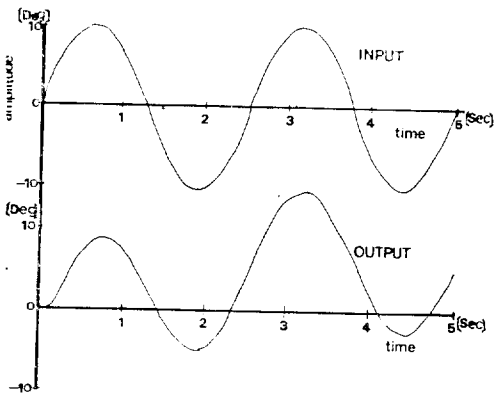


그림 4-1. 개루우프, 주파수=0.4[Hz]
Fig. 4-1. Open-loop, Frequency=0.4 [Hz]

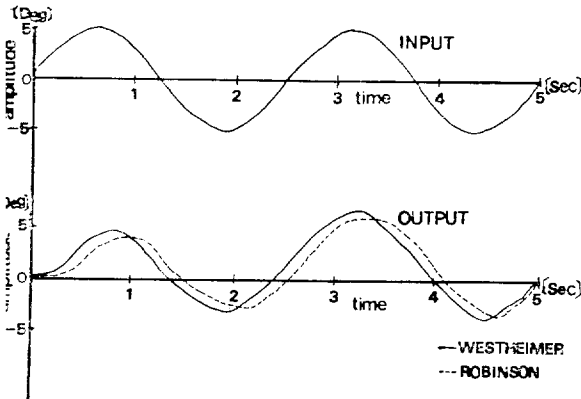


그림 4-2. 폐루우프, 주파수 =0.4[Hz]
Fig. 4-2. Closed-loop, Frequency=0.4[Hz]

3.2 결과 고찰

1) 제한이 없는 경우

그림 4-1은 개루우프 일때의 응답을 보여주고 있는데, 외부로부터의 아무런 정보가 없기 때문에 입력에 대한 출력응답은 드리프트를 하게 된다.

이러한 현상은 Fender와 Young의 실험결과와 잘 일치한다^{(4),(8)}. 비록 응답이 드리프트를 하고, 외부로부터

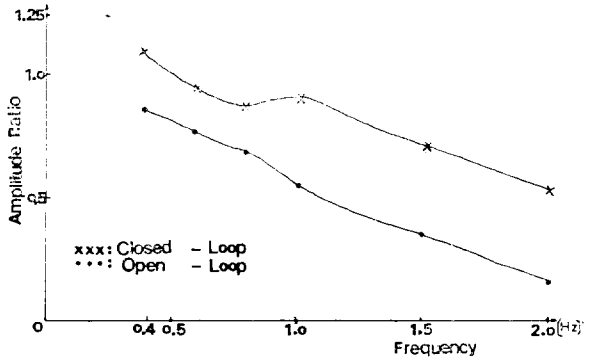


그림 4-3. 진폭비 곡선
Fig. 4-3. Amplitude Ratio Curve

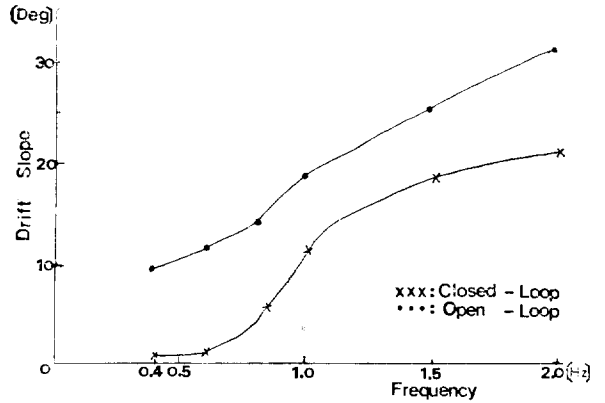


그림 4-4. 드리프트의 기울기 곡선
Fig. 4-4. Drift Slope Curve

터 아무런 오차 정보도 받지 못하지만 낮은 주파수에서는 입력에 잘 따라가고 있는 것을 그림 4-1에서 볼 수 있다.

0.4[Hz]일때의 출력응답에서는 예측성을 볼 수 있다. 이 현상은 시표의 입력이 정현파이기 때문에 잘 나타났다.

2) 제한이 있는 경우

그림 4-2는 제한이 있는 모델 전체를 시뮬레이션한 결과를 나타내 주고 있다.

이 모델 응답은 제한이 있으므로 수시로 외부로부터 오차정보를 받기 때문에 제한이 없는 모델 응답보다 드

리프트가 확실히 적게 나타났다(그림 4-4 참조). 그림 4-1과 그림 4-2에서는 안구운동을 처음 시작할 때 확실한 지연 현상이 일어났음을 알 수 있다.

또, 정현파의 첫번째 주기에서 과도응답이 잠시 나타났다가 곧 다음 주기부터는 정상 응답으로 옮겨가는 현상을 볼 수 있다.

실선은 모델 전체의 응답을 나타낸 것이고, 점선은 모델의 Westheimer의 플랜트 부분만을 Robinson의 플랜트 다이내믹스로 바꾸어서 모델 전체의 응답을 나타낸 것이다.

4. 결 론

본 연구는 동안제의 운동 특성을 MIMIC 프로그램으로 고찰하여 본 것으로 얻어진 결과는 다음과 같다.

- 1) 정현파의 예측성은 주파수가 증가되면서 증가되지만, 주파수가 1[Hz]에 이르면 예측성이 감소하기 시작하여 주파수가 증가할 수록 예측성은 현저히 감소하였다.
- 2) 확률적 샘플 데이터 모델의 계산을 제거하여 개루우프 시스템으로 변환한 경우에는 망막시상 운동으로부터 아무런 정보를 받지 못하기 때문에 입력 변화에 따르는 응답은 드리프트 하였다.
- 3) 정현파 입력에 대한 출력의 응답은 과도응답을 거친 후에 정상상태에 도달하였다.

參 考 文 獻

1. 남문현, 인간의 Saccade 안구운동계에 대한 정보처리 특성, 연세대학교 대학원, 박사학위논문, 1975.
2. Bach-Y-Rita, P. Collins, C.C. and Hyde, J.E.; The control of Eye Movements, Academic Press, New York, 1971
3. Fender, D.H.; The Eye-Movements Control System: Evolution of a Model, Neural Theory and Modeling (Proc. Ojai Symp.), Reiss., R.F. Ed. Stanford, Calif.: Stanford University Press, 1962.
4. Fender, D.H.; Control Mechanism of the Eye, Sci. Am., pp.24~33, 1964.
5. Rashbass, C.; "The Relationship between Saccadic and Smooth Tracking Eye Movement," J. Physiol., pp.326~338, 1961.
6. Stark, L., Vossius, G., Young, L.R.; "Predictive control of Eye Movements", IRE Trans. on

- Human Factors in Electronics, Vol. HFE-3, pp.52~57, 1962.
7. Sugie, N.; "A Model of Predictive Control in Visual Target Tracking", IEEE Trans. on Systems, Man, and Cybernetics, Vol. SMC-1, No. 1, pp.2~7, 1971.
8. Young, L.R., Forster, J.D., and Van Houtte, N.; "A Revised Stochastic Sampled-Data Model for Eye Tracking Movements", Fourth Annual NASA University Conference on Manual Control, NASA SP-192, 1968.
9. Young, L.R., Stark, L.; "Variable Feedback Experiments Testing a Sampled-Data Model for Eye Tracking Movements", IEEE Trans. on Human Factors in Electronics Vol. HFE-4, pp.38~51, 1963.

附 錄

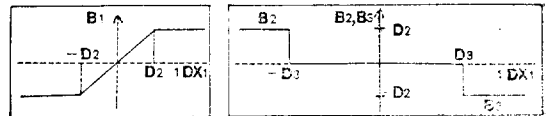
1. Pursuit Control Path

1) 미분기(Differentiator)

$$XT \rightarrow \boxed{S} \rightarrow 1DX1 \quad 1DX1 = DER(T, XT, O.)$$

2) 속도 제한기(Velocity-Limiter)

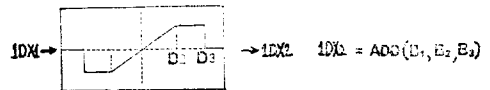
이 블럭은 아래 표시되어 있는 두 그림의 합으로 나타내진다.



$$B1 = LIM(1DX1, -D2, D2)$$

$$B2 = FSW(1DX1 + D3, D2, O., O.)$$

$$B3 = FSW(1DX1 - D3, O., O., -D2)$$



3) Pursuit 지연(Delay)

$$1DX2 \rightarrow \boxed{e^{-ST^2}} \rightarrow 1DXD \quad 1DXD = TDL(1DX2, T_s, 3)$$

4) Pursuit 적분기(Integrator)

$$1DXD \rightarrow \boxed{\frac{1}{S}} \rightarrow XD \quad XD = INT(1DXD, O.)$$

5) Pursuit 위상지연(Lag)

이 블럭은 아래와 같이 변형할 수 있다.

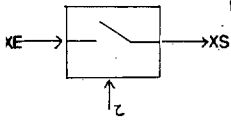
$$XL = \frac{1}{T_3S+1} \cdot XD \text{에서}$$

$$XL = \frac{XD - XL}{T_3D} = \frac{1}{S} \left(\frac{XD - XL}{T_3} \right)$$

$$XD \rightarrow \left[\frac{1}{T_3S+1} \right] \rightarrow XL \quad XL = INT((XD - XL) / T_3, O.)$$

2. Saccadic Control Path

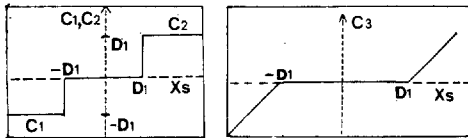
- 1) 샘플러(Sampler) 샘플링 주기 (τ)=0.2sec
 샘플지속기간=0.05sec



$$\begin{aligned} L_1 &= FSW(T, O., 1., 1.) \\ P_1 &= FSW(T-0.05, L1, 0., 0.) \\ L_2 &= FSW(T-0.2, 0., 1., 1.) \\ L_2 &= FSW(T-0.25, L2, 0., 0.) \\ &\vdots \\ SP &= P_1 + P_2 + \dots \\ XS &= XE * SP \end{aligned}$$

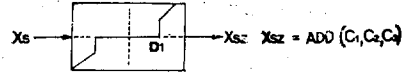
2) Saccadic 불감대(Dead Zone)

이 블럭 역시 아래에 표시되어 있는 두 그림의 합으로 나타내 진다.



$$\begin{aligned} C_1 &= FSW(XS + D_1 - D_1, O., O.) \\ C_2 &= FSW(XS - D_1, O., O., D_1) \end{aligned}$$

$$C_3 = DSP(XS, -D_1, D_1)$$



3) Saccadic 적분기(Integrator)

$$XSZ \rightarrow \left[\frac{1}{S} \right] \rightarrow XZ \quad XZ = INT(XSZ, O.)$$

4) Saccadic 시간지연(Delay)

$$XZ \rightarrow \left[e^{-sT_1} \right] \rightarrow XZD \quad XZD = TDL(XZ, T_1, 4.)$$

5) 안구 다이내믹스(Eye dynamics)

이 식을 아래와 같이 변형한 다음 각각 MIMIC Language로 고치면 된다.

$$\begin{aligned} \theta_{in}(S) &= \theta(S) \cdot \left(\frac{1}{W_n^2} S^2 + \frac{2\zeta}{W_n} \cdot S + 1 \right) \\ &= \frac{1}{W_n^2} \ddot{\theta} + \frac{2\zeta}{W_n} \dot{\theta} + \theta \end{aligned}$$

$$\therefore \ddot{\theta} = (\theta_{in} - \frac{2\zeta}{W_n} \dot{\theta} - \theta) W_n^2$$

$$\dot{\theta} = f\dot{\theta}$$

$$\theta = f\theta$$

$$XIN \rightarrow \left[\frac{W_n^2}{S^2 + 2\zeta W_n S + W_n^2} \right] \rightarrow X$$

$$2DX = (XIN - (2 * ETA * 1DX / W_n) - X) * W_n * W_n$$

$$1DX = INT(2DX, O.)$$

$$X = INT(1DX, O.)$$