'87 韓國自動制御學術會議論文集 1987. 10.16~17

Man-Machine 제어 시스템 분석

°이상훈 최중락 이동권 김영수
진 해 기 계 창

Man-Machine Control System Analysis

Sang-Hoon Lee, Joong-Lak Choi, Dong-Kwon Lee, Yong-Su Kim
Chinhae Machine Depot

Abstract

This paper presents an analysis of the man-machine control system. A man-machine system depends on the performance of a human operator for proper operation. The analysis method is based upon the assumption that human operator will act in a near optimal controller. Optimal control theory and its associated state space representation is used as the basis for the analytic procedure. The computer simulation for a given plant shows that plant parameters have limited range by the human operator.

1. 서 론

제어시스템에서 기계와 사람의 상호작용에 의해서 기계가 제어될 때 Man-Machine 시스템이라 한다. 그림 1 에서 제시된 바와같이 사람의 역할은 제어 시스템의 상태변수 조절기(State regulator)로서 피제어 시스템의 오차 출력이 영이 되도록 하는 것이다. 그림 1 은 보상수동추적 시스템 (Compensatory Manual Tracking System) 의 대표적인 구성도이다.

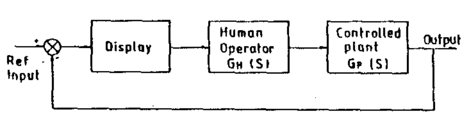


그림 1. 보상수동추적 장치의 구성도

이러한 Man-Machine 시스템에서 Man 의 역할에 따라서 전체시스템의 성능이 크게 좌우되며, 사람은 저주파수의 입력에 응답이 가능하는 점에서 제어 시스템은 사람의 특성을 고려하여 설계되어야 한다.

Man - Machine 시스템을 해석하기 위하여서는 Man 모델을 선정하여야 한다. Man 모델은 주파수 특성, 비선형성, 시간지연, 적응성등이 고려되어져야 하며, Shinners 에 의해서 다음과 같이 제시되고 있다.

$$GH(S) = K \frac{(1+T_A s)}{(1+T_L s)(1+T_N s)} e^{-Ds} \tag{1}$$

여기서 K = Gain
D = Time Delay
T_A = Time Constant
T_L = Error Smoothing time Constant
T_N = Neuromuscular lag

한편 Kleinman 는 최적개념을 적용하여 Man 을 모델링하였으며, 실제 시스템에 적용하여 만족할 만한 결과를 얻었다. 따라서 본 논문에서는 Kleinman 이 제시한 모델을 제어대상 시스템에 적용하여 그 결과를 분석하였으며, 제어시스템의 계수들을 Man 에 적합하도록 결정할 수 있었다.

2 장에서는 최적제어 개념에서 Man-Machine 시스템의 모델을 제시하였고, 3 장에서는 Man 모델을 대상 피제어 시스템에 적용한 컴퓨터 시뮬레이션 결과를 나타내었다.

2. Man-Machine 시스템 모델

본 논문에서 수행될 Man-Machine 시스템의 구성도는 다음 그림 2 와 같다. $\omega(t)$ 는 Plant 의 Disturbance, $v(t)$ 는 Man 의 관측잡음, $v_m(t)$ 는 Neuromuscular 의 잡음으로 Gaussian White 잡음으로 취급하였다.

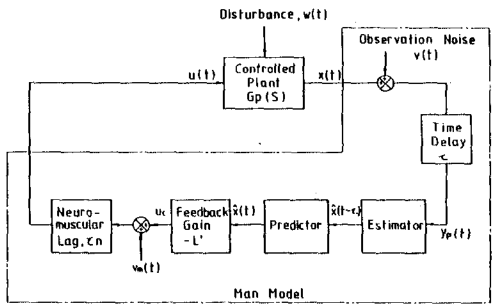


그림 2. Man - Machine 시스템의 구성도

피제어 시스템을 선형시불변계로 표시하면,

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + BU(t) + \omega(t) \tag{2}$$

여기서 $E\{\omega(t)\} = 0$

$E\{\omega(t)\omega^T(\sigma)\} = W\delta(t-\sigma)$

제어시스템에서의 Man Model 은 반응시간 지연 τ, Estimator, Predictor, Neuromuscular Lag 항으로 표시할 수 있다. τ 와 τ_n 의 값은 실험적으로 구할수 있는데 τ = 0.15-0.3sec, τ_n = 0.1-0.2 sec의 값을 갖는다. 또 그림 2의 제어시스템에서 Man 은 피제어 시스템의 출력, 즉 오차를 영으로 하는 State Regulator 역할을 하므로, 최적제어 개념을 적용하여 작동수에 의해서 피제어 시스템의 입력이 다음과 같은 목적함수를 최소화 한다고 가정하면,

$$J(u) = \int_0^\infty \left[\sum_{i=1}^{n} q_i x_i^2(t) + ru^2(t) + g\dot{u}^2(t) \right] dt \tag{3}$$

여기서 $x_i(t)$ = 피제어 시스템의 상태변수

$u(t)$ = 제어 입력

$q_i \geq 0, \quad r \geq 0, \quad g > 0$

(3)식의 목적함수에서 비례입력 $\dot{u}(t)$ 로 인하여 새로운 상태변수 (Augmented State Vector)를 정의하면

$$\Gamma(t) \triangleq \begin{bmatrix} x(t) \\ \cdots \\ u(t) \end{bmatrix} \tag{4}$$

$$\mu(t) \triangleq \dot{u}(t)$$

따라서 최적궤환 이득을 위한 상태방정식은 다음과 같다.

$$\dot{\Gamma}(t) = A_1\Gamma(t) + B_1\mu(t) + \omega(t) \tag{5}$$

여기서 $A_1 = \begin{bmatrix} A & | & B \\ - & | & - \\ 0 & | & 0 \end{bmatrix}$

$B_1 = [0, \cdots\cdots 0, 1]^T$

따라서 최적제어 입력 $u^*(t)$ 는 다음식에서 얻어진다.

$$\tau_n \dot{u}^*(t) + u^*(t) = u_c(t) + v_m(t) \tag{6}$$

$u_c(t) = -L\hat{x}(t)$

$L = \tau_n L' = \tau_n [l_1', l_2' \cdots\cdots l_n']$

궤환이득 L 은 Riccati 방정식의 해로부터 구할 수 있다.

$$A_1^T K_C + K_C A_1 + Q_1 - K_C B_1 B_1^T K_C / g = 0 \tag{7}$$

$L' = B^T K_C / g$

$Q_1 = \mathrm{diag}[q_1 \cdots\cdots q_n \; r]$

Man 에 의해서 감지되는 저주파수 오차입력에서 Neuromuscular Lag 는 위상지연항으로 나타나며 Man-Machine 제어 시스템에서($\tau + \tau_n$)를 등가시간 지연이라 한다.

Man 에 의한 측정모델을 (8) 식으로 표시할 때 Man 모델의 Estimator 와 Predictor 는 다음과 같다.

$$y_p(t) = Hx(t-\tau) + v(t-\tau) \tag{8}$$

여기서 측정잡음 $v(t)$ 는

$E\{v(t)\} = 0$

$E\{v(t)v^T(\sigma)\} = V_2\delta(t-\sigma)$

직렬연결된 Kalman 필터와 Predictor 의 출력인 $\hat{x}(t)$ 를 구하기 위하여서는 추가되는 $v_m(t)$ 의 잡음이 포함되도록 상태방정식을 정하여야 한다. (4) 식의 상태변수를 이용 (2),(6) 식에서

$$\dot{\Gamma}(t) = A_2\Gamma(t) + B_2 u_c(t) + \omega_2(t) \tag{9}$$

여기서 $A_2 = \begin{bmatrix} A & | & B \\ - & | & - \\ 0 & | & -\tau_n^{-1} \end{bmatrix}$

$B_2 = [0, \cdots\cdots, \tau_n^{-1}]^T$

$\omega_2 = [\omega(t) \,\vdots\, v_m(t)/\tau_n]$

Estimator (Kalman Filter);

$$\dot{\hat{\Gamma}}(t-\tau) = A_2\hat{\Gamma}(t-\tau) + K_f[y_p(t) - H\hat{\Gamma}(t-\tau)] + B_2 U_c(t-\tau) \quad (10)$$

(10) 식의 Kalman 필터는 관측치 $y_p(t)$ 로 부터 지연된 상태변수 $\hat{\Gamma}(t-\tau)$ 를 추정하는 것으로, $\Gamma(t-\tau) - \hat{\Gamma}(t-\tau)$ 의 공분산을 $P(t-\tau)$ 라 할 때 $P(t-\tau)$ 와 Kf 를 구함으로써 $\Gamma(t-\tau)$ 의 추정이 가능하다. Kf 는 Kalman 필터의 이득으로 최적 제어입력을 구하는 방법과 같이 구할 수 있다.

$$0 = A_2P + PA_2^T + W_2 - PH^TV_2^{-1}HP \quad (11)$$

$$K_f = PH^TV_2^{-1}$$

여기서 $W_2 = \mathrm{diag}[W \vdots V_m/\tau_n^2]$

Predictor

$$\hat{\Gamma}(t) = \xi(t) + e^{A_2\tau}[p(t) - \xi(t-\tau)] \quad (12)$$

$$\dot{\xi}(t) = A_2\xi(t) - B_2L'\hat{x}(t)$$

$$p(t) \triangleq x(t-\tau)$$

3. 시뮬레이션

피제어 시스템의 모델은 식 13 과 같으며, 2장에서 제시한 Kleinman 의 Man 모델을 적용하여 보상 수동 추적 시스템을 컴퓨터로 시뮬레이션하였다.

$$G_p(s) = \frac{K_p}{T_p s + 1} \quad (13)$$

시뮬레이션에 적용되는 전체시스템의 Matrix 는 다음과 같다.

$$A_1 = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \qquad A_2 = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} \\ 0 & a_{22} \end{bmatrix}$$

$$B_1 = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} \qquad B_2 = \begin{bmatrix} 0 \\ b \end{bmatrix}$$

$$Q_1 = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \qquad g = 0.9 \times 10^{-3}$$

여기서

$$a_{11} = T_G^{-1}, \quad a_{12} = K_G/T_G$$

$$a_{22} = b = \tau_n^{-1}$$

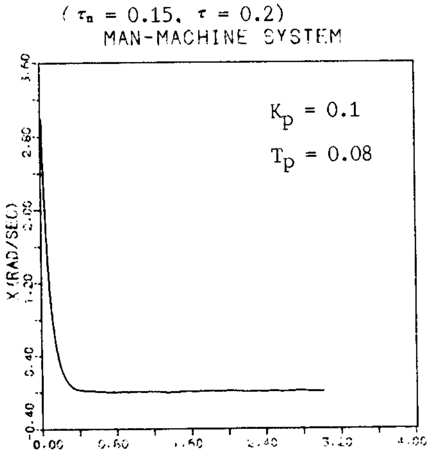
(13) 식의 피제어 시스템과 시간지연항, (10)-(12) 식으로 표현되는 Kalman 필터 및 Predictor 식을 Runge-Kutta 적분방식을 이용하여 시뮬레이션 하였고, 적분시 $\Delta T = 0.001$ 로 하였다.

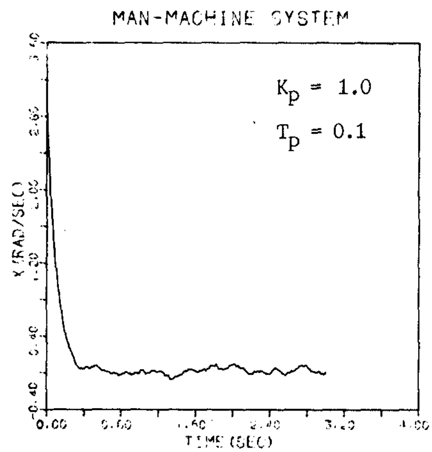
2 장에서 제시한 τ_n, τ 값의 범위를 각각 0.1 - 0.2 sec, 0.15 - 0.3 sec 로 제한하고, 피제어 시스템의 Kp 및 Tp 값을 각각 0.08 - 10.0, 0.04 - 1.0 범위에서 변화시키면서 피제어 시스템의 출력을 관찰한 결과 그림 3과 같은 결과를 얻었다. 피제어 시스템의 Kp 의 증가에 따라 출력오차의 증가와 Tp 의 증가에 따라 출력오차의 감쇄시간이 지연됨을 볼 수 있다.

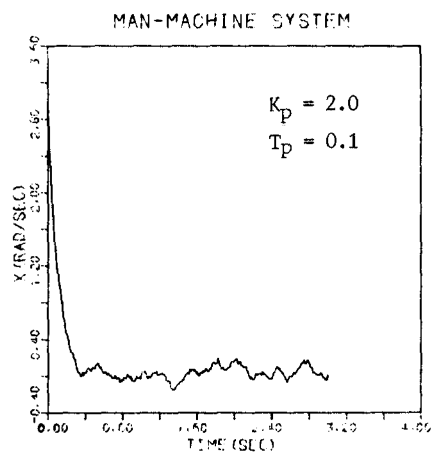
4. 결 론

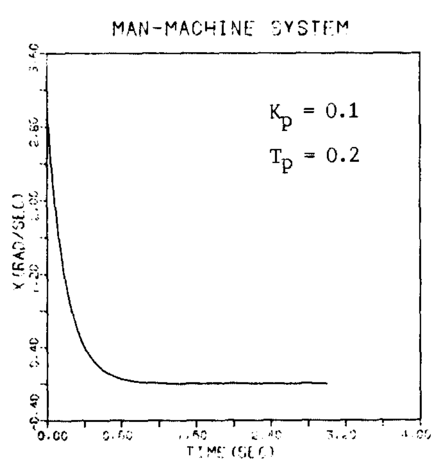
본 논문에서는 보상 수동추적 장치에서 작동수의 특성에 최적제어 개념을 적용하여 피제어 시스템의 파라미터의 변화에 따르는 출력을 컴퓨터 시뮬레이션을 통하여 관찰하였다. 시뮬레이션 결과 개략적인 시스템 파라미터의 범위를 정할 수 있었고, 좀 더 정확한 값은 실제 실험을 통하여 Man 의 특성을 파악한 후, 시스템이 목적하는 정확도를 고려하여 결정하여야 할 것으로 판단된다. 본 논문에서는 Man 에 대한 잡음을 Gausian White 잡음으로 고려하였으나 제어 측면에서의 Man 의 특성과 잡음에 관한 연구가 계속 수행되어져야 한다.

그림 3. Kp, Tp 의 변화에 대한 시스템의 응답특성
($\tau_n = 0.15$, $\tau = 0.2$)









참 고 문 헌

[1] Stanley M. Shinners, "Man-Machine Control System" Electro Technology, April 1967.

[2] Sheldon Baron, David L. Kleinman, Duncan C. Miller & William H. Levison "Application of Optimal Control Theory to the Prediction of Human Performance in a Complex Task" AFFDL TR69-81, March 1969.

[3] L. Daniel Metz, " A Time-Varing Approach to the Modeling of Human Contron Remnant" IEEE Trans., Syst., Man, Cybern., Vol. SMC-12, 1982.

[4] L.D. Metz & B. Cyr " Robust Control Performance of Time-Varing Human Controller Models", Automatia, Vol.24, No-4, 1985.

[5] David L. Kleinman, Sheldon Baron "A Control Theoretic Approach to Manned-Vehicle Systems Analysis", IEEE Trans., Auto. Cont., AC-16 Dec., 1971.

[6] Stanley M. Shinners, " Modeling of Human Operator Performance Utilizing Time Series Analysis", IEEE Trans., Sys. Man & Cyb., SMC-4, Sep., 1974.

[7] Jerone I. Elkind, Peter L.Falb & David Kleinman, "An Optimal Control Method for Predicting Control Characteristics and Display Requirements of Manned-Vehicle Systems" , AFFDL-67-187, June 1968.

[8] Andrew P. Sage, "Optimum Systems Control", Prentice-Hall, Inc., 1977.

[9] Donald E. Kirk, "Optimal Control Theory", Prentice-Hall, In.c, 1970.

[10] Arthur Gelb, "Applied Optimal Estimation", The MIT Press, 1974.