

Hybrid GA-PID WAVENET 제어를 이용한 모형 헬리콥터 시스템의 자세 제어

Attitude Control of Helicopter Simulator System using A Hybrid GA-PID WAVENET Controller

박두환*, 성상규**, 이오걸***, 이준탁*

*동아대학교 전기공학과, **(주)한국공항, ***동의공업대학 전기과

Doo-Hwan Park*, Sang-Kyu Sung**, Oh-Kel Lee***, Jun-Tark Lee*

Dept. of Electrical Engineering Graduate School of Dong-A University

E-mail : dhparkor@chol.com

요 약

본 논문에서는 대표적인 비선형 동특성을 가지는 실제 헬리콥터의 회전 및 자세 운동을 근사화한 모형 헬리콥터의 시스템을 소개하고 이 시스템의 정지 자세 제어를 위하여 WAVENET 제어기와 PID 제어기를 설계하였으며, WAVENET의 신경망 연결 가중치(weight) 및 웨이브렛의 신축 및 이동변수와 PID 제어기의 최적 이득 계수를 GA를 사용하여 조정되도록 하였다. 그리고 과도 응답 특성이 우수한 WAVENET 제어기와 정상 상태 특성이 우수한 GA-PID 제어기를 Hybrid 형태로 구성한 Hybrid GA-PID WAVENET 제어기를 비선형 시스템인 모형 헬리콥터 시스템에 적용하여 제안한 제어기 설계 알고리즘의 유효성과 우수성을 입증하고자 한다.

1. 서론

모형 헬리콥터 시스템은 주 직류전동기의 회전속도에 의해 주 프로펠러의 항력을 조절할 수 있으며, 시뮬레이터의 꼬리부인 보조 직류전동기의 회전속도로 진행방향을 제어할 수 있는 시스템이다[1,2]. 이 시스템은 불안정하고 비선형이 강한 다변수 시스템으로서 그 안정화 제어문제는 제어 공학자들에 의해 오래 전부터 연구되어 왔었다[1]. 일반적으로 비선형 시스템에 있어서는 다양한 동작 모드에 대응하는 정확한 수학적 모델을 얻기 어렵고, 얻어진다고 하더라도 주어진 비선형 모델에 대한 제어기의 설계는 만족스럽지 못한 경우가 많다. 따라서 동작점 근방에서의 선형화를 통해 PID, LQ 제어 등의 고전 제어기법이나 부모모델 제어가 가능한 Fuzzy 및 신경회로망, GA 등에 의한 다양한 지능제어 기법도 제안되고 있다[3].

이들 기존 제어기의 경우, 제어기 설계 파라

미터의 동정이 어렵고, 내·외부 외란이나 동작 모드들에 따른 제어기 파라미터들의 적응성이 저하되어 동작영역이 상이해지면 안정화 가능 영역이 또한 협소해지고 시스템이 불안정하게 된다.

최근의 연구결과에 의하면, 신경회로망과 웨이브렛 분해(decomposition) 사이의 유사성에 기인하여 웨이브렛 이론과 신경회로망을 결합한 WAVENET이 여러 논문에서 제안되고 있으며 기존의 신경회로망보다 우수한 근사 능력을 가진다는 것이 증명되고 있다[4,5].

따라서, 본 논문에서는 모형 헬리콥터 시스템의 자세제어를 위하여 WAVENET 제어기와 PID 제어기를 설계하였으며, WAVENET의 신경망 연결 가중치(weight) 및 웨이브렛의 신축 및 이동변수와 PID 제어기의 최적 이득 계수를 GA를 사용하여 조정되도록 하였다[13,14]. 그리고 과도 응답 특성이 우수한 WAVENET 제어기와 정상 상태 특성이 우수한 GA-PID 제어기를

Hybrid 형태로 구성한 Hybrid GA-PID WAVENET 제어를 비선형 시스템인 모형 헬리콥터 시스템에 적용하여 제한한 제어기 설계 알고리즘의 유효성과 우수성을 입증하고자 한다.

2. 헬리콥터 시스템의 수학적 모델링

2.1 헬리콥터의 동역학 방정식

그림 1은 모형 헬리콥터 시스템의 프로펠러 장치 구성도를 나타내고 있다. 여기서 θ_1 은 수직각(상승각)이며, θ_2 는 수평각(방위각)이다. 그리고 ω_1 은 주 직류전동기의 각속도이고 ω_2 는 보조 직류전동기의 각속도이다.

헬리콥터의 동역학 방정식을 유도하기 위해 Lagrange 방정식과 힘의 평형 법칙을 이용하고, 헬리콥터의 양력은 주 직류전동기 속도의 제곱에 비례하고, 헬리콥터 시스템의 속도가 주 직류전동기의 속도에 비해서 훨씬 적다고 가정한다면 수직 평면내에서의 헬리콥터에 작용하는 토크는 다음과 같다. (단, 헬리콥터 속도에 의한 영향은 무시하고 상승각과 방위각의 자세 제어만 행한다.)

$$I\ddot{\theta}_1 = K_{\omega_1}\omega_1^2 + \frac{1}{2}m_1\dot{\theta}_1^2 \sin\theta_1 - (C_{\theta_1} \text{sign}\dot{\theta}_1 + B_{\theta_1}\dot{\theta}_1) - mg_1 \sin\theta_1 + K_G\theta_2\omega_1 \cos\theta_1 \quad (1)$$

수평면에서의 토크 방정식은 수평면방향에서 헬리콥터의 몸체에 작용하는 힘들을 고려하면 다음과 같이 된다.

$$I\sin\theta_1\ddot{\theta}_2 = K_{\omega_2}l_2\sin\theta_1\omega_2^2 - (C_{\theta_2} \text{sign}\dot{\theta}_2 + B_{\theta_2}\dot{\theta}_2) - \tau_r \quad (2)$$

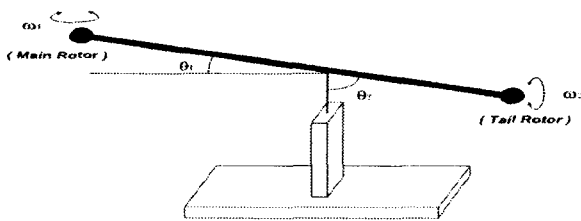


그림 1 헬리콥터 시스템

식 (2)에서 τ_r 은 주 직류전동기의 회전에 의한 반발 토크이며, 식 (1)과 식 (2)에서 θ_1 과 θ_2 는 ω_1 과 ω_2 에 의해서 결정되는 상승각과 방위각이다.

2.2 주 직류전동기 및 보조 직류전동기의 수학적 모델

프로펠러 장치의 수학적 모델은 그림 2와 같다. 헬리콥터 시스템에 장착된 주 직류전동기와

보조 직류전동기의 입력 전압은 U_1 과 U_2 이고 ω_j 는 각속도, T_m 는 전동기의 시정수를 나타내며, 그 전달함수는 다음과 같이 모델링된다.

$$\frac{\omega_j}{U_j} = \frac{1}{(T_m s + 1)^2} \quad (j=1, 2) \quad (3)$$

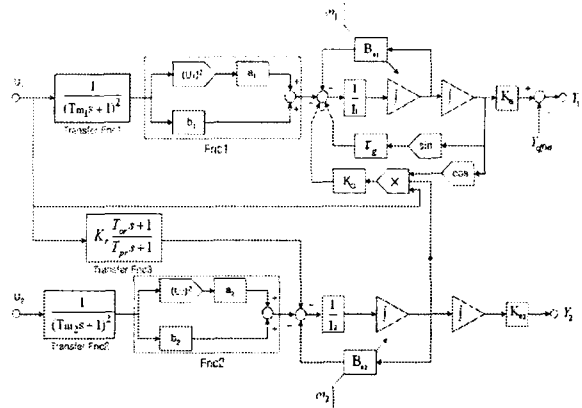


그림 2 모형 헬리콥터의 구성도

각속도는 프로펠러의 수직인 팔에 f 만큼의 힘이 작용함으로써 각축이 회전하게 된다. 각 운동량 보존의 법칙에 의해서 회전에 의한 각운동량은 프로펠러 지지대에 의해서 보상되며, 시스템은 비선형성을 지니고 있다. 즉, 전체 시스템의 구성에 있어서 전동기 시정수가 기계적 부분의 시정수보다 상대적으로 매우 작으므로 전동기의 과도상태는 전체 시스템의 과도상태에 거의 영향을 미치지 않는다고 볼 수 있다. 그러므로 모델 파라미터를 구하기 쉬운 간편한 형태로 만들기 위하여 각각의 전동기와 프로펠러를 결합하고 입력을 주었을 때의 구동 토크 변화를 정적으로 측정한다. 그러나, 응답속도가 기계적인 부분에 비해서 상당히 빠르다고 하더라도 시간 지연요소가 존재하게 되므로 본 논문에서는 2차 시간 지연요소를 포함시켜서 모델링하였다.

2.3 시스템의 동정

본 논문에서는 물리적으로 접근 가능한 파라미터(m, l, g, u_j 등)는 직접적인 측정에 의한 부분별로 동정하는 방법을 사용하였고 그림 2에서와 같이 Subsystem 사이에 결합이 존재하는 이유로서 접근이 어려운 부분($\tau_r, \tau_f, T_m, I, B_{\theta}, K_G, K_r$ 등)의 파라미터는 시스템을 black box로 보고 입력·출력 신호를 처리하는 Model Subsystem을 동정하는 방법을 사용하였다. 대표적인 시스템 파라미터를 구하는 과정을 아래의 세 단계로 나타내었다.

첫째, 두 전동기의 전기적인 모델은 식 3과 같이 제어입력에 따르는 구동 토크의 2차 식과 시간 지연(delay)으로 간략화하였다.

둘째, 상승·방위각의 동적 모델은 질량, 스프링과 댐퍼로 구성된 2차 전달함수로 가정하고, 질량 관성모멘트와 마찰 계수를 구하였다.

셋째, 반작용 토크 모델은 시스템 동정법의 한 방법인 black box model을 이용하여 그 파라미터들을 구하였다.

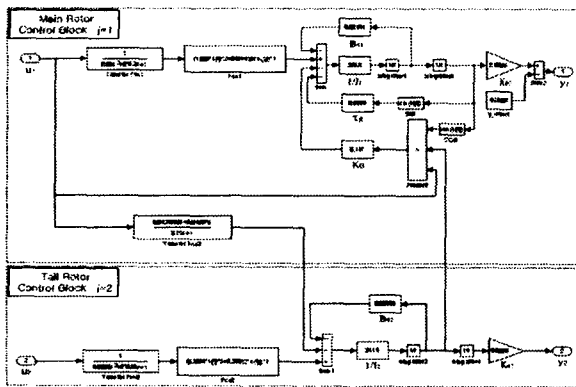


그림 3 Matlab의 시스템 동정에 의한 모형 헬리콥터의 구성도

3. WAVENET 제어기 설계

3.1 WAVENET의 구조

웨이브렛 변환에 사용한 기저함수로는 시간, 주파수 영역에서 양호한 성분 분리특성을 지니고 있으며, 웨이브렛의 필요 충분 조건을 만족하는 다음의 Morlet함수를 사용하였다.

$$m(t) = \exp\left(-\frac{t-\beta}{\alpha}\right)^2 \cos 5\left(\frac{t-\beta}{\alpha}\right) \quad (4)$$

웨이브렛 이론과 신경망 이론의 기본개념의 결합으로 제안된 WAVENET이라 불리는 새로운 네트워크가 구성된다. WAVENET 알고리즘은 네트워크의 자기구성과 오차의 최소화, 즉, 두가지 연산으로 구성되어진다. 첫 번째 과정에서는 대표적으로 적용되는 신경망 구조에 웨이브렛 함수를 사용함으로써 결정된다. 이 신경망은 점진적으로 은닉층을 늘려 주어진 표적에 의해 점유되는 시간-주파수 영역을 효과적이고 충분하게 다루게 된다. 동시에 신경망 파라미터들은 갱신되어, 이후의 처리과정에 편승된다. 두 번째 과정에서는, 순시 오차의 근사값이 GA에 기반한 최적 기법을 이용하여 최소화된다. 출력 함수는 허

용조건과 대상에 충분히 근사한 네트워크를 만족해야 하며 네트워크 근사신호는 식 (5)에 의해 표시할 수 있다. 여기서 $h(t)$ 는 웨이브렛 창함수이고 W_K 는 신경망의 가중치 계수이며, α_K 와 β_K 는 웨이브렛의 신축 및 이동 변수이다.

$$z_i(t) = r_i(t) \sum_{K=1}^N W_K h_{\alpha_K \beta_K}(t) \quad (K=0 \sim 8) \quad (5)$$

WAVENET의 구성도를 그림 4에 나타내었다.

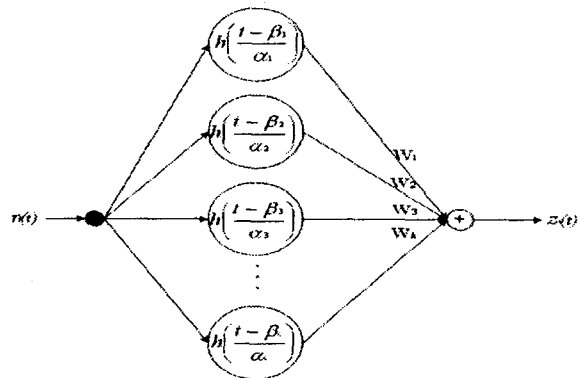


그림 4 웨이브넷 구성도

3.2 GA를 이용한 PID-WAVENET의 설계

일반적으로 WAVENET의 구조는 입력층과 은닉층의 가중치에 해당하는 신축값과 뉴런의 임계값에 해당하는 이동값에 의하여 결정된다. 따라서 본 논문에서는 유전 알고리즘을 사용하여 근사 대상함수에 대한 WAVENET의 신축과 이동의 최적값을 찾는다. 오차를 최소화하는 적합도 함수를 Matlab의 Simulink를 이용하여 수치적으로 구하여 비선형 시스템인 헬리콥터 시스템에 적용하였다.

3.3 Hybrid GA-PID WAVENET 제어기의 설계

그림 5는 본 논문에서 제안한 Hybrid GA-PID WAVENET 제어기의 구성도이다. 본 논문에서는 유전 알고리즘을 이용하여 모형 헬리콥터의 운동영역에서 오차가 최소화되는 전역적인 최적의 제어 이득계수를 선정하고자 한다.

4. 시뮬레이션 및 결과고찰

본 논문에서 제안한 Hybrid GA-PID WAVENET 제어기의 유용성과 우수성을 평가하기 위하여 목표 상승각 및 방위각을 $\theta_1=20[^\circ]$

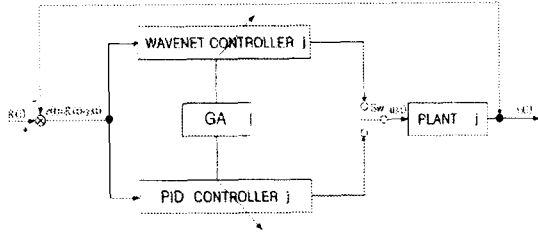


그림 5 제안하는 Hybrid GA-PID WAVENET 제어기의 구성도

및 $\theta_2=30[^\circ]$ 로 하였을 때의 스텝 응답을 구하였다. 그림 6은 Ziegler-Nichols법에 의하여 이득 계수를 동조하여 구한 PID 제어기 및 GA-PID 제어기와 제안한 Hybrid GA-PID WAVENET 제어기에 의한 모의 실험 결과를 각각 비교하여 나타내고 있으며, 여기서, 상승각의 초기각도 $20[^\circ]$, 방위각의 초기각도 $30[^\circ]$ 인 경우 모의 실험 결과를 각각 보여준다. 이 Hybrid GA-PID WAVENET 제어기의 성능을 Matlab의 Simulink로 모의 실험하여 검증한 결과, 방위각을 기준으로 할 경우 PID 제어기나 GA-PID 제어기에 비해 오버슈터나 언더슈터 없이 2[%]내의 정정 시간이 각각 2.1[sec], 1.1[sec] 빠르게 도달하였다. 그리고 상승각을 기준으로 할 경우에도 PID 제어기나 GA-PID 제어기 보다 2[%]내의 정정 시간이 오버슈터나 언더슈터 없이 각각 1.3[sec] 및 0.5[sec] 빠르게 도달한다는 사실을 알 수 있었다. 즉, 본 논문에서 제안한 Hybrid GA-PID WAVENET 제어기는 종래의 PID 제어기나 GA-PID 제어기에 비해 목표치에 더욱 빠르고, 정확하게 추종할 수 있음을 확인하였다.

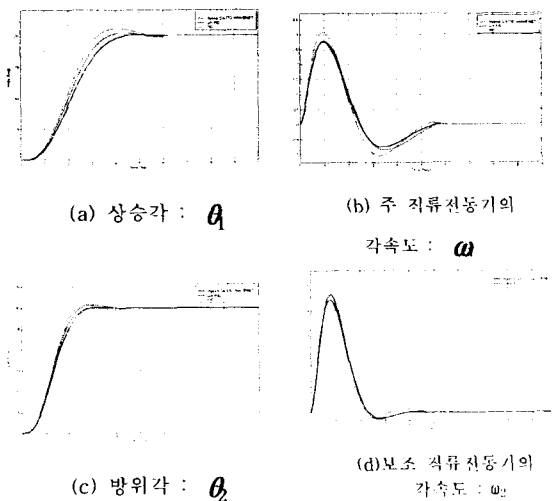


그림 6 Hybrid GA-PID WAVENET 제어 결과

5. 결론 및 향후과제

본 논문에서는 대표적인 불안정 비선형 시스템으로 알려진 모형 헬리콥터의 정지 자세제어를 제어 목표로 하여 두 개의 프로펠러로 구성된 헬리콥터 시스템을 모델링하고 시뮬레이션을 행하였으며, 이를 위한 제어기 설계에 있어서 기존의 신경회로망보다 근사화 능력이 뛰어난 웨이브렛 신경회로망에서 신축과 이동을 최적으로 구성하고 학습시키는 GA를 이용하여 주어진 문제 해결에 적합한 신축과 이동 값을 결정한 후에 WAVENET 제어기와 PID 제어기를 하이브리드 형태로 구성하여 모의 실험을 행하였다. 모의 실험 결과, 본 논문에서 제안한 Hybrid GA-PID WAVENET 제어기는 다른 두 종류의 제어기 보다 목표치에 더욱 빠르고, 정확하게 추종할 수 있음을 확인하여 그 유용성과 우수성을 검증하였다. 향후, 비선형 시스템에서 보다 우수한 제어 성능을 보이도록 WAVENET에 사용한 적절한 웨이브렛 함수를 선택하여 실시간으로 직접 비선형 시스템을 제어하는 문제를 수행하여야 할 것이다.

6. 참고문헌

- [1] B. Srinivasan, P. Mullhaupt, T. Baumann, and D. Bonvin. "A discrete-time decoupling scheme for a differentially cross-coupled system", 13th IFAC Triennial World Congress, San Francisco, pp 301-306, 1996.
- [2] Mats Akesson, Erik Gustafson and Karl Henrik Johansson. "Control Design for a Helicopter Lab Process" IFAC. 13th Triennial World Congress, San Francisco, USA, pp. 41-46, 1996
- [3] Chia-Ju Wu and Ching-Huo Huang, "A Hybrid Method for Parameter Tuning of PID Controllers", J Franklin Inst., vol. B334, No. 4, pp. 547-562, 1997.
- [4] Rong-Jong Wai, Jia-Ming Chang, "Intelligent control of induction servo motor drive via wavelet neural network", Electric Power System Research 61, pp. 67-76, 2002.
- [5] J. Zhang, G. G. Walter, Y. Miao and W. N. W. Lee, "Wavelet neural networks for function learning", IEEE Trans. Signal Processing, vol. 43, pp. 1485-1497, 1995.