

퍼지 추론 시스템 기반의 다중 신경회로망 제어를 이용한 초음파 모터의 위치제어

최재원*, 민병우**, 박운식***

Fuzzy Inference System Based Multiple Neural Network Controllers for Position Control of Ultrasonic Motor

Jae Weon Choi*, Byung Woo Min**, and Un Sik Park***

ABSTRACT

Ultrasonic motors are newly developed motors which are expected to be useful as actuators in many practical systems such as robot arms or manipulators because of several advantages against the electromagnetic motors. However, the precise control of the ultrasonic motor is generally difficult due to the absence of appropriate and rigorous mathematical model. Furthermore, owing to heavy nonlinearity, the position control of a pendulum system driven by the ultrasonic motor has a problem that control responses vary with the initial position of the pendulum. To overcome this problem, we propose a new control method using multiple neural network controllers based on a fuzzy inference system that can determine the initial position of the pendulum in the beginning of control operation. In addition, an appropriate neural network controller that has been learned to operate well at the corresponding initial position is adopted by switching schemes. The effectiveness of the proposed method was verified and evaluated from real experiments.

Key Words : Ultrasonic motor (초음파 모터), Fuzzy inference system (퍼지 추론 시스템), Neural network (신경 회로망), Error back-propagation (오류 역전파)

1. 서론

최근에 개발된 초음파 모터(ultrasonic motor)는 기존의 전자기 모터에 비해서 저속에서 큰 토크를 낼 수 있어 감속기어를 사용하지 않는 직접구동(direct drive)방식이 가능하고, 큰 정지토크, 빠른 응답속도와 함께 전기장의 영향을 전혀 받지 않는 특성이 있다. 또한, 작동소음이 거의 없으며 모터 설계에 대한 제

약이 없어 모터 크기를 소형화할 수 있다는 장점을 가지고 있다^[1-3].

그러나, 초음파 모터는 진동하는 고정자와 회전자 간의 마찰력에 의해 구동되기 때문에 심한 비선형성을 띠며 마찰열이 많이 발생한다. 또한, 마찰열로 인해 모터의 파라미터가 변하므로 모터의 입출력 특성이 시간에 따라 변한다^[4]. 이러한 특성들은 기존의 전자기 모터에 비해서 초음파 모터의 정밀한 제어를 어

* 부산대학교 기계공학부 및 기계기술연구소
** 부산대학교 기계공학부
*** 부산대학교 기계기술연구소

럽게 하는 중요한 요인들이 된다.

초음파 모터는 고정자의 초음파 진동에 의해 구동되는 진동시스템이기 때문에 제어를 수행하기 위한 실제적인 수학적모형을 유도하기가 매우 어렵다. 이러한 이유들로 인하여 이전의 연구들에서는 수학적모형을 필요로 하지 않는 신경회로망(neural network)을 이용한 학습제어기를 초음파 모터의 제어에 많이 사용하였다^{5,7)}. 그러나, 오프라인(off-line)에서 학습된 신경회로망 제어기는 시스템의 급격한 파라미터 변화나 다양한 부하 환경에 대하여 만족할 만한 성능을 내지 못하였다.

초음파 모터는 그 크기에 비해 큰 출력토크를 낼 수 있으므로 로봇의 팔이나 매니퓰레이터의 구동기로서 매우 유용하게 사용될 수 있는 모터이다. 앞으로 이러한 시스템의 구동기로서의 이용가능성을 고려할 때, 비슷한 부하환경을 가진 진자시스템에서 초음파 모터의 정밀한 위치제어는 매우 중요하다고 할 수 있다. 하지만, 초음파 모터로 구동되는 진자시스템을 기존의 신경회로망 제어기를 이용하여 제어하는 경우에 진자의 초기위치에 따라 제어응답이 다르게 나오는 문제점이 발생하며, 이는 초음파 모터에서 발생하는 데드존(dead zone)과 진자시스템의 비선형성에 기인한 것이다. 즉, 진자의 초기위치에 따라 정상상태오차가 큰 경우가 발생하며, 이로 인해 정밀하고 신뢰성있는 위치제어가 곤란하게 된다.

본 논문에서는 이러한 문제점을 해결하기 위해 퍼지 추론 시스템(FIS: fuzzy inference system)에 기반한 다중 신경회로망 제어기를 이용한 제어방법을 제안한다. 이 방법은 특정한 몇가지 초기위치들에 대해 가장 좋은 제어성능을 내도록 오프라인에서 미리 학습된 신경회로망 제어기를 다중으로 설계한 뒤, 작동 초기에 퍼지 추론 시스템이 진자의 초기 회전속도와 기준입력을 입력으로 받아 가장 적합한 제어기를 추론해내고, 적절한 스위칭계획을 이용하여 제어기를 교체함으로써 제어를 수행하게 된다. 제안된 방법은 퍼지의 추론 능력과 신경회로망의 적응성과 학습능력을 적절히 이용한 알고리즘으로서, 그 유용성과 타당성을 검증하기 위해 초음파 모터에 의해 구동되는 진자시스템을 실제 제작하고 제안된 알고리즘을 적용한 실험을 수행하였다.

본 논문은 이후로 다음과 같이 구성된다. 먼저, 2장에서 초음파 모터의 구동원리 및 특성에 대해서 간략하게 설명하고, 3장에서는 제안된 제어 알고리즘에

관해서 구체적으로 기술한다. 다음으로 4장에서는 기존의 신경회로망 제어기와 제안된 알고리즘을 각각 실제 제작된 실험장치에 적용하여 비교함으로써 실험결과를 고찰한다. 마지막으로, 5장에서 본 논문의 결론을 맺도록 한다.

2. 초음파 모터의 구동원리와 특성

초음파 모터는 1973년 Barth⁸⁾에 의해 처음으로 제안된 이후 구소련에서 활발한 연구가 이루어졌으며, 1980년에 일본에서 Sashida에 의해 처음 실용화되어 지금까지 많은 연구 및 개발이 진행되고 있다.

초음파 모터의 형태는 리니어형과 로터리형으로 크게 나눌 수 있다. 리니어형 초음파 모터는 제어하기가 쉽기 때문에 복사기나 카드 반송장치의 구동용으로 사용되고, 로터리 형태의 초음파 모터는 자동차의 시트 및 유리 구동 등 비교적 간단한 제어를 필요로 하는 시스템의 구동기로서 이미 사용되고 있으며, 의학계에서는 내시경의 카메라 구동용으로 실용화되어 사용되고 있다⁹⁾. 그러나, 고도의 정밀한 제어를 필요로 하는 분야 즉, 로봇의 팔이나 매니퓰레이터 같은 시스템에 대해서는 현재 연구가 진행 중이다.

또한, 초음파 모터의 구동방법에는 크게 주파수, 위상차, 전압 제어방식이 있다¹⁰⁾. 이 가운데 위상차 제어방식은 데드존이 거의 발생하지 않지만 위상차가 작아질수록 효율이 떨어지고 과전류가 흐르는 문제가 있다. 반면에 전압 제어방식은 데드존이 발생하는 문제점이 있지만, 이 데드존에서의 정지토크가 크기 때문에 위치제어가 가능하다¹¹⁾.

2.1 초음파 모터의 구동원리

일반적인 전자기 모터와는 달리, 초음파 모터의 구동원리는 탄성체인 고정자 내부에 위치한 압전소자(piezoelectric ceramic)에 위상차를 가지는 두 개의 정현파(40~50kHz) 입력을 인가하여 고정자에 진동파를 발생시키고, 고정자에 적당한 압력으로 가압되어 있는 회전자가 기계적인 마찰력에 의해 회전함으로써 모터가 구동되는 방식이다. 이러한 구동원리를 Fig. 1에 도시하였다. Fig. 2는 고정자의 진동파에 의해서 회전자가 회전하게 되는 원리를 자세히 보여주고 있다. 고정자에서 발생하는 초음파의 진행파는 왼쪽에서 오른쪽으로 Ω 의 각속도로 진행하고, 마찰에

의해 회전자는 오른쪽에서 왼쪽으로 ω 의 속도로 진행한다. 돌기(teeth) 내부에 있는 화살표는 고정자의 진동파가 진행할 때에 생기는 타원 궤적의 순간속도를 나타낸다. 화살표가 회전자의 속도와 평행을 이룰 때 순간속도는 0이고 화살표의 기울기가 클수록 속도가 크게 된다^[2].

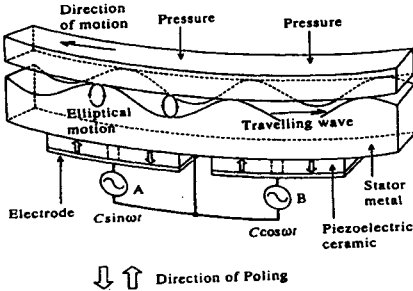


Fig. 1 Principle of the ultrasonic motor

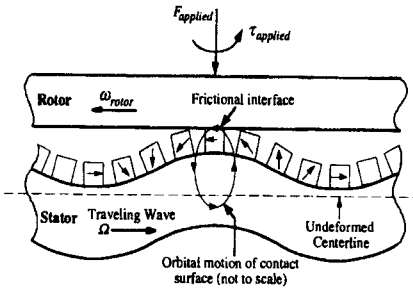


Fig. 2 The travelling wave in the ultrasonic motor

2.2 초음파 모터의 특성

본 연구에서는 일본 SHINSEI사에서 제작한 초음파 모터(USR30-E3a)를 이용하여 실험하였고, 그 특성을 알아보기 위해서 입력전압에 대한 출력회전수를 측정하는 실험을 수행하였는데, 그 결과를 Fig. 3에 도시하였다. Fig. 3에 도시된 실험결과를 통해 입력전압이 -0.5V에서 +0.4V사이의 값을 가질 때 출력토크가 발생하지 않는 데드존이 존재한다는 것을 알 수 있으며, 이러한 요인으로 인하여 초음파 모터가 심한 비선형성을 나타내게 된다. 그리고, 데드존을 제외한 나머지 구간에 대해서는 대체로 선형적인 특성을 가짐을 알 수 있으며, 이와 같이 실험을 통해서 얻어진 입출력 특성은 신경회로망의 입출력 패턴을 학습시키는데 이용되었다.

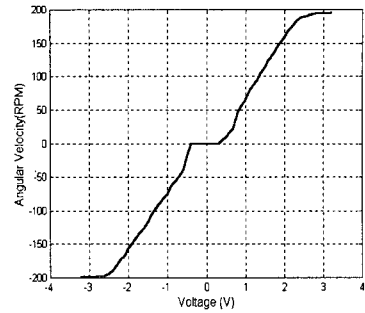


Fig. 3 Input/Output characteristics of the ultrasonic motor(USR30-E3a)

3. 퍼지 추론 시스템에 기반한 다중 신경회로망 제어기

3.1 다중 신경회로망 제어기

먼저, 초기 진자위치에 따른 제어응답이 특징적으로 달라지는 4가지 초기 진자위치(6시, 9시, 12시, 3시 방향)와 360도 기준입력에 대해 가장 좋은 응답이 나오도록 오프라인에서 학습된 4개의 신경회로망 제어기를 독립적으로 설계한다.

본 논문에서 사용된 신경회로망의 학습방법은 오프라인상에서 학습하는 방법(batch learning)방법^[12]을 이용하였다. 여기서, 기준 각도입력과 엔코더로 측정되는 진자의 실제 각도와의 오차를 신경회로망의 입력으로 두고, 신경회로망의 출력은 초음파 모터를 구동하는 제어전압값으로 두어 학습을 시행하였다. 먼저, 6시 방향의 초기진자위치와 360도 기준입력에 대해 목적하는 입출력패턴을 얻기 위해 비례적분(PI) 제어기를 설계하고, 이를 실제시스템에 적용하여 얻어진 제어응답을 목적패턴으로 이용하였다. 하지만, 초음파 모터의 데드존으로 인해 적은 각도오차 범위에서는 만족할 만한 성능을 내지 못하였다. 따라서, 이를 보상하기 위해 데드존이 시작되는 전압값(+0.3V, -0.4V)에 해당하는 크기만큼 출력 축을 쉬프트시키고, 이로 인해 발생하는 불연속구간은 다시 적당한 기울기로 연속화를 시킴으로써 목적패턴을 수정하였다. 또한, 성능을 향상시키기 위해 실험결과를 기반으로 한 시행착오(trial and error)적인 방법으로 목적패턴을 조정하였고, 이렇게 하여 얻어진 최종적인 목적패턴은 다음의 Fig. 4에 실선으로 도시되어 있다.

본 제어기에 사용된 신경회로망 구조는 3개의

은닉층을 가지는 다층 신경회로망(multi-layered neural network)으로서, 학습방법은 오류 역전파(error back-propagation) 알고리즘^[12]을 이용하였다. 오류 역전파 알고리즘은 입력층에서 출력층까지의 가중치를 조정하면서 학습이 이루어지는 동시에, 출력오차에 기반하여 역으로 출력층에서 입력층까지의 가중치도 변경함으로써 기존의 델타규칙과 같은 학습법보다 향상된 학습결과를 보인다. 학습은 C로 구현된 학습 시뮬레이터를 통해 6만회이상을 수행하였고, 이렇게 하여 얻어진 신경회로망의 실제입출력을 Fig. 4에 점선으로 도시하였다.

나머지 3시, 9시, 12시 방향의 초기 진자위치에 대해서는 동일한 과정으로 학습이 이루어졌으나, 비례적인 제어기설계와 목적패턴을 수정하는 과정에서 각 경우에 해당하는 작동환경과 응답특성을 고려해줌으로써 조금씩 다른 최종적인 입출력패턴을 생성하였다

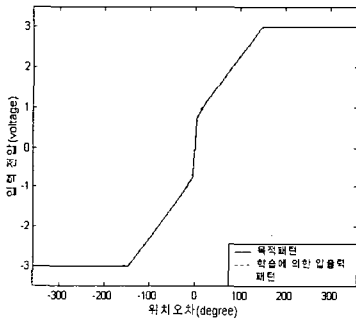


Fig. 4 Learned input-output pattern of Neural Network

다음은 오류 역전파 학습 알고리즘을 살펴보기 위해 입력층의 신경세포를 다음과 같이 표현한다.

$$net_i = x_i, \quad O_i = f_i(net_i) = net_i \quad (1)$$

식 (1)에서, x_i 는 입력층의 i 번째 신경세포의 입력이고, O_i 는 i 번째 신경세포의 출력이다. 또한, 은닉층의 신경세포를 표현하면 다음과 같다.

$$net_j = \sum_{i=1}^n W_{ji} O_i, \quad (2)$$

$$O_j = f_j(net_j) = \frac{1 - \exp(-net_j)}{1 + \exp(-net_j)}$$

식 (2)에서 W_{ji} 는 입력층과 은닉층사이의 연결 가중치이다. 여기서, 활성화 함수(f)는 -1.0~1.0값을 가지는 바이폴라(bipolar)함수^[13]를 이용하였다.

다음은 출력층의 신경세포를 나타낸 수식이다.

$$net_k = \sum_{j=1}^m W_{kj} O_j, \quad (3)$$

$$O_k = f_k(net_k) = \frac{1 - \exp(-net_k)}{1 + \exp(-net_k)}$$

여기서, W_{kj} 는 은닉층과 출력층사이의 연결 가중치이다.

그리고, 신경회로망 제어기를 학습시키기 위해서 다음과 같은 목적함수를 정의한다.

$$E = \sum_k \frac{1}{2} (D_k - O_k)^2 \quad (4)$$

식 (4)에서 O_k 는 신경회로망의 출력으로서 실제로 초음파 모터를 구동하는 제어전압을 나타내고, D_k 는 바람직한 제어전압을 나타낸다. 여기서, D_k 는 실제실험을 통해 얻어진 입출력 데이터로부터 얻어진 값이다. 또한, e_k 는 바람직한 제어전압과 실제 제어전압간의 오차이다. 따라서, 식 (4)의 목적함수가 최소가 되도록 신경회로망을 학습시키면, 정확한 제어전압을 초음파 모터에 인가하여 진자시스템의 정밀한 위치제어가 가능하게 된다.

학습방법은 경사하강법을 이용한 역전파 알고리즘을 이용해서 신경회로망의 가중치를 계속적으로 갱신하여 최종적으로 목적함수인 학습오차가 최소가 되도록 하면 학습최적화가 이루어지게 된다. 이러한 가중치 W 를 갱신하는 방법을 은닉층과 출력층에 대하여 나누어 기술하면 다음과 같다.

우선, 출력층에 대하여 전파되는 오차항을 구하면 다음과 같다. 식 (5)에서 e_k 는 출력층의 k 번째 신경세포에서의 오차값이다. 따라서, 가중치의 변화량은 다음과 같이 표현된다.

$$\delta_k = -\frac{\partial E}{\partial net_k} = f'_k(net_k) e_k$$

$$= \left[\frac{1}{2} [1 + f(x)][1 - f(x)] \right] e_k, \quad (5)$$

$$e_k = -(D_k - O_k)$$

여기서, 파라미터 α ($0 < \alpha \leq 1$)는 학습률로서, 이 파라미터를 이용하여 학습속도를 조정할 수 있다. α 값이 1에 가까울수록 학습속도가 빠른 대신에 국소 최소화에 빠질 확률이 높고, 0에 가까울수록 학습속도가 느린 대신 국소 최소화에 빠질 확률이 상대적으로 적다. 따라서, 원하는 값을 학습하기 위해서는 α 값을 적절히 조절하여야 한다. 결국, 출력층에서의 가중치는 다음과 같은 식으로 갱신된다

$$\begin{aligned} \Delta W_{kj} &= -\alpha \frac{\partial E}{\partial W_{kj}} \\ &= -\alpha \frac{\partial E}{\partial net_k} \cdot \frac{\partial net_k}{\partial W_{kj}} = \alpha \delta_k O_j \end{aligned} \quad (6)$$

$$W_{kj}(N) = W_{kj}(N-1) + \Delta W_{kj}(N) \quad (7)$$

또한, 은닉층에 대해 전파되는 오차항은 식 (8)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \delta_j &= -\frac{\partial E}{\partial net_j} = f'_j(net_j) e_j \\ &= \left[\frac{1}{2} [1 + f(x)] [1 - f(x)] \right] e_j \\ e_i &= \sum_k W_{ki} \delta_k \end{aligned} \quad (8)$$

$$\Delta W_{ji} = \alpha \delta_j O_i \quad (9)$$

식 (9)는 O_i 는 신경회로망의 입력값과 같다. 마찬가지로, 은닉층에서의 가중치도 다음과 같은 식으로 갱신되게 된다.

$$W_{ji}(N) = W_{ji}(N-1) + \Delta W_{ji}(N) \quad (10)$$

이렇게 학습된 한 개의 신경회로망 제어기 (NNC)는 Fig. 5의 블록선도에 나타낸 바와 같이 최적의 입력전압을 초음파 모터 구동 드라이브에 인가함으로써 진자시스템의 위치제어를 수행하게 된다. 결론적으로 위와 같은 학습방법을 반복적으로 수행하여 각각 독립적인 4개의 신경회로망 제어기를 설계함으로써 다중 신경회로망 제어기를 구성할 수 있다.

3.2 퍼지 추론 시스템

본 논문에서 제안된 방법에서 사용된 추론법은 후반부 변수가 실상수인 직접법 형태의 간략 추론법을 사용하였다^[14]. 간략 추론법은 추론기구가 간단하고 추론시간이 빠르므로 온라인 상에서 실행할 수 있다는 장점이 있다. 추론 규칙은 IF-THEN 규칙을 이용하여 표현하였고, 복수개의 규칙들을 규칙 베이스로 구성하였다. 간략 추론을 하기 위해 2입력 1출력을 가진 n 개의 규칙을 추론하는 예들 식 (11)에 표현하고, 그 추론 과정을 단계 별로 나타내면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \text{Rule 1 : IF } x_1 \text{ is } A_1 \text{ and } y_1 \text{ is } B_1, \text{ Then } z_1 \text{ is } a_1 \\ \vdots \\ \text{Rule } n \text{ : IF } x_n \text{ is } A_n \text{ and } y_n \text{ is } B_n, \text{ Then } z_n \text{ is } a_n \end{aligned} \quad (11)$$

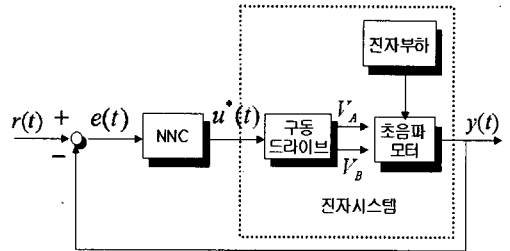


Fig. 5 Block diagram of a neural network controller(NNC)

여기서, $A_1 \dots A_n, B_1 \dots B_n$ 는 퍼지 집합이고, $a_1 \dots a_n$ 은 후반부 변수로 실상수이다.

[단계1]: 각각의 입력에 대하여 각 규칙의 전반부에 대한 적합도(w)를 구한다.

$$R_1 \text{의 적합도: } w_1 = \mu_{A_1}(x_1) \wedge \mu_{B_1}(y_1)$$

⋮

$$R_n \text{의 적합도: } w_n = \mu_{A_n}(x_n) \wedge \mu_{B_n}(y_n)$$

여기서, μ_A 와 μ_B 는 각 퍼지함수의 소속정도를 나타낸다.

[단계2]: 각 규칙의 추론결과 z 에 대하여 최종 추론결과(Y)를 산출한다.

$$Y = \frac{\sum_{i=1}^n w_i a_i}{\sum_{i=1}^n w_i}$$

여기서, Y 는 최종적으로 추론된 값이고, a_i 는 실상수, w_i 는 i 번째 규칙의 전반부 적합도를 나타낸다.

위와 같은 간략추론법을 적용한 퍼지 추론 시스템은 작동초기에 진자의 초기 회전가속도와 기준입력을 이용하여 3.1절에서 미리 설계된 다중 신경회로망 제어기 가운데에서 현재의 작동상황(초기위치와 최종위치)에서 가장 좋은 응답을 보이는 제어기를 추론해내는 역할을 한다.

따라서, 퍼지 추론 시스템의 입력부는 진자의 초기 회전가속도와 기준입력을 퍼지화한 값이고, 출력값은 교체할 신경회로망 제어기의 번호가 된다. 구성된 규칙 베이스의 입력값들에 대하여 이산형의 소속함수(membership function)를 Fig. 6과 같이 구성하였다. 기준입력에 대한 이산형 소속함수는 전체 360도의 기준입력을 12단계로 이산화한 값에 대하여 Fig. 6의 원편 그림에서 보이는 바와 같이 Very small, Small, Middle, Big의 4개의 삼각함수

를 선정하였다. 작은 각도의 기준입력에 대해서도 제어가 잘 되도록 Very small이라는 소속함수를 추가하였으며, 소속함수의 형태와 영역 등은 시행착오적인 실험을 통하여 추론결과가 향상되도록 조정하였다. 작동초기에 일정한 전압입력을 주어 진자를 회전시키면 중력의 영향에 의해 초기 위치에 따라 회전가속도가 다르다는 것은 쉽게 알 수 있으며, 진자의 회전가속도가 특징적으로 다른 9시, 6시, 12시, 3시 방향에서의 초기 진자위치를 판별해내기 위해 Fig. 6의 원편 그림에 Small, Middle1, Middle2, Big의 사다리꼴 형태의 소속함수를 이용하여 퍼지화하였다. 이들 소속함수들도 그 형태와 영역을 결정짓는 파라미터들은 실제 실험데이터를 기반으로 시행착오적으로 결정하였다. 먼저, 초기 진자위치가 9시 방향인 경우에 회전가속도는 3.15 rad/sec^2 으로 가장 작으며, 이 초기위치를 잘 구별하기 위해 Small과 같은 퍼지함수를 선정하였다. 또한, 진자의 초기위치가 6시 방향과 12시 방향인 경우에 진자의 초기 회전가속도는 각각 22.05 rad/sec^2 와 32.13 rad/sec^2 으로 비슷한 양상을 보이는데, 이 두 초기위치를 정확히 구별해내기 위해 시행착오적으로 Middle1함수와 Middle2함수가 선정되었다. 마지막으로 초기 진자위치가 3시 방향인 경우에 회전가속도는 47.25 rad/sec^2 으로 가장 큰 값을 가지며 Small함수에서와 비슷한 형태를 가지도록 Big함수를 선정하였다. 따라서, 이렇게 판단된 초기위치와 기준입력을 이용하면 최종 정지위치를 알 수 있게 되고, 몇 가지 특징적인 초기위치와 최종위치에 대하여 가장 좋은 응답을 낼 수 있는 신경회로망 제어를 미리 오프라인에서 학습시켜 두고, 임의의 초기위치와 최종위치에 대해 가장 적합한 제어를 추론해내고 교체함으로써 원활한 제어를 수행할 수 있게 된다.

Table 1은 추론 규칙들로 구성되어 있는 규칙 베이스(rule base)이고, 이 규칙 베이스에 의해서 실제 추론이 수행된다. 여기서, 구성된 추론 규칙들은 초음파 모터의 특성과 요구되는 제어성능을 기반으로 실험을 통하여 얻어진 일종의 전문가 시스템이다. 예를 들어, 초기위치가 3시 방향이고 기준입력이 360도이면 회전가속도는 Big에 소속되고 기준입력도 Big에 소속되는데, 이 때 미리 설계되어 있는 4개의 다중 신경회로망 제어를 각각 적용하여 실제 응답을 살펴보고 가장 제어성능이 좋은 4번 신경회로망 제어기(NNC4)를 결정하는 식으로 실제 실험

을 통하여 추론 규칙들을 생성하였다.

퍼지화된 입력 함수에 대하여 간략 추론 과정을 거쳐 최종적으로 추론된 값들이 룩업 테이블로 구성되고, 이를 Table 2에 도시하였다. Table 2에 도시된 룩업 테이블은 Table 1의 퍼지 규칙 베이스에 의하여 추론된 실제값을 보여준다. 룩업테이블의 세로축과 가로축은 각각 기준입력과 진자의 초기 회전가속도를 12단계로 양자화한 값을 나타내고, 이를 통해 참조되는 값 1, 2, 3, 4는 각각 작동상황(초기 진자위치와 기준입력)에 가장 효과적인 제어효과를 낼 수 있다고 추론된 제어기의 번호를 나타내며, 각각 NNC1, NNC2, NNC3, NNC4를 나타내는 값이다

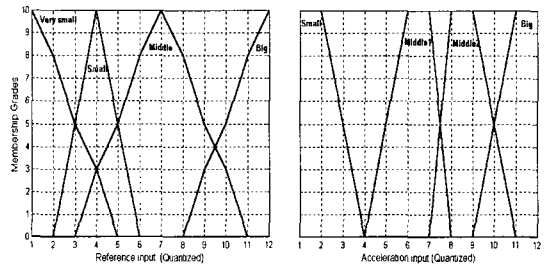


Fig. 6 Discrete membership function for a reference input and angular acceleration of the pendulum

3.3 퍼지 추론 시스템 기반 다중 신경회로망 제어기

본 논문에서 제안하는 퍼지 추론 시스템(fuzzy inference system: FIS) 기반의 다중 신경회로망 제어기(multiple NNCs)는 3.1절에서 설명한 오류 역전파 알고리즘을 이용하여 4가지 초기 진자위치(6시, 9시, 12시, 3시 방향)에 대해 최적으로 학습된 4개의 신경회로망 제어를 설계하고, 작동초기에 3.2절에서 설명한 퍼지 추론 시스템이 진자의 초기 회전가속도와 기준입력을 입력으로 받아 다중 신경회로망 제어기 가운데에서 현재상황에 가장 적절한 제어를 추론해내고, 이를 적당한 교체계획을 통해 제어기교체를 수행함으로써 초음파 모터의 위치제어를 수행한다. 이에 대한 블록선도를 Fig. 7에 도시하였다.

4. 실험 및 고찰

본 논문에서 제안하는 알고리즘의 유용성과 타

당성을 검증하기 위한 실험장치로서 초음파 모터에 의해 구동되는 진자시스템을 실제로 제작하였다. 본 장에서는 먼저 실험에 사용된 초음파 모터와 전체 실험장치에 대하여 자세하게 기술한다. 다음으로 기존의 신경회로망 제어기와 제안하는 제어 알고리즘을 각각 적용한 실험결과를 제시하고, 이들을 비교하고 분석함으로써 실험에 대해 고찰한다.

Table 1 Fuzzy rule base

		Angular Acceleration			
		Small	Middle1	Middle2	Big
Reference Input	Very Small	NNC2	NNC1	NNC2	NNC2
	Small	NNC1	NNC2	NNC4	NNC1
	Middle	NNC4	NNC3	NNC1	NNC2
	Big	NNC2	NNC1	NNC3	NNC4

Table 2 Lookup table

		Quantized Level of Angular Acceleration											
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Quantized Level of Reference Input	1	2	2	2	1	1	1	1	2	2	2	2	2
	2	2	2	2	1	1	1	1	2	2	2	2	2
	3	1	1	1	1	1	1	1	3	2	2	2	1
	4	1	1	2	2	2	2	2	3	2	2	1	1
	5	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	1	1
	6	4	4	4	4	3	3	3	1	1	1	1	2
	7	4	4	4	4	3	3	3	1	1	1	1	2
	8	4	4	4	4	3	3	3	1	1	1	1	2
	9	3	3	3	3	2	2	2	1	2	2	2	2
	10	2	2	2	2	1	1	1	2	2	2	2	3
	11	2	2	2	2	1	1	1	3	3	3	3	4
	12	2	2	2	2	1	1	1	3	3	3	3	4

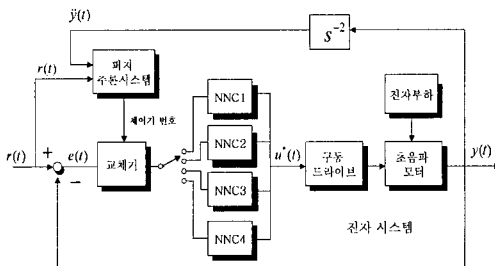


Fig. 7 Block diagram for the FIS based multiple NNCs

4.1. 초음파 모터와 실험장치

본 논문에서 사용하는 초음파 모터는 지름이 3.5cm 정도의 소형모터이지만 최대출력토크는 0.1

$N \cdot m$ 를 낼 수 있으며 엔코더가 내장되어 있다. 실험에 사용된 초음파 모터(USR30-E3a)의 외형과 구동 드라이브를 Fig. 8에 도시하고, 모터의 상세한 사양은 Table 3에 나타내었다.

먼저, 초음파 모터의 회전축에 길이 15cm의 봉을 직접 연결하고 봉의 말단에 52g의 부하를 부착함으로써 진자시스템을 제작하였다. 초음파 모터에 내장되어 있는 500 ppr의 분해능을 가진 엔코더를 통하여 진자의 각변위를 측정하고, 엔코더에서 나오는 펄스신호는 12bit 업/다운 카운터를 이용하여 계수하였다. 또한, 데이터 획득 시스템은 16채널의 A/D 변환기와 2채널의 D/A 변환기가 있는 다림회사의 DR-8330보드를 이용하였다. 카운터에서 나오는 12bit신호를 D/I포트를 통해 받아들여 진자의 각변위를 측정된 후, 출력은 D/O포트를 통해 +3.2~ -3.2V의 전압을 초음파 모터의 드라이버로 보낸다. 그리고 실시간 제어를 위하여 펜티엄 233 MHz 컴퓨터를 이용한 PC기반의 제어를 수행하였으며, 제시한 알고리즘은 C-언어를 이용하여 구현하였다. 전체 실험장치는 Fig. 9에 도시하였다.

4.2. 실험결과 및 고찰

본 논문에서는 기존의 신경회로망 학습제어기와 제안하는 퍼지 추론 시스템 기반의 다중 신경회로망 제어기를 각각 초음파 모터로 구동되는 진자시스템에 적용한 실험결과를 비교함으로써, 제안된 방법의 유용성과 타당성을 입증하고자 한다. 이를 위해 본 절에서는 세 가지의 실험을 수행하였다.

첫 번째 실험은 각각 3시, 6시, 9시, 12시 방향의 초기 진자위치에 대하여 360도의 기준입력을 주어 위치제어를 수행하였고, 두 번째 실험은 6시방향의 초기 진자위치에 대하여 90도, 180도, 270도의 기준입력을 연속적으로 인가하는 위치제어를 수행하였다. 이 두 경우의 실험은 진자의 초기위치와 기준입력의 변화에 대해, 비교하고자 하는 두가지 제어기가 어떠한 제어응답을 보이는 가를 살펴보고, 이로부터 제안된 방법의 타당성을 입증한다.

마지막으로, 세 번째 실험에서는 제안된 방법이 임의의 초기 진자위치와 기준입력에 대해 나타내는 실험결과를 살펴본다. 이는 오프라인에서 3시, 6시, 9시, 12시 방향의 초기 진자위치에 대해 가장 잘 작동하도록 학습된 다중 신경회로망 제어기가 앞서의 4가지 초기위치가 아닌 임의의 초기위치에 대해서도 만족할 만한 제어성능을 보임을 살펴보기 위한 것이다.

Table 3 Specifications of USR30-E3a

크기	지름 35mm	구동전압	약 110 Vrms
정격출력	1.3W	구동주파수	약 50kHz
정격회전수	250rpm	정격토크	0.05 N·m
정지토크	0.1N·m	최대토크	0.1 N·m
시작응답시간	약 50msec	수명	최소 2000시간
정지응답시간	약 50msec	엔코더	500ppr

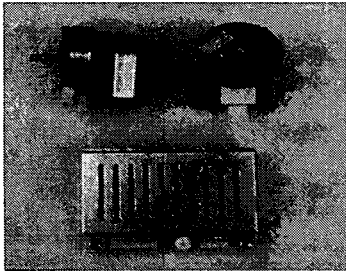


Fig. 8 Ultrasonic motor(USR 30-E3a) and driver

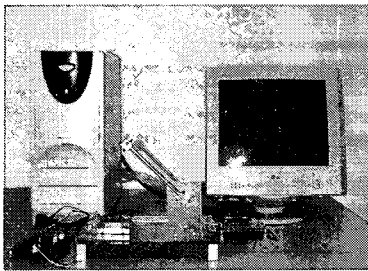


Fig. 9 Experimental setup

우선, 첫 번째 실험에서 각각 3시, 6시, 9시, 12시 방향의 4가지 초기위치에 대하여 기존의 단일 신경회로망 제어기(NNC)를 적용한 실험결과와 본 논문에서 제안된 제어방법(FIS+multiple NNCs)을 적용한 결과를 비교하여 Fig. 10부터 Fig. 13에 나란히 도시하였다. 그림 안의 진자모양은 진자의 초기 위치를 나타내는 것이다.

Fig. 11와 Fig. 12의 왼쪽 그림은 기존의 신경회로망 제어기(NNC)를 적용한 경우로서 9시와 12시 방향의 초기 진자위치에서 360도의 기준입력이 가해졌을 때 상당히 많은 정상상태오차를 발생하는 것을 볼 수 있다. 이는 앞서 설명한 바와 같이 초음파 모터에 존재하는 데드존과 진자시스템이 가지는 비선형성이 복합되어 나타나는 현상으로서, 정밀한

초음파 모터의 위치제어를 위해서는 반드시 해결되어야 하는 문제점이다. 이러한 문제점을 해결하기 위해 본 논문에서는 퍼지 추론 시스템 기반의 다중 신경회로망 제어기(FIS+multiple NNCs)를 제안하였고, 이 방법을 적용한 경우 9시와 12시 방향의 초기 위치에 대해 정상상태오차가 전혀 발생하지 않음을 Fig. 11과 Fig. 12의 오른쪽 그림들에서 확인할 수 있다. 또한, 이 실험을 통해 제안된 방법이 전체적으로 향상된 제어성능을 보임을 확인할 수 있다.

두 번째 실험은 초음파 모터가 시스템에 사용되는 실제적인 상황을 고려하여 6시 방향의 초기 진자위치에 대해 90도, 180도, 270도의 기준입력을 순차적으로 주어 연속적인 위치제어를 수행하였고, 그 결과들을 Fig. 14에 도시하였다. 먼저, Fig. 14의 왼쪽 그림은 기존의 신경회로망 제어기(NNC)를 적용한 경우로 각 단계마다 발생한 정상상태오차가 누적되어 최종위치인 540도에 훨씬 못 미치는 제어성능을 보이고 있다. 반면에, Fig. 14의 오른쪽 그림에서 보는 바와 같이 제안된 방법(FIS+multiple NNCs)을 적용한 경우에는 각 단계마다 잘 수렴하여 최종위치인 540도에도 정상상태오차가 없이 잘 수렴하고 있음을 볼 수 있다. 이 과정에서 먼저 6시 방향의 초기위치에 대해 90도의 기준입력을 주었을 때 퍼지 추론 시스템(FIS)에서 NNC2가 추론되어 교체됨으로써 제어가 수행되고, 270도 기준입력을 주었을 때 NNC4로 교체되고, 최종적으로 270도 기준입력을 주었을 때 NNC3으로 교체되어 전체적인 제어가 수행되었다. 본 실험결과에서 알 수 있듯이 진자와 같은 부하를 구동하는 초음파 모터의 위치제어에 있어서는 본 논문에서 제안한 방법이 매우 효과적임을 알 수 있다.

지금까지의 실험에서 제안된 퍼지 추론 시스템 기반의 다중 신경회로망 제어기는 3시, 6시, 9시, 12시 방향의 4가지 초기위치에 대해 기존의 단일 신경회로망 제어기를 이용한 경우에 비해 뛰어난 제어성능을 나타냄을 보였다. 그러나, 실제적인 위치제어를 위해서는 임의의 초기위치와 기준입력에 대해서도 잘 작동하는지 확인해 볼 필요가 있다. 따라서, 세 번째 실험에서 임의의 초기위치와 기준입력에 대하여 제안된 방법(FIS+multiple NNCs)을 적용한 결과를 Fig. 15과 Fig. 16에 도시하였다.

Fig. 15는 각각 2시, 5시, 7시, 10시 방향의 초기 진자위치에 대해 360도의 기준입력을 주어 위치제어를 수행한 결과이며, 모든 경우에 있어서 정상상

태오차 없이 정확히 제어됨을 알 수 있다. Fig. 16에서 연속적인 임의의 기준입력에 대해서도 정확히 제어됨을 볼 수 있다. 이상의 실험결과를 바탕으로 다음과 같은 고찰을 할 수 있다. 우선, 본 논문에서 제안하는 방법으로 설계된 제어기를 사용함으로써 기존의 신경회로망 제어기를 이용하여 진자와 같은 부하를 구동하는 초음파 모터의 위치제어를 하는 경우에 발생하였던 문제점을 해결할 수 있었다. 따라서, 제안된 방법은 초음파 모터의 위치제어에 보다 적합한 제어방법이라 할 수 있다. 또한, 세 번째 실험을 통해서 4가지 경우의 초기위치에 대해서 학습된 다중 신경회로망 제어기를 이용하여 그 이외의 임의의 초기 진자위치에 대해서도 만족할 만한 제어성능을 얻을 수 있었는데, 이는 신경회로망 제어기가 가진 적응능력에 의한 것으로 판단된다.

5. 결론

본 논문에서는 진자의 초기위치와 기준입력을 이용하여 시스템의 작동상태를 판단한 결과를 기반으로 오프라인에서 미리 학습하여 설계된 다중 신경회로망 제어기들 가운데 가장 적합한 제어기를 추천해내고, 스위칭계획에 따라 적절한 제어기를 교체함으로써 초음파 모터의 위치제어를 수행할 수 있는 새로운 알고리즘을 제안하였다. 제안된 알고리즘은 초음파 모터의 테드준과 진자시스템이 가지는 비선형성으로 인해 전체 시스템의 제어응답이 초기상태에 따라 변하는 문제점을 극복하기 위한 방법으로서, 그 유용성과 타당성을 실제 실험을 통하여 검증하였다. 결론적으로 본 논문에서 제안한 방법은 다양한 부하환경 하에서 작동하는 실제 시스템의 구동기로서 유용한 초음파 모터를 효과적으로 제어할 수 있는 방법이라 할 수 있다.

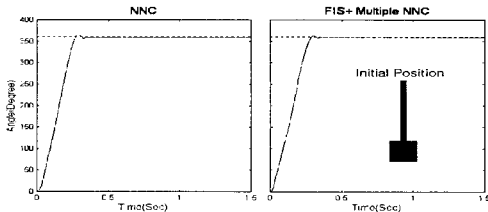


Fig. 10 The response for NNC and FIS based multiple NNCs at the initial position in the direction of 6 o'clock

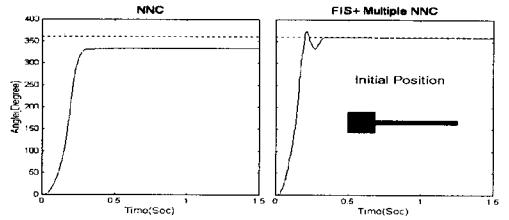


Fig. 11 The response for NNC and FIS based multiple NNCs at the initial position in the direction of 9 o'clock

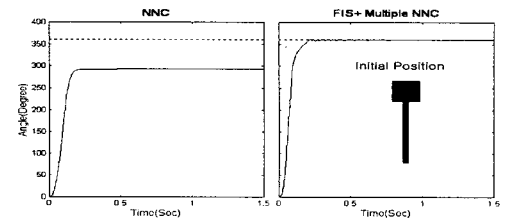


Fig. 12 The response for NNC and FIS based multiple NNCs at the initial position in the direction of 12 o'clock

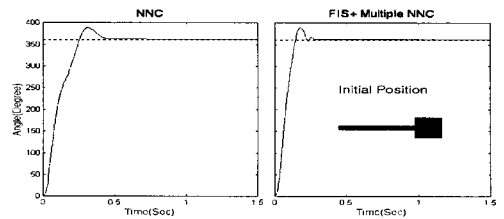


Fig. 13 The response for NNC and FIS based multiple NNCs at the initial position in the direction of 3 o'clock

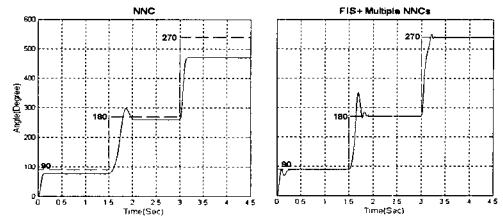


Fig. 14 The response for a series of the reference inputs

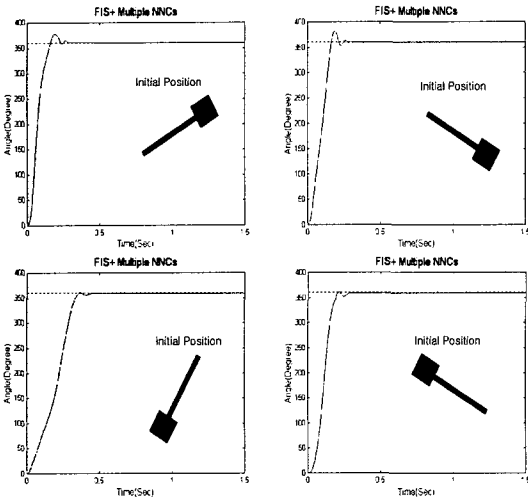


Fig. 15 The response at the arbitrary initial position(7, 10, 2, 5 o'clock)

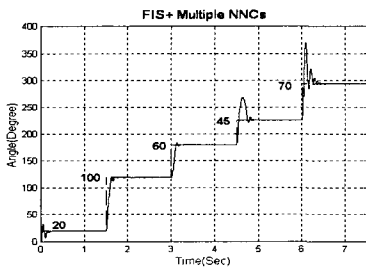


Fig. 16 The response for the arbitrary reference inputs

참고문헌

1. S. Ueha, Y. Tomikawa, M. Kurosawa, and N. Nakamura, *Ultrasonic Motors: Theory and Applications*, Clarendon Press · Oxford, 1993.
2. N. W. Hagood VI and A. J. McFarland, "Modeling of a Piezoelectric Rotary Ultrasonic Motor," *IEEE Transactions on Ultrasonic Ferroelectrics, and Frequency Control*, Vol. 42, No. 2, pp. 210-223, 1995.
3. P. Hagedorn and J. Wallaschek, Travelling Wave Ultrasonic Motors. Part I : Working Principle and Mathematical Modelling of the Stator," *Journal of*

Sound and Vibration, Vol. 155, No. 1, pp. 31-46, 1992.

4. T. Senjyu, H. Miyazato, S. Yokoda, and K. Uezato, "Speed Control of Ultrasonic Motors Using Neural Network," *IEEE Transactions on Power Electronics*, Vol. 13, No. 3, pp. 381-387, 1998.
5. T. Senjyu, H. Miyazato, S. Yokaoda, and K. Uezato, "Position Control of Ultrasonic Motors Using Neural Network," *Proceedings of the IEEE International Symposium on Industrial Electronics*, Vol. 1, pp. 368-373, 1996.
6. F. J. Lin, R. Jong, and R. Y. Duan, "Neural-Network Controller for Parallel-Resonant Ultrasonic Motor Drive," *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, Vol. 7, No. 4, pp. 494-501, 1999.
7. 민병우, 최재원, "초음파 모터의 위치제어를 위한 학습제어기 설계," *한국자동제어학술회의 논문집 D권*, pp. 245-248, 1999년 10월.
8. H. V. Barth, *Ultrasonic motor Driven Motor* IBM Technical Disclosure Bulletin, Vol. 16, No. 7, pp. 2263, 1973.
9. 임기조, 강문성, "초음파 모터의 응용-최근에 출원된 일본 특허를 중심으로," *대한전기학회지*, Vol. 43, No. 7, pp. 32-38, 1994.
10. 이감연, "DSP를 이용한 초음파 모터 설계," *조선대학교 제어계측공학과 석사학위논문*, 1997년 2월.
11. 신덕, 김동욱, 고낙용, 최한수, 김영동, "초음파 모터의 전압 및 위상차 제어 특성," *대한전기학회 하계학술대회 논문집*, pp. 949-952, 1996년 7월.
12. J. S. R. Jang, C. T. Sun and E. Mizutani, *Neuro-Fuzzy and Soft Computing*, Prentice Hall, pp. 233-236, 1997.
13. L. Fausett, *Fundamentals of Neural Networks*, Prentice Hall, pp. 17-21, 1991.
14. 오성권, 퍼지모델 및 제어이론과 프로그램, 기다리, pp. 93-231, 1999.