韓國精密工學會 2002年度 春季學術大會論文集 pp.424~427 KSPE 02S063

정밀 위치제어 서보시스템의 성능 평가

이원희*(한국기계연구원), 김동수(한국기계연구원), 최병오(한국기계연구원)

The Performance Evaluation of Precision Position Control Servo System

W.H. Lee(KIMM), D.S. Kim(KIMM), B.O. Choi(KIMM)

ABSTRACT

Pneumatic control systems have the potential to provide high output power to weight and size ratios at a relatively low cost. However, they are mainly employed in open-loop control applications where positioning repeatability is not of great importance. This paper presents precision positioning control of pneumatic servo cylinder with on-off valve, Pneumatic low-friction cylinder with servo valve and DC servo motor under parameter variations. Basically positioning control uses PID controller, where needs a linearized model. A neural network is added to a PID controller to compensator nonlinearity of the system and an influence of friction force is consider as disturbance. The performances of the proposed algorithms were compared by experiments with them of PID controller.

From those experiments is was shown that the proposed algorithms are more efficient about settling time, steady state error and overshoot than PID control algorithm.

Key Words : Pneumatic Servo System(공압 서보 시스템), Pneumatic Servo Cylinder(공압 서보 실린더), Position Control(위치제어), Neural Network(신경망)

1. 서론

현대 산업계에서 공장 자동화는 이제 필수적인 핵심 기술이다. 자동화 기술은 급속히 발전하고 있으며 특히 전기식 서보 시스템은 정밀 위치제어나 궤적추종에 있어서 탁월한 성능을 보이고 있다. 그러나 정밀도면에서 좀 떨어지더라도 속도가 빠르고 저렴한 시스템이 요구되는 경우 공압식 시스템이 타 시스템에 비해 성능이 우수하다. 공압식 위치제어 시스템은 전기식에 비해서는 큰 출력을 낼 수 있고, 직선운동을 목적으로 하는 경우에는 회전운동을 직선운동으로 바꾸어야 하는 전기모터에 비해서 장치가 간단하다는 이점이 있다. 또한 유압식에 비해서는 유지보수가 간편하고 청결한 작업이 유지되며 동력원을 별도의 장소에 둠으로써 진동 및 소음이 적고 각 기능별 구성요소의 가격이 저렴하여 타 시스템에 비해 성능/비용의 비가 우수하다(1)(4).

그러나 이러한 장점을 갖고 있음에도 불구하고 서보 제어 시스템으로 널리 응용되지 못하고 있는데, 그 이유는 작동유체인 공기의 압축성이 크고 내부 윤활이 나빠 마찰력이 크다는 것과 이런 이유들에 기인한 비선형성 때문에 속도나 위치를 제어하기 쉽지 않기 때문이다. 근래에 들어와 서보밸브를 사용하여 매우 정확한 위치제어가 가능하게 되었으나 서보 시스템의 구성시 비용이 비교적 많이 들기 때문에 공압시스템의 장점들이 크게 부각되지 못하고 있는 실정이다. 본 연구에서는 장치비용을 줄일 수 있는 On-Off 밸브와 공압 서보 실린더를 이용하여 저가의 서보제어 시스템과 서보밸브와 저마찰 공압 실린더를 이용한 중저가의 공압서보 시스템 그리고 DC서보 모터를 이용한 비교적 고가의 전기 서보 시스템을 이용하여 인쇄기의 핀트 조절을 위해 각각 X, Y, Z 3축으로 시스템을 구성하였다.

각각의 서보 시스템에 기본적으로 PID제어 알고리즘을 적용하여 위치정밀도를 실험하였으며, 공압 서보 시스템의 경우 강한 비선형성을 보상하기 위해 신경망 제어기를 추가하여 실험하였다.

2. 시스템 비선형 모델

2.1 밸브 모델

밸브를 통과하여 흐르는 유체의 질량유량은 식

(1)과 같이 표현된다.

$$\dot{m} = S\lambda_2 \frac{P_u}{\sqrt{(RT)}} f\left(\frac{P_d}{P_u}\right) \quad (1)$$

P_u, P_d는 밸브의 유입측과 유출측 압력이고, R,T는 각각 기체상수 (공기의 경우 29.2m/° K), 절대 온도이다. S는 밸브의 유효 단면적으로서 스풀의 위치 즉,밸브의 입력전압에 비례하므로 전체 시스템의 입력으로 생각할 수 있다. 밸브 내 유량은 밸브의 유입측과 유출측의 압력비와 밸브의 유효단면적에 의해 달라진다. 이때, 압축성 유체의 흐름인 경우 압력비에 관련된 함수 f 는 식(2)와 같이 근사화 된다. λ_1, λ_2는 무차원 상수이고, 임계압력 P_c는 P_u와 임계압력비인 r_c의 곱으로 표현된다(2).

$$f\left(\frac{P_d}{P_u}\right) = \begin{cases} \frac{\lambda_1}{\lambda_2}\sqrt{\left(\frac{P_d}{P_u}\right)^{2/\gamma} - \left(\frac{P_d}{P_u}\right)^{(\gamma+1)/\gamma}} & (P_d \le P_c) \\ 1 & (P_d > P_c) \end{cases} \quad (2)$$

$$\lambda_1 = \sqrt{\frac{2\gamma}{\gamma-1}}, \quad \lambda_2 = \sqrt{\gamma\left(\frac{2}{\gamma+1}\right)^{\frac{\gamma+1}{\gamma-1}}} \quad (3)$$

$$r_c = \left(\frac{2}{\gamma+1}\right)^{\frac{\gamma}{\gamma-1}} \quad (4)$$

2.2 실린더 모델

공기압 실린더 시스템은 앞서 언급했듯이 비선형성을 지니고 있는데 비선형 모델링을 위해 2가지 가정을 둔다. 첫째, 등온과정이며 작동유체는 이상기체이다. 둘째, 시스템의 유체 누출은 무시한다.

$$P\left[\frac{V}{M}\right]^{\gamma} = constant \quad (5)$$

식(5)는 미분에 의해 식(6)과 같이 표현된다.

$$\dot{P}\left[\frac{V}{M}\right] + P\gamma\left[\frac{V}{M}\right]^{\gamma-1}\left(\frac{\dot{V}}{M} - V\frac{1}{M^2}\dot{m}\right) = 0 \quad (6)$$

$$\dot{P}V + \gamma P\dot{V} = \gamma\dot{m}PV\frac{1}{M} \quad (7)$$

식(7)에 이상기체 상태방정식 $(PV=MRT)$ 을 적용하면 실린더 내의 압력과 유입, 유출의 유량 관계를 다음 식과 같이 표현할 수 있다.

$$\dot{P}V + \gamma P\dot{V} = \gamma\dot{m}RT \quad (8)$$

따라서 실린더 내의 압력 변환 식은 다음과 같이 얻을 수 있다.

$$\Delta\dot{p} = \dot{p}_a - \dot{p}_b = \frac{\gamma\dot{m}_a RT}{V_a} - \frac{\gamma\dot{m}_b RT}{V_b} + \frac{\gamma p_a\dot{V}_a}{V_a} - \frac{\gamma p_b\dot{V}_b}{V_b} \quad (9)$$

실린더의 운동 방적식은 식(10)과 같다.

$$A\Delta p = A(p_a - p_b) = m\frac{d^2x}{dt^2} + b\frac{dx}{dt} + f_c \quad (10)$$

$A, \Delta p, p_a, p_b$는 각가 실린더의 단면적, 실린더 내의 압력차, a chamber의 압력, b chamber의 압력이다.

3. 제어기 설계

비선형 마찰의 영향 때문에 PID 제어기에 의해선 만족할 만한 결과를 얻지 못한다. 따라서, 마찰을 실시간에서 추정하고 보상하기 위해 PID 위치제어기와 신경망에 기초한 궤환선형화 제어기를 사용하였다.

3.1 신경망

신경망(Neural Network)은 입력인 구동기의 속도와 가속도로부터 마찰을 추정하여 출력으로 내보내고 이를 입력전압에 더해주어 실시간으로 추정된 마찰을 보상할 수 있게 한다. 각각의 뉴런(Neuron)은 비선형 전이함수로서 시그모이드(Sigmoid) 함수를 사용하였으며, 식(11)과 같다.

$$f(x) = \frac{1}{1+\exp(-x)} \quad (11)$$

신경망이 뉴런의 상호작용을 모델화한 것으로 서로 다른 신호 전달 효율을 고려하여 가중치를 둔다. 즉, 앞단에서 나오는 신호에 가중치를 고려하여 더한 후, 전이함수를 계산하여 다음 뉴런으로 계산된 값을 출력하는 과정을 가지고 있다(3).

그리고 본 실험에서 사용한 신경망의 구성은 Fig. 1과 같다.

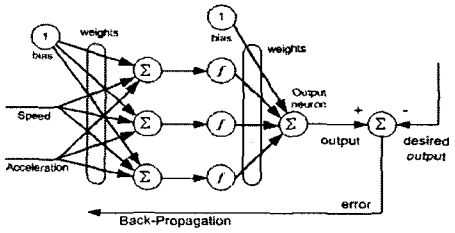

Fig. 1. The Structure of Neural Network

$$net_j^k = \sum_i w_{ij}^{k-1} O_i^{k-1} \quad (12)$$

$$O_j^k = f(net_j^k) = \frac{1}{1+\exp(-net_j^k)} \quad (13)$$

여기서

net_i^k = k 번째 층의 j 번째 노드의 입력

o_i^{k-1} = (k-1)번째 층의 i 번째 노드의 출력

$w_{ij}^{k-1,k}$ = (k-1) 번째 층의 i 번째 노드와 k 번째 층의 j 번째 노드를 연결하는 결합계수

가중치 w_{ij}는 노드 i가 노드 j에 미칠수 있는 영향력의 크기를 의미한다.

3.2 학습 알고리즘

본 연구에서는 여러 가지 학습이론들 중에서 널리 알려진 구조중의 하나인 다층 신경망을 학습시키는데 유용한 역전파학습법(Backpropagation)을 이용한다. 역전파학습법은 출력의 기대치와 실제값의 오차를 감소시키는 방향으로 연결강도를 조절하고 상위층의 오차를 현재의 연결강도를 가중치로 하여 다음 하위층에 역전파하여 하위층에서는 이를 근거로 하여 자기층의 결합계수를 조정해 간다. 여기서 학습율은 수정치의 크기를 조절한다.

$$w_{ij}^{k-1,k}(k+1) = w_{ij}^{k-1,k}(t) + \Delta w_{ij}^{k-1,k}(t) \quad (14)$$

$$\Delta w_{ij}^{k-1,k}(t+1) = -\eta \frac{\partial E}{\partial w_{ij}^{k-1,k}} \quad (15)$$

식 (14)에서 우변 첫 번째 항은 k 번째 학습단계에서의 연결 가중치이며, 두 번째 항은 수정 가중치이다.

3.3 제어계 구성

공기압 서보 실린더 및 공기압 저마찰 실린더 그리고 DC 서보 모터의 위치제어용 제어기로서 PID 제어기와 신경망 제어기를 사용한다. 선형화된 모델로서 구해진 PID 게인을 비선형 모델에 적용했을 경우 원하는 만큼의 출력을 얻을 수 없다. 이는 비선형 모델과 선형화된 모델간의 모델링 오차에 기안한 것으로 이를 보상하기 위하여 신경망 제어기를 부가적으로 사용하였다. Fig. 2는 제어 시스템의 블록선도이다.

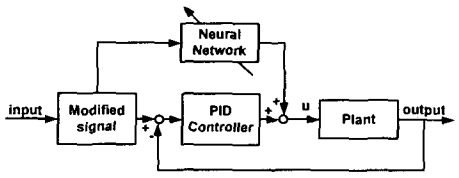

Fig. 2. Block Diagram of Control System

4. 실험장치 구성

본 실험에 사용된 시스템은 Fig. 3과 같으며 시스템은 각기 다른 3가지 액츄에이터로 구성되어져 있다. 사용된 액츄에이터는 On/Off 밸브를 이용한 공압 서보 실린더, 서보 밸브를 이용한 공압 저마찰 실린더, 그리고 DC 서보 모터를 사용하였다. 먼저, 공압 서보 액츄에이터는 볼스크류에 의해서 직선 운동을 회전운동으로 변환하며 로터리 엔코더를 이용하여 실린더 변위를 측정한다. 그리고 실린더의 변위가 목표값에 도달했을 때 밸브를 중립으로 놓음과 동시에 전자 브레이크를 이용하여 강제로 실린더를 정지시킨다.

사용된 서보밸브는 100 Hz의 대역폭과 0.3% 이하의 히스테리시스를 가지며 입력전압(0~10V)에 따라 스풀의 위치를 변화시켜 유량을 변화시키는 유량제어 밸브이다. 마지막으로 DC 서보 모터 시스템은 삼성전자의 CSDJ Plus 모델을 사용하였으며, 서보모터에 부착되어져 있는 로터리엔코더에 의한 1차 피드백 뿐만 아니라 포텐셔미터(Potentiometer)를 이용하여 실 작업물의 위치를 피드백 받을 수 있도록 2차 피드백 루틴을 구성하였다.

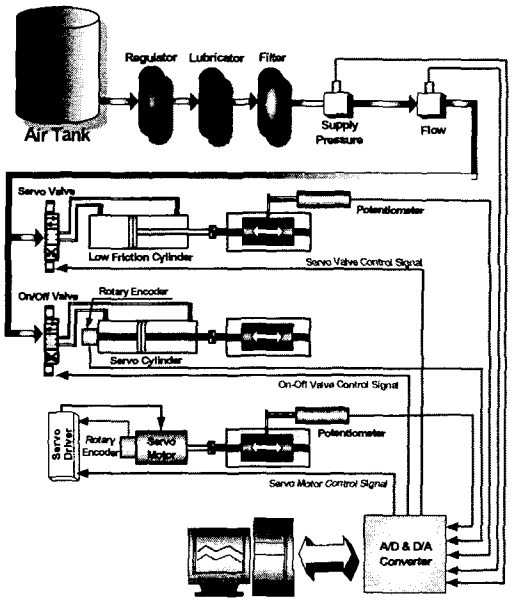

Fig. 3. Block Diagram of 3-Axis Position Control System

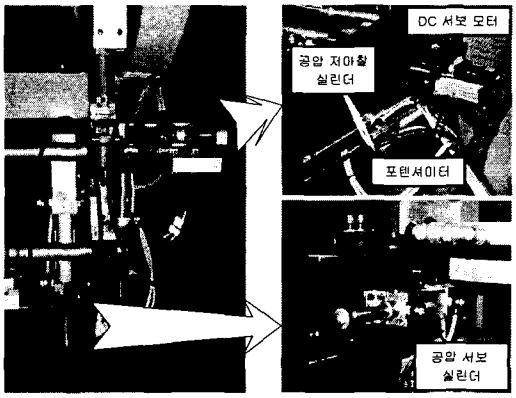

Fig. 4. 3-Axis Pint Position Control System for Printing Machine

5. 실험결과

각 액츄에이터별 실험 결과는 Fig. 5, 6, 7과 같다. 공기의 압축성에 의해 발생되는 과도상태에서의 비선형성은 제안된 궤환 선형화로 제거되어보다 좋은 성능을 가지게 됨을 볼 수 있다. 그리고 위치 정밀도

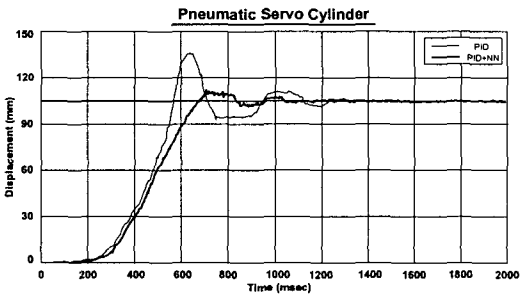

Fig. 5. Pneumatic Servo Cylinder and On/Off Valve

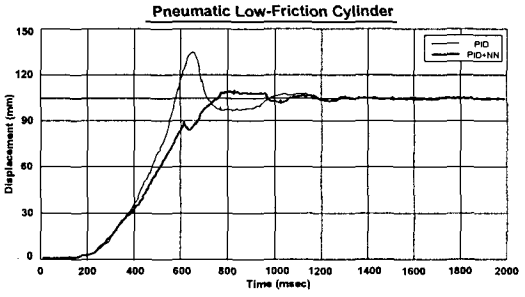

Fig. 6. Pneumatic Low-Friction Cylinder and Servo Valve

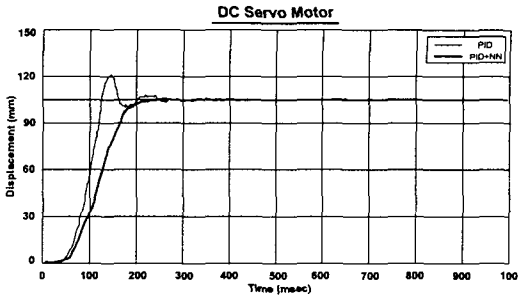

Fig. 7. DC Servo Motor and Drive

면에서 볼 때 On/Off 밸브를 이용한 공압 서보 실린더는 ± 0.5mm 오차를 보였으며, 서보 밸브를 이용한 공압 저마찰 실린더는 보다 우수한 ± 0.1mm 오차를 보였다. 마지막으로 DC 서보 모터 시스템에서는 ± 0.01mm 의 오차 범위를 확인하였다.

6. 결론

본 연구에서는 각 액츄에이터별로 위치 정밀도를 구하기 위하여 X, Y, Z 각축에 다른 액츄에이터를 이용하여 시스템을 구성하였으며, 공압시스템의 경우 압축성으로 인한 비선형성을 보상하기 위하여 PID 제어와 신경망 제어기를 구성하여 비선형성을 보상하였다.

보다 정확히 추종된 마찰이나 위치변화등이 궤환 제어기에 적용되거나, 구동기의 속도나 가속도를 직접 검출 하므로써 위치의 미분에 의해 구해질 때의 노이즈가 없다면 위치 제어 결과는 보다 향상될 것이다.

참고문헌

1. J Pu and R H Weston,"Motion Control of Pnuematic drives", Microprocessor and Microsystems, Vol 12 No 7, Sep. p373-382, 1988.
2. K. Hamiti, A. Voda-Besancon and Roux-Buisson, "Position Control of a Pneumatic Actuator under the Influence of Striction", Computer Eng., Vol. 4. No. 8. pp 1079-1088, 1996.
3. J. Song, X. Bao and Y. Ishida, "An Application of MNN Trained by MEKA for the Position Control of Pneumatic Cylinder", IEEE, p829-833, 1997.
4. 갈명준, "개패식밸브를 이용한 공압실린더의 위치제어에 관한 연구", 한국과학기술원 석사학위논문, 1991.