

On/Off 밸브를 이용한 공압 실린더의 지능제어

안경관[#], 표성만^{*}, 송인성^{*}, 이병룡^{**}, 양순용^{**}

Intelligent Control of Pneumatic Actuator using On/Off Valve

Kyoung-Kwan Ahn[#], Sung-Man Pyo^{*}, In-Sung Song^{*}, Byung-Ryong Lee^{**}, Soon-Yong Yang^{**}

ABSTRACT

The development of a fast, accurate, and inexpensive position-controlled pneumatic actuator that may be applied to a variety of practical positioning applications with various external loads is described in this paper. A novel modified pulse width modulation (MPWM) valve pulsing algorithm allows on/off solenoid valves to be used in place of costly servo valves. A comparison between the system response of standard PWM technique and that of the novel modified PWM technique shows that the control performance is significantly increased. A state feedback controller with position, velocity and acceleration feedback is successfully implemented as the continuous controller. Switching algorithm of control parameter using learning vector quantization neural network (LVQNN) is newly proposed, which estimates the external loads of the pneumatic actuator. The effectiveness of the proposed control algorithms are demonstrated through experiments with various loads..

Key Words : pneumatic (공압), switching control (스위칭제어), on/off solenoid valve (개폐식 솔레노이드 밸브), pulse width modulation (펄스폭변조방식), neural network (뉴럴네트워크), intelligent control (지능제어)

1. 서론

자동화 시스템에 사용되는 구동기는 작동원에 따라 전기식, 공기압식, 유압식으로 구분할 수 있다. 그 중 공기압식 구동시스템은 전기식 구동시스템보다 큰 마찰력과 스틱슬립 등의 현상으로 저속에서 연속적으로 제어하기가 힘들다. 그러나 공기압식은 전기식에 비해 일반적으로 큰 출력을 낼 수 있고, 직선운동을 목적으로 하는 경우 실린더를 사용하면 직선운동을 쉽게 구현할 수 있어 시

스템의 구성이 간단해지고 가격이 저렴해진다는 장점이 있다. 또한 유압식 시스템과 비교해 보면 유지보수가 간편하고 환경 친화적인 장점이 있다. 근래 공압서보밸브가 개발되어 상당히 정확한 위치제어가 가능하게 되었으나, 서보밸브는 가격이 비싸고 오염에 민감한 단점을 가지고 있다.

따라서, 본 논문에서는 고가의 서보밸브 대신 저가의 개폐식 밸브를 이용하여, 외부부하의 변화에도 상관없이 빠르고 정확한 위치 제어가 가능한 지능형 공압 제어 알고리즘을 개발하고자 한다.

^{**} 접수일: 2003 년 2 월 19 일; 게재승인일: 2003 년 7 월 11 일

[#] 교신저자: 울산대학교 기계자동차공학부
Email: kkahn@mail.ulsan.ac.kr, Tel: (052) 259-2282

^{*} 울산대학교 기계자동차공학과 대학원

^{**} 울산대학교 기계자동차공학부

공압을 이용한 위치제어 시스템에 관해서는 지금까지 다양한 연구¹⁻¹²가 진행되어 왔고, 이 중 저가의 On/off 밸브를 이용한 공압서보에 관한 연구⁹⁻¹²에서는 PWM(Pulse Width Modulation) 방식이 On/off 밸브를 제어하기에 효과적인 방법이라고 알려져 있다¹³. 그러나, PWM 방식으로 밸브를 구동할 때의 단점인 제어기 출력이 0 일 때도 밸브가 계속 동작하는 문제점을 보완하기 위하여 PWMD(Pulse Width Modulation with Dead-zone), MPWMD(Modified Pulse Width Modulation with Dead-zone)과 같은 새로운 밸브 개폐방법이 제안되었다⁽¹⁴⁾. 그러나, 기존의 연구에서는 일정한 외부부하에서는 원하는 성능을 보여 주었지만, 외부 부하가 변할 경우 위치제어 정도가 나빠짐을 알 수 있었다. 또한, 불감대 영역에서의 불필요한 전력 손실을 막기 위해서 개폐식 밸브의 전원을 차단하는 방법이 사용되었지만¹⁵, 불감대 영역에서는 제어 출력값이 너무 작아 밸브가 열려야 함에도 불구하고 열리지 않는 현상이 발생하였다.

본 논문에서는 상기 언급된 On/Off 밸브의 불감대 영역에서의 제어 성능의 열화문제와 외부부하의 변화에 상관없이 고정도의 제어를 실현하기 위하여, 새로운 밸브 개폐방식인 수정된 펄스폭변조(Modified Pulse Width Modulation, 이하 MPWM) 방식과 학습벡터양자화 뉴럴네트워크(Learning Vector Quantization Neural Network, 이하 LVQNN)에 의한 스위칭제어 알고리즘이 새롭게 제안, 다양한 부하에 대한 공압실린더의 위치제어 실험을 통하여 제어 성능을 확인하였다.

2. 공압위치제어 시스템

2.1 공압 위치제어 시스템 및 동작방법

그림 1 은 8 개의 개폐식 밸브로 구성된 공압 위치제어 시스템에 대한 개념도를 나타낸다. 이 시스템은 로드리스 실린더(SMC, MY1M32-1000L), 리니어 스케일(US Digital, resolution 0.05mm), 카운터 보드(Advantech, PCL 833), A/D 보드(Advantech, PCI 1731), 공압센서(SMC, ISE 40-01-22L), 디지털 IO 보드(Advantech, PCI 1731), DC 컨버터 및 8 개의 개폐식 밸브(MAC, 111B-872JD)로 구성되어 있다. 각 개폐식 밸브에 공급되는 공압은 0.5[MPa] 이고, 퍼스널 컴퓨터(Celeron 1G)에 의해 0.1Khz 로 계산된다. 그림 2 는 실제로 구성된 시스템을 보여준다.

여기서 압력센서는 로드리스 실린더의 이동챔버의 압력을 계측하기 위하여 사용되었다.

2.2 개폐식 밸브의 특성

본 실험에 사용되는 개폐식 밸브(MAC, 111B-872JD)의 특성을 파악하기 위하여 밸브에 흐르는 전류를 측정하였고, 그 결과를 그림 3 에 나타내었다. 100ms 동안 개폐식 밸브를 열고, 오실로스코프를 이용하여 개폐식 밸브에 전류를 측정하였다. 그림 3 의 확대된 그림에서 보면 전류가 상승하다가 감소하는 순간이 밸브가 열리기 시작하는 순간이고, 다시 전류가 상승하는 순간이 밸브가 다 열린 순간이다. 본 실험에 사용된 개폐식 밸브는 입력 신호가 가해진 시간보다 4ms 늦게 열리기 시작하여 0.6ms 동안 열리게 된다. 이 실험을 통하여 불감대영역이 4ms 임을 확인하였고, MPWM 에 의한 밸브 구동 시간은 이보다 길어야 한다.

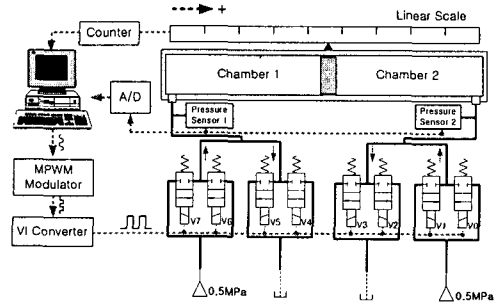


Fig. 1 Schematic diagram of pneumatic control system

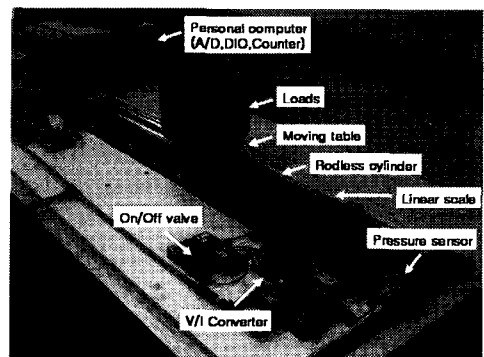


Fig. 2 Photograph of the experimental apparatus

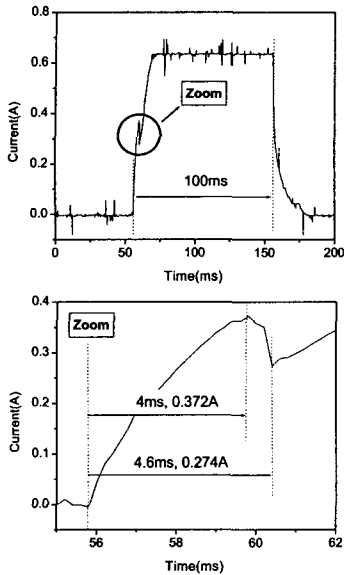


Fig. 3 Measurement of the valve opening time

3. 공압시스템의 제어 알고리즘

3.1 공압시스템의 제어기설계

공압실린더의 위치 제어를 위하여 위치, 속도, 가속도를 궤환하는 3-루프 제어기가 사용되었다. 공압시스템에는 3-루프 제어기가 유용하다고 이미 알려진 바 있다¹⁶⁻¹⁷. 이러한 제어기를 수식으로 표현하면 다음과 같다.

$$u = K_p(y_d - y) - K_v v - K_a a \quad (1)$$

- u : control input y_d : target position
- y : table position K_p : position gain
- v : table velocity K_v : velocity gain
- a : table acceleration K_a : acceleration gain

그림 4 는 3-루프 제어기, MPWM 변환기와 로드리스 실린더로 구성된 기본적인 제어기의 구조를 보여준다. 제어입력값 ‘ u ’는 테이블의 3 가지

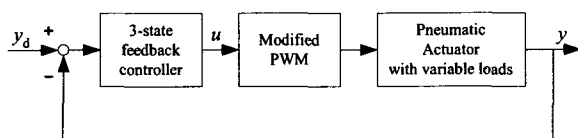


Fig. 4 Structure of the basic control algorithm

상태값으로부터 계산되고, 개폐식 밸브를 동작시키기 위한 MPWM 출력비로 변환된다.

3.2 MPWM 에 의한 밸브개폐

개폐식 밸브의 응답시간과 비 연속적인 동작 특성 때문에 연속적인 제어 입력값으로 로드리스 실린더를 제어하기에는 많은 문제가 있다. 따라서 제어 입력값 ‘ u ’는 개폐식 밸브를 동작시키기 위한 비 연속적인 값으로 변환되어야 한다. 개폐식 밸브의 불감대보다 밸브를 여는 시간이 작게 되면, 전류만 흐를뿐 밸브는 열리지 않게 된다. 이러한 문제를 해결하기 위해서 제어출력값이 작더라도 밸브를 동작시킬 수 있도록 불감대 영역(t_{DZ})을 이 동시켜 비례적인 출력이 가능하도록 MPWM 이라는 새로운 밸브제어방식을 제안한다. 제안하는 MPWM 방식은 식(2)와 같으며, 연속적인 제어입력 값으로부터 MPWM 출력결과의 한 예를 그림 5 에 나타내었다. 본 논문에서 제안된 MPWM 방식은 1ms 로 구동되고 3 루프제어기는 10ms 의 주기로 연산된다. 또한, 제어성능을 향상시키기 위해서 한 쌍의 같은 크기의 밸브를 사용하였다. 같은 크기의 밸브는 응답시간이 같기 때문에 MPWM 신호에 의한 동기화가 쉽다는 장점이 있다. 제어입력 값이 정해진 값보다 커지게 되면 한 쌍의 밸브(V1,V2,V5,V6 or V3,V4,V7,V8)가 동시에 열리게 되고 보다 많은 양의 공기가 흘러 들어갈 수 있어서 테이블이 빠르게 이동한다. 이때 열린 밸브는 제어 목표값 근처에 갈 때까지 열려있고, 제어 입력 값이 정해진 값보다 작아지게 되면, 각각 하나의 밸브만 동작하여 정밀위치제어를 하게 된다.

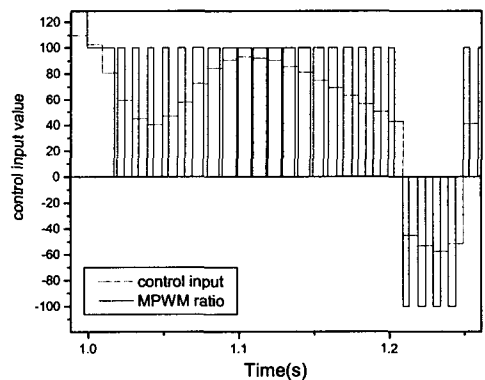


Fig. 5 Example of the MPWM ratio

$$U_{MPWM}(t) = \begin{cases} \text{sign}(U_0)|U_0| & (k-1)T \leq t \leq (k-1)T + t_p(k) \\ 0 & (k-1)T + t_p(k) \leq t < kT \end{cases}$$

$$t_p(k) = \begin{cases} t_s(k) & 0 < t_s(k) < T \\ T & t_s(k) \geq T \end{cases} \quad (2)$$

$$t_s(k) = \begin{cases} \frac{|U(k)|}{U_{\max}} T + t_{DZ} & 0 < |U(k)| \leq U_{\max} \cdot (1 - t_{DZ}/T) \\ T & |U(k)| > U_{\max} \cdot (1 - t_{DZ}/T) \end{cases}$$

- $U_{MPWM}(t)$: MPWM Output
- U_0 : Valve Opening Signal
- t_p : ON Duty Ratio of Valve for One MPWM Cycle
- t_s : Minimum Duty Ratio for Opening Valve
- t_{DZ} : Deadband Time of Valve
- T : MPWM Cycle Time
- t : Continuous Time
- $U(k)$: Sampled Control Input of $u(t)$
- U_{\max} : Saturated Control Input for MPWM Modulator
- k : Discrete Sequence

3.3 MPWM 에 의한 위치제어실험결과

그림 6은 무부하 조건에서 제안한 MPWM 알고리즘을 이용하여 로드리스 실린더의 위치제어를 실시한 결과이다. 한편 동일한 조건에서 On/Off밸브 대신 공압서보밸브를 사용한 경우의 실험결과를 그림 7에 나타내고 있다. 실험결과로부터 저가의 On/Off밸브를 사용하더라도 제안한 MPWM 알고리즘에 의해 서보밸브와 동일한 제어정도가 얻어짐을 확인할 수 있다.

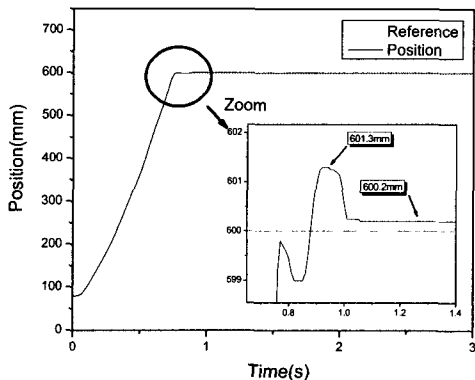


Fig. 6 Experimental result of the rodless cylinder by on/off valve controller with MPWM

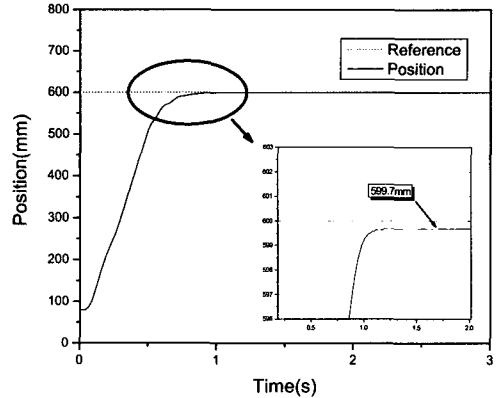


Fig. 7 Experimental result of the rodless cylinder by servo valve

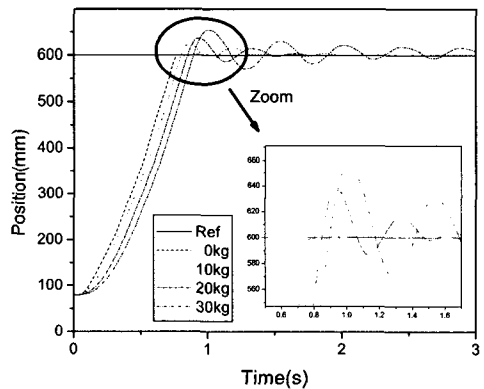


Fig. 8 Experimental results of the rodless cylinder with four different loads

한편 그림 8은 그림 6의 조건에서 부하만을 더 증가(10kg, 20kg, 30kg)하여 같은 실험을 반복한 결과이다. 부하가 10kg, 20kg, 30kg와 같이 점점 증가할수록 위치정도도 나빠지고 진동도 더 크게 발생함을 알 수 있다. 이와 같은 문제를 해결하기 위해서 LVQNN을 이용하여 테이블 위의 외부부하를 추정하고 적당한 3-loop 제어기의 게인값을 선택하는 방법을 제안한다.

4. LVQNN 에 의한 게인 선택 알고리즘

4.1 LVQNN 의 구조

외부부하에 따라 3 루프 제어기의 파라미터를 적절하게 조절하기 위하여, 공압시스템의 동적 특성을 바탕으로 부하가 On-line 상태로 인식되어져

야한다. 본 연구에서는 대표적인 4 가지 부하에 대하여 이를 4 가지의 부하상태로 구분하는 역할을 담당하는 감독기(Supervisor)로 LVQNN 을 도입한다. 그림 9 에 LVQNN 의 구조를 나타내고 있으며, 그림 10 에는 제안한 LVQNN 을 포함한 전체 제어기의 블록선도를 나타내고 있다. 그림 9 에서 $P, y, W_1, W_2, R, S_1, S_2$ 와 T 는 각각 입력벡터, 출력벡터, 경쟁층 및 선형층의 하중계수, 입력층, 경쟁층, 선형층 및 교사층의 뉴런 개수를 각각 나타낸다. LVQNN 은 교사신호를 가지는 학습알고리즘으로 경쟁층 및 선형층으로 구성된다. 경쟁층은 입력벡터의 분류를 학습하는 역할을 하고, 선형층은 설계자가 의도하는대로 경쟁층을 분류한다. LVQNN 의 각 가중치는 다음의 Kohonen 의 학습규칙¹⁸에 따라 갱신된다.

$$\Delta W_1(i, j) = \lambda \cdot a_1(i) \cdot (p(j) - W_1(i, j)) \quad (3)$$

여기서, λ 는 학습률이고, $a_1(i)$ 는 경쟁층의 출력값이다.

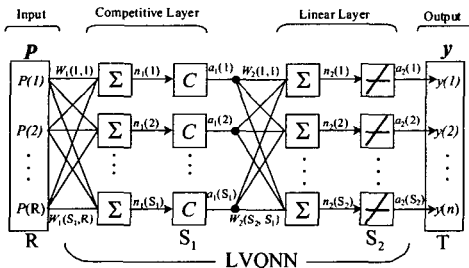


Fig. 9 Structure of the LVQNN

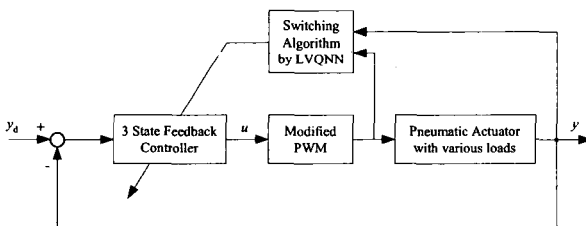


Fig. 10 Structure of the newly proposed control algorithm

4.2 학습용 데이터의 생성 및 LVQNN 학습

이 절에서는 LVQNN 의 학습을 위한 입출력 데이터 생성에 관하여 설명한다. LVQNN 의 입출력 데이터는 그림 11 에 나타낸 것과 같이, 로드리

스 실린더의 속도가 LVQNN 의 입력이 되며, 1 부터 4 까지의 정수 중의 한 값이 출력 데이터가 된다. 여기서 4 가지 값은 외부부하의 크기에 따라 결정되며 Table 1 에 그 예를 나타내고 있다. 예를 들어 3 이라는 출력 값은 외부부하가 15kg 과 25kg 의 사이에 있다는 것을 의미한다. LVQNN 을 위한 학습데이터를 얻기 위하여 Table 1 에 나타난 바와 같이 12 가지의 다른 부하조건에서 실험을 수행한다. 실험이 진행되는 동안 로드리스 실린더의 테이블은 실린더 좌측으로부터 80mm 위치에서 동작을 시작한 후 우측으로 빠르게 이송된다(V1, V2, V5 와 V6 밸브 열림). 그 실험 결과를 그림 12 에 나타내고 있다. LVQNN 의 입력갯수 및 경쟁층의 뉴런갯수의 최적값을 얻기 위하여, Table 2 에 나타낸 바와 같이 입력층의 개수를 27 에서 32 까지, 그리고 경쟁층의 뉴런갯수를 20 에서 40 까지 변화시키면서 LVQNN 의 최적 파라미터를 결정한 결과, 입력벡터의 개수는 30, 경쟁층의 개수는 40 으로 선정하였다.

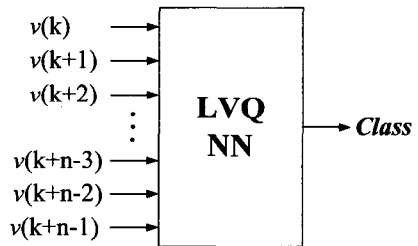


Fig. 11 Learning data for LVQNN

Table 1 Classification of external loads

No.	Class 1	Class 2	Class 3	Class 4
1	0 kg	8 kg	18 kg	28 kg
2	2 kg	10 kg	20 kg	30 kg
3	4 kg	12 kg	22 kg	32 kg

Table 2 Success rate of training of LVQNN

Hidden layer	Input data number				
	28	29	30	31	32
20	95.5%	97.2%	98.5%	97.5%	98.1%
30	98.7%	99.3%	97.7%	99.1%	100%
40	98.1%	99.3%	99.2%	100%	100%
learning rate: 0.6					
Training : 10000					

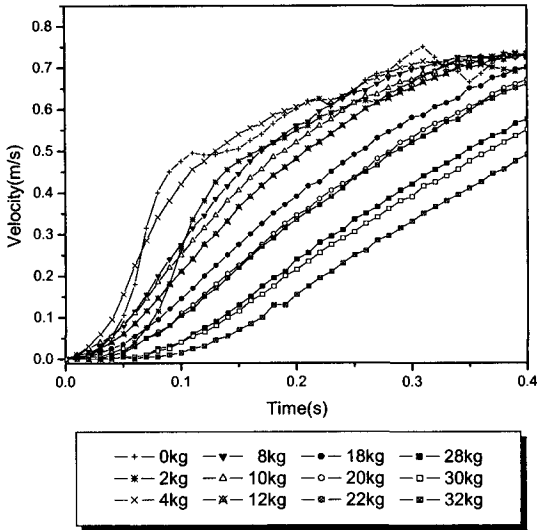


Fig. 12 Experimental results for learning data generation

4.3 LVQNN 에 의한 스위칭알고리즘의 제안

전절에서 이미 학습된 부하 조건의 경우, LVQNN 가 외부부하를 충분히 분류할 수 있는 능력이 있음을 확인하였다. 만약 외부부하조건이 이전의 학습조건과 다르다면, LVQNN 의 출력값은 이전에 정의된 클래스에 소속되지 못하고, 각 클래스에 적당한 비율로 혼합되어 나타날 것이다. 즉, 외부부하가 25kg 이라면, 그 결과는 3 과 4 클래스에 동시에 소속될 것이다. 따라서, 급격하게 부하가 바뀌는 시스템에 적용하기 위하여, 다음의 스위칭 알고리즘을 제안한다.

$$\text{class}(k) = \lambda \times \text{class}(k-1) + (1 - \lambda) \times \text{class}(k) \quad (4)$$

여기서, k 는 이산시간, λ 는 이동평균계수, $\text{class}(k)$ 는 k 이산시간에서의 LVQNN 의 출력값을 나타낸다.

3 루프 제어기와 MPWM 의 최적 파라미터는 실험에 의하여 시행착오법으로 선정하였다. 그 결과는 Table 3 에 나타나 있다. 여기서 속도, 가속도는 리니어 엔코더에서 나오는 신호를 수학적으로 차분하여 이용하였다. 이 결과로부터 알 수 있듯이 제어성능에 가장 큰 영향을 미치는 것은 속도 제어제인과 MPWM 의 포화 입력값임을 알 수 있다.

Table 3 Optimal parameters of 3 loop controller and MPWM

Class No.	K_v	U_{\max}	K_p	K_a
1	0.07	60	1.5	10^{-6}
2	0.12	100		
3	0.166	150		
4	0.195	200		

다음은 LVQNN 의 결과로부터 도출된 클래스를 이용하여 제어 계인을 갱신하는 알고리즘이다.

$$K_v(k) = K_v(p) \times (q - \text{class}(k)) + K_v(q) \times (\text{class}(k) - p) \quad (5)$$

$$U_{\max}(k) = U_{\max}(p) \times (q - \text{class}(k)) + U_{\max}(q) \times (\text{class}(k) - p) \quad (6)$$

$$p = \text{floor}(\text{class}(k)), q = \text{ceil}(\text{class}(k)) \quad (7)$$

여기서, k 는 이산시간, $\text{class}(k)$ 는 k 이산시간에서의 LVQNN 의 출력값, $\text{floor}(\cdot)$ 는 절하하여 반올림하는 함수 그리고 $\text{ceil}(\cdot)$ 은 절상하여 반올림하는 함수를 나타낸다.

5. 실험결과

제안한 MPWM 알고리즘과 LVQNN 에 의한 스위칭 알고리즘을 검증하기 위한 실험을 수행하였다. 외부부하가 10kg 인 경우의 실험결과가 그림 13 에 나타나 있다. 그림 13 에서는 실린더의 위치, 속도, 가속도, 실린더 각 챔버의 압력, 제어입력, LVQNN 의 출력 및 MPWM 밸브구동신호를 각각 나타내고 있다. LVQNN 은 실린더의 속도데이터의 개수가 30 이상(여기서는 0.3[s]가 소요) 취득되면 작동하기 시작한다. 실험결과로부터, 외부부하 조건은 클래스 2 로 정확하게 인식하고 있음을 알 수 있으며, 0.4[mm]이내의 정상상태 오차를 외부부하에 상관없이 고정도제어가 실현되었음을 알 수 있다. 다음으로 외부부하 15kg 인 경우의 실험결과를 그림 14 에 나타낸다. 이 부하조건은 클래스 2 와 3 의 중간에 속하는 값이다. 그림 14 의 상단부터 실린더의 속도, 클래스분류 결과, 속도피드백 계인(K_v), 포화제어입력(U_{\max}) 그리고, 3 루프제어를 통한 제어입력값을 각각 나타내고 있다. LVQNN 의 출력값으로부터 연산한 클래스 구분의 최종값은 2.58 이고, 이는 외부부하가 10kg 과 20kg

사이에 존재함을 의미한다. 속도피드백게인(K_v)과 포화제어입력(U_{max})는 (5)식과 (6)식을 이용하여 갱신된다. 상기 제안한 LVQNN의 성능을 검토하기

위하여 4 가지 부하조건에 대하여 실험을 실시하였다. 그 결과를 그림 15에 나타내고 있다. 실험 결과로부터 LVQNN을 적용하지 아니한 경우는 외부 부하가 증가함에 따라 시스템의 응답이 진동적이 됨을 알 수 있다. 한편, LVQNN을 사용한 경우, 시스템응답은 부하변화에 상관없이 일정하고 정상상태 오차도 0.4[mm]이내임을 알 수 있다.

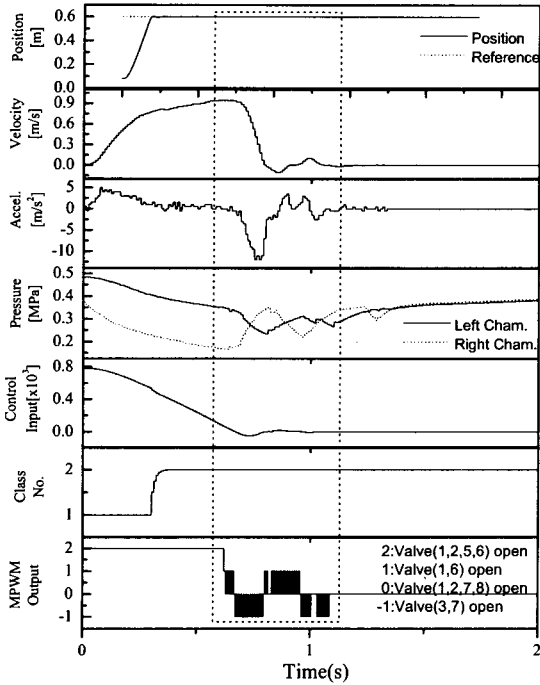


Fig. 13 Experimental results when external load is 10kg

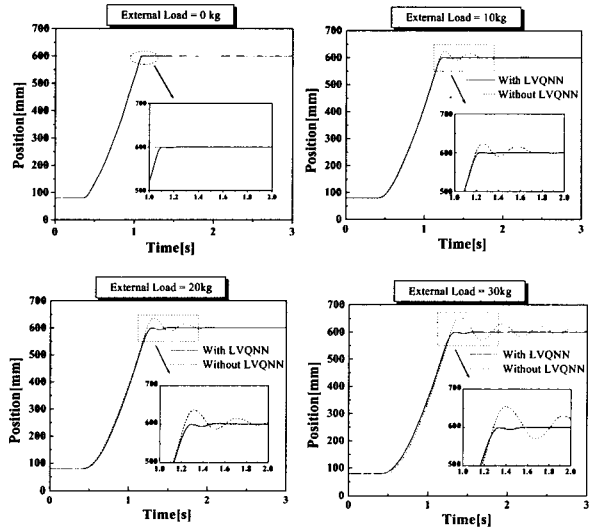


Fig. 15 Comparison of experimental results between with and without LVQNN

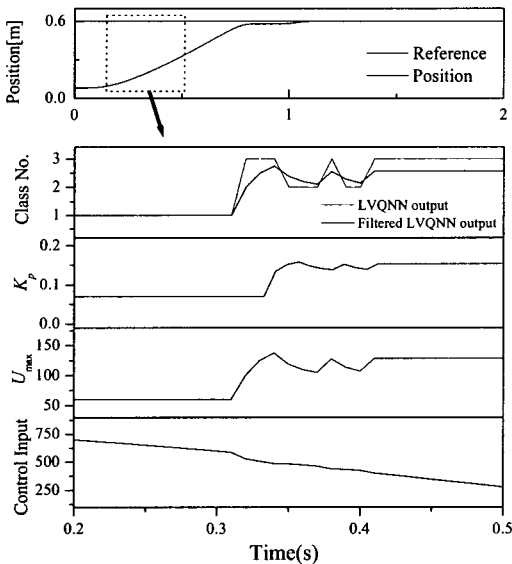


Fig. 14 Experimental results when external load is 15kg

6. 결론

본 논문에서는 다양한 실제적인 위치제어에 사용될 수 있는 고속, 고정도이면서 저가인 공압 액추에이터의 제어기를 개발하였다.

개폐식 밸브에서 발생되는 불감대를 보상하는 MPWM 밸브 구동방법을 새롭게 제안하여 공압 로드리스 실린더에 적용한 결과, 정상상태 오차가 0.4[mm]이내로 줄어들었다.

두번째 본 논문의 기여는 로드리스 실린더의 외부부하에 상관없이 항상 일정한 제어 성능을 얻기 위하여, LVQNN을 이용하여 외부부하 상태를 구분하여 제어 파라미터를 자동스위칭하는 알고리즘을 제안하였다. 4 가지 다른 부하에서의 공압실린더의 위치제어 실험으로부터 제안한 MPWM과 LVQNN에 의한 스위칭 알고리즘이 유효함을 증명하였다.

후 기

본 연구는 한국과학재단 지정 울산대학교 기계부품 및 소재 특성평가 연구센터의 지원에 의한 것입니다.

참고문헌

1. Eric J. Barth, Jianlong Zhang and Michael Goldfarb, "Sliding Mode Approach to PWM-Controlled Pneumatic Systems," Proc. of the American Control conference Anchorage, AK, May 8-10, 2002.
2. Bobrow, J. E. and Jabbari, F., "Adaptive Pneumatic Force Actuation and Position Control," ASME J. Dynamic Syst., Measur., Contr., Vol. 113, pp. 267-272, June 1991.
3. Choi, S. H., Hong, Y. S., Lee, C. O., "A Study on the Position Control and Simulation of Pneumatic Servo System," J. of the KSPE, Vol. 13, No. 6, pp. 102-113, 1996.
4. Noritsugu, T. and Takaiwa, M., "Robust Position of Pneumatic Servo System with Pressure Control Loop," Proc. IEEE int. Conf. Robotics and Automation, Vol. 3, pp. 2613-2618, May 1995.
5. Tang, J. and Walker, G., "Variable Structure Control of a Pneumatic Actuator," ASME J. of DSMC, Vol. 117, pp. 88-92, 1995.
6. Rachkov, M. Yu., Crisostomo, M., Marques, L. and A. T. de Almeida, "Position Control of Pneumatic Manipulators for Construction Tasks," Automation in Construction 11, pp. 655-665, 2002.
7. Robert B. van Varseveld and Gary M. Bone "Accurate Position Control of a Pneumatic Actuator Using On/Off Solenoid Valves," IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, Vol. 2, No. 3, 1997.
8. Tore Haeggglund, "A Friction Compensation for Pneumatic Control Valves," Journal of Process Control 12, pp. 897-904, 2002.
9. Matsui, T., Ishimoto, E. and Takawaki, M., "Learning Position Control of a Pneumatic Cylinder using Fuzzy Reasoning," J. Fluid Control, Vol. 20, No. 3, pp. 7-29, Mar. 1990.
10. Limmatt, J. A. and Smith, M. C., "An Accurate Low-Friction Pneumatic Position Control System," Proc. Inst. Mech. Eng. B, Vol. 203, No. 33, pp. 159-165, Apr. 1989.
11. Paul, A. K., Mishra, J. K. and Radke, M. G., "Reduced Order Sliding Mode Control for Pneumatic Actuator," IEEE Trans. Contr. Syst. Technol., Vol. 2, pp. 271-276, Sept. 1994.
12. Noritsugu, T., "Development of PWM Mode Electro-Pneumatic Servo Mechanism, Part II: Position Control of a Pneumatic Cylinder," J. Fluid Control, Vol. 17, No. 2, pp. 7-28, Mar. 1987.
13. Peirong, W., Yunbo, D. and Jianhua, H., "The Story of a Pneumatic PWM Position Control System," ICFP'93, Hangzhou, China, pp. 499-504, Sept. 1993.
14. Hwang, W. T., Choi, S. H., Lee, C. O., "Study on the Effective Operating Method of On-Off Valves for a Pneumatic Servo System," J. of the KSPE, Vol. 15, No. 1, pp. 109-116, 1998.
15. Choi, S. H., "A Study on the Position Control and Simulation of Pneumatic Servo System," KAIST M.S. Thesis, 1995.
16. Weston, R. H., Moore, P. R., Thatcher, T. W., "Computer Controlled Pneumatic Servo Drives," Proc. Inst. Mech. Engrs., Vol. 198B, No. 14, pp. 225-231, 1984.
17. Klein, A., Einsatz der Fuzzy Logik zur Adaption der Positionsregelung Fluidtechnischer Zylinderantriebe, Dissertation, RWTH Aachen, 1993.
18. Kohonen, T., Self-Organization and Associative Memory, 2nd Edition, Springer-Verlag, Berlin, 1987.