

On/Off 밸브를 이용한 공압 매니플레이터의 고정도 위치제어

Accurate Position Control of Pneumatic Manipulator Using On/Off Valves

안 경 관*, 표 성 만
(Kyoung Kwan Ahn and Sung Man Pyo)

Abstract : Loading/Unloading task in the real industry is performed by crane, but most of the loading/unloading task with the weight of 5kg~30kg is done by human workers and this kind of work causes industrial disaster of workers. Therefore it is necessary to develop low cost loading/unloading manipulator system to prevent this kind of industrial accidents. This paper is concerned with the design and fabrication of 2 axis pneumatic manipulators using on/off solenoid valves and accurate position control without respect to the external load and low damping in the pneumatic rotary actuator. To overcome the change of external load, switching of control parameter using LVQNN (Learning Vector Quantization Neural Network) is newly applied, which estimates the external loads in the pneumatic cylinder. As an underlying controller, a state feedback controller using position, velocity and acceleration is applied to the switching control system. The effectiveness of the proposed control algorithms are demonstrated through experiments of pneumatic cylinder with various loads.

Keywords : pneumatic, On/Off solenoid valve, LVQNN, neural network, manipulator, state feedback controller

I. 서론

자동화 시스템에 사용되는 구동기는 작동원에 따라 전기식, 공기압식, 유압식으로 구분할 수 있다. 그 중 공기압식 구동시스템은 전기식 구동 시스템보다 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 시스템의 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 공압 제어 알고리즘을 개발하고자 한다.

공압을 이용한 위치제어 시스템에 관해서는 지금까지 다양한 연구[1-12]가 진행되어 왔고, 이 중 저가의 On/off 밸브를 이용한 공압서보에 관한 연구[9-12]에서는 PWM(Pulse Width Modulation) 방식이 On/off 밸브를 제어하기에 효과적인 방법이라고 알려져 있다[13]. 그러나 PWM방식으로 밸브를 구동할 때의 단점인 제어기 출력이 0일 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]. 기존의 연구에서 MPWMD방식을 이용하여 비교적 제어가 용이한 로드리스 실린더를 이용하여 외부 부

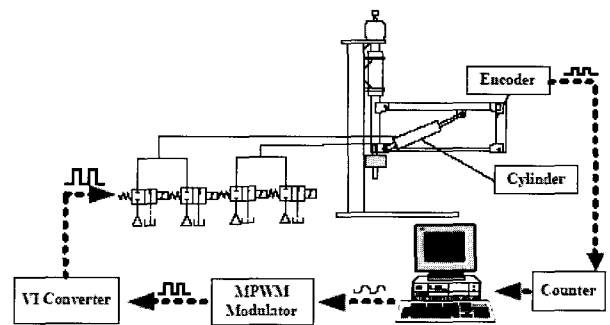


그림 1. 공압 제어 시스템의 개략도.
Fig. 1. Schematic diagram of pneumatic control system.

하가 변할 경우 위치제어 정도를 개선하였으나, 실제 산업현장에서 직접 적용이 되는 공압 매니플레이터에 대하여는 적용한 예가 없다. 본 논문에서는 상기 언급된 On/Off 밸브의 불감대 영역에서의 제어성능의 열화문제와 외부부하의 변화에 상관없이 고정도제어를 실현하기 위하여, 수정된 펄스폭 변조방식과 학습벡터 양자화 뉴럴 네트워크에 의한 스위칭 제어 알고리즘을 실제 산업현장의 Loading 및 Unloading작업에 적용 가능한 2축 공압 매니플레이터에 적용하여, 제안한 제어기의 성능을 확인하고자 한다.

II. 실험장치

Fig. 1은 4개의 개폐식 밸브로 구성된 공압 위치제어 시스템에 대한 개념도를 나타낸다.

이 시스템은 복동 실린더(SMC,CG1BA63-200), 로터리 엔코더(MATRONIX, S48-8-3600ZO, 10Pulse/Degree), 카운터 보드(Advantech,PCL 833, UP/Down 24bit), A/D 및 DIO보드(Advantech, PCI 1711, 12bit), 공압센서(FESTO, SDE 10-10V), VI Converter 및 4개의 개폐식 밸브(MAC, 250B-611BAAA)로 구성되어 있다. 각 개폐식 밸브에 공급되는 공압은 0.4[MPa] 이고, 퍼스널 컴퓨터

* 책임저자(Corresponding Author)

논문접수 : 2004. 4. 27., 채택확정 : 2004. 9. 30.
안경관, 표성만 : 울산대학교 기계자동차공학부
(kkahn@mail.ulsan.ac.kr/mic9577@mail.ulsan.ac.kr)

※ 본 연구는 울산대학교 교내연구비의 지원에 의한 것입니다.

(Pentium III 1.2G)에 의해 0.1kHz로 계산된다.

컴퓨터에서 계산된 제어값은 MPWM을 통하여 PWM신호로 변환되고 변환된 신호는 VI Converter를 통과하여 각각의 축에있는 4개의 밸브에 전달된다. 제어신호에 따라 각 밸브 조합이 작동되고, 복동 실린더의 해당챔버에 공압이 공급됨으로써 공압 매니플레이터의 기구학적인 동작이 이루어진다. 각 축의 움직임은 로터리 엔코더에 의해 검출되고 카운트 보드를 통해 읽어진다.

III. 공압시스템의 제어 알고리즘

1. 공압시스템의 제어기설계

공압 매니플레이터의 위치 제어를 위하여 위치, 속도, 가속도를 제환하는 3 Loop 제어기가 사용되었다. 공압시스템에는 3 Loop 제어기가 유용하다고 이미 알려진 바 있다[14,15]. 이러한 제어기를 수식으로 표현하면 다음과 같다.

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

- 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

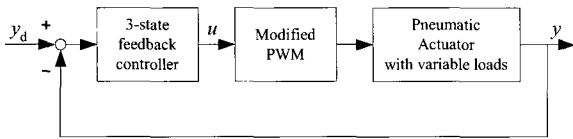


그림 2. 3 Loop 제어 알고리즘의 구조.

Fig. 2. Structure of the 3 Loop control algorithm.

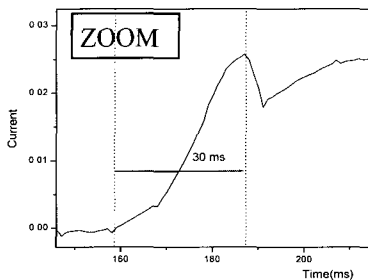
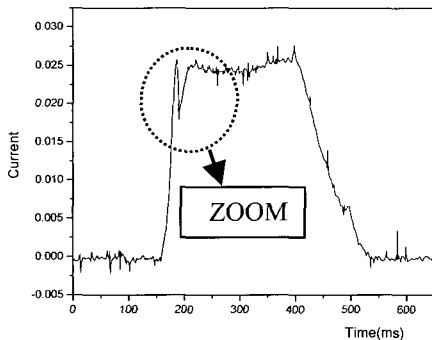


그림 3. On/Off valve의 개폐시간 측정.

Fig. 3. Measurement of the valve opening time.

Fig. 2는 3 Loop 제어기, MPWM 변환기와 공압 매니플레이터로 구성된 기본적인 제어기의 구조를 보여준다. 제어입력값 'u'는 (1)에서의 3가지 상태값으로부터 계산되고, 개폐식 밸브를 동작시키기 위한 MPWM 출력비로 변환된다.

2. 개폐식 밸브의 특성

본 실험에 사용되는 개폐식 밸브(MAC, 250B-611BAAA)의 특성을 파악하기 위해 밸브에 일정시간 동안 밸브에 흐르는 전류를 측정하여 그 결과를 나타내었다. 임의의 시간동안 개폐식 밸브를 완전히 열고 닫았을 때의 전류흐름을 오실로스코프를 이용하여 측정하였다. Fig. 3의 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 30ms 늦게 열리기 시작하는 것을 알 수 있다.

이 실험을 통하여 불감대영역이 30ms임을 확인하였고, MPWM에 의한 밸브 최소 구동 시간은 이보다 길어야 한다.

3. MPWM에 의한 밸브개폐

개폐식 밸브의 응답시간과 비연속적인 동작 특성 때문에 연속적인 제어 입력값으로 공압 매니플레이터를 제어하기에는 많은 문제가 있다. 따라서 제어 입력값 'u'는 개폐식 밸브를 동작시키기 위한 비연속적인 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 이동시켜 비례적인 출력이 가능하도록 MPWM이라는 새로운 밸브제어방식을 제안한다. 제안하는 MPWM방식은 (2)와 같으며, 연속적인 제어입력 값으로부터 MPWM 출력결과의 한 예를 그림 5에 나타내었다. 본 논문에서 제안된 MPWM방식은 10ms로 구동되고 3 Loop제어기는 100ms의 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. 제어입력값이 정해진 값보다 커지게 되면 한 쌍의 밸브(V1, V2 or V3, V4)가 동시에 열리게 되고 보다 많은 공기가 흘러 들어갈 수 있어서 매니플레이터가 빠르게 동작한다. 이때 열린 밸브는 제어 목표값 근처에 갈 때까지 열려 있고, 제어 입력값이 정해진 값보다 작아지게 되면 각각 하나의 밸브만 동작하여 정밀위치제어를 하게 된다.

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

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

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

- $U_{MPWM}(t)$: 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} : Dead Time of Valve Operation
- 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

4. MPWM에 의한 위치제어 실험결과

Fig. 5는 무부하 조건에서 제안한 MPWM 알고리즘을 적용하여 공압매니플레이터의 위치제어를 실시한 결과를 나타내고 있다. 본 실험에서는 시행착오법을 통하여 3 Loop 제어기의 위치, 속도 및 가속도 게인을 0.023, 0.002 및 0.0001로 각각 설정하였다. 3Loop 제어기와 MPWM 제어기를 이용한 위치제어 실험 결과, 0.1[°] 이내의 정상상태오차를 얻을 수 있었다. 본 실험결과로부터 제안한 제어기가 본 공압 시스템에서도 충분히 유효함을 알 수 있다.

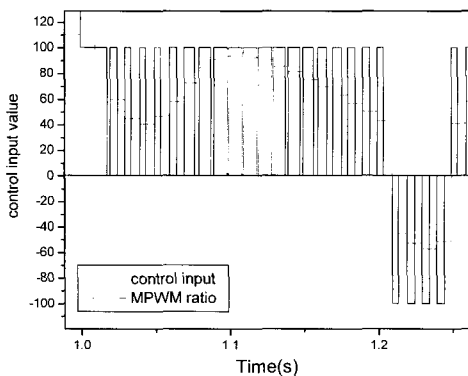


그림 4. MPWM 비율의 예.
Fig. 4. Example of the MPWM ratio.

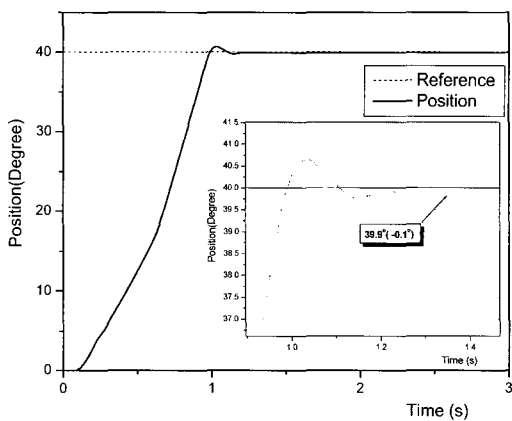


그림 5. 3 MPWM을 이용한 3 Loop제어 실험 결과.
Fig. 5. Experimental results of 3 Loop control using MPWM.

5. 다양한 부하에 따른 위치제어 및 그 문제점

공압 매니플레이터는 한가지 부하뿐만 아니라 다양한 부하를 들어 올리는 작업에 사용될 수 있다.

다양한 부하에 대한 공압매니플레이터의 제어성능을 감토하기 위한 실험을 실시한 결과는 Fig. 6에 나타내고 있다. 공압 매니플레이터에 추가되는 하중이 점점 증가할수록 응답이 느려지고 진동도 더 크게 발생함을 알 수 있다. 그러므로 고정된 제어기를 이용하여 제어를 한다면, 제어성능이 떨어지리라 예상할 수 있다. 이러한 문제를 극복하기 위해서 본 연구에서는 학습벡터 양자화 뉴럴 네트워크(Learning Vector Quantization Neural Network)를 도입하였다.

IV. LVQNN에 의한 게인 선택 알고리즘

1. LVQNN의 구조

외부부하에 따라 3 Loop 제어기의 파라미터를 적절하게 조절하기 위하여, 공압시스템의 동적 특성을 바탕으로 부하가 On-line 상태로 인식되어야 한다. 본 연구에서는 대표적인 4 가지 부하에 대하여 이를 4가지의 부하상태로 구분하는 역할을 담당하는 감독기 (Supervisor)로 LVQNN을 도입하였다. Fig. 7에 LVQNN의 연산구조를 나타내고 있으며, Fig. 7에서 $w_c(t)$, $x(t)$ 는 각각 가중벡터와 입력데이터를 나타낸다.

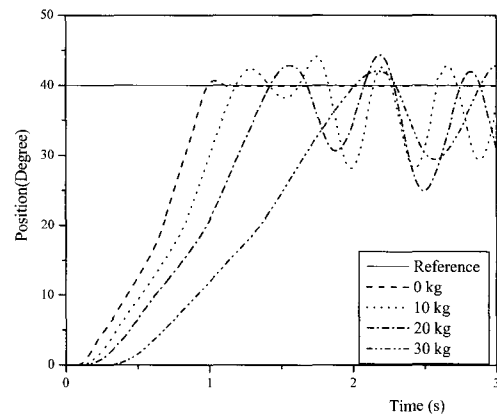


그림 6. 4가지 부하에 대한 위치제어 실험결과.
Fig. 6. Experimental results with respect to 4 external loads.

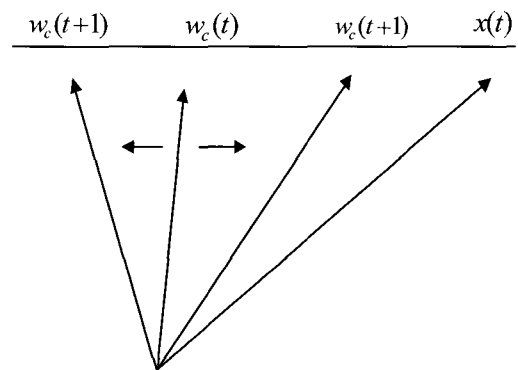


그림 7. LVQNN의 연산 구조.
Fig. 7. Operating structure of the LVQNN.

LVQNN은 교사신호를 가지는 학습 알고리즘으로 경쟁층 및 선형층으로 구성된다. 경쟁층은 입력벡터의 분류를 학습하는 역할을 하고, 선형층은 설계자가 의도하는대로 경쟁층을 분류한다. LVQNN의 각 가중치는 다음의 Kohonen의 학습 규칙[16]에 따라 갱신된다.

입력 데이터 $x(t)$ 로부터 최소거리에 있는 출력층에서 단위 c 를 찾는다.

$$\|x(t) - w_c\| = \min \|x(t) - w_i\| \quad (3)$$

여기서 $\| \cdot \|$ 는 Euclidean norm이고 t 는 반복시간을 나타낸다. 만약 입력 $x(t)$ 가 분류 c 에 속하면

$$\begin{aligned} w_c(t+1) &= w_c(t) + \alpha(t)(x(t) - w_c(t)) \\ w_i(t+1) &= w_i(t), i \neq c \end{aligned} \quad (4)$$

그리고 입력 $x(t)$ 가 다른 분류 $j(j \neq c)$ 에 속하면

$$\begin{aligned} w_c(t+1) &= w_c(t) - \alpha(t)(x(t) - w_c(t)) \\ w_i(t+1) &= w_i(t), i \neq c \end{aligned} \quad (5)$$

여기서 $\alpha(t)$ 이 양의 함수인 학습율을 나타내며, 다음식과 같이 주어진다.

$$\alpha(t) = \alpha_0 \left(1 - \frac{t}{T}\right) \quad (6)$$

여기서 $0 < \alpha < 1$ 이며 T 는 총 학습반복 횟수를 나타낸다.

2. 학습용 데이터의 생성 및 LVQNN 학습

이 절에서는 LVQNN의 학습을 위한 입출력 데이터 생성에 관하여 설명한다. Fig. 8, 9와 같은 속도, 압력 등 두가지 학습용 데이터가 순차적으로 LVQNN의 입력이 되며, 1부터 4까지의 정수 중의 한 값이 출력 데이터가 된다. 여기서 4가지 값은 외부부하의 크기에 따라 결정되며 Table 1에 그 예를 나타내고 있다. 예를들어 3이라는 출력값은 외부부하가 20kg과 24kg의 사이에 있다는 것을 의미한다. LVQNN을 적용하기 위하여 Fig. 6의 실험결과로부터 Fig. 8.과 같이 순차적으로 데이터를 입력하여 학습을 하였다. Fig. 8, 9와 같은 속도, 압력 등 두 가지를 학습 데이터로 이용였다. 외부부하에 따라 Table 1과 같이 4가지로 분류하여 학습하였다. 학습에 사용되는 구간은 학습구간은 초기 작동을 시작하면서 0.9초 동안의 구간에서만 학습하였다. 은닉층 신경 개수 30개, 입력 벡터 개수는 200개로 지정하였다. 학습율은 0.002로 설정하여 60,000회 학습하였으며, 학습성공률은 75.7%의 결과를 얻었다.

3. LVQNN에 의한 스위칭 알고리즘의 제안

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

표 1. 외부부하의 구분.

Table 1. Classification of external loads.

No.	Class 1	Class 2	Class 3	Class 4
1	0 kg	10 kg	20 kg	30kg
2	2 kg	12 kg	22 kg	32kg
3	4 kg	14kg	24 kg	34 kg

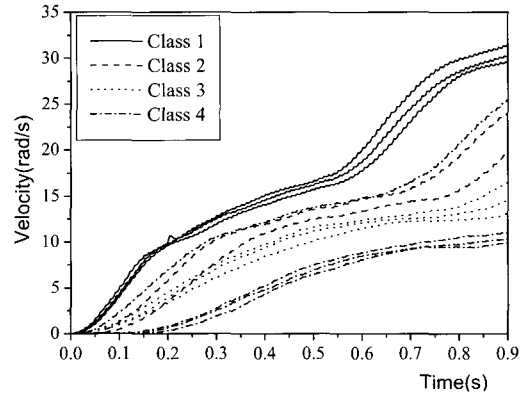


그림 8. 학습을 위한 매니플레이터의 응답 데이터(속도).
Fig. 8. Experimental results of manipulator for learning data generation(velocity).

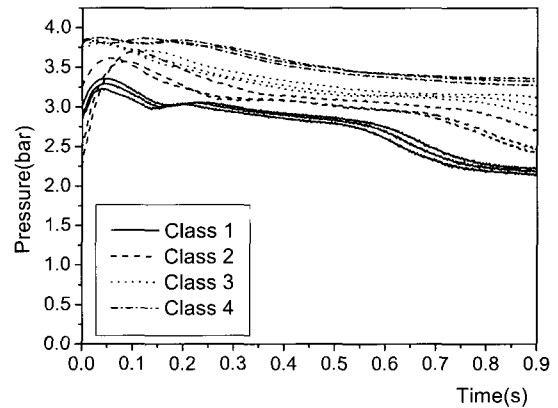


그림 9. 학습을 위한 위한 매니플레이터의 응답 데이터(압력).
Fig. 9. Experimental results of manipulator for learning data generation(pressure).

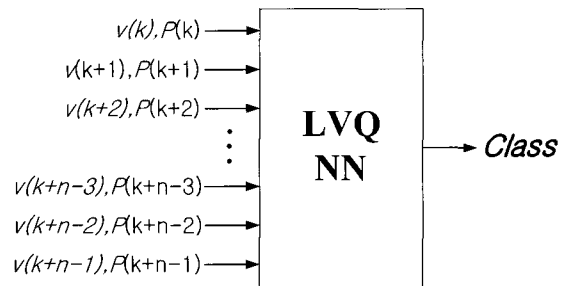


그림 10. LVQNN을 위한 학습 데이터 입력.
Fig. 10. Learning data for LVQNN.

$$\text{class}(k) = \lambda \times \text{class}(k-1) + (1-\lambda) \times \text{class}(k) \quad (7)$$

여기서 k 는 이산시간, λ 는 이동평균계수, $\text{Class}(k)$ 는 이산시간에서의 LVQNN의 출력값을 나타낸다.

3Loop 제어기와 MPWM의 최적 파라미터는 실험에 의하여 시행착오법으로 선정하였다. 그 결과는 Table 2에 나타나 있다. 여기서 속도, 가속도는 엔코더에서 나오는 신호를 수학적으로 차분하여 이용하였다. 다음은 LVQNN의 결과로부터 도출된 클래스를 이용하여 제어 Gain을 갱신하는 알고리즘이다.

$$K_v(k) = K_v(p) \times (q - \text{class}(k)) + K_v(q) \times (\text{class}(k) - p) \quad (8)$$

$$U_{\max}(k) = U_{\max}(p) \times (q - \text{class}(k)) + U_{\max}(q) \times (\text{class}(k) - p) \quad (9)$$

$$p = \text{floor}(\text{class}(k)), q = \text{ceil}(\text{class}(k)) \quad (10)$$

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

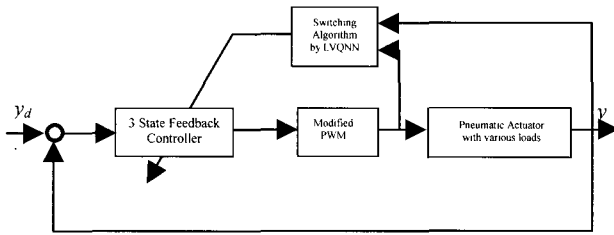


그림 11. 새로 제안된 제어알고리즘의 구조.
Fig. 11. Structure of the newly proposed control algorithm.

4. LVQNN에 따른 학습방법 및 다양한 부하에 따른 위치제어 실험결과

Fig. 12에서는 실린더의 위치, MPWM 신호, 속도, 가속도 및 LVQNN의 출력을 각각 나타내고 있다. LVQNN은 실린더의 속도데이터의 개수가 30이상 (여기서는 0.3[s]가 소요) 취득되면 작동하기 시작한다. 실험결과로부터 외부부하 조건은 클래스 2로 정확하게 인식하고 있음을 알 수 있으며, 정상상태 오차가 0.5[°] 이내로 안정적인 응답을 보였다.

3 Loop 제어기 게인값은 무부하 상태에서 최적화 되어 있기 때문에 외부 부하가 증가하게 되면 위치오차가 커지고 진동이 발생하였다. 이를 극복하기 위해 LVQNN을 이용하여 부하상태를 판별하고, 판별 된 부하상태로부터 최적의 3Loop 제어기의 Gain으로 스위칭 하였다. Fig. 12, 13에서는 임의의 외부 부하(각각 10kg, 30kg)를 부가했을 때의 시스템 응답을 나타내었다. 0.7초 이내 각각 Class 2와 Class 4로 바르게 분류하였으며 정상상태 오차가 0.5[°] 이내로 안정적인 응답을 보임으로서 제안된 알고리즘이 유효하다는 것을 알 수 있었다.

표 2. 3 Loop제어기의 최적 파라미터.

Table 2. Optimal parameters of 3 Loop controllers.

Class No.	K_p	K_v	K_a
1	0.02308	0.00205	0.0001
2	0.0160	0.00175	0.0001
3	0.01567	0.00165	0.0001
4	0.01566	0.00163	0.0001

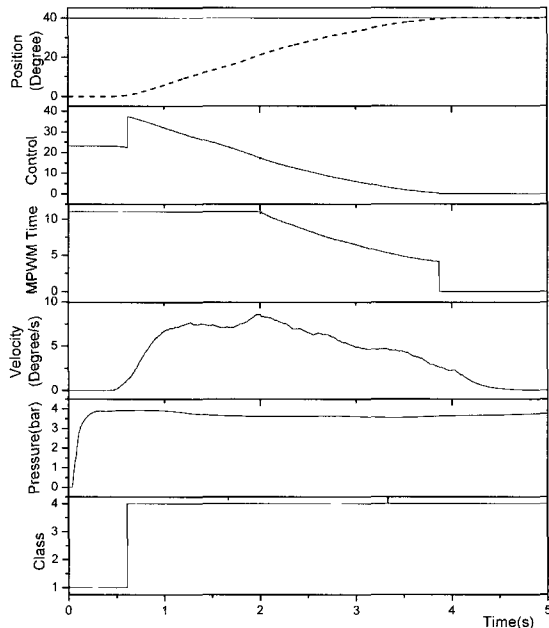


그림 12. LVQNN을 적용한 외부부하(class 2)에서의 실험결과.
Fig. 12. Experimental results of using LVQNN on any external load (class 2).

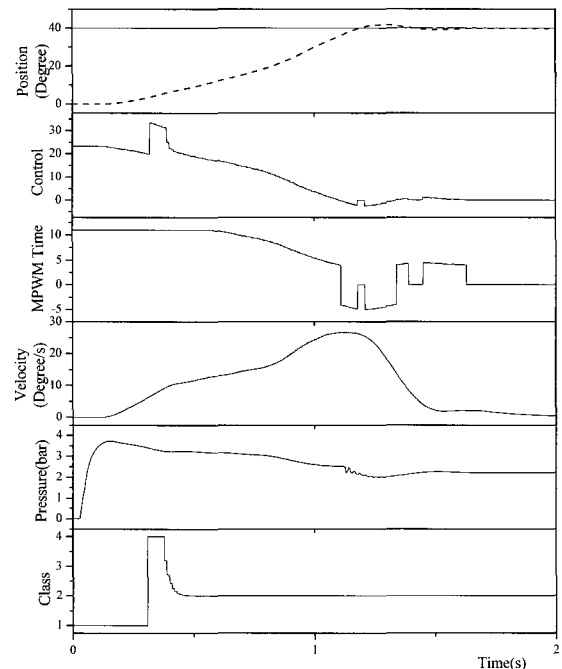


그림 13. LVQNN을 적용한 외부부하(class 4)에서의 실험결과.
Fig. 13. Experimental results of using LVQNN on any external load (class 4).

V. 결론

본 논문에서는 2축 공압매니플레이터에 대하여 실제적인 로딩/언로딩 작업에 사용될 수 있는 고정도이면서 저가인 공압 액츄에이터의 제어기를 개발하였다. 개폐식 밸브에서 발생하는 불감대를 보상하는 MPWM밸브 구동방법을 새롭게 제안하여 공압 매니플레이터에 적용한 결과 정상상태 오차가 크게 줄어들었다.

또한 본 논문에서는 공압 매니플레이터의 외부 부하에 상관없이 항상 일정한 제어 성능을 얻기 위하여, LVQNN을 이용하여 외부부하 상태를 구분하여 제어 파라미터를 자동적으로 스위칭하는 알고리즘을 적용하였다. 4가지 외부 부하의 조건에서의 공압 매니플레이터의 위치제어 실험 결과, 제안한 MPWM과 LVQNN에 의한 스위칭 알고리즘이 실제 현장에 적용될 공압 매니플레이터에도 유효함을 증명하였다.

참고문헌

- [1] E. J. Barth, J. Zhang and M. Goldfarb, "Sliding mode approach to PWM-controlled pneumatic systems", *Proc. of the American Control conference Anchorage, AK* May 8-10, 2002.
- [2] J. E. Bobrow and F. Jabbari, "Adaptive pneumatic force actuation and position control", *ASME J. Dynamic Syst., Measur., Contr.*, vol. 113, pp. 267-272, June 1991.
- [3] S. H. Choi, Y. S. Hong, C. O. Lee, "A study on the position control and simulation of pneumatic servo system", *KSPE*, vol. 13, no. 6, pp. 102-113, 1996.
- [4] T. Noritsugu, and M. Takaiwa, "Robust position of pneumatic servo system with pressure control loop", *Proc. IEEE int. Conf. Robotics and Automation*, May 1995, vol. 3, pp. 2613-2618.
- [5] J. Tang and G. Walker, "Variable structure control of a pneumatic actuator," *ASME J. of DSMC*, vol. 117, pp. 88-92, 1995.
- [6] M. Y. Rachkov, M. Crisostomo, L. Marques and A. T. de Almeida, "Position control of pneumatic manipulators for construction tasks", *Automation in Construction 11*, 2002, 655-665.
- [7] R. B. van Varseveld and G. 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] T. Haeggglund, "A friction compensation for pneumatic control valves", *Journal of Process Control 12*, 897-904, 2002.
- [9] T. Matsui, E. Ishimoto, and M. Takawaki, "Learning position control of a pneumatic cylinder using fuzzy reasoning", *J. Fluid Control*, vol. 20, no. 3, pp. 7-29, Mar. 1990.
- [10] J. A. Limmatt and M. C. Smith, "An accurate low-friction pneumatic position control system", *Proc. Inst. Mech. Eng. B*, vol. 203, no. 33, pp. 159-165, Apr. 1989.
- [11] A. K. Paul, J. K. Mishra and M. G. Radke, "Reduced order sliding mode control for pneumatic actuator", *IEEE Trans. Contr. Syst. Technol.*, vol. 2, pp. 271-276, Sept. 1994.
- [12] T. Noritsugu, "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] W. Peirong, D. Yunbo and H. Jianhua, "The story of a pneumatic PWM position control system", *JCFP 93*, Hangzhou, China, Sept., pp. 499-504, 1993.
- [14] R. H. Weston, P. R. Moore. T. W. Thatcher "Computer controlled pneumatic servo drives", *Proc. Inst. Mech. Engrs.*, vol. 198B. no 14, pp. 225-231, 1984.
- [15] A. Klein, "Einsatz der fuzzy logik zur adaption der positionsregelung fluidtechnischer zylinderantriebe", *Dissertation, RWTH Aachen*, 1993.
- [16] T. Kohonen, "Self-organization and associative memory", 2nd Edition, Springer-Verlag, Berlin, 1987.

안경관

제어 · 자동화 · 시스템공학 논문지 제 9 권 제 3 호 참조.

표성만

제어 · 자동화 · 시스템공학 논문지 제 9 권 제 4 호 참조.