연구 논문

유공압시스템학회논문집 제1권 제1호 pp. 17~22 2004년 3월

MR Brake를 이용한 공압 머니퓰레이터의 과도응답특성의 향상
Improvement of Transient Response Characteristics of Pneumatic Manipulator using MR Brake

안경관 · 송주영
K. K. Ahn and J. Y. Song

Key Words : Pneumatic Rotary Actuator(공압 로터리 액추에이터), Magneto-Rheological Fluid (MR유체), MR Brake(MR 브레이크), Phase Plane Switching Control(위상면절환제어), Manipulator (머니퓰레이터)

Abstract : The goal of this paper is to improve the position control performance of pneumatic rotary actuator with variable brake using Magneto-Rheological Fluid. The air compressibility and the lack of damping of the pneumatic actuator bring the dynamic delay of the pressure response and cause the oscillatory motion. In this study, a variable rotary brake comprising Magneto-Rheological Fluid is equipped to the joint of a pneumatic manipulator. Experiments of step response have proved that the transient response of the manipulator could be improved compared with that of the conventional control algorithm by using a phase plane switching control algorithm.

1. 서 론

자동화 시스템에 사용되는 액추에이터는 작동원에 따라 전기식, 공기압식, 유압식으로 구분할 수 있다. 그 중 공기압식 구동시스템은 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. 그러나 공기압 시스템은 큰 압축성과 감쇠력 등의 부족으로 정밀한 위치제어가 곤란하다. 따라서 공압시스템을 이용하여 서보제어가 필요한 자동화 장치에 적용하기 위해서는 무엇보다도 정밀한 위치제어성능의 향상이 요구된다.

공압을 이용한 위치제어 시스템에 관해서는 지금까지 다양한 연구[1-9]가 진행되어 왔으나, 기존의 연구는 직선형 운동을 하는 공압실린더를 대상으로 한 연구가 대부분이고, 공압 로터리 액추에이터를 대상으로 한 회전각도 제어에 관한 연구는 거의 이루어지지 않고 있다. 특히 공압 로터리 액추에이터는 압축성 및 액추에이터의 응답시간 지연 등으로 인하여 고정도의 위치제어가 매우 힘들다. 이를 해결하기 위해서는 인위적으로 감쇠력을 키우기 위한 댐퍼를 설치하는 방법이 있으나, 이는 제어성능을 나쁘게 한다.

본 연구에서는 인가된 전류의 크기에 따라서 유체의 점도가 가변되는 특징을 가지고 있는 MR유체(이하, MRF)로 구성된 가변 회전형 Brake(이하, MR Brake)를 공압 머니퓰레이터의 회전관절에 장착, 위상면 절환 제어(Phase Plane Switching Control) 알고리즘을 적용함으로서 계단응답 실험을 통하여 제어성능을 비교 검토한다. MR Brake는 감쇠력과 응답속도를 모두 고려하여, 가속 및 감속이 일정 설정값 이상이 되는 영역에서만 작동된다. 본 알고리즘에 의하여, 공압 머니퓰레이터의 응답속도를 떨어뜨리지 않고 감쇠 성능을 조절함으로서 제어성능을 향상시키고자 한다.

2. 실험장치

2.1 공압 머니퓰레이터

본 실험에 사용된 공압 머니퓰레이터의 사진을 Fig. 1에 나타낸다. 제2관절에는 공압 로터리 액추에이터가 회전축의 상단부에 부착되어 있다.

접수일 : 2004년 1월 15일
안경관(책임저자) : 울산대학교 기계자동차공학부
E-mail : kkahn@ulsan.ac.kr, Tel : 052-259-2282
송주영 : 울산대학교 대학원 기계자동차공학과

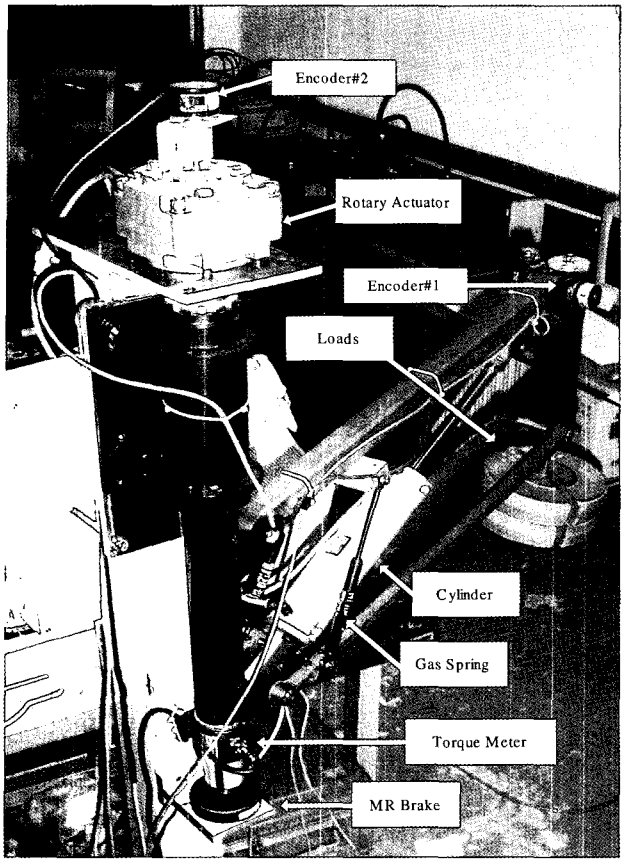


Fig. 1 Photograph of 2-axis pneumatic manipulator

On/Off 솔레노이드 밸브에 의해 로터리 액추에이터의 각 포터에 공급된 압력으로 회전 토크를 발생시켜, 링크 및 작업 대상물을 회전 운동시킨다. 본 연구에서 사용하는 머니퓰레이터는 감속기를 사용하고 있지 않고 있으며, 공압의 압축성 효과 등으로 인하여 유연한 시스템이 되고 또한 각 관절의 강성 역시 작다. 여기서 MR Brake는 Fig. 1에 나타난 바와 같이 첫 번째 회전축에 부착되어 있다. 또한, 공압 머니퓰레이터의 공압 회로 및 제어선도를 Fig. 2에 나타내고 있다. 관절의 각도는 각 관절에 장착된 회전형 인코더에 의해 계측되어, 24bit Counter에 의하여 PC에 피드백 된다. 인코더의 정도는 회전축에 대해서는 0.03[°]이다. 그리고 계산된 제어 입력값은 12bit D/A변환기로부터 0~10[V]로 변환되어, V/I변환기를 통하여 0~1[A]의 전류가 MR Brake에 공급되게 된다. 또한 제어시스템의 샘플링 주기는 1[ms]이다.

2.2 MR Brake

MR유체의 겉보기 점도는 전류를 인가한 후 수백분의 1초 내에 변하고, 전류를 차단하면 원래의 점도로 복귀하는 특성을 가지는 기능성 유체이다. 따라서 MR유체는 자동차용 완충기, 엔진 마운트의 진동제어, 클러치, Brake 및 밸브 등에 응용하기 위한 다양한 시도가 되어왔다[10-11]. 본 연구에서는 미국 Lord사에서 상용으로 제공되는 MRB-2107-3 Rotary Brake를 사용하였다. 본 연구에서 사용하는 MR Brake는

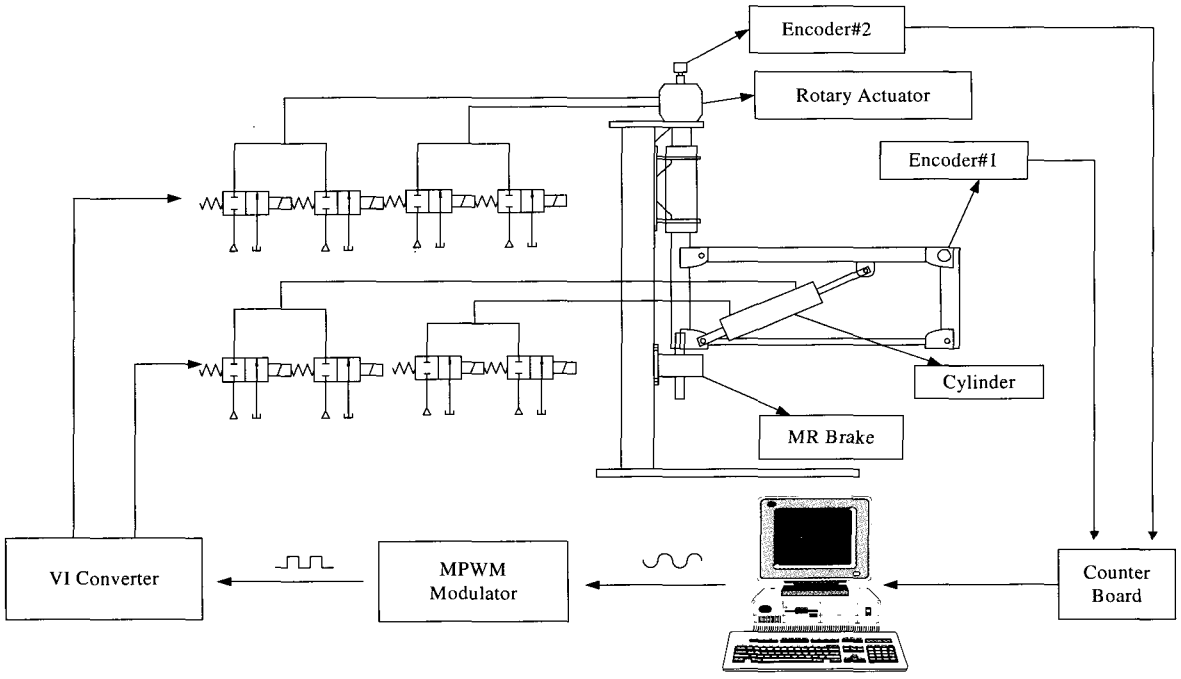


Fig. 2 Experimental Apparatus

자장에 따라 감쇠계수가 변하는 유체의 특성을 이용하여 내부에 자장을 형성하는 코일을 감아서 코일의 전류를 변화시킴으로서 MR Brake에 걸리는 감쇠력을 제어할 수 있도록 설계되어 있다(Fig. 3). 사용하는 MR Brake의 정특성 및 동특성을 파악하기 위하여, MR Brake의 회전축에 토크 미터와 DC서보모터를 직렬로 연결하고, 다양한 인가전류 및 회전속도에 대하여 감쇠 토크를 측정하였다. 그 결과를 Fig. 4에 나타내고 있다. Fig. 4(a)는 회전속도가 200[rpm]에서 다양한 전류를 MR Brake에 인가하였을 때의 감쇠 토크를 나타내고 있다. 본 계단응답의 실험결과로부터, 사용한 MR Brake의 감쇠토크 상승시간이 약 0.02[s]이내의 빠른 응답을 보임을 알 수 있다. 또한 인가전류에 따라서 MR Brake에 발생된 감쇠 토크의 관계를 Fig. 4(b)에, 인가전류와 회전속도에 따른 감쇠 토크의 관계를 Fig. 4(c)에 각각 나타내고 있다. 인가한 전류에 대하여 비례적으로 감쇠 토크가 증가함을 알 수 있다. 또한 회전속도가 빨라짐에 따라 감쇠 토크가 약간 증가함을 알 수 있다.

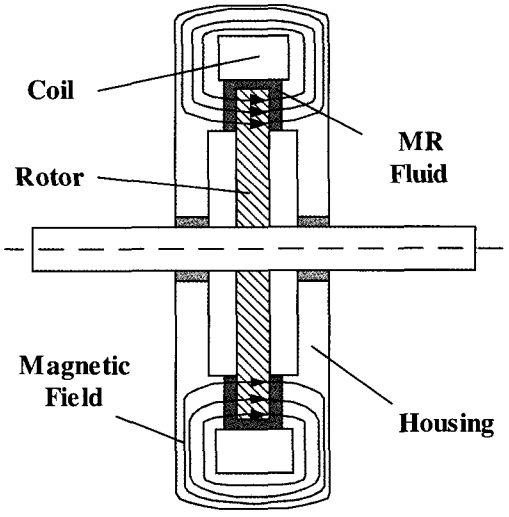
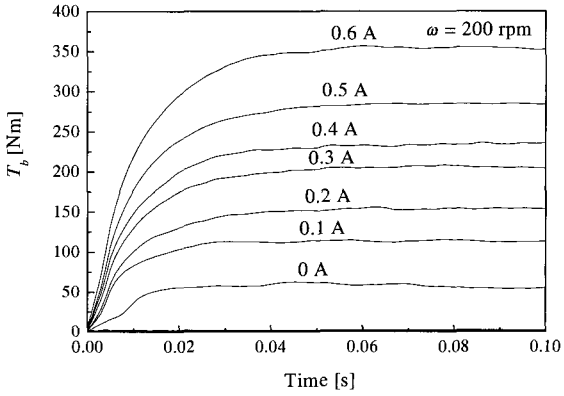


Fig. 3 Variable damper using MRF

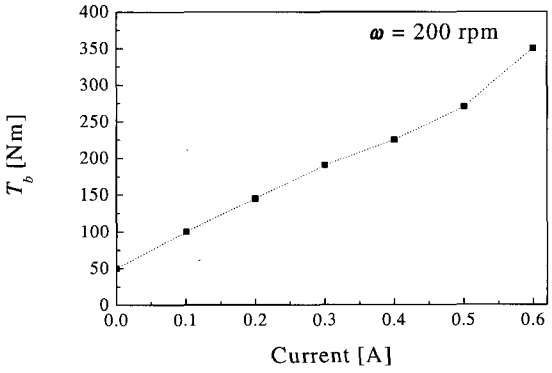
3. 제어시스템 구축

3.1 위치제어 시스템

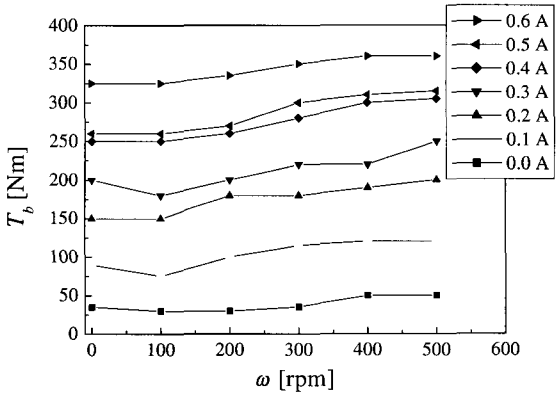
위치 제어시스템의 블록선도를 Fig. 5에 나타내고 있다. 여기서 머니퓰레이터의 제어성능이 공압 로터리 액추에이터에 공급되는 내부압력에 의존하므로 각 포터에 공급되는 압력을 신속, 정확하게 제어할 필요가 있다. 머니퓰레이터에 공급되는 압력은 저자에 의해 제안된 MPWM (Modified Pulse Width Modulation)알고리즘[12]에 의하여 제어된다. 여기서 T_a는 공압 로터리 액추에이터에 의해 발생된 회전력이고, T_b는 MR Brake에서 발생되는 감쇠력이다.



(a) Step responses of damping torque



(b) The relationship between input current and the damping torque



(c) Damping torques with respect to the various rotational speed and input current

Fig. 4 Characteristics of MR Brake with respect to the change of input current and rotational speed

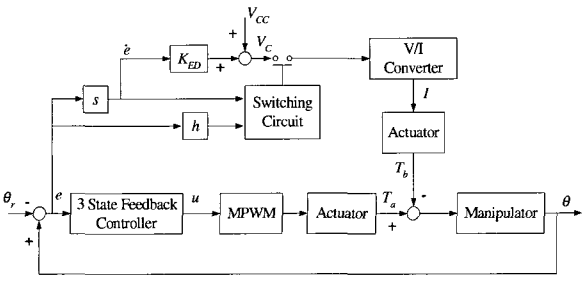
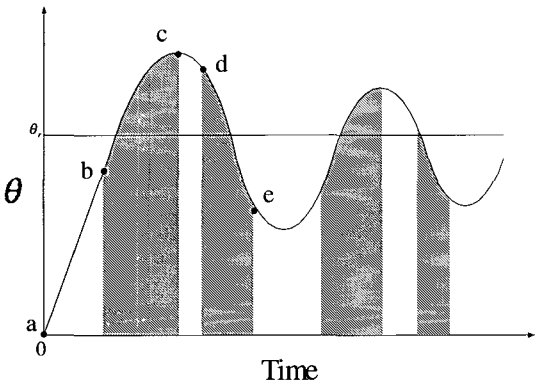


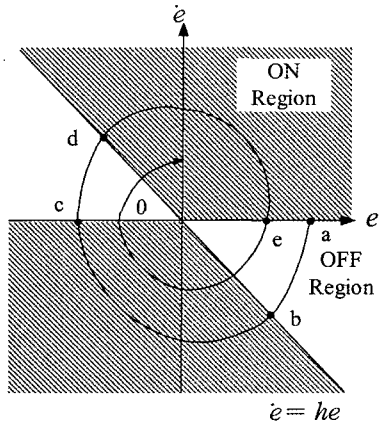
Fig. 5 Structure of position control system

3.2 위상면 절환 제어(Phase Plane Switching Control)

감쇠 토크 T_b는 머니퓰레이터의 감쇠 성능을 개선시키는 역할을 한다. 그런데, 감쇠력은 머니퓰레이터의 회전 방향과 반대 방향으로 작동하므로 가속 성능은 반대로 나빠지게 되다. 본 연구에서 적용하고자 하는 위상면 절환제어 알고리즘의 원리는 다음과 같다. 머니퓰레이터의 회전관절이 Fig. 6(a)에서 a楹b, c楹d 구간에 있을 때, 즉, 최고 가속 성능이 필요한 위치에 존재할 때, MR Brake가 머니퓰레이터의 운동을 방해하지 않도록 MR Brake에 전류를 가하지 않는다.



(a) Damping Region



(b) Phase Plane

Fig. 6 Concept of phase plane switching control

머니퓰레이터가 목표위치에 근접하거나, 멀어지려고 하는 b楹c, d楹e구간에서는 목표각도에 빨리 수렴할 수 있도록, MR Brake에 전류를 가하여 감쇠력을 증가시키도록 제어한다. MR Brake에의 전류인가 여부에 대한 판단은 Fig. 6(b)의 위상면 선도를 사용한다.[13] 이 평면에서 가로축은 목표각도와 실제 관절각도와의 편차를, 세로축은 목표각속도와 실제 관절의 각속도의 미분($\dot{e} = de/dt = -\ddot{\theta}$)을 각각 나타낸다. 위상면에서의 a에서 e점은 Fig. 6(a)의 각 점에 대응된다. 여기서, 전류가 인가되는 영역은 Fig. 6(b)의 직선의 기울기에 해당하는 $h[s^{-1}]$에 의해 조절된다. 즉 h의 기울기를 크게 하면 MR Brake의 감쇠토크가 작용하는 영역이 작아지고, 반대로 h를 작게 하면, Brake가 작동하는 영역이 커지게 된다.

4. 실험 결과

4.1 MR Brake의 감쇠성능 실험

위상면 절환 제어기의 성능을 검토하기 이전에, 본 실험에서 사용하고 있는 MR Brake의 감쇠성능을 파악하기 위한 실험을 실시하였다. MR Brake에 인가하는 전류를 0[A]부터 0.1[A]간격으로 0.5[A]까지 변경했을 때의 공압 머니퓰레이터의 스텝응답실험결과를 Fig. 7에 나타내고 있다. 본 실험결과로부터 공압 머니퓰레이터에 감쇠력이 작용하지 않을 경우에는 큰 오버슈트가 발생하게 되고, 반대로 너무 강한 감쇠력이 주어지게 되면, 목표치에 이르지 못하고 정상상태 오차가 발생함을 알 수 있다. 따라서 상기에 설명한 위상면 절환 알고리즘을 응용함으로서 필요한 때, 필요한 감쇠력을 감함으로서 고정도의 위치제어가 실현되리라고 기대된다.

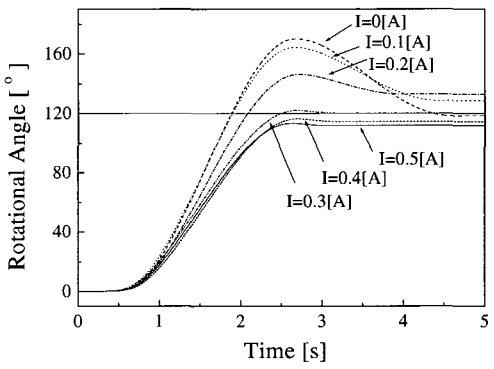


Fig. 7 Comparison of step response with respect to the change of the applying current to MR Brake

4.2 MR Brake를 이용한 위상면 절환 제어 실험

본 논문에서 적용하고자하는 위상면 절환제어기의 성능을 검토하기 위하여, 계단입력실험을 실시하였다. 목표 각도를 120[°], K_{ED}를 5[Nms/rad], h를 -2[s^{-1}], T_c를 7[Nm]로 각각 설정하였을 때의 실험결과를 Fig. 8에 나타내고 있다. 본 실험에서는 3루프 제어기의 위치, 속도 및 가속도게인을 각각 0.2096, 0.0206 및 10^{-6}으로 설정하였다. Fig. 8의 상단부로부터 머니퓰레이터의 회전각도 (실선: 위상면 절환제어기를 적용한 경우, 점선: 위상면 절환제어기 미적용시), 위상면 절환제어기를 적용했을 때의 회전각속도, MR Brake의 감쇠토크, 머니퓰레이터의 회전 각도오차 및 속도오차, 그리고 위상면 제어 알고리즘에 의한 MR Brake의 작동여부를 나타내는 영역 (ON Region은 MR Brake가 작용하는 영역을 의미함) 을 각각 나타내고 있다. 실험결과로부터 알 수 있듯이, 위상면 절환제어기를 적용하지 않았을 때에 비하여 위상면 절환제어기를 적용함으로서 오버슈트 없이 정상상태 오차도 0.2[°]이내의 좋은 응답성을 얻을 수 있음을 확인할 수 있다.

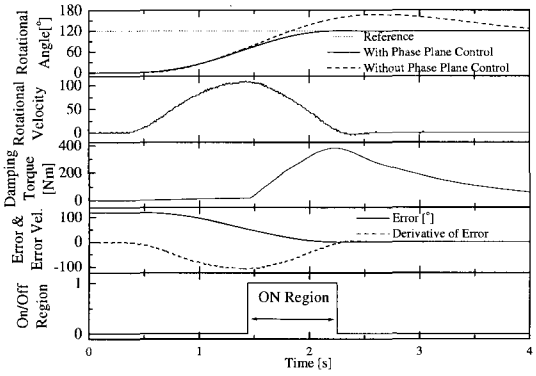


Fig. 8 Comparison of system response with and without phase plane control

4.3 위상면 절환제어기의 파라미터 영향분석

본 실험에서는 상기 공압머니퓰레이터의 위치제어에 적용한 위상면 절환 제어기의 주요 설계변수인 h가 위치제어에 미치는 영향을 실험적으로 분석하고자 한다. 여기서는 h값을 -1, -2 및 -4로 변경하면서 위치제어 실험을 실시, 실험결과를 Fig. 9에 나타내고 있다. 그래프는 상단부로부터 머니퓰레이터의 회전각도, 감쇠 토크, MR Brake의 작동 영역을 각각 나타내고 있다. 본 실험결과로부터 알 수 있듯이 h절대값을 크게 할수록 Fig. 6의 절환평면에서 MR Brake의 감쇠력이 작용하는 영역이 작아짐을 알 수 있다. 상단부의 위치제어실험결과로부터 알 수 있듯이 h절대값을 너무 작게 설정하면 언더슈트가 발생하게 되고, 역으로 너무 크게 설정한 경우, 감쇠력이 너무 작게 작용하여 오버슈트가 발생함을 알 수 있다.

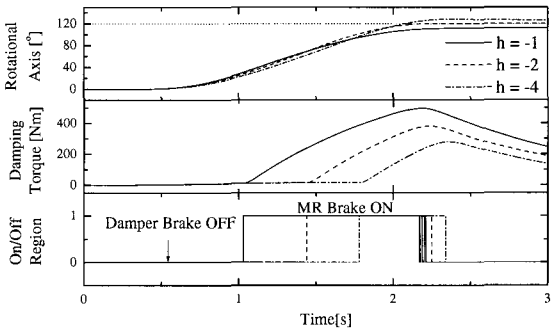


Fig. 9 Comparison of phase plane control with respect to the change of h

5. 결 론

인가한 전류에 비례해서 겉보기 점도가 순간적으로 변하는 MR가변 Brake를 압축성으로 인하여 고정도제어가 곤란한 공압 머니퓰레이터의 위치제어의 댐퍼로 적용하여, 제어성능을 향상을 시도하였다. 우선 위상면 절환제어 기법(Phase Plane Switching Control Algorithm)에 의하여 제어 영역을 분할함으로서, 시스템의 응답특성을 그대로 유지하면서 위치제어의 성능을 향상시킬 수 있음을 실험을 통하여 검증하였다. 또한, 위상면 제어알고리즘의 주요 설계변수인 위상면의 기울기를 결정하는 h값의 영향에 대하여 실험적으로 검토하였다. 본 연구 결과로부터 MR Brake를 압축성의 영향을 많이 받는 공압 액추에이터에 의해 구동되는 공압 머니퓰레이터에 적용함으로서 공압을 이용한 서보제어의 응용 가능한 가장 효과적인 방법 중의 하나임을 증명하였다

후 기

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

참 고 문 헌

1) J. B. Eric, Z. Jianlong and G. Michael, "Sliding Mode Approach to PWM-Controlled Pneumatic

Systems", Proc. of the American Control Conference, pp. 8~10, 2002.
2) J. E. Bobrow and F. Jabbari, "Adaptive Pneumatic Force Actuation and Position Control", ASME Journal of DSMC, Vol. 113, pp. 267~272, 1991.
3) S. H. Choi, Y. S. Hong, C. O. Lee, "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) T. Noritsugu and M. Takaiwa, "Robust Position of Pneumatic Servo System with Pressure Control Loop", Proc. IEEE Int. Conf. Robotics and Automation, Vol. 3, pp. 2613~2618, 1995.
5) J. Tang and G. Walker, "Variable Structure Control of a Pneumatic Actuator", ASME Journal of DSMC, Vol. 117, pp. 88~92, 1995.
6) M. Rachkov et al., "Position Control of Pneumatic Manipulators for Construction Tasks", Automation in Construction 11, pp. 655~665, 2002.
7) B. Robert et al., "Accurate Position Control of a Pneumatic Actuator Using On/Off Solenoid Valves", IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, Vol. 2, No. 3, 1997.
8) Tore Haegglund, "A friction Compensation for Pneumatic Control Valves", Journal of Process Control, Vol. 12, pp. 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, 1990.
10) H. Huang et al., "Analysis and Design of a Cylindrical Magneto-rheological Fluid Brake", Journal of Material Processing Technology, Vol. 129, pp. 559~562, 2002.
11) Y. K. Ahn, M. Ahmadian and S. Morishita, "On the Design and development of a magneto-rheological mount", Vehicle System Dynamics, Vol. 32, pp. 199~216, 1999.
12) K. K. Ahn et al.,, "Intelligent control pneumatic actuator using on/off valve", Journal of the Korean Society of Precision Engineering, Vol. 20, No. 8, pp. 86~93, 2003.
13) T. Noritsugu, Y. Tsuji and K. Ito, "Improvement of control performance of pneumatic rubber artificial muscle manipulator by using electroreological fluid damper", Proc. IEEE int. Conf. Robotics and Automation, Vol. 4, pp. 788~793, 1999.