

MR Brake 를 이용한 공압근육매니플레이터의 지능제어 Performance Improvement of Pneumatic Artificial Muscle Manipulators using Magneto-Rheological Brake

안경관*·T.D.C.Thanh**·안영공***

KyoungKwan Ahn, T.D.C. Thanh and YoungKong Ahn

Key Words : Pneumatic artificial muscle, Magneto-Rheological brake, Phase plane switching control, Manipulator.

ABSTRACT

A novel pneumatic artificial muscle actuator (PAM actuator), which has achieved increased popularity to provide the advantages such as high strength and high power/weight ratio, low cost, compactness, ease of maintenance, cleanliness, readily available and cheap power source, inherent safety and mobility assistance to humans performing tasks, has been regarded during the recent decades as an interesting alternative to hydraulic and electric actuators. In order to realize satisfactory control performance, a variable damper - Magneto-Rheological Brake (MRB), is equipped to the joint of the manipulator. Superb mixture of conventional PID controller and a phase plane switching control method brings us a novel controller. This proposed controller is appropriate for a kind of plants with nonlinearity, uncertainties and disturbances. The experiments were carried out in practical PAM manipulator and the effectiveness of the proposed control algorithm was demonstrated through experiments, which had proved that the stability of the manipulator can be improved greatly in a high gain control by using MRB with phase plane switching control method and without regard for the changes of external inertia loads.

1. 서론

대부분의 로봇 응용에 사용되는 액추에이터는 유압과 공압보다는 전기 시스템으로 구성되어 있다. 그러나, 전기시스템은 비교적 작은 중량대 파워비를 가지고 있으며, 인간친화 로봇이나, 인간과 공존하거나 공동작업을 수행하는 의료 및 복지 분야에서는 안전상의 문제로 전기 서보에 의하여 구동되는 로봇을 적용하기가 어려운 상황이다. 한편, 고강성과 높은 단위중량당 파워비, 저가 및 소형 등과 같은 많은 특징을 가지고 있는 공압인공근육 액추에이터가 최근 유압식 및 전기식 액추에이터를 대신하여 대안으로 여겨지고 있다. 이와 같은 장점을 가진 공압 인공근육은 맥키번 근육, 고무 근육 및 공압 인공근육 매니플레이터와 같은 새로운 액추에이터의 개발로 연결되어 인간친화형 치료 로봇 등의 다양한 분야에 적용되었다⁽¹⁻²⁴⁾. 그러나, 공기의 압축성과 공압근육 매니플레이터의 감쇠력의 부족으로 압력응답이 지연되어 진동적인 응답이 발생되었다. 따라서 인간친화적인 치료로봇을 실현하기 위하여, 고속 및 외부부하의 변화에 상관없이 고속응답의 성능을 향상하는 것은 쉽지 않다. 공압 인공근육이 관절의 재활 기능을 위한 재활용 로봇과 같은 치료 로봇에 가까운 미래에 적용된다면, 외부관성부하가 급격하게 변화하더라도, 빠른 응답을 실현할 필요가 있다. 그러나, 대부분의 경우 외부부하는 정확하게 알 수 없

으며, 공압 시스템에서는 빠른 응답을 쉽게 얻을 수 없다. 따라서, 다양한 부하에 대하여 적용할 수 있는 새로운 제어 알고리즘을 적용할 필요가 있다.

이 논문에서는 인가한 전류에 따라 감쇠력을 가변 할 수 있는 MR 브레이크를 공압 근육 매니플레이터에 적용하여, 외부부하의 변화에 상관없이 고속, 고정도의 위치제어 시스템을 제안, 실험을 통하여 제안한 제어알고리즘의 유효성을 검증하고자 한다.

2. 실험장치

2.1 실험장치

공압 인공근육 매니플레이터의 개략도가 Fig. 1에 나타나 있다. 이 시스템은 PC, 비례제어밸브(FESTO, MPYE-5-1/8HF-710 B), MR 회전형 브레이크(LORD, MRB-2107-3 Rotary Brake) 및 2 개의 공압 인공근육(LORD, MRB-2107-3 Rotary Brake)로 구성되어 있다. MR Brake 의 제동 토크는 D/A 보드로부터 인가된 전압이 V/I 변환기를 통하여 전류로 변환되어 제어된다. 관절각도 θ 는 회전형 엔코더(METRONIX, H40-8-3600ZO)에 의하여 계측되고 각 챔버의 공기압은 압력센서(FESTO, SDE-10-10)에 의하여 계측되어 각각 24Bit 디지털 카운트보드(Advantech, PCL 833)와 A/D 보드(Advantech, PCI 1711)에 의해 피드백 된다. 외부 관성부하는 20[kg/cm²]에서 200[kg/cm²]로 변한다. 이는 최소 관성에 대하여 1,000[%]의 관성변화이다.

* 울산대학교, 기계자동차 공학부

E-mail : kkahn@ulsan.ac.kr

Tel : (052) 259-2282, Fax : (052) 259-1680

** 울산대학교, 기계자동차공학과 대학원

*** 울산대학교, 기계부품 및 소재특성 평가 연구센터

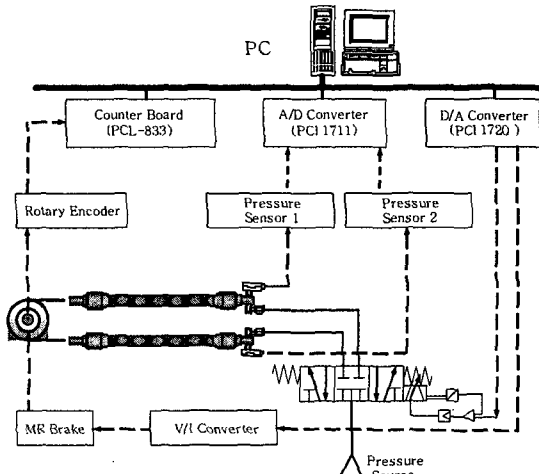


Fig. 1 Schematic diagram of pneumatic artificial muscle manipulator

2.2 MRB의 특성

MR 회전형 브레이크의 단면도를 Fig. 2에 나타내고 있다. Fig. 2의 회전자는 축에 고정되어 있으며 하우징에 대하여 회전한다. 회전자와 하우징 사이에는 MR 유체로 채워진 틈새가 있다. MR 회전형 브레이크의 브레이킹 회전력은 코일에 공급하는 전류에 의하여 제어될 수 있다. MR 유체의 걸보기 점도는 자기장을 인가한 후 수 천분의 1 초 이내에 변하고, 자기장을 없애면 정상 점도로 되돌아간다.

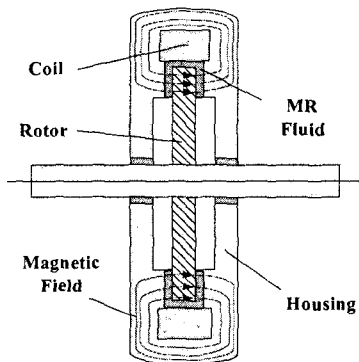


Fig. 2 Construction of magneto-rheological rotary brake

3. 위상면 절환제어 알고리즘

3.1 전체제어시스템

PID 제어기는 산업계에서 가장 빈번하게 사용하

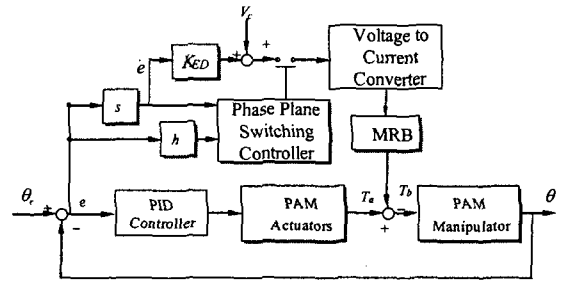


Fig. 9 Block diagram of control system

는 제어 알고리즘중의 하나이다. 이는 PID 제어가 넓은 작동영역에서 간단한 형태이면서 강건성을 가지고 있기 때문이다. 이 PAM 매니플레이터를 제어하기 위해서, 고전적인 PID 제어 알고리즘이 기본제어기로서 본 논문에서 사용되었다. 제어기의 출력은 시간영역에서 다음과 같이 표현된다.

$$u(t) = K_p e(t) + \frac{K_p}{T_i} \int_0^t e(t) dt + K_p T_d \frac{de(t)}{dt} \quad (2)$$

식(2)의 라플라스 변환을 취하면 식(3)을 얻을 수 있다.

$$U(s) = K_p E(s) + \frac{K_p}{T_i s} E(s) + K_p T_d s E(s) \quad (3)$$

그리고 최종 PID 제어기의 전달함수는 다음과 같다.

$$\frac{U(s)}{E(s)} = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right) \quad (4)$$

이산시간 k에서 전형적인 실시간 적용은 다음 식과 같이 표현된다.

$$u(k) = K_p e(k) + u(k-1) + \frac{K_p T}{T_i} e(k) + K_p T_d \frac{e(k) - e(k-1)}{T} \quad (5)$$

여기서 $K_p, T_i, T_d, u(k)$ 와 $e(k)$ 는 비례계인, 적분계인, 미분계인, 제어밸브의 제어입력과 원하는 목표치와 관절의 출력치 사이의 오차를 나타낸다.

게다가, MRB는 가속도 및 감속도가 너무 큰 영역에서만 작동하기 때문에 댐핑과 응답속도를 잘 조절함으로써 PAM 매니플레이터의 제어 성능을 향상할 수 있는 방법중의 하나이다. 제안한 위상면 절환제어 알고리즘의 구조가 Fig. 4에 나타나 있다. 여기서, s는 라플라스 연산자, T_a 는 매니플레이터에 의하여 발생된 토크, T_c 는 일정 토크, KED는 각속도에 비례하는 토크계인, V_c 는 T_c 를 발생하기 위하여 식(1)로부터 계산되어진 제

어전압이다. 댐핑 토크의 방향은 매번 압의 회전속도와는 반대이다. 따라서, 아래의 식(6)은 댐퍼 T_b 가 토크를 발생함을 의미한다.

$$T_b = (K_{ED}\dot{\theta} + T_c) \text{sign}(\dot{\theta}) \quad (6)$$

3.2 위상면 전환제어 방법

댐핑 토크는 매니플레이터의 댐핑 성능 T_b 를 향상시킨다. 댐핑 토크는 항상 매니플레이터의 회전속도의 반대방향으로 작용하므로, 그 가속 성능은 저하되게 된다. Fig. 4(a)에서 관절각이 원하는 각도에 근접할 때(a~b 및 c~d 구간) MRB는 압의 운동을 방해하지 않도록 전류는 인가되지 않는다. 한편, 압이 원하는 각도(Fig. 4(a)의 b~c 및 d~e 영역)를 지나갔을 때, 원하는 각도에 신속히 수렴하도록 전류가 인가된다. 자기장이 인가되어야 할지 아닐지를 결정하기 위해서, Fig. 4(b)의 위상면이 사용된다. 위상면의 수평축은 목표각도와 관절각도 사이의 오차를 나타내고, 수직축은 그 오차의 미분을 나타낸다. 위상면에서의 각 위치 a~e는 Fig. 4(a)의 a~e에 각각 해당된다. 여기서, 전류인가 영역의 크기는 Fig. 4(b)에서 보여주는 바와 같이 직선의 미분인 $h[s^{-1}]$ 에 의해 조절된다. 따라서, 댐핑 토크의 인가영역은 $|h|$ 가 작을수록 커진다.

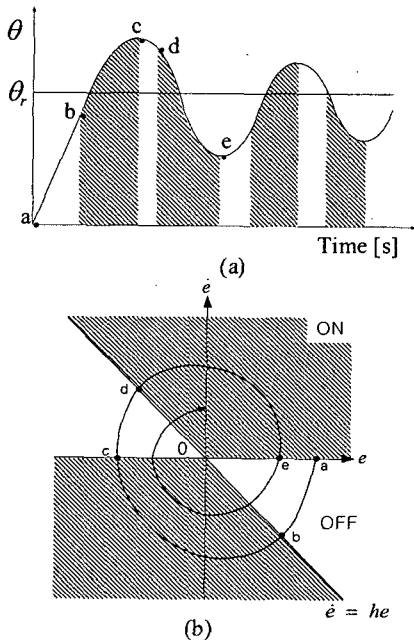


Fig. 4 Concept of phase plane switching control

4. 실험결과

3 가지의 다른 관성부하 조건에 대하여 실험을 실시하고, 기존의 PID 제어기와 위상면전환 제어기사이의 성능을 비교하였다. PID 제어기를 이용하여 3 가지 외부부하에 대하여 실험한 결과를 Fig. 5에 나타내고 있다. 이 결과로부터, 시스템의 응답은 외부부하의 증가에 따라 더 진동적으로 되었고, 10 배의 외부관성부하에서는 더 불안정하게 되었다.

Fig. 6은 외부 관성부하조건 3에 대하여 위상면전환제어기를 적용한 경우의 상세한 실험결과를 나타내고 있다. 제안한 제어기는 높은 계인제어, 빠른 응답 및 10 배의 외부관성부하변화에 대한 강건안정성에 유효함을 알 수 있다.

5. 결론

이 논문에서는 다양한 관성부하에 대하여 제어 성능을 향상시키기 위하여 MR Brake를 이용한 새로운 위상면전환제어 알고리즘이 공압근육 매니플레이터에 적용되었다. 실험결과로부터 새롭게 제안된 제어기는 외부관성부하가 1,000[%]변하더라도 원하는 제어성능을 만족함을 알 수 있다. 그리고 각 부하에 대한 정상상태오차는 $\pm 0.05[^\circ]$ 이내로 줄어들었다. 또한 가변 댐퍼로서 MRB를 사용함으로써, 댐핑 토크는 인가한 자기장의 강도에 의해 제어되고, 위치제어 성능은 위상면 전환제어 알고리즘에 의해 댐핑 토크가 발생되는 영역을 분리함으로써 응답속도에 영향을 주지 않고 항상 되었음을 알 수 있다. 이 결과로부터 MRB는

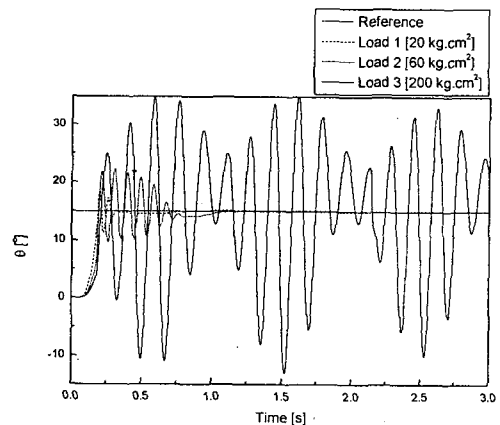


Fig. 5 Experimental results of PID controller with various loads

PAM 매니플레이터에 의해 구동되는 인간친화 로봇을 개발할 때에 유효한 방법임을 알 수 있다.

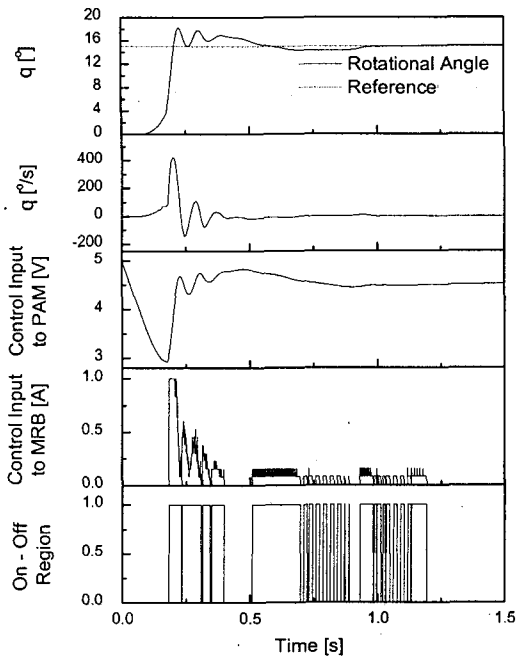


Fig. 6 Experimental results of phase plane switching control method (Load 3)

후기

본 연구는 산업자원부에서 시행한 지역산업기술 혁신사업으로 울산대학교 기계부품 및 소재특성평가연구소의 지원에 의한 것입니다.

참고 문헌

- (1) Ahn, K. K., Lee, B. R., Yang, S. Y., 2003, "Design and experimental evaluation of a robust force controller for a 6-link electro-hydraulic manipulator via H infinity control theory," in *KSME, Int., Jour.*, Vol. 17, No. 7, pp. 999-1010.
- (2) Ahn, K., K., Tu, D. C. T., 2004, "Improvement of the control performance of pneumatic artificial manipulators using an intelligent switching control method," in *KSME, Int., Jour.*, Vol. 18, No. 8, pp. 1388-1400.
- (3) Balasubramanian, V., Rattan, K.S., 2003, "Feedforward control of a non-linear pneumatic muscle system using fuzzy logic," in *IEEE Int., Conf., Fuzzy Systems*, Vol. 1, pp. 272-277.
- (4) Bowler, C. J., Caldwell, D. G., and Medrano-Cerda, G. A., 1996, "Pneumatic muscle actuators; Musculature for an anthropomorphic robot arm," in *Proc. IEE Colloquium on Actuator Technology Current Practice and New Developments*, London, pp. 8/1-8/5.
- (5) Cai, D., Yamaura, H., 1997, "A VSS control method for a

- manipulator driven by an McKibben artificial muscle actuator," *Electron, Commun, Japan*, Vol. 80, No. 3, pp. 55-63.
- (6) Caldwell, D. G., Medrano-Cerda, G. A., and Goodwin, M. J., 1995, "Control of pneumatic muscle actuators," *IEEE Contr., Syst., Mag.*, Vol. 15, No. 1, pp. 40-48.
- (7) Caldwell, D. G., Medrano-Cerda, G. A., Goodwin, M. J., 1994, "Characteristics and adaptive control of pneumatic muscle actuators for a robotic elbow," in *Proc., IEEE Int., Conf. Robotics and Automation*, Vol.4, pp. 3558-3563.
- (8) Carbonell, P., Jiang, Z.P., Repperger, D.W., 2001, "Nonlinear control of a pneumatic muscle actuator: backstepping vs. sliding-mode," in *Proc., IEEE Int., Conf., Control Applications*, Mexico City, Mexico, pp. 167-172.
- (9) Chan, S.W., Lilly, J.H., Repperger, D.W., Berlin, J.E., 2003, "Fuzzy PD+I learning control for a pneumatic muscle," in *IEEE Int., Conf., Fuzzy Systems*, Vol. 1, pp. 278-283.
- (10) Folgheraiter, M., Gini, G., Perkowski, M., and Pivtoraiko, M., 2003, "Adaptive Reflex Control for an Artificial Hand," in *Proc., SYROCO 2003, Symposium on Robot Control*, Holiday Inn, Wroclaw, Poland.
- (11) Gaylord, R. H., 1958, United States Patent 2,844,126.
- (12) Guihard, M., Gorce, P., 1999, "Dynamic control of an artificial muscle arm," in *Proc., IEEE Int., Conf., Systems, Man and Cybernetics*, Le Touque, France, Vol. 4, pp. 813-818.
- (13) Hamerlain, M., 1995, "An anthropomorphic robot arm driven by artificial muscles using a variable structure control," in *IEEE/RSJ Int., Conf., Intelligent Robots and Systems*, Vol. 1, pp. 550-555.
- (14) Hesselroth, T., Sarkar, K., Patrick van der Smagt, P., and Schulten, K., 1994, "Neural network control of a pneumatic robot arm," *IEEE Trans Syst., Man., Cybernetics.*, Vol. 24, No 1, pp. 28-38.
- (15) Iskarous, M., Kawamura, K., 1995, "Intelligent control using a neuro-fuzzy network," in *Proc., IEEE/RSI Int., Conf., Intelligent Robots and Systems*, Vol. 3, pp. 350-355.
- (16) Klute, G. K., Czerniecki, J. M., and Hannaford, B., 2002, "Artificial Muscles: Actuators for Biorobotic Systems," Accepted for Publication, *Int., Jour., Robotics Research*.
- (17) Klute, G. K., Czerniecki, J., and Hannaford, B., 1999, "McKibben Artificial Muscles: Actuators with Biomechanical Intelligence," *Proc., IEEE/ASME Int., Conf., Advanced Intelligent Mechatronics*, pp. 221-226.
- (18) Klute, G. K., Czerniecki, J., and Hannaford, B., 2000, "Artificial Tendons: Biomechanical Properties for Prosthetic Lower Limbs," *Proc., IEEE Int., Conf., Medical Physics and Biomedical Engineering*, Vol. 3, pp. 1972-1975.
- (20) Klute, G. K., Czerniecki, J., and Hannaford, B., 2000, "Muscle-Like Pneumatic Actuators for Below-Knee Prostheses," *Proc. Int., Conf., New Actuators*, pp. 289-292.
- (21) Koeneman, E. J., Schultz, R. S., Wolf, S. L., Herring, D. E. and Koeneman J. B., 2004, "A pneumatic muscle hand therapy device," *Proc., IEEE/EMBS Int., Conf.*, pp. 2711-2713.
- (22) Medrano-Cerda, G. A., Bowler, C. J., and Caldwell, D. G., 1995, "Adaptive position control of antagonistic pneumatic muscle actuators," in *Proc. IEEE/RSJ Int., Conf., Intelligent Robots and Systems, Human Robot Interaction and Cooperative Robots*, Pittsburgh, PA, pp. 378-383.
- (23) Nickel, V. L., Perry, J. and Garrett, A. L., 1963, "Development of useful function in the severely paralyzed hand," in *Jour., Bone and Joint Surgery*, Vol. 45A, No. 5, pp. 933-952.
- (24) Noritsugu, T., Tanaka, T., 1997, "Application of rubber artificial muscle manipulator as a rehabilitation robot," in *IEEE/ASME Trans., Mechatronics*, Vol. 2, pp. 259-267.