

공압모터의 3-루프 기반 슬라이딩 모드 제어

김근묵*

¹아주자동차대학 자동차계열

Sliding Mode Control Based on 3-Loop of a Pneumatic Motor

Geun-Mook Kim^{1*}

¹Division of Automotive Engineering, Ajou Motor College

요약 공압모터는 저렴한 가격, 가벼운 무게, 용이한 조립, 중량대비 힘, 위험한 지역에서도 안전한 내부 구조와 더불어 매우 가혹한 환경에서도 작동하기 때문에 여러 분야의 응용에 매우 매력적이다. 이러한 장점에도 불구하고, 공압모터는 빠르고 정확한 응답을 필요로 하는 용도에 있어서 그 사용을 제한하는 여러 가지 바람직하지 않은 특성을 나타낸다. 이러한 바람직하지 않은 특성은 공기의 높은 압축성과 공압모터 구동시스템에 존재하는 비선형성에 기인한다. 본 논문에서는 공압모터의 회전각 제어시 강성을 높이기 위해 3-루프 기반 슬라이딩 모드 제어를 제안하였으며 계단 응답과 외란 부하에 대한 응답 특성을 기존 PID 제어기와 비교 하였다. 공압모터 위치제어에 적용하여 본 결과 공압모터의 위치제어 정밀도는 $\pm 0.05\text{mm}$ 이내로 제어할 수 있으며 부하에 대한 강성은 기존 PID제어기 보다 3.5배 향상됨을 보였다.

Abstract Pneumatic motors are quite attractive for many applications because of their competitive price, light-weight, easy assembly, safety in hazardous areas as well as other features, such as a good force/weight ratio and operation in exceptionally harsh environments. In contrast to these advantages, pneumatic motors have limited use in applications, particularly those requiring a fast and precise response. These undesirable characteristics are due to the high compressibility of air and from the nonlinearities in pneumatic systems. This paper presents the sliding mode controller based on 3-loop(SMCB3L), which increases the load stiffness to control the rotation angle of a pneumatic motor. The characteristics for the step responses and load disturbances of the proposed controller were compared with the conventional PID controller. The experimental results showed that a properly designed SMCB3L is capable of high positioning accuracy within $\pm 0.05\text{mm}$. Furthermore, the load stiffness of the SMCB3L can be improved 3.5 fold compared to that of PID controllers.

Key Words : pneumatic motor, sliding mode controller, 3-loop controller, sliding mode controller based on 3-loop

1. 서론

공압모터(pneumatic motor)는 구조가 간단하고 출발과 정지는 거의 순간적이며 과부하나 연속 정지 시에도 모터에 큰 무리를 주지 않는다. 또한, 상대적으로 가격이 저렴하고, 유지 및 속도 가변이 용이하고 높은 기동 토크를 낼 수 있으며 위험한 영역에서도 자체 특성상 안전하며 가혹한 환경에서도 작동할 것으로 기대된다[1]. 그러나, 공압모터 구동 위치제어 시스템은 공기의 압축성, 베

인(vane)과 하우징(housing) 사이의 마찰력 및 누기(leakage), 상대마찰 운동부의 마찰력, 비례밸브의 불감대 및 밸브 몸체와 스프링사이의 스틱-슬립 마찰, 시스템의 백래시(backlash) 등으로 시변 비선형 시스템이 되어 정밀 제어가 매우 어렵다[2,3]. 지금까지의 연구도 대부분 실린더와 같은 왕복구동기에 집중되어 왔다[4-9].

공압 위치제어시스템의 비선형성을 극복하기 위해 슬라이딩 모드 제어를 시도해왔다[10-19].

연속 슬라이딩 모드 제어를 직선형 공압 위치제어

*Corresponding Author : Geun-Mook Kim(Ajou Motor College)

Tel: +82-41-939-3074 email: gmkim@motor.ac.kr

Received October 24, 2014

Revised November 3, 2014

Accepted November 6, 2014

시스템에 적용하여 부하질량이 10배로 변해도 좋은 위치 제어 정밀도는 $\pm 0.2[\text{mm}]$ 를 유지했지만 추종해야 할 목표값이 연속적으로 변할 경우 추종성능은 $\pm 15[\text{mm}]$ 로 만족스럽지 못했다[18].

공압모터의 서보 모션 제어를 위하여 비례제어 루프에, 속도와 가속도를 궤환하고 속도 전향이득을 더한 추종제어 알고리즘을 수행하여 전기 및 유압모터의 대안으로서의 잠재력을 보였으며, 특히, 속도 전향이득을 적절히 선정하여 공압모터의 추종제어 오차를 상당히 감소시킬 수 있음을 보였다[6].

공압모터의 추종제어를 위해 속도전향이득을 갖는 슬라이딩 모드제어기를 적용하여 추종오차를 상당히 감소시킬 수 있었다[2].

공압모터 구동 볼스크류 위치제어 시스템에 연속슬라이딩 모드를 적용하여 부하 강성을 높였다[3].

공압구동장치는 고유진동수와 댐핑이 작고 시스템 자체의 스틱슬립과 같은 큰 마찰력과 공기의 높은 압축성 때문에 1-루프 제어(PID 제어) 만으로는 만족스러운 위치제어를 할 수 없다. 좋은 위치제어 성능을 얻기 위해서는 회로의 게인을 크게 할 수 밖에 없으나 이 경우 진동이 지속적으로 발생된다.

공압구동장치는 3-루프제어(상태변수 궤환 제어)를 하여 위치, 속도 및 가속도를 모두 궤환하면 매우 향상된 제어성능을 얻을 수 있다[19].

그러나 외란과 시스템 파라미터 변화에 따른 게인 튜닝이 요구된다.

슬라이딩 모드 제어는 시스템의 상태변수를 슬라이딩 평면에 머물게 함으로써 시스템의 불확실성, 외란 등에 대해서 안정성과 강인성을 보장할 수 있다[2,3].

본 논문에서는 산업용 베인 모터를 가혹한 환경이나 폭발 위험이 있는 환경에서의 적용을 검토하기 위하여 공압모터 회전각 서보제어 시스템을 구성하였다. 공압모터의 회전각 제어를 강성을 높이기 위해 3-루프 기반 슬라이딩 모드 제어기(sliding mode controller based on 3-loop 이하 SMCB3L)를 제안하였고 계단 응답과 외란 부하에 대한 응답을 기존 PID 제어기와 비교 하였다.

2. 제어기 설계

산업용으로 많이 사용하는 공압서보시스템의 제어기

는 3-루프 제어기로 위치, 속도 및 가속도를 이용하여 식(1)과 같이 제어기 출력값을 만든다.

$$M = K_p(y_r - y) - K_v y' - K_a y'' \quad (1)$$

여기서, K_p, K_v, K_a 는 각각 비례이득, 속도이득, 가속도이득을 나타낸다. y_r, y, y', y'' 는 목표 위치값, 실제 위치값, 실제 속도값, 실제 가속도 값을 각각 나타낸다. 3-루프 제어기는 3개의 이득값을 튜닝하면 불안정에 가까운 시스템을 이상적으로 제어할 수 있다.

본 논문에서는 3-루프 제어기 출력값을 식(2)와 같이 슬라이딩 모드의 스위칭 함수로 구성하였다.

$$\begin{aligned} \sigma &= -\frac{M}{K_a} = Gx \\ &= -\frac{K_p}{K_a}(y_r - y) + \frac{K_v}{K_a}y' + y'' \end{aligned} \quad (2)$$

슬라이딩 모드제어는 스위칭 함수의 부호에 따라 릴레이 스위칭 제어를 수행한다. 스위칭 동작을 무한히 빠르게 할 때 스위칭 함수가 0인 궤적에 머물 수 있도록 할 수 있어서 이상적인 슬라이딩 모드가 일어난다. 그러나 실제 시스템의 경우 시스템 자체의 지연 요소가 존재하고 궤환 신호의 지연 및 하드웨어 상의 절환 기구 동작 지연으로 절환 평면 주위를 진동하게 되는 채터링(chattering) 문제를 해결해야 한다[2,3].

본 논문에서는 이러한 채터링을 제거하기 위하여 절환 평면 주위에 절환 경계층을 설정하고 스위칭 함수 값이 절환 경계층 값 보다 클 때는 원래의 절환제어 입력을 채택하고 경계층 내에서는 3-루프 제어기로 전환하도록 슬라이딩 모드 제어기 출력값을 식(3)과 같이 구성하였다.

$$\begin{aligned} u &= -Vsgn(\sigma) \text{ for } \sigma > \phi \\ &= -V\frac{\sigma}{\phi} \text{ for } \sigma \leq \phi \end{aligned} \quad (3)$$

경계층은 비례벨브 최대 구동신호 V 와 가속도 이득 K_a 을 이용하여 식(4)와 같이 설정하였다.

$$\phi = V/K_a \quad (4)$$

일단 시스템이 경계층에 들어가면 3-루프 제어기에 의해 제어된다. 이때 3-루프 제어기는 식(5)와 같다.

$$u = -Kx \quad (5)$$

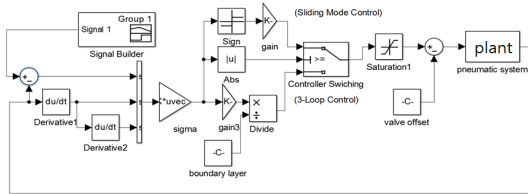
이때, K 는 3-루프 제어기 이득이며 식(6)과 같다.

$$K = [-K_p \ K_v \ K_a] \quad (6)$$

여기서, x 는 위치오차, 속도 및 가속도를 갖는 상태변수

이다.

본 논문에서 제시한 3-루프 기반 슬라이딩 모드 제어기(SMCB3L)의 블록선도는 Fig. 1과 같다.



[Fig. 1] Block diagram of SMCB3L

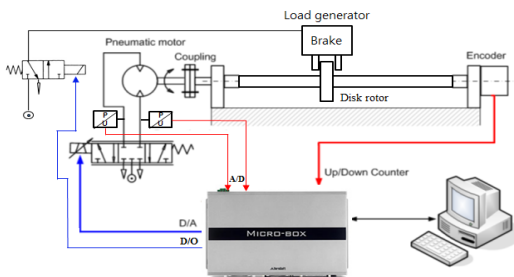
SMCB3L의 제어기 파라미터는 실험을 통해 튜닝한 3-루프 제어기를 기반으로 설계하였으며 Table 1에 나타내었다.

[Table 1] SMCB3L parameter

3-Loop Controller		SMCB3L
K_p	13	$\sigma = -3939(y_r - y) + 303y' + y''$
K_v	1	
K_a	0.003	$\phi = \frac{V}{K_a} = 3030 = 3030$

3. 실험

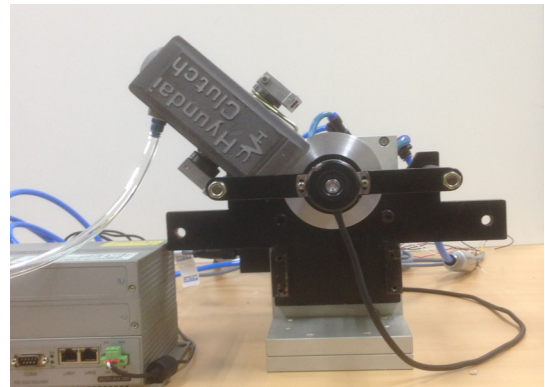
본 논문에서 제안한 3-루프 기반 슬라이딩 제어기를 적용할 공압모터 구동 시스템의 전체 구성도는 Fig. 2와 같고 Fig. 3은 공압모터 구동 실험장치를 보여준다. 실험에 사용한 비례제어밸브는 FESTO사의 MPYE-5-1/8이다. 실험에 사용한 공압모터는 GAST사의 1UP-NRV-10이다. 공압 모터의 축은 알루미늄 디스크 로터와 축커플링 되어 있고 여기에 로터리 엔코더가 직결되어 있다.



[Fig. 2] Layout of the experimental devices

공압모터 제어시 외란은 공압모터와 직결된 디스크 로터를 공압 구동식 브레이크로 제동하여 외란 부하를 발생시켰다. 회전각 제어시 토크 부하 발생은 공압식 브레이크로 디스크 로터를 제동한 상태에서 공압식 브레이크 자중에 의해 토크가 발생되도록 하였다.

슬라이딩 모드 제어기의 스위칭 함수를 구하기 위해서는 모터의 회전각 뿐만 아니라 각속도 및 각 가속도 정보가 필요하다. 본 논문에서는 회전축에 직결된 엔코더로부터 출력되는 펄스로부터 회전각을 계산하고 이 신호를 미분하기 전에 차단주파수가 70[Hz]인 2차 저역통과 필터(low pass filter)를 사용하였으며 필터링 된 신호를 미분하여 각속도 정보를 구하였다. 각가속도 정보는 각속도 정보를 미분하여 구하였다. 외부 부하작동시 공압모터내 압력변화를 모니터링하기 위하여 FESTO사의 압력센서를 공압모터 공압 연결구 양단에 설치하였다. 제어기는 Mathworks사의 Matlab/Simulink를 이용하여 구현하였으며 설계된 제어기를 실시간 실행하기 위한 타겟 컴퓨터는 TeraSoft사의 Micro-Box 2000을 사용하였다. 타겟 컴퓨터는 호스트 컴퓨터인 노트북과 LAN 통신으로 연동된다. 샘플링 시간은 1[ms]로 하였다. 이때, 제어기로부터 출력되는 값은 비례밸브 구동 최대 전압 영역인 0-10[V] 범위로 포화되어 비례밸브에 입력하도록 하였다. 제어기 출력이 5[V]일 때 공압비례 밸브는 공압모터로 공급되는 유로를 차단하고 0[V] 및 10[V]일 때 유로를 최대한 개방한다. 공압모터는 5[V]를 기준으로 전압이 증가할 때 시계방향으로 회전하고 전압이 감소할 때 반시계방향으로 회전한다.

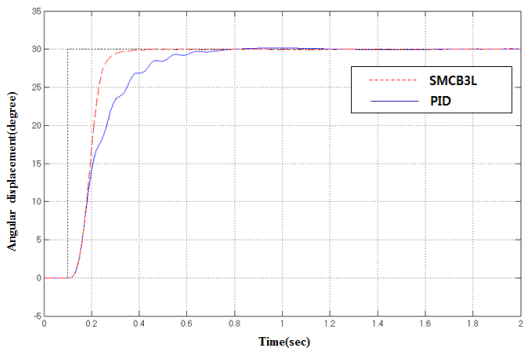


[Fig. 3] Pneumatic motor Drive system

4. 실험 결과 및 고찰

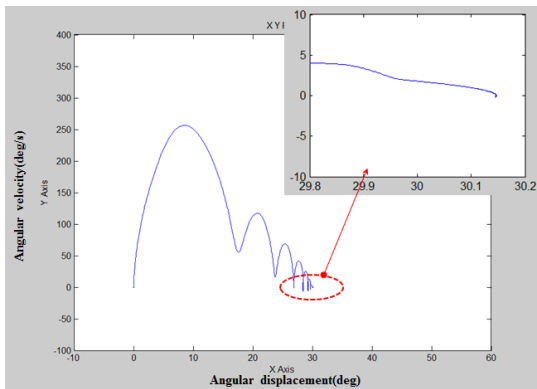
본 논문에서 제안한 3-루프 기반 슬라이딩 모드 제어기를 공압모터 회전각 제어 시스템에 적용하였다.

회전각 위치제어와 부하 외란 적용시 응답을 확인하는 실험을 수행하였다. 제안한 SMCB3L의 제어 성능은 PID 제어 결과와 비교하였다. 비교 실험에 사용한 PID 제어기 이득은 실험을 통한 시행착오를 통해 구하였으며 구한 이득값은 $K_p=2.8$, $K_I=0.1$, $K_D=0.6$ 로 각각 비례이득, 적분이득, 미분이득을 나타낸다.



[Fig. 4] Comparison of Step responses

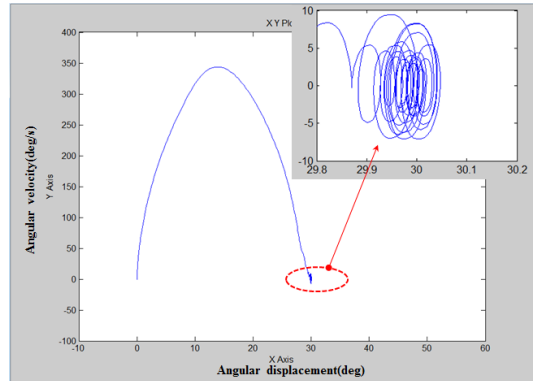
Fig. 5의 계단응답 특성을 비교해보면 제안된 SMCB3L가 PID보다 성능이 우수함을 보여준다. Fig. 5와 Fig. 6의 그래프에서 SMCB3L를 적용했을 경우 PID에 비해 목표 값에 도달하는 속도는 약 1.4배 더 빠른 응답을 보여준다. 위치 결정 정밀도 측면에서도 제안된 제어가 PID제어보다 우수함을 보여준다.



[Fig. 5] Phase plane trajectory of step response (PID control)

Fig. 5의 위상 평면상의 궤적을 보면 공압모터 회전각 제어장치에 적용된 PID제어의 경우 위치정밀도는 ± 0.1 [deg]를 벗어났다. 이때 공압모터의 최대 구동속도는 250 [deg/s] 정도이다.

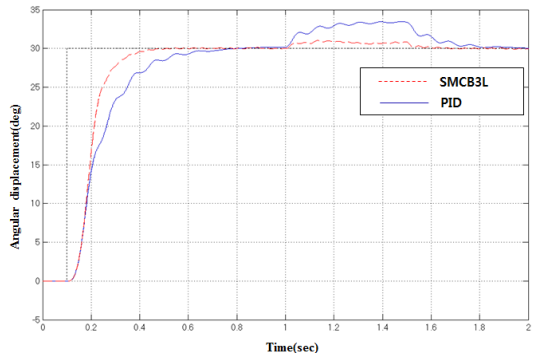
SMCB3L가 적용된 공압모터 회전각 제어의 계단응답을 나타내는 Fig. 4와 위상평면상의 궤적을 보여주는 Fig. 6은 최대구동 속도는 350 [deg/s]를 보여준다. 위치 제어 정밀도는 ± 0.05 [deg] 이내로 제어됨을 보여준다.



[Fig. 6] Phase plane trajectory of step response (SMCB3L)

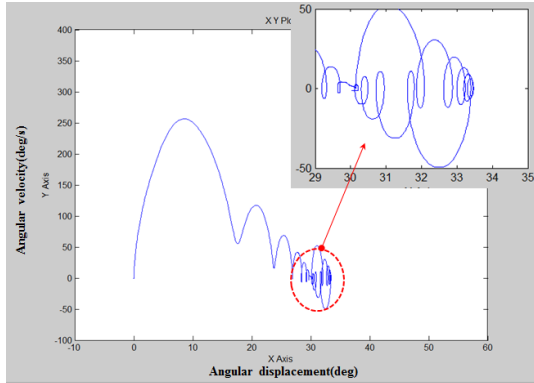
부하 외란에 대한 제안된 제어기의 특성을 알아보기 위하여 공압식 브레이크로 공압모터와 직결된 디스크 로터를 제동한 상태에서 외팔보 형태로 매단 형태로 공압모터 회전축에 회전토크를 가해 부하외란을 주었다.

Fig. 7에서 보는 바와 같이 부하 외란은 $1[s]$ 부터 $1.5[s]$ 까지 $0.5[s]$ 간 계단입력 형태로 공압모터 회전축에 $10[Nm]$ 의 토크를 가했다.



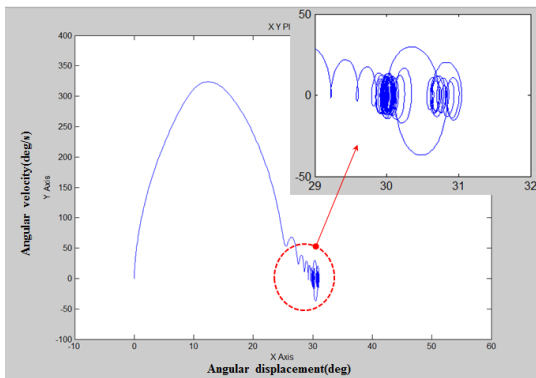
[Fig. 7] Responses to the torque disturbance

Fig. 8에서 PID 위치제어시 부하 외란 토크를 주었을 때 공압모터의 회전속은 최대 3.5[deg] 회전하였다. Fig. 7에서 부하 외란이 제거된 뒤에도 원래의 상태로 돌아가지는 데 시간 지연이 0.3[s] 이상 지속되었다. PID 제어기 적용시 공압모터의 부하강성은 약 2.8[Nm/deg]로 측정되었다. Fig. 9에서 제안된 SMCB3L 적용시 부하외란 제거시 바로 원래의 위치로 복귀함을 보여준다.



[Fig. 8] Phase plane trajectory of step response with torque disturbance(PID)

SMCB3L가 적용된 공압모터의 부하강성은 10 [Nm/deg]로 측정되었다.



[Fig. 9] Phase plane trajectory of step response with torque disturbance(SMCB3L)

이 결과로부터 제안된 SMCB3L 제어기를 공압모터 위치 제어시스템에 적용했을 때 PID제어기보다 부하 강성이 약 3.5배 더 향상되었고 부하 외란 제거시 원상태로 빠르게 복귀함을 보여준다.

5. 결론

본 논문에서는 산업용 배인 모터를 가혹한 환경이나 폭발 위험이 있는 환경에서의 적용을 검토하기 위하여 공압모터 회전각 제어시 시스템을 구성하였다. 공압모터의 회전각 제어시 강성을 높이기 위해 3-루프 기반 슬라이딩 모드 제어기를 제안하였고 계단 응답과 외란 부하에 대한 응답을 기존 PID 제어기와 비교 하였다.

제안된 제어기가 적용된 공압모터 위치제어는 목표값이 30[deg]인 계단응답에서 350[deg/s]의 빠른 속응성과 위치제어 정밀도는 ± 0.05 [deg] 이내로 제어됨을 보였다.

부하 외란 토크에 대한 제안된 제어기가 적용된 공압모터 회전각 제어시스템의 부하강성은 10[Nm/deg]로 PID 제어기를 적용하였을 때 보다 부하강성이 3.5배 향상되었고 부하 외란 제거시 빠르게 원래의 위치로 복귀함을 보였다.

제안된 3-루프 기반 슬라이딩 모드 제어기는 공압모터 위치제어 시스템과 같이 고유진동수와 댐핑이 작고 시스템 자체의 스틱슬립과 같은 큰 마찰력과 공기의 높은 압축성으로 제어가 어려운 공압서보 시스템 제어에 유용할 것으로 기대된다. 또한, 제안된 제어기를 적용한 공압모터 위치제어 시스템은 중부하 중량물을 빠른 속도로 위치제어 하고자 하는 로봇이나 자동화 시스템 분야에 전기 및 유압 서보모터 구동 시스템의 대안으로 기대된다.

References

- [1] M. O. Tokhi, M. Al-Miskiry, M. Brisland, "Real-time control of air motors using a pneumatic H-bridge", Control Engineering Practice, vol. 9, no. 4, pp. 449-457, 2001.
DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/S0967-0661\(00\)00122-2](http://dx.doi.org/10.1016/S0967-0661(00)00122-2)
- [2] Geun-Mook kim, E-Sok Kang, "Sliding Mode Control with Velocity Feedforward Gain of a Pneumatic Motor", Journal of Control, Automation and Systems Engineering Vol. 12, No. 11, pp. 1061-1064, 2006.
DOI: <http://dx.doi.org/10.5302/J.ICROS.2006.12.11.1061>
- [3] Geun-Mook kim, "The Ball Screw Position Control System Driven by a Pneumatic Motor Using Continuous Sliding Mode", The Korean Society of Industrials

- Application, Vol.11, No.4, pp.209~216, 2008.
- [4] F. Takemura, S. R. Pandian, Y. Nagase, H. Mizutani, Y. Hayakawa, S. Kawamura, "Control of a hybrid-pneumatic/electric motor", Proc. of IEEE Int'l Conf. on Intelligent Robots and Systems, pp. 209-214, 2000.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/IROS.2000.894606>
- [5] H. M. Mahgoub, I. A. Craighead, "Development of a microprocessor based control system for a pneumatic rotary actuator", Mechatronics, vol. 5, no. 5, pp. 541-560, 1995.
DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/0957-4158\(95\)00025-Z](http://dx.doi.org/10.1016/0957-4158(95)00025-Z)
- [6] J. Pu, P. R. Moore, R. H. Weston, "Digital servo motion control of air motors", Int. J. of Production Research, vol. 29, no. 3, pp. 599-618, 1991.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1080/00207549108930091>
- [7] J. Wang, J. Pu, P. R. Moore, Z. Zhang, "Modelling study and servo control of air motor systems", Int. J. of Control, Vol. 71, no. 3, pp. 459-476, 1998.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1080/002071798221777>
- [8] Min-Chang Shih, Ching-Sham Lu, "Pneumatic servomotor drive a ball-screw with fuzzy-sliding mode position control", Proc. of IEEE conf. on Systems, Man and Cybernetics, pp. 50-54, 1993.
- [9] W. Backe, "The application of servo-pneumatic drives for flexible mechanical handling techniques", Robotics, vol. 2, no. 1, pp. 45-56, 1986.
DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/0167-8493\(86\)90021-5](http://dx.doi.org/10.1016/0167-8493(86)90021-5)
- [10] S. R. Pandian, Y. Hayakawa, F. Takemura, S. Kawamura, "Control performance of an air motor -Can air motors replaces electric motors?", Proc. of IEEE Int'l Conf. on Robotics and Automation, pp. 518-524, 1999.
- [11] A. K. Paul, J. K. Mishra, and M. G. Radke, "Reduced order sliding mode control for pneumatic actuator", IEEE Trans. on control systems Technology, vol. 2, no. 3, pp. 271-276, 1994.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/87.317984>
- [12] S. R. Pandian, Y. Hayakawa, Y. Kanazawa, Y. Kamoyama and S. Kawamura, "Practical design of a sliding mode controller for pneumatic actuators", Trans. of ASME, vol. 119, no. 4, pp. 666-674, 1997.
- [13] J. Song and Y. Ishida, "Robust tracking controller design for pneumatic servo system", Int. J. of Engineering Science, vol. 35, no. 10-11, pp. 905-920, 1997.
DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/S0020-7225\(97\)00037-2](http://dx.doi.org/10.1016/S0020-7225(97)00037-2)
- [14] S. Drakunov, G. D. Hanchin, W. C. Su and U. Ozguner, "Nonlinear control of a rodless pneumatic servomotor, or sliding modes versus coulomb friction", Automatica, vol. 33, no. 7, pp. 1401-1408, 1997.
DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/S0005-1098\(97\)00015-0](http://dx.doi.org/10.1016/S0005-1098(97)00015-0)
- [15] Wu-Chung Su, Chun-Yen Kuo, "Variable structure control of a rodless pneumatic servomotor with discontinuous sliding surfaces", Proc. of American Control Conference, pp. 1617-1621, 2000.
- [16] M. Bouri, D. Thomasset, "Sliding control of an electropneumatic actuator using an integral switching surface", IEEE Trans. on Control Systems Technology, vol. 9, no. 2, pp. 368-375, 2001.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/87.911388>
- [17] J. Tang, G. Walker, "Variable structure control of a pneumatic actuator", Trans. of ASME, J. of Dynamic Systems, Measurement, and Control, vol. 117, no. 1, pp. 88-92, 1995.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1115/1.2798526>
- [18] B. W. Surgenor and N. D. Vaughan, "Continuous sliding mode control of a pneumatic actuator", Trans. of ASME, J. of Dynamic Systems, Measurement, and Control, vol. 119, no. 3, pp. 578-580, 1997.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1115/1.2801298>
- [19] Geun-Mook kim, E-Sok Kang, "Development of a Pneumatically Driven 6 DOF Driving Simulator", Journal of The Korea Academic-Industrial cooperation Society, Vol.13, No.12, pp.6090~6097, 2013.
DOI: <http://dx.doi.org/10.5762/KAIS.2013.14.12.6090>

김 근 목(Geun-Mook Kim)

[정회원]



- 1987년 2월 : 충남대학교 기계설계 공학과 (공학사)
- 1990년 2월 : 충남대학교 기계설계 공학과 (공학석사)
- 1990년 3월 ~ 1996년 2월 : 국방 과학연구소 선임연구원
- 1996년 3월 ~ 현재 : 아주자동차 대학 부교수
- 2000년 2월 : 충남대학교 기계설계공학과 박사 수료

<관심분야>

유공압시스템 제어 및 응용