

## 하이브리드형의 공압 서비스 로봇의 개발

최철우\*, 최현석\*, 한창수\*\*

## Development of the Pneumatic Service Robot with a Hybrid Type

Cheolu Choi, Hyeunseok Choi, Changsoo Han

**Key Words :** pneumatic service robot (공압 서비스 로봇), hybrid type robot(하이브리드형 로봇), sliding mode control (슬라이딩 모드 제어)

## Abstract

In this paper, the pneumatic service robot with a hybrid type is developed. A pneumatic has the advantage of good compliance, high payload-to-weight and payload-to-volume ratios, high speed and force capabilities. Using pneumatic actuators which have low stiffness, the service robot can guarantee safety. By suggesting a new serial-parallel hybrid type for the service robot which separates into positioning motion and orienting motion, we can achieve large workspace and high strength-to-moving-weight ratio at the same time. A sliding mode controller can be designed for tracking the desired output using the Lyapunov stability theory and structural properties of pneumatic servo systems. Through many experiments of circular trajectory, the pneumatic service robot is evaluated and verified.

## 1. 서론

현재, 로봇은 갈수록 응용분야가 넓어져 산업현장 뿐만 아니라 인간생활에 더 깊숙이 적용되고 있다. 그 한 분야인 서비스 로봇은 제조업에 사용되는 산업용 로봇을 제외한 복지로봇, 재활로봇, 수술로봇, 오락로봇 등을 말한다<sup>(1)</sup>. 서비스 로봇이 산업용 로봇과 다른 주요 기구적 특성은 인간과 공동생활을 하거나 공동작업을 하므로 높은 하중에 견딜 수 있고 높은 정밀도를 요구하지 않으며 무엇보다도 안전성이 보장되어야 한다는 것이다<sup>(2)</sup>.

본 연구에서 사용한 공압 액츄에이터(pneumatic actuator)의 경우 다른 액츄에이터에 비해 값이 저렴하고 파워/비용, 파워/무게의 비가 뛰어나며, 설치 및 보수와 사용상의 편리성, 장치가 간단하다는 장점이 있다<sup>(3)</sup>. 또한 공기의 압축성으로 생긴 강성의 저하는 고정도의 위치 제어에는 불리하지만 외부 외란이 발생했을 때 충격을 흡수하고 외부 힘을 억제하는데 유리하다<sup>(4)</sup>. 이러한 특성 때

문에 공압 액츄에이터는 인간과 잦은 접촉이 예상되는 서비스 로봇에서 뛰어난 성능을 발휘할 수 있다<sup>(5)</sup>. 로봇 팔에 저강성 특성을 가지는 공압 액츄에이터를 주요 구동부에 사용한다면, 로봇 팔과 사용자가 서로 부딪혔을 때에도 부상을 방지할 수 있다.

하지만 공압 액츄에이터의 특성인 비선형성 때문에 제어기 설계에 어려움이 있다<sup>(3)</sup>. 이러한 제어의 문제점을 해결하기 위해서, 다양한 연구가 진행되고 있는데, 적응제어<sup>(6)</sup>, 퍼지제어<sup>(7)</sup>, 슬라이딩 모드 제어<sup>(8)</sup> 등 다양한 제어 기법들이 사용되고 있고 있지만, 주로 수평상태 하에서의 위치제어 실험이 위주였다. 실제로 중력의 영향은 공압 액츄에이터의 위치제어에 심각한 영향을 미친다. 최근에는 공압 실린더가 중력의 힘을 받은 상태에서의 제어에 관한 연구도 있다<sup>(9)(10)</sup>.

로봇의 형태에 있어서 대부분의 로봇은 직렬로봇(serial robot)이 주류를 이루고 있다. 직렬형의 경우, 일반적으로 큰 작업공간을 가질 뿐만 아니라 작은 공간에서도 효과적으로 작업할 수 있는 유연한 자유도를 가지는 장점이 있다. 그러나, 직렬 구조는 긴 외팔보 형상으로 인해 강성이 높지

\* 한양대학교 대학원 정밀기계공학과

\*\* 한양대학교 기계공학과

못하여 큰 하중이나 진동이 걸리는 작업에 취약하고, 각 링크의 오차가 로봇의 끝 단에 누적되어 나타나게 되는 단점이 있다. 반면 병렬 로봇(parallel robot)의 경우 하중이 각 구동기로 분산되어 직렬 로봇에 비해 높은 강성을 가질 뿐만 아니라 높은 정밀도와 낮은 관성을 가지며, 작은 공간에서 높은 자유도를 갖는 특징이 있다. 그러나, 각 액츄에이터 간의 간섭으로 인한 작은 작업공간을 가지는 단점이 있다.

이러한 직렬과 병렬구조의 로봇의 장단점을 보완한 하이브리드형의 로봇(Hybrid type robot)<sup>(11)</sup> (12)(13)은 높은 하중을 견디고 넓은 작업공간에서 큰 자유도가 필요한 서비스 로봇에 적용하기에 적당하다.

본 연구는 인간과 가까운 거리에서 인간의 작업을 보조해 주거나, 장애인이나 노인의 손 역할을 하는 등의 서비스를 제공하는 서비스 로봇을 개발하는 것을 목적으로 한다. 공압 액츄에이터를 적용하여, 안전성을 보장하고, 하이브리드 형태를 이용하여 무거운 중량물을 넓은 영역까지 이동시킬 수 있는 있는 하이브리드형 공압서비스 로봇을 개발하고자 한다.

## 2. 기구부 제안 / 기구학 해석

### 2.1 System 구성

높은 하중과 그리고 큰 작업공간이 필요한 작업환경에 사용하기 위해, Fig. 1 과 같이 큰 작업공간을 가지는 PRRR 직렬구조와 높은 가반 하중을 견딜 수 있는 3RPS 병렬구조로 이루어진 하이브리드형 6 자유도 로봇을 제안하였다.

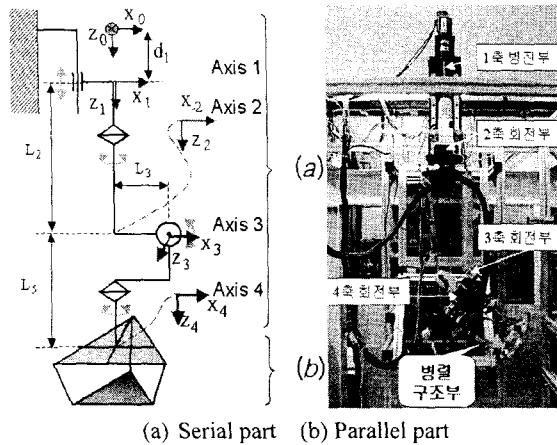


Fig. 1 Serial-parallel hybrid type robot model

로봇의 작업시 인간과 접촉할 가능성이 가장

큰 주요 구동부인 직렬부 축 3 과 병렬부는 공압 액츄에이터를 사용해, 충격을 흡수하고 외부 힘의 변화에 유연하게 대응하도록 하였다.

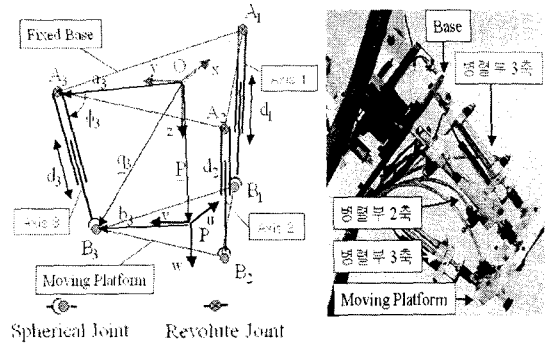


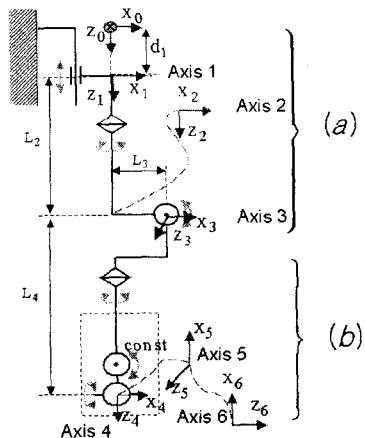
Fig. 2 Parallel part model

본 연구에서 적용한 Fig. 2 와 같은 병렬 구조부는 Lee 와 Shah<sup>(14)</sup> 가 제안한 3RPS 병렬 매니퓰레이터로서 이는 선형 액츄에이터의 베이스(fixed base) 부분에 회전 조인트, 플랫폼 (moving platform) 부분에는 볼 조인트를 설치하여 2 개의 회전과 1 개의 병진 운동, 즉 3 자유도를 가지는 구조이다.

### 2.2 기구학 해석

#### 2.2.1 정기구학

로봇이 움직일 때에는 Fig. 3 과 같이 먼저 positioning motion 부인 직렬부 축 1, 2, 3 을 구동해 원하는 위치에 end-effector 를 이동시키고 난 후, orienting motion 부인 직렬부 축 4 와 병렬부(축 5, 6) 를 움직여 end-effector 를 원하는 방향으로 회전시킨다.



(a) Positioning motion (serial 1,2,3 axes)  
(b) Orienting motion (serial 4 axis + parallel)  
Fig. 3 Kinematic analysis

기구학 해석의 단순화를 위해 Fig. 3 과 같이 병렬부의 병진운동을 구속하여 병렬부를 2 자유도의 회전운동으로 해석함으로써, 전체적으로 6 자유도의 직렬 로봇으로 해석하였다. Denavit-Hartenberg Parameters 는 Table. 1 과 같다.

Table. 1 Denavit-Hartenberg Parameters

	I	$\alpha_{i-1}$	$a_{i-1}$	$d_i$	$\theta_i$
Positioning motion	1	0	0	$d_1$	0
	2	0	0	$L_2$	$\theta_2$
	3	$-90^\circ$	$L_3$	0	$\theta_3$
Orienting motion	4	$90^\circ$	$-L_3$	$L_4$	$\theta_4$
	5	$-90^\circ$	0	0	$\theta_5$
	6	$-90^\circ$	0	0	$\theta_6$

Positioning motion 부와 orienting motion 부의 변환행렬은 다음과 같다.

병렬부 end-effector 의 위치와 방향운동은 서로 간섭현상을 발생시킨다<sup>(14)</sup>. 본 논문에서는 이러한 병렬부에 간섭현상을 무시하였다. 왜냐하면 병렬부 end-effector 의 workspace(Fig.4)에서 간섭에 의한 위치변화가 병렬부 전체 workspace 에 비교해서 미세한 수준이기 때문에, 높은 정밀도가 필요하지 않은 경우의 서비스 로봇에서는 충분히 무시할 수 있다.

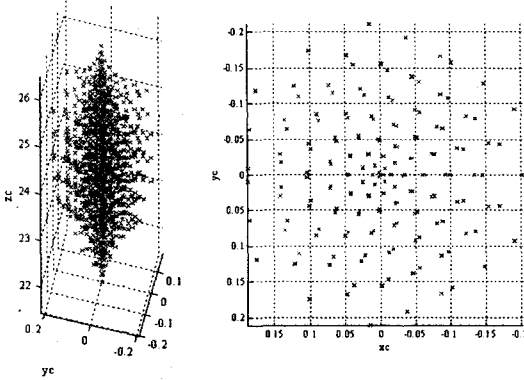


Fig. 4 Workspace of parallel part end-effector (unit:cm)

## 2.2.2 역기구학

Table.1 로부터 구해진 변환행렬을 이용하여, 주어진 위치  $(p_x, p_y, p_z)$  로부터 축 1, 2, 3 의 해  $d_1, \theta_2, \theta_3$  를 다음과 같이 구하였다.

$${}^0T_2{}^2T_3{}^3T_E P = \begin{bmatrix} p_x \\ p_y \\ p_z \\ 1 \end{bmatrix}, {}^3P_E = \begin{bmatrix} -L_3 \\ -L_5 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$\theta_2 = A \tan 2(p_y, p_x) \quad (2)$$

$$a = p_x c_2 + p_y s_2 - L_3 \quad (3)$$

$$\theta_3 = A \tan 2(-L_4, L_3) + A \tan 2(\sqrt{L_4^2 + L_3^2 + a^2}, -a) \quad (4)$$

$$d_1 = p_z - L_2 - L_4 c_3 - L_5 s_3 \quad (5)$$

식(2), (4), (5)에서 구해진  $d_1, \theta_2, \theta_3$  에 의해  ${}^0R$  를 구한 후, 주어진 방향  ${}^0R$  을 이용해서 다음 식(6)과 같이  ${}^3R$  를 구하였다.

$${}^3R = ({}^0R)^T {}^0R \quad (6)$$

또한 Table. 1 로부터 다음을 구할 수 있다.

$${}^3R = {}^3R_4 {}^4R_5 {}^5R_6 {}^6R \quad (7)$$

식(6)과 (7)은 서로 같으므로  $\theta_4, \theta_5, \theta_6$  를 구하면 아래와 같다.

$$\theta_5 = {}^3R(2,1) \quad (8)$$

$$\theta_6 = a \sin\left(-\frac{{}^3R(2,2)}{c_5}\right) \quad (9)$$

$$\theta_4 = a \tan 2({}^3R(3,1), {}^3R(1,1)) \quad (10)$$

구해진  $\theta_5, \theta_6$  를 이용해 병렬부의 회전변환 행렬을 구한 후, 이 행렬을 가지고 최종적으로 병렬부의 링크 길이  $l_1, l_2, l_3$  를 구하였다<sup>(14)</sup>.

본 논문에서 구한 역기구학의 해를 간섭을 고려한 정기구학 식<sup>(14)</sup>에 대입하였다. 직경 5cm 인 원형 경로에 대한 시뮬레이션 결과 end-effector 의 궤적은 목표한 원의 궤적에 거의 일치하는 것을 알 수 있었다.

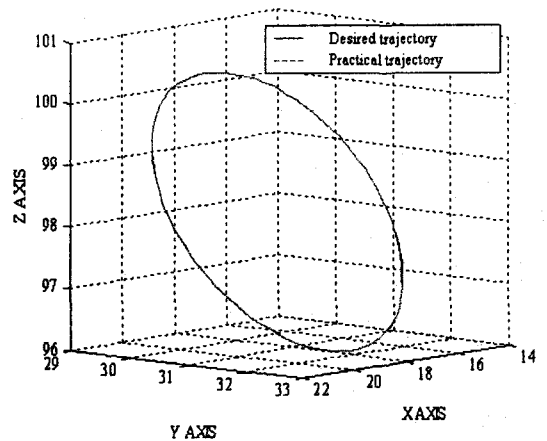


Fig. 5 Kinematics verification simulation (unit:cm)

### 3. 공압시스템의 동적모델링 / 제어

#### 3.1 공압 실린더 모델링

실린더의 피스톤의 끝단에 부가되는 외부 힘, 외란, 마찰력, 질량 등 공압실린더의 특성을 고려하여 식(11)과 같이 2 차 시스템으로 모델링 하였다<sup>(8)</sup>. 직렬부 축 3의 공압실린더와 마찬가지로 병렬부의 3 개의 축도 같은 방법으로 모델링하고 제어하였다.

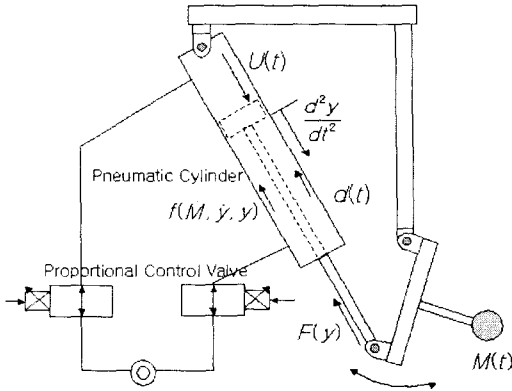


Fig. 6 Schematic of pneumatic system (serial axis 3)

$$M \frac{d^2y}{dt^2} + F(y) + f(M, \dot{y}, y) + d(t) = U(t) \quad (11)$$

where,

$d(t)$  : Disturbance     $F(y)$  : Force by Gravity  
 $M$  : Mass     $f(M, \dot{y}, y)$  : Friction Force  
 $y$  : Length of Piston     $U(t)$  : Control Input

공압 동역학식(11)에서 측정하기 어려운 항들은 식(12)와 같은 범위를 가진다고 가정한다<sup>(8)</sup>.

$$q_1 < Q < q_2 \quad Q = M^{-1} \quad (12a)$$

$$|f(M, \dot{y}, y)| \leq f_f |\dot{y}| + f_p |y| + f_s \quad (12b)$$

$$|d(t)| \leq \rho = \text{const} \quad (12c)$$

where,

$f_f$  : damping coefficient     $f_p$  : stiffness  
 $f_s$  : stiction coefficient     $q_1, q_2, \rho$  : 양의 계수

식(11)이 Lyapunov 식을 만족하도록 슬라이딩 모드 제어입력  $U(t)$  를 구하면 식(13)와 같다<sup>(8)</sup>.

$$U(t) = -\frac{1}{q_1 |s|} w(t) + F(y) \quad (13)$$

where,

$$w(t) = |a_{m1} y_m| + |a_{m2} \dot{y}_m| + |b_m r| + q_1 |\rho| + c_1 |\dot{\epsilon}| + q_2 (f_f |\dot{y}| + f_p |y| + f_s)$$

$a_{m1}, a_{m2}, b_m$  : reference model parameter

$r$  : reference input

$y_m$  : reference model state variable

$\epsilon = y - y_m, \dot{\epsilon} = \dot{y} - \dot{y}_m$

$s = c_1 \epsilon + \dot{\epsilon}$  : sliding surface

$c_1$  : positive constant

제안된 슬라이딩 모드 제어기는 하중의 변화, 마찰력, 외란 등이 주어지는 상황에서도 시스템의 안정성을 보장하고, 원하는 목표위치를 추종하도록 설계되었다.

### 4. 실험결과 / 분석

부부하 상태와 end-effector 에 5kg 의 하중을 가한 상태에서 위치 추종 실험을 하였다. 먼저 축 3의 공압 액추에이터에 대해 계단 입력과 정현파 입력의 추종 실험을 한 후, 전체 시스템에서 end-effector 가 지정한 평면과 수직한 방향을 유지한 채 원 궤적을 추종하는 실험을 실시하였다.

#### 4.1 축 3에서의 계단 입력 추종 실험

공압 실린더의 피스톤이 목표지점에 도달하는 추종성능을 알아보기 위해 계단 입력 실험을 하였다. 실험결과 Fig. 7 과 같이 계단 입력에 대해서 빠르게 원하는 위치를 추종하는 것을 알 수 있었다. 하중이 부과된 상태에서는 피스톤의 위치가 최대값에 가까울 경우 중량에 의한 모멘트에 의해 3mm 정도의 정상상태 오차가 발생하였다.

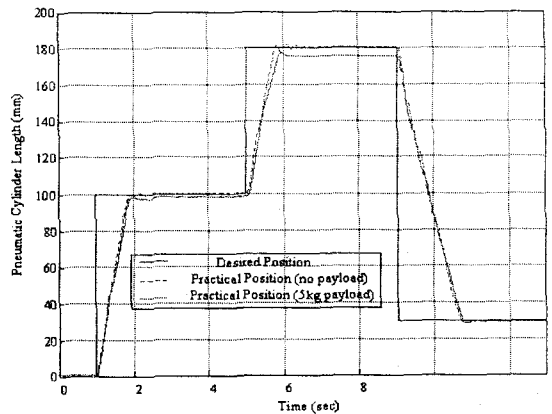


Fig. 7 Output tracking of axis 3 (step input)

#### 4.2 축 3에서의 정현파 입력 추종 실험

보다 일반적인 궤적 추종성능을 알아보기 위해 정현파 입력 실험을 하였다. Fig. 8 은 정현파 입력에 대한 제어기 출력을 보여주고 있다. 하중

이 부가된 경우, 계단입력과 마찬가지로 피스톤의 위치가 최대값이 되었을 때 오차가 발생하였고 시간 지연도 발생하였으나, 그 값이 적으므로, 제어기의 성능은 충분하다고 볼 수 있다.

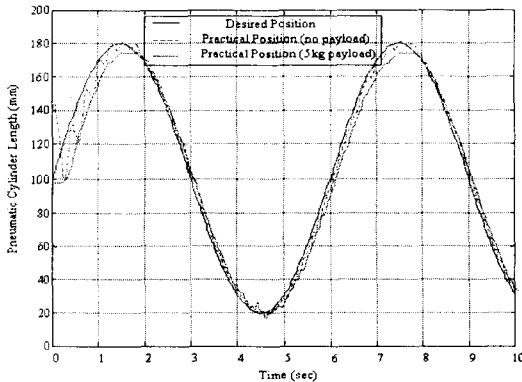


Fig. 8 Output tracking of axis 3 (sine input)

#### 4.3 전체시스템의 원운동 궤적 추종 실험

직경 5cm 의 원을 5 초동안 회전하도록 end-effector 를 움직였을 때 궤적 추종 성능을 실험하였다. 전체로봇의 각 축들의 궤적 추종 실험결과는 Fig. 9, 10 과 같이 주어진 궤적을 추종하였다. 그리고 원점에서 본 end-effector 의 궤적은 Fig.11 과 같이 주어진 원을 추종하는데, 각 축에서 발생한 오차가 누적되는 것을 알 수 있다.

실험결과, 서보 모터에서 발생하는 오차는 매우 미소하였으며 end-effector 에 발생하는 오차의 대부분은 공압부에 의한 것으로 판단된다. 이와 같은 공압 제어의 한계 때문에 전체 로봇 시스템에 공압 액추에이터를 사용하기 보다는 충격을 흡수해야 하는 축에 대하여 제한적으로 적용하는 것이 타당하다.

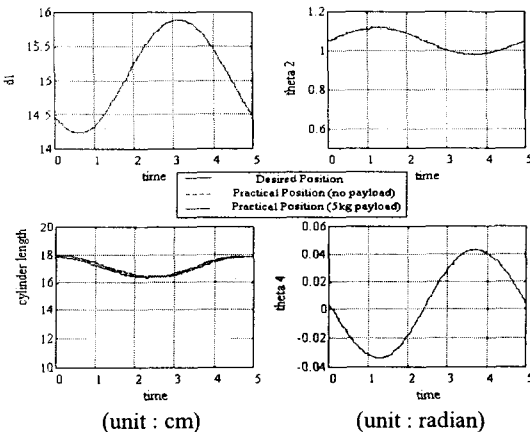


Fig. 9 Output tracking of serial axes(circular trajectory)

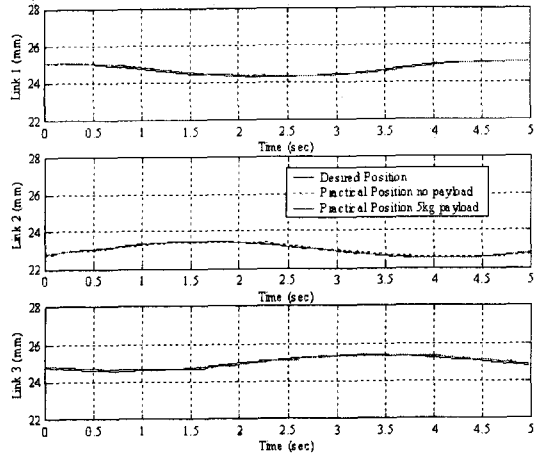


Fig. 10 Output tracking of parallel axes (circular trajectory)

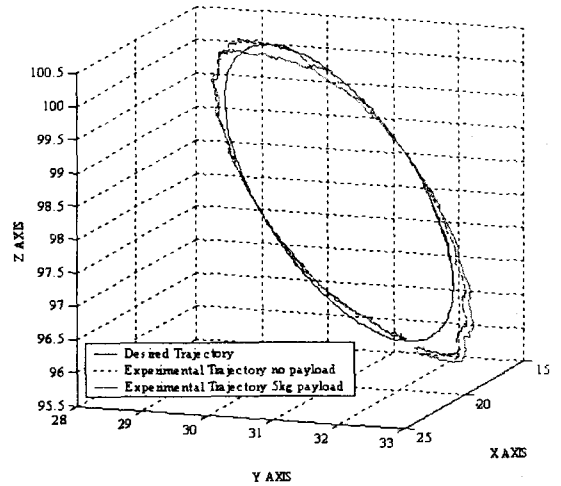


Fig. 11 Circular Trajectory (unit : cm)

## 5. 결론

본 연구에서는 인간의 작업을 보조해 주거나, 장애인이나 노인의 손 역할을 하는 등의 서비스를 제공하기 위해, 공압 액추에이터와 하이브리드 형태를 사용하여 공압 서비스 로봇을 개발하였다. 결론은 다음과 같이 요약할 수 있다.

1. 하이브리드형 공압 서비스 로봇은 넓은 작업 영역을 구현하고 하중에 견디는 성능을 보여주었다.
2. 슬라이딩 모드 제어를 사용하여 공압 액

축에어터의 비선형성을 극복하고 주어진 목표위치를 만족하도록 제어하였다.

3. 실제 시스템에 이론적으로 설계한 제어를 적용하여 실시간 제어시스템을 구성하였다.
4. 다양한 입력에 대한 실험과, 실시간 제어 실험을 통해, 원하는 위치와 궤적으로 추종하는 것을 보였다.

공압 액츄에이터의 저강성 특성 때문에 토크센서 없이도 외부의 충격이 주어지더라도 사용자의 안전성을 확보할 수 있지만, 공압 서보 시스템의 제어를 위한 연구가 필요하다. 향후 로봇 팔의 유연화와 각종 센서 및 제어 장치에 대한 연구를 통하여, 큰 힘을 가지면서도 사용자와 로봇이 접촉할 때 충격을 완화시킬 수 있는 안전성을 높인 서비스 로봇을 개발할 수 있을 것이다.

#### 참고문헌

- (1) 이희영, 송원경, 변중남, 2000, “복지용 서비스 로봇 시스템,” *Journal of the Korean Society of Precision Engineering*. Vol.17, No.9
- (2) S. P. Gaskill and S. R. G. Went, 1996, “Safety issues in modern applications of robots,” *Reliability Engineering and System Safety*, 53:301-307
- (3) S. R. Pandian, et. Al, 1999, “Control Performance of an Air Motor,” *Proc. of the 1999 IEEE Int. Conf. on Robotics & Automation*, pp.518-524
- (4) 박정규, 노리츠구 토시로, 1996, “공압 매니플레이터의 강인 힘제어”, *대한기계학회논문집 A*, 제 20 권 제 2 호, pp. 540~552
- (5) H. Janocha, 1996, “New Actuators from the Point of View of Mechatronics,” *Mechatronics*, 6, pp.497-506
- (6) B. McDollell and J. Bobrow, 1993 “Adaptive tracking control of an air powered robot actuator,” *J. Dyn. Syst., Measurement, Contr.*, vol.115, pp.427-433
- (7) 최서호, 홍예선, 이정오, 1996 “공기압 서보 시스템의 위치제어 및 시뮬레이션에 관한 연구,” *한국정밀공학회지*, 제 13 권, 제 6 호, pp.102-113
- (8) J.Song and Y. Ishida, 1997, “ A Robust Sliding Mode Control for Pneumatic Servo Systems”, *International Journal. Engineering Science*. Vol.35, No.8, pp.771-723
- (9) R. Richardson, Andrew R. Plummer, and Michael D. Brown, 2001, “Self-Tuning Control of a Low-Friction Pneumatic Actuator Under the Influence of Gravity,” *IEEE Trans. on Control Systems Technology*, Vol.9, No.2
- (10) R. Pandian, Y. Hayakawa, Y. Kanazawa, Y. Kamoyama, and S. Kawamura, 1997, “Practical Design of a Sliding Mode Controller for Pneumatic Actuators”, *Trans. of ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*. Vol.119, pp. 666-670
- (11) Choi and Lee, 1996, “Development of a hybrid robot arm for propeller grinding”, *SPIE, SPIE'S 1996 v.10*, pp.517-527, *Conference Proceeding*
- (12) 백영중, 2000, “복합 형상 가공기 개발” . MTRC 세미나 발표 자료 pp. 41-68
- (13) 이민기, 1995, “기계가공작업을 위한 강성이 큰 2 단 평행구조 로봇트 암 설계, Design of a high stiffness machining robot arm with double parallel mechanism” *대한기계학회논문집 서울, 대한기계학회*, v.19, n.1(통권 112 호), pp.22-37 1225-5963
- (14) Lee and Shah, 1988, “Kinematic Analysis of a Three-Degrees-of-Freedom In-Parallel Actuated Manipulator”, *IEEE Journal Robotics and Automation*,