

마스트 암 엔드-이펙터 궤적에 관한 연구

(A Study on a Trajectory of Mast Arm End-Effector)

문진수* · 김철우

(Jin-Soo Moon · Cheul-U Kim)

요 약

생활수준이 향상 될수록 로봇이 인간의 노동을 대신하는 요소는 더욱 많아지고 있다. 하지만 대부분의 로봇이 지면에 고정된 장치산업에 국한되어 있기 때문에, 폭넓은 응용가치가 기대되는 휴먼 로봇에 대한 필요성이 강조되고 있다. 휴먼로봇은 사람을 대신하기 위한 목적으로 많은 연구가 진행되고 있지만, 관련 하드웨어의 부족으로 매우 단순하고 제한적으로 적용되고 있다. 이러한 한계를 극복하기 위해 본 연구에서는 기구학적인 메커니즘과 제어 장치를 개발하여, 어깨와 팔을 3자유도 형태로 마스트 암을 구성하고, 관절변수의 특성과 엔드-이펙터 궤적실험을 통하여 사람과 유사한 동작을 재현하였다.

Abstract

As people's living standard is being improved, human works are being replaced by robots. However, because most robots are used in process industry, fixed on the ground, we need to develop human robots that have wide applications. Currently many researches are being conducted on human robots with the object of replacing human works, but because of lack of relevant hardware, such robots are being applied limitedly to very simple tasks. To overcome the limitation, the present study developed a kinematical mechanism and a controller. Based on human kinematics, the shoulders and the arms were composed of master arms with 3 degree of freedom, and we reproduced motions similar to human ones through the characteristics of joint variables and experiment on the trajectory of the end effector.

Key Words : Robot Master, Kinematic of master arm, Trajectory, End-effector

1. 서 론

로봇은 기계 · 전기 · 전자 · 제어기술이 일체화된

메카트로닉스로서 차세대 핵심 산업으로 부상하고 있으며, 산업현장에서도 3D해소와 생산성 향상을 목적으로 점차 쓰임이 늘어나고 있다. 하지만 지면에 고정된 장치산업의 특정 공정 외에는 그 범위를 확대하지 못하고 있기 때문에, 인간의 접근이 위험한 원전, 폭발물제거 등의 분야에서 이동용 로봇에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 이들 로봇의 이동 수단으로는 무게중심이 안정된 차륜이나 무한궤도

* 주저자 : 부산대학교 전기공학과 박사과정
Tel : 051-610-3150, Fax : 051-610-3155
E-mail : jsm@korcham.net
접수일자 : 2006년 10월 24일
1차심사 : 2006년 10월 27일
심사완료 : 2006년 11월 22일

마스트 암 엔드-이펙터 궤적에 관한 연구

형식이 이용되고 있으나, 장애물과 지형의 제약을 이유로 폭 넓은 응용가치가 기대되는 휴먼로봇에 대한 필요성이 강조되고 있다[1-4].

휴먼로봇은 인간과 유사한 형태를 지니게 되며 작업환경에 바로 적용할 수 있기 때문에, 기구학적 메커니즘을 바탕으로 많은 연구가 진행되고 있다. 그러나 대부분의 연구는 관련 하드웨어의 부족으로 RC서보(radio control servo motor, 이하 RC서보라 함)에 의존하고 있고, 이 RC서보는 토크나 속도의 한계로 매우 단순하고 제한적으로 적용되고 있다[1, 5, 6].

이러한 한계를 극복하기 위해 본 연구에서는 메커니즘과 제어장치를 개발하여 휴먼로봇을 구성하고, 마스터 암의 관절변수 특성실험을 하였다. 그리고 휴먼로봇 암 엔드-이펙터(툴을 장착하고 작업을 할 수 있는 로봇의 말단 점, 이하 엔드-이펙터라 함)의 기준궤적과 추종궤적을 컴퓨터로 시뮬레이션하고, 휴먼로봇에 적용하여 사람과 유사한 동작을 재현하였다[4,8].

2. 마스트 암의 Kinematics

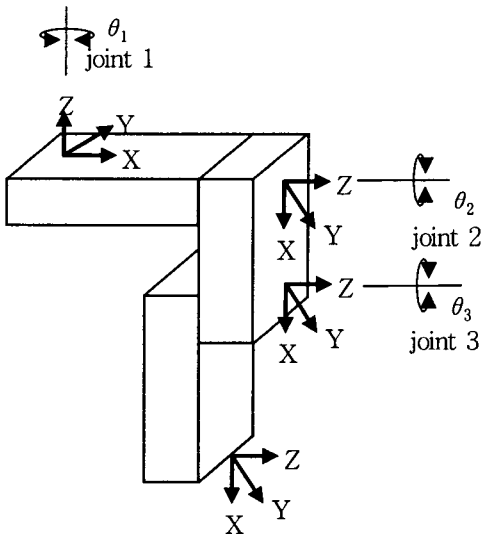


그림 1. 좌표계 시스템
Fig. 1. Coordinate system

휴먼로봇의 마스트 암은 머리부, 몸통부 그리고 양팔 부분으로 크게 나눌 수 있다. 여기서 팔 동작만을 다시 분류하면, 3자유도의 어깨, 1자유도의 팔꿈

치 그리고 3자유도의 손목을 기반으로 하고 있기 때문에, 한 팔에 7개의 축을 갖도록 설계하는 것이 이상적인 방법이다. 그러나 마스터 암의 회전관절은 어깨와 손목의 중심에 직접 회전축이 부착될 수 없을 뿐 아니라, 인간의 어깨 및 손목운동이 동일한 점을 중심으로 회전하기 때문에 기구학적 간섭이 발생한다[9].

위와 같은 간섭을 해소하기 위해 3자유도 구조로 개발된 휴먼로봇의 마스터 암은 그림 1과 같이, 어깨에 2축, 팔꿈치에 1축으로 인간과 동일하게 구성하고, 마스트 암 직결회전축 θ_1 , 어깨 회전축 θ_2 , 팔꿈치 회전축 θ_3 로 좌표계를 설정한다.

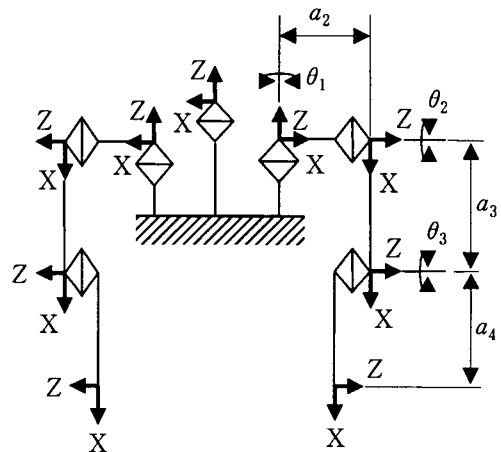


그림 2. 마스트 암의 기구학 구조
Fig. 2. Kinematic structure of master arm

로봇의 기구학 해석을 위해 그림 2와 같이 D-H규약(Denavit-Hartenberg규약, 이하 D-H규약이라 함)에 따른 매개변수를 이용하면, 각 조인트의 좌표 변환 운동식은 식 (1)과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned}
 {}^n T_{n+1} &= A_{n+1} = Rot(z, \theta_{n+1}) \\
 &\quad \times Trans(0, 0, d_{n+1}) \\
 &\quad \times Trans(a_{n+1}, 0, 0) \\
 &\quad \times Rot(x, \alpha_{n+1}) \quad (1)
 \end{aligned}$$

D-H표현법에서 모든 관절은 Z축을 기준으로 표현할 수 있으며, 이때의 회전관절은 Z축이 된다. 병진관절은 직선 이동 방향이 Z축이 되고, X축과 Y축은 오일러 좌표에 따라 결정되므로 로봇기구학 해석을 위한 D-H파라미터는 표 1과 같다[9].

표 1. 마스트 암의 D-H파라미터
Table 1. D-H Parameter of master arm

	θ	d	a	α
Joint1	θ_1	0	0	0
Joint2	θ_2	0	a_2	-90
Joint3	θ_3	0	a_3	0
Joint4	0	0	a_4	0

표 1에서 매개변수 θ 는 각 축의 회전각도이고, d 는 동 축의 이동거리이다. 그리고 a 는 링크의 길이이고, α 는 Z축에 대한 비틀림 각도를 나타낸다.

여기서 \sin 과 \cos 의 간략화를 위해 $\sin \theta_n$ 을 S_n , $\cos \theta_n$ 은 C_n 으로 표현하고, 다음 좌표 변환 운동에 대한 각 조인트 변환 행렬은 식 (2)~(5)와 같다.

$$A_1 = Rot(z, \theta_1) \tag{2}$$

$$A_2 = Rot(z, \theta_2) \times Trans(a_2, 0, 0) \times Rot(x, -90) \tag{3}$$

$$A_3 = Rot(z, \theta_3) \times Trans(a_3, 0, 0) \tag{4}$$

$$A_4 = Trans(a_4, 0, 0) \tag{5}$$

삼각함수 관계식은 식 (6), (7)과 같이 표현할 수 있다.

$$S_1 C_2 + C_1 S_2 = S_{12} \tag{6}$$

$$C_1 C_2 - S_1 S_2 = C_{12} \tag{7}$$

전체 행렬의 곱을 로봇의 순기구학으로 표현하면 식 (8)과 같이 된다.

$${}^0T_4 = A_1 A_2 A_3 A_4 = \begin{bmatrix} C_{123} & -C_{12}S_3 & -S_{12} & C_{12}(C_3 a_4 + C_3 a_3 + a_2) \\ S_{12}C_3 & -S_{12}S_3 & C_{12} & S_{12}(C_3 a_4 + C_3 a_3 + a_2) \\ -S_3 & -C_3 & 0 & -S_3 a_4 - S_3 a_3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{8}$$

로봇의 기준 좌표는 식 (9)와 같이 정의를 할 수 있다.

$${}^0T_4 = \begin{bmatrix} n_x & o_x & a_x & P_x \\ n_y & o_y & a_y & P_y \\ n_z & o_z & a_z & P_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{9}$$

여기서, 각 변수를 수식으로 표현하면 다음 식 (10)~(12)와 같다.

$$P_x = C_{12}(C_3 a_4 + C_3 a_3 + a_2) \tag{10}$$

$$P_y = S_{12}(C_3 a_4 + C_3 a_3 + a_2) \tag{11}$$

$$P_z = -S_3 a_4 - S_3 a_3 \tag{12}$$

현재위치를 알고자 함으로 각 관절의 각도 θ 에서 엔드-이펙터 궤적은 P_x , P_y , P_z 로 결정된다[10].

3. 실험장치 구성

3.1 휴먼로봇시스템의 기구부

개발된 실험장치의 기구부는 키 85[cm] 마스트 암 길이 30[cm] 무게 20[kg]의 휴먼로봇으로 전·후진 보행이 가능하다. 머리 부분에는 카메라를 장착하여 화상인식이 가능하도록 하였으며, 전방 장애물 검출을 위해 초음파 센서를 장착하였다. 마스트 암에는 어깨에 Pitch-Roll 2자유도와 팔에 Pitch 1자유도로 인간의 동작을 재현할 수 있도록 구성하였다[4].

3.2 휴먼로봇제어부 구성

머리 좌·우측 귀의 위치에 음성신호를 받을 수 있는 센서를 장착하여, 음성인식에 따라 행동이나

마스트 암 엔드-이펙터 궤적에 관한 연구

음성으로 답변할 수 있도록 구성하였다. 출력부는 17개의 액추에이터를 구동하여 로봇동작을 수행할 수 있으며, 스피크를 통하여 음성답변을 할 수 있다. 주 제어장치인 MPU는 원칩(PIC16F877)을 사용하였고, 로봇 액추에이터용 직류전동기의 파라미터는 표 2와 같다. 전동기축과 로봇조인트 사이에는 감속기를 장착하여 동력을 전달하는 방식이다. 서보시스템은 Power AMP(LM12)에 의한 일체화 방식으로, 로봇에 탑재할 수 있게 콤팩트한 구조로 개발하였다. 적용된 Power AMP는 $\pm 30[V]$ 전원전압에서 $10[A]$ 의 출력제어가 가능하고, 정현파에서는 $4[\Omega]$ 의 부하에 $80[W]$ 의 전력을 제어할 수 있는 전력증폭기이다[4].

표 2. DC 모터의 파라미터
Table 2. Parameters of DC motor

기호	설 명	값	단 위
R_m	전기자 저항	8.57	Ω
L_m	전기자인덕턴스	0.16	mH
J_m	전기자회전관성	2.84×10^{-7}	$kg \cdot m^2$
K_m	역기전력 상수	0.0061	$V/rad/sec$
K_t	토크 상수	0.0061	$N \cdot m/A$
K_g	기어비	150:1	

제어부구성은 그림 3과 같으며 소프트웨어는 17개의 액추에이터 동작에 관련된 기준각도(angle)를 제어하는 방식이다. 프로그램구성은 먼저 I/O조건을 검색하여 각축의 원점 동작을 수행하고, 음성인식에 따라 관련동작을 선택적으로 수행하게 된다.

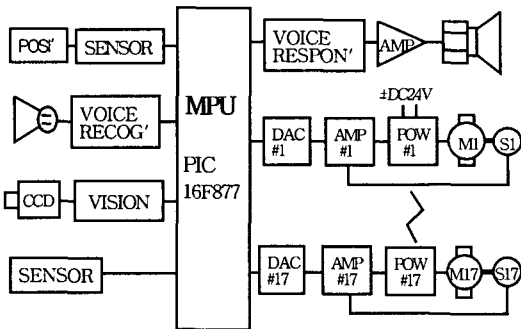


그림 3. 제어부 구성도
Fig. 3. Configuration of control system

4. 실험 및 결과

본 실험에서는 마스트 암 자체가 휴먼로봇이므로, 우리나라 국민과의 친화력이 있는 “대~한민국”을 대상으로 선정하였다. 이 동작은 2002년 한·일월드컵에서 사용했던 응원구호로 “대~한민국”이라 선창을 하면, 휴먼로봇은 대~한민국(구호)과 함께 파이팅 하고, 짹~짝 짹~짝 박수동작을 그림 4와 같이 재현하게 된다. 휴먼로봇의 마스트 암은 좌우가 대칭인 관계로 그림 4의 왼팔부분 3자유도를 대상으로, 동작시의 각 변위에 대한 응답 특성과 궤적 추종 실험을 하였다.

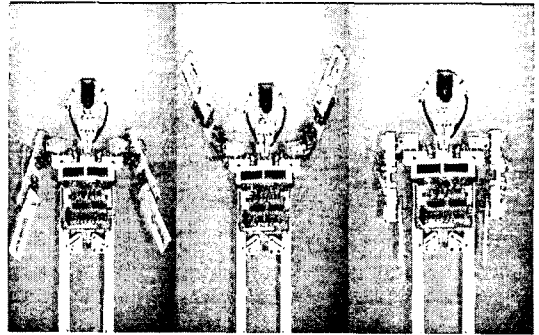


그림 4. 실험결과와 스냅사진
Fig. 4. Snapshot of experiment result

4.1 설계된 기준궤적 실험

실험의 데이터는 virtual instrument사의 pico ADC-200모델을 적용하여, $5[ms]$ 간격으로 샘플링 데이터를 획득하였다. 그림 5는 패턴에 맞추어 설계된 휴먼로봇 마스트 암의 기준궤적에 대한 각도(Angle)이다. 직결회전축 θ_1 , 어께 회전축 θ_2 , 팔꿈치 회전축 θ_3 를 Joint1~Joint3의 Angle value로 시간 축으로 나타낸 그림이다.

그림 6은 휴먼로봇 마스트 암의 엔드-이펙터 궤적 생성을 목적으로 식 (10)~(12)를 적용한 블록선도이다. 그림 5의 Angle value를 θ_1 , θ_2 , θ_3 에 대입하고, 휴먼로봇 마스트 암의 실측데이터인 $a_2 = 60[mm]$, $a_3 = 160[mm]$, $a_4 = 140[mm]$ 을 입력하였다. 그림 7은 MATLAB 6.0의 simulink틀을 적

용하여 생성한 엔드-이펙터의 궤적실험이다. 이 실험에서 로봇기구부의 개별각도 θ 의 변수에 따라 X, Y, Z방향으로 엔드-이펙터 궤적을 추종할 수 있어, 보다 정교한 자세제어를 할 수 있었다.

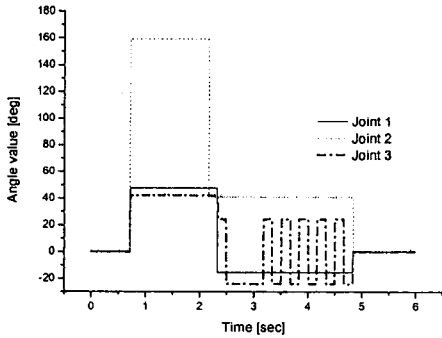


그림 5. 기준 각도
Fig. 5. Angle of reference

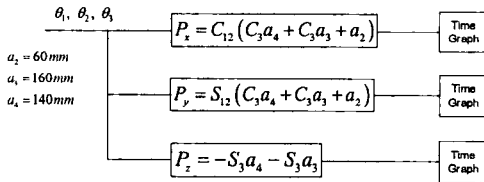


그림 6. 기구학 블록선도
Fig. 6. Block diagram of kinematics

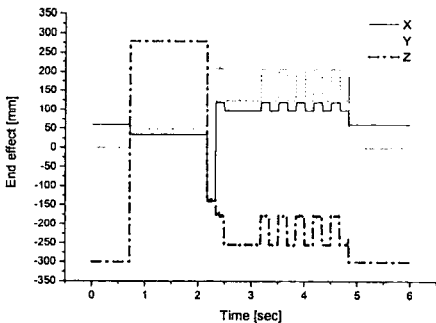


그림 7. 엔드-이펙터의 기준궤적
Fig. 7. Reference trajectory of end-effector

그림 8은 엔드-이펙터의 궤적 특성파악을 목적으로 X, Y, Z 축의 3차원 그래프를 생성할 수 있는 블록선도이다. 선행 연구한 그림 7의 기준궤적을 그림

8의 블록선도로 구현하면, 그림 9와 같이 3차원 엔드-이펙터의 궤적추종에 대한 특성을 얻을 수 있다.

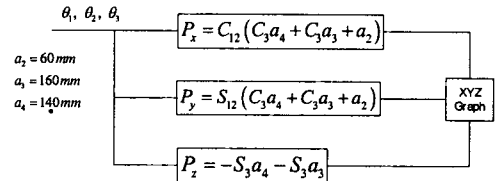


그림 8. XYZ 궤적의 기구학 블록선도
Fig. 8. Block diagram of kinematics on XYZ trajectory

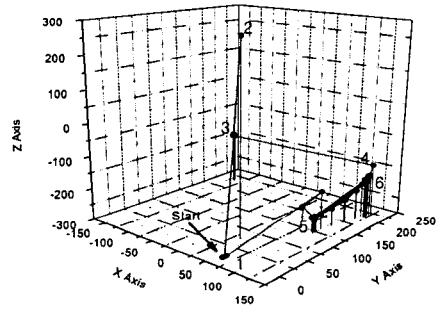


그림 9. 엔드-이펙터의 XYZ 기준궤적
Fig. 9. XYZ reference trajectory of end-effector

4.2. 시뮬레이션

시뮬레이션은 MATLAB 6.0의 simulink를 이용하여, 엔드-이펙터 궤적을 그림 10과 같이 생성하였다. 그림 5의 기준각도를 그림 6의 기구학에 적용하고, 선행연구에서 미흡한 PID제어를 시뮬레이션으로 예측한 실험이다. PID제어 게인 선정은 동시 튜닝으로 고유특성을 파악하고, 다시 개별 튜닝하여 표 3과 같은 조건으로 시뮬레이션 하였다.

표 3. PID 특성 파라미터
Table 3. Parameters of PID characteristics

	P	I	D
Joint1	300	40	8
Joint2	61	24	2
Joint3	43	11	2

마스트 암 엔드-이펙터 궤적에 관한 연구

그림 11은 시뮬레이션 데이터를 그림 8의 기구학으로 추적한 3차원 궤적추종에 대한 특성이다. 이 실험은 스태프동작에 PID제어 개인 값을 설정하고, 속도 조건에 따른 궤적특성에 관한 실험이다. 그림 9에서는 속도에 대한 조건이 없는 상태에서 엔드-이펙트 궤적이고, 그림 11에서는 표 4의 PID특성 파라미터를 적용하여, 속도를 추적한 시뮬레이션 결과이다. 이상의 실험에서 X, Y, Z축의 엔드-이펙트궤적을 예측할 수 있었다.

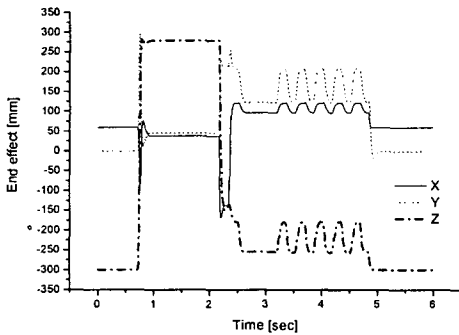


그림 10. 엔드-이펙터의 시뮬레이션 궤적
Fig. 10. Simulation trajectory of end-effector

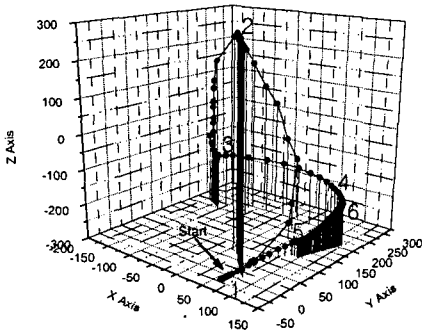


그림 11. 엔드-이펙터의 XYZ 시뮬레이션 궤적
Fig. 11. XYZ Simulation trajectory of end-effector

4.3 기준입력대비 실제 궤적 실험

실체 궤적 실험에서는 그림 5의 기준 각도를 휴먼로봇 마스트 암에 적용하고, 그림 4의 스태프사진과 같이 동작을 재현하였다. 액추에이터 구동에 의한

Angle value는 변위센서의 피드백 전압으로 실측하였으며, 그림 6의 기구학 블록선도 θ_1 , θ_2 , θ_3 에는 실측된 Angle value를 입력하였다. 그리고 그림 6의 블록선도 a_2 , a_3 , a_4 에 휴먼로봇 마스트 암 데이터를 입력하여, 그림 12, 13과 같이 엔드-이펙터의 실제 궤적추종에 대한 특성실험을 하였다.

이상의 궤적실험 그림 9, 11, 13에서 개별 포인트는 표 4와 같은 X, Y, Z축의 궤적 파라미터이다. 표 4에 의하면 기준궤적과 시뮬레이션에서 좌표 값의 오차가 적었으나, 실제 궤적에서는 3, 4포인트에서 다소 오차가 발생되었다. 이는 각 링크에서 발생하는 관성과 수직하중, 그리고 기준궤적 설계시 포인트간의 거리 보다 다음 포인트 이동시간이 짧은 것으로 판단된다.

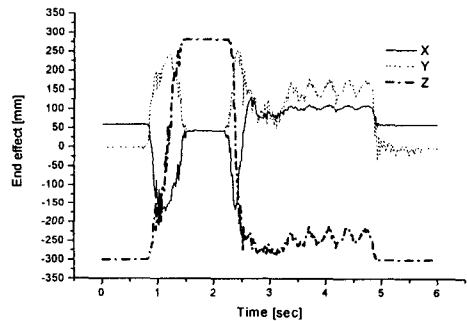


그림 12. 엔드-이펙터의 실제궤적
Fig. 12. Real trajectory of end-effector

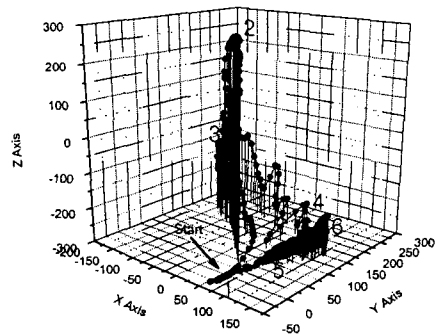


그림 13. 엔드-이펙터의 XYZ 실제궤적
Fig. 13. XYZ real trajectory of end-effector

표 4. 엔드-이펙터의 궤적 파라미터
Table 4. Trajectory parameters of end-effector

구분	축	1	2	3	4	5	6
기준 궤적	X	65	37	-150	125	100	122
	Y	0	50	205	205	125	205
	Z	-300	278	-150	-175	-250	-175
시뮬 레이션	X	65	40	-135	120	95	115
	Y	0	45	205	205	120	205
	Z	-300	280	-150	-175	-250	-175
실체 궤적	X	65	45	-155	135	85	100
	Y	0	40	240	150	120	180
	Z	-300	276	-160	-225	-255	-205

5. 결 론

본 연구에서 휴먼로봇의 기구학적인 메커니즘과 제어장치를 개발하여, 3자유도형태의 마스트 암을 구성하고, 이 로봇의 관절변수 특성과 엔드-이펙터 궤적실험으로 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 개발된 액추에이터는 서보일체형으로 콤팩트하여, 제어부와 같이 휴먼로봇에 탑재된 구조로 기동성을 용이하게 하였다.

(2) 엔드-이펙터 궤적실험으로 사람과 유사한 동작재현 뿐만 아니라, 산업용 로봇의 경로생성에도 유용하게 적용할 수 있게 되었다.

그러나 관절변수 특성실험에서 발견된 바와 같이 속도와 가속도에서 궤적의 일그러짐이 발생하였고, 개별특성을 고려하지 못한 모터의 선정과 기구부 백래쉬 영향으로 응답특성과 반복 정밀도가 부족한 단점이 발견되었다.

향후 본 연구에서 발생한 단점을 보완하고, 개발된 하드웨어부와 궤적특성을 이용하여, 사람과 연계 작업을 할 수 있는 로봇을 개발하고자 한다.

References

[1] Y. W. Sung and S. Y. Yi, "The Development of a Miniature Humanoid Robot System", Journal of Control, Automation and Systems Engineering, Vol.7, No. 5, pp.420~426, 2001. 5.
[2] B. J. Oh, "A Study on a Control of 3D Animation for Adaptive Control" Ministry of Information and

Communication republic of Korea, 1999.
[3] J. W. Lee, Y. S. Kim, S. Y. Lee and M. S. Kim, "Kinematic Design and Analysis of Masterarm with Distributed Controller Architecture", Journal of Control, Automation and Systems Engineering, Vol.7, No.6, pp.532~359, 2001. 6.
[4] J. S. Moon and C. U. Kim, "A study on Development of Actuator for Biped Walking Robot", Journal of The Korean Institute of Illuminating and Electrical Installation Engineers Vol. 19, No.7, pp.73~80, 2005. 11.
[5] M. Bergamasco, et al, "An arm exoskeleton system for teleoperation and virtual environments applications", Proceedings of the 1994 IEEE ICRA, 1994.
[6] T. B. Sheridan, Telerobotics, Automation, and Human Supervisory Control, The MIT Press, Cambridge, MA, 1992.
[7] J. G. Jin, J. Sakong, J. Y. Choi, "Learning and Generation of Motion Trajectory in a Humanoid Robot", Proceeding of KFIS2001 Spring Conference, 2001. 5.
[8] S. H. Yi, S. H. Yang, Y. K. Park, "Generation of Constant Orientation in Industrial Robots", Transaction of the Korean Society of Machine Tool Engineers. Vol. 10 No. 2, 2001. 4.
[9] Y. S. Kim, J. W. Lee, S. Y. Lee, M. S. Kim, J. W. Lee, "Masterarm Development for Teleoperation of a Humanoid Robot", The Korean Institute of Electrical Engineers. Vol. 50D No. 6, 2001. 6.
[10] Mark W. Spong, M. Vidyasagar, "Robot Dynamics and Control", John wily & sons, Inc. 1989.
[11] S. B. Dewan, A. Stranghen, "Power semiconductor circuits", John wily & sons, Inc. 1975.
[12] P. C. Sen, "Thyristor D. C. Drive", John willey & Sons Inc. pp.222~239, 1980.

◇ 저자소개 ◇

문진수 (文鎭洙)

1959년 7월 16일생. 2003년 부산대학교 공과대학 전기공학과 졸업(석사). 현재 동 대학원 전기공학과 박사과정. 1980~1987년 한국중공업(주) 전기부 근무. 현재 대한상공회의소 부산인력개발원 시스템제어과 과장. 주 관심분야는 휴머노이드로봇 개발, 산업용로봇, PLC, PMU, CNC공작기계 제어분야, FMS.

김철우 (金喆禹)

1942년 12월 5일생. 1969년 부산대학교 공과대학 전기공학과 졸업. 1974년 일본 전기통신대학 전자공학과 졸업(석사). 1982년 일본 동경공업대학 전기전자공학과 객원교수. 1986년 중앙대학교 전기공학과 졸업(박사). 현재 부산대학교 공과대학 전자전기통신공학부 교수. 본 학회 평의원.