

3자유도 암 로봇의 가상시뮬레이션과 실제계적

(A Virtual Simulation and Real Trajectory of 3-DOF Arm Robot)

문진수* · 김철우

부산대 대학원 전기공학과

(Jin-Soo Moon · Cheul-U Kim)

Dept. of Electrical Engineering, Pusan National Univ.

Abstract

This study developed a human robot master arm, which has a structure similar to the human arm, with the object of taking over human works. The robot arm was structured to reproduce human actions using three axes on each of the shoulder and the wrist based on mechanics, and the actuator of each axis adopted an ordinary DC motor. The servo system of the actuator is a one body type employing an amp for electric power, and it was designed to be small and lightweight for easy installation. We examined the posture control characteristics of the developed robot master arm in order to test its interlocking, continuous motions and reliability.

1. 서론

로봇기술은 최근 반도체와 컴퓨터기술의 발전으로 가장 혁신적인 성장을 이룩한 분야이다. 산업현장에서도 점차 로봇사용이 늘어나고 있으며, 특히 인간의 접근이 위험한 심해저, 원전, 군사용 등의 다양한 분야에서 로봇에 대한 연구가 진행 중이거나 일부 적용단계에 있다. 이들 로봇의 이동수단에는 비교적 안정된 차륜이나 무한궤도형식이 많이 이용되고 있는데, 이 방식은 장애물이나 지형 등의 제약을 많이 받는다. 이러한 이유로 동작이 완만하고 폭 넓은 응용가치가 기대되는 휴먼로봇에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다 [1~3].

휴먼로봇은 인간과 유사한 형태를 지니고 있으므로 인간의 작업환경에 바로 적용할 수 있다. 때문에 이들 로봇의 기구학적 메커니즘을 바탕으로 많은 연구가 진행되고 있다. 그러나 대부분의 연구는 로봇관련 하드웨어의 부족으로 RC서보에 의존하고 있고, 이 RC서보는 토크나 속도의 한계로 매우 단순하고 제한적으로 적용되고 있다.

이러한 한계를 극복하기 위해 본 연구에서는 기구학적인 메커니즘과 액추에이터, 그리고 제어장치를 개발하여 로봇 마스트 암을 구성하였다. 이 로봇의 마스트 암은 인간의 기구학을 기반으로 어깨와 팔에 자유도 3개의 형태로 구성하고, 가상시뮬레이션과 엔드 이펙트의 실제계적을 비교하여, 로봇의 동적 알고리즘의 가능성을 검증하고자 한다[4~6].

2. 마스트 암의 순기구학

본 연구에서 개발된 로봇 마스트 암은 그림 1과 같다. 로봇의 마스트 암은 머리부, 몸통부 그리고 양팔 부분으로 크게 나눌 수 있으며, 원팔 동작만을 다시 분류하여, 순기구학 좌표계로 그림 2와 같이 표현하였다. 로봇 마스트 암의 좌표계 구성은 어깨에 2축, 팔꿈치에 1축으로 인간과 동일한 구조이며, θ_1 은 암 직결축의 회전각이고, θ_2, θ_3 는 어깨와 팔꿈치축의 회전각이다.

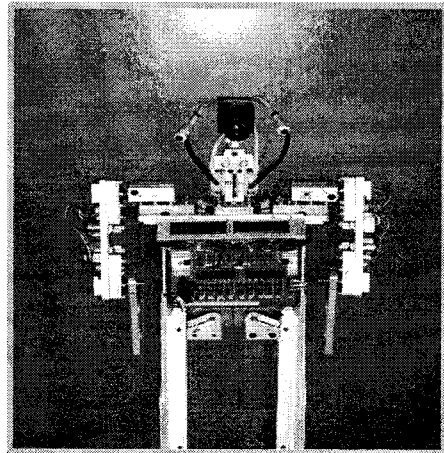


그림 1. 마스트 암 시스템
Fig. 1. Master arm system

그림 1에서 로봇 순기구학을 쉽게 접근하기 위해 D-H(Denavit-Hartenberg)표현법을 사용하면, 지역좌표계를 그림 2와 같이 나타낼 수 있다. D-H표현법에서 모든 관절은 Z축을 기준으로 표현할 수 있으며, 회전관절의 회전축이 Z축이 된다. 병진관절은 직선이동 방향이 Z축이 되고, X축과 Y축은 오일러 좌표에 따라 결정된다. 여기서 로봇기구학 해석을 위한 D-H파라미터는 표 1과 같다[7].

표 1. 로봇의 데나비트-하텐버그 파라미터
Table 1. Denavit-Hartenberg parameter of robot

	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 1의 매개변수에서 θ 는 각 축의 회전각이고, d 는 축의 이동거리이다. 그리고 a 는 법선의 길이이고, α 는 Z축에 대한 각도를 나타낸다.

그림 2에서 D-H매개변수를 이용한 조인트의 좌표변환운동은 식(1)과 같다.

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

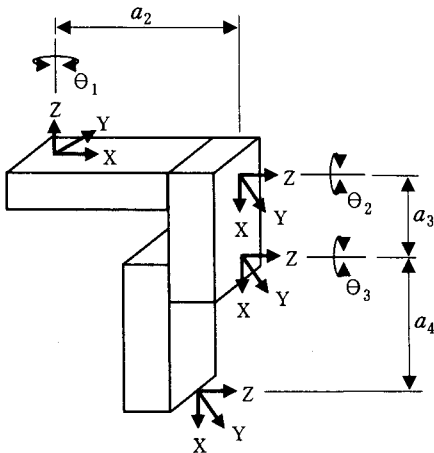


그림 2. 마스트 암의 기구학 구조
Fig. 2. Kinematic structure of Master arm

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

$$A_1 = \text{Rot}(z, \theta_1) = \begin{bmatrix} C_1 & -S_1 & 0 & 0 \\ S_1 & C_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

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

$$= \begin{bmatrix} C_2 & -S_2 & 0 & 0 \\ S_2 & C_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & a_2 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos 90 & \sin 90 & 0 \\ 0 & -\sin 90 & \cos 90 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_2 & -S_2 & 0 & C_2 a_2 \\ S_2 & C_2 & 0 & S_2 a_2 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

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

$$= \begin{bmatrix} C_3 & -S_3 & 0 & 0 \\ S_3 & C_3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & a_3 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_3 & -S_3 & 0 & C_3 a_3 \\ S_3 & C_3 & 0 & S_3 a_3 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

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

$$= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & a_4 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

전체 행렬의 곱으로 로봇의 순기구학을 표현하면 식(6)과 같이 된다.

$${}^0 T_4 = A_1 A_2 A_3 A_4 = \begin{bmatrix} C_1 & -S_1 & 0 & 0 \\ S_1 & C_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} C_2 & 0 & -S_2 & C_2 a_2 \\ S_2 & 0 & C_2 & S_2 a_2 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} C_3 & -S_3 & 0 & C_3 a_3 \\ S_3 & C_3 & 0 & S_3 a_3 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & a_4 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{123} & -C_{12}S_3 & -S_{12} & C_{12}(C_3 a_4 + C_3 a_3 + a_2) \\ S_{12}C_3 & -S_{12}S_3 & C_{12} & S_{12}(C_3 a_4 + C_3 a_3 + a_2) \\ -S_3 & -C_3 & 0 & -S_3 a_4 - S_3 a_3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

로봇의 기준좌표에 대해서 식(7)과 같이 정의를 할 수 있고,

$${}^0 T_4 = \begin{bmatrix} n_x & o_x & a_x & P_x \\ n_y & o_y & a_y & P_y \\ n_z & o_z & a_z & P_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (7)$$

여기서, 각 변수들에 대해서 표현하면 다음 식(8)~(19)과 같다.

$$n_x = C_{123} \quad (8)$$

$$n_y = S_{12}C_3 \quad (9)$$

$$n_z = -S_3 \quad (10)$$

$$o_x = -C_{12}S_3 \quad (11)$$

$$o_y = -S_{12}S_3 \quad (12)$$

$$o_z = -C_3 \quad (13)$$

$$a_x = -S_{12} \quad (14)$$

$$a_y = C_{12} \quad (15)$$

$$a_z = 0 \quad (16)$$

$$P_x = C_{12}(C_3a_4 + C_3a_3 + a_2) \quad (17)$$

$$P_y = S_{12}(C_3a_4 + C_3a_3 + a_2) \quad (18)$$

$$P_z = -S_3a_4 - S_3a_3 \quad (19)$$

현재위치에 대해서 알고자 함으로 각 관절의 각도를 입력으로 주었을 때, 엔드-이펙트좌측은 P_x, P_y, P_z 로 구해진다[7].

3. 실험장치

3.1. 마스트 암 시스템의 구성

인간의 상체 부분은 머리와 몸체 그리고 두 팔을 가진 하나의 독립구성체이다. 개별 운동을 분석하면 머리와 몸통운동에 각각 3개의 축으로 구성되어 있고, 팔운동에는 어깨에 3개, 팔꿈치와 손목에 각각 2개의 축으로 구성되어 있다. 따라서 전체적으로는 20개의 회전축을 갖도록 설계하는 것이 이상적인 방법이다.

그러나 몸통 부분과 팔꿈치 등의 회전중심에 회전축을 부착하기에는 곤란하다. 때문에 본 연구에서는 머리에 1축과 양팔에 6개의 축을 사용하여, 그림 1과 같이 마스트 암 시스템을 기구학적으로 간결하게 설계 제작하였다.

소프트웨어 구성은 7개의 액추에이터 동작에 관련된 데이터를 제어하는 방식이다. 플로는 먼저 I/O조건을 검색하여 각축의 원점 동작을 수행하고, 이후 음성 인식 시스템의 인식결과에 따라 관련동작을 선택하여 수행 할 수 있도록 프로그램을 설계하였다.

3.2. 로봇액추에이터 구동장치

로봇액추에이터는 직류전동기를 적용하였고, 전동기와 로봇조인트 사이에 기어박스를 통하여 동력을 전달한다. 직류전동기의 파라미터는 표 2와 같으며, 구동방식에는 파워앰프(LM12)를 이용한 서보시스템을 구축하였다.

전력제어 소자인 파워앰프는 OP amp($\mu A741$)와 유사한 특성을 가지면서, $\pm 30[V]$ 전원전압에서 $10[A]$ 의

출력제어가 가능한 전력증폭기이다. 모노타입형식으로 콤팩트하고 $4[\Omega]$ 의 부하에 $80[W]$ 의 정현파전력을 제어할 수 있다.

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	

3.3. 서보시스템의 구성

DC서보시스템에 적용된 D/A Converter의 DAC-8043칩은 아날로그디바이스사의 12bit D/A컨버터로 MPU에서 결정된 디지털데이터를 아날로그로 변환하도록 설계하였다. 이 출력은 다시 A/V변환된 아날로그전압으로 서보시스템에 공급된다.

서보시스템은 이 전압을 기준으로 모터를 제어하는 DC drive방식이다. 사용 전압의 범위는 $0 \sim \pm 24[V]$ 이며, 암의 변위는 $0 \sim 360[^\circ]$ 까지 제어가 가능하지만, 암의 각 변위는 $320[^\circ]$ 범위($20 \sim 340[^\circ]$)를 제어토록 하였다.

마스트 암의 변위는 센서에 의해 각도변위와 비례된 전압을 검출하고, 이 값과 기준값을 비교한 전압차를 반전 증폭하여, 모터에 공급하는 폐 루프제어방식을 채택하였다. 때문에 운전 중에 발생하는 자중이나 외란에 의한 오차를 보상하여 정자세를 유지할 수 있다.

4. 실험 및 결과

마스트 암 로봇은 12개의 음성명령에 따라 수행하게 된다. 본 실험에서는 마스트 암 자체가 휴먼로봇임으로 우리나라 국민과의 친화력이 있는 "대한민국"을 대상으로 선정하였다.

이 동작은 2002년 한·일월드컵에서 온 국민이 사용했던 응원구호로 대한민국(구호)과 함께 파이팅 후 짹짹~ 짹 짹(박수)을 치는 동작이다. 여기 박수동작에서는 본 로봇이 박수소리를 낼 수 없어 손목 상·하 동작만으로 재현하여, 그림 3과 같이 연속동작 패턴을 설계하였다.

로봇의 암은 좌우가 대칭인 관계로 그림 1의 왼팔 부분을 그림 2와 같이 #1, #2, #3축으로 구분하여 동작시의 각 변위에 대한 응답 특성을 실험하였다. 로봇의 연속동작에 대한 변위 값을 virtual instrument사의 pico ADC-200모델을 적용하여, 샘플링 간격 5ms로

데이터를 측정하였다.

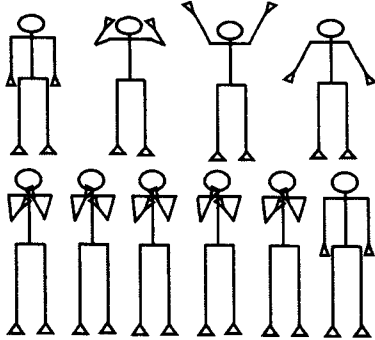


그림 3. 제안된 동작패턴
Fig. 3. proposed pattern

이상의 실험조건에서 얻어진 데이터 값은 그림 4~6까지의 결과 값을 얻을 수 있었다. 그림 4는 #1번 축의 관절변수 특성으로 기준값(Reference angle)은 MPU에서 패턴에 맞추어 발생된(commend value)값이고, 시뮬레이션데이터(PID control)는 튜닝으로 선정된 PID값을 적용하여 시뮬레이션으로 예측된 특성 그림이다. 실측값(Real angle)은 기준 값에 따라 본 연구에서 개발된 DC 서보시스템을 적용하여 설계패턴으로 연속 동작된 변위 값(actual value)이다.

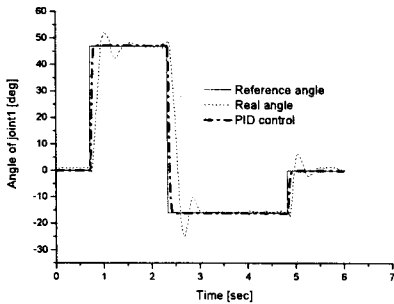


그림 4. #1축 관절 변수
Fig. 4. Trace of #1 axis joint

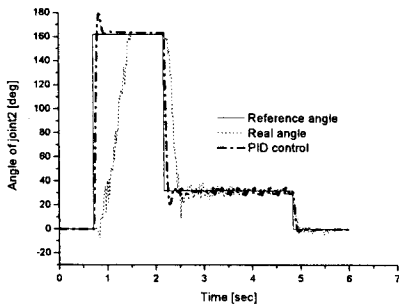


그림 5. #2축 관절 변수
Fig. 5. Trace of #2 axis joint

그림 4의 #1축 관절변수에서는 원점에서부터 세 개

의 동작으로 이루어짐을 알 수 있다. #1축이 로봇 팔에 직결된 회전축이므로 직접적인 부하가 적고, 동작이 단순하여 비교적 안정된 동작특성을 확인할 수 있다.

그림 5의 #2축 관절변수 궤적에서도 원점에서 세 개의 동작이 이루어짐을 알 수 있다. 그러나 #1축이 팔에 직결된 회전축인 반면 #2축은 암에 해당하는 축임으로 부하가 직접 가해진다. 때문에 목표 값에 도달하는 시간이 늦고 불안정한 동작특성을 보이면서, 오차 폭이 #1축보다는 크게 나타나고 있다.

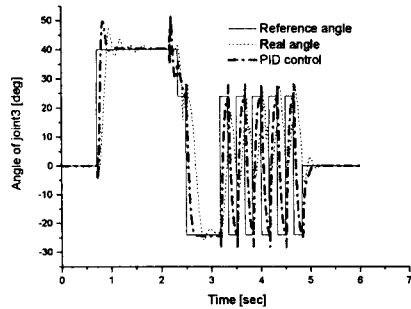


그림 6. #3축 관절 변수
Fig. 6. Trace of #3 axis joint

그림 6의 #3축 관절변수 궤적에서는 원점에서 9개의 연속 동작이 이루어짐을 알 수 있다. 여기서도 #2축과 같은 암이지만 팔목에 해당됨으로 목표 값에는 비교적 안정되게 도달할 수 있었다. 그러나 “짜깁~짜 깎깎” 박수를 치는 동작에서는 목표 값에 도달하기 전에, 다음 동작이 이어져 응답이 늦고 오차 폭이 넓게 나타나고 있다.

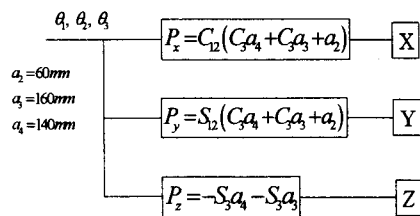


그림 7. 기구학 블록도
Fig. 7. Block diagram of Kinematics

그림 7은 로봇 암의 엔드-이펙트의 궤적을 생성하기 위해 2장에서 유도된 식(17)~(19)를 블록으로 표현하였다. 입력 데이터는 실험에서 얻어진 그림 4~6의 real angle과 PID control을 $\theta_1, \theta_2, \theta_3$ 로 입력하고, a_2, a_3, a_4 는 로봇 암의 실측데이터를 입력하였다. MATLAB 6.0의 simulink를 이용하여, 그림 8, 9와 같은 엔드-이펙트궤적을 생성하였다. 그림에서 나타난 바와 같이 로봇기구부의 개별각도 θ 의 변수에 따라 X,

Y, Z 좌표상에서 엔드-이펙트의 이동궤적을 추정할 수 있다. 이는 보다 섬세한 동작과 정밀한 위치제어가 가능하게 되었다.

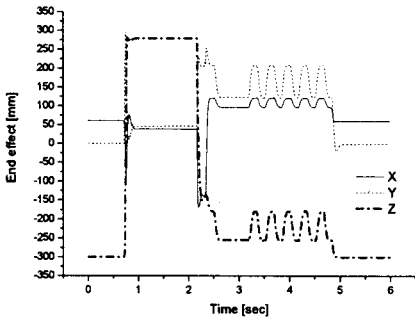


그림 8. 시뮬레이션 엔드-이펙트 궤적
Fig. 8. X, Y, Z Trajectory of simulation end-effector

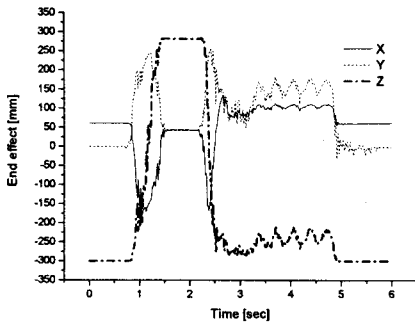


그림 9. 실제 엔드-이펙트 궤적
Fig. 9. X, Y, Z Trajectory of real end-effector

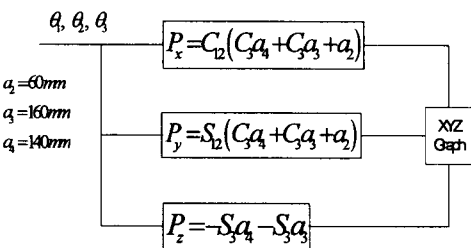


그림 10. XYZ 궤적의 기구학 블록선도
Fig. 10. Block diagram of kinematics on XYZ trajectory

그림 10은 엔드-이펙터의 궤적 특성파악을 목적으로 X, Y, Z 축의 3차원 그래프를 생성할 수 있는 블록선도이다. 그림 4~6의 변수를 그림 10의 블록선도로 구현하면, 그림 11, 12와 같이 3차원 엔드-이펙터의 궤적추종에 대한 특성을 얻을 수 있다.

그림 11은 시뮬레이션 데이터를 그림 10의 기구학으로 추적한 3차원 궤적추종에 대한 특성이다. 이 실험은 스텝동작에 PID제어 게인 값을 설정하고, 속도조

건에 따른 궤적특성에 관한 실험이다. 그리고 그림 12는 실제동작에서 각 관절의 각도 θ 를 이용하여 속도를 추적한 시뮬레이션 결과이다. 이 실험에서 시뮬레이션과 실제동작 X, Y, Z축의 엔드-이펙트궤적의 차이를 예측할 수 있었다.

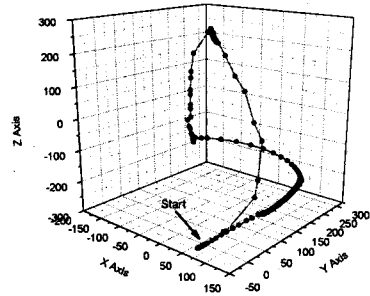


그림 11. 엔드-이펙터의 시뮬레이션 3D궤적
Fig. 11. Simulation 3D trajectory of end-effector

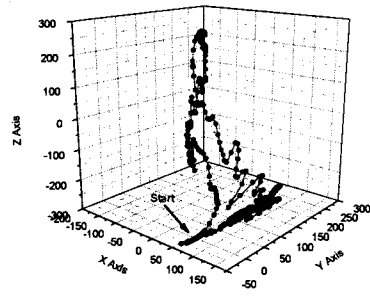


그림 12. 엔드-이펙터의 실제 3D궤적
Fig. 12. Real 3D trajectory of end-effector

이상의 궤적실험 그림 11, 12에서 개별 포인터는 표 3과 같은 X, Y, Z축의 궤적 파라미터이다. 표 3에 의하면 시뮬레이션궤적과 실제궤적 3, 4포인터에서 다소 오차가 발생되었다. 이는 각 링크에서 발생하는 관성과 수직하중, 그리고 기준궤적 설계시 포인터간의 거리 보다 다음 포인터 이동시간이 짧은 것으로 판단된다.

표 3. 엔드-이펙터의 궤적 파라미터
Table 3. Trajectory parameters of end-effector

구분	축	1	2	3	4	5	6
시뮬레이션	X	67	42	-135	122	97	117
	Y	0	47	207	207	120	205
	Z	-300	280	-150	-175	-250	-175
실제궤적	X	67	47	-153	137	87	102
	Y	0	42	240	152	120	180
	Z	-300	276	-160	-225	-255	-205

5. 결 론

본 논문에서는 지금까지 연구가 미진했던 휴먼로봇의 기구학적인 메커니즘과 액추에이터, 그리고 제어장치를 개발하였다. 어깨와 팔에 자유도 3개의 형태로 마스트 암을 구성하고 관절변수 특성과 엔드-이펙트 궤적실험결과는 다음과 같다.

인간의 기구학에 기초하여 어깨와 팔목에 각각 3개의 축만으로 인간의 동작을 재현할 수 있었다. 그리고 액추에이터는 서보일체형으로 콤팩트하게 개발하여, 로봇에 탑재된 구조로 기동성을 용이하게 하였고, 엔드-이펙트 궤적실험을 통하여 보다 정교한 동작실험의 가능성을 확인하였다. 그러나 관절변수 특성실험에서 발견된바와 같이 개별특성을 고려하지 못한 모터의 선정과 기어장치부 백래쉬 영향으로 응답특성과 반복정밀도가 부족한 단점이 있다.

향후 보다 섬세한 동작이 될 수 있도록 기구부를 개선하여 두 손 연동으로 정밀 작업이 가능한 모바일 로봇을 개발할 계획이다.

참 고 문 헌

- [1] Jean Vertut and Philippe Coiffet, *Teleoperation and Robotics: Applications and Technology*, Kogan Page, 1985.
- [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] M. Bergamasco, et al, "An arm exoskeleton system for teleoperation and virtual environments applications", *Proceedings of the 1994 IEEE ICRA*, 1994
- [5] T. B. Sheridan, *Telerobotics, Automation, and Human Supervisory Control*, The MIT Press, Cambridge, MA, 1992.
- [6] 문진수, 김철우, "직립보행로봇 Actuator 개발에 관한 연구" 한국조명·전기설비학회논문지, 제19권 제7호, pp.73~80, 2005. 11.
- [7] Mark W. Spong, M. Vidyasagar, "Robot Dynamics and Control" John wily & sons, Inc. 1989.
- [8] 박민용, "로봇 공학", 大英社, 1994.
- [9] S. B. Dewan, A. Stranghen, "Power semiconductor circuits," John wily & sons, Inc. 1975.
- [10] 전금경, "파워 일렉트로닉스와 AC드라이버", 세화, pp.15~358, 1991.
- [11] P. C. Sen "Thyristor D. C. Drive", John wiley & Sons Inc. pp.222~239, 1980.
- [12] 文熙和, "모 터 제 어", KPC, pp.281~310, 1990