

# 포항공대 7자유도 직접구동 로봇의 설계

## 염 영 일

포항공과대학 기계공학과 교수



●1942년생  
●기계공학에서 특히 운동역학을 전공하였으며, CAD, 생체역학, 로봇틱스에 관심을 갖고 있다.

## 정 완 균

포항공과대학 기계공학과 교수



●1959년생  
●생산공학을 전공하였으며, 로봇 제어, 여유자유 로봇에 관심을 갖고 있다.

### 1. 머리말

1950년대 원격조작형태의 매니퓰레이터가 원자력산업의 위험한 작업에 이용되기 시작한 이래, 로봇은 생산현장에서 생산자동화의 기수로 계속 발전하여 왔다. 산업용로봇은 보통의 산업기기와는 달리 몸체의 키에 비해 비교적 긴 링크를 가지고 있고 링크 끝점의 위치정밀도는 각 조인트의 정밀도, 마찰, 백래시 및 제어의 성능에 많이 좌우되게 된다. 본 글에서는 지금까지의 산업용 로봇과는 달리 사람팔의 자유도를 닮은 7자유도를 가지고 이 여유자유도를 이용하여 장애물회피 및 힘제어등이 가능한 여유자유도 직접구동로봇의 몸체 설계방법을 다룬다. 직접구동로봇의 몸체 설계, 링크 길이의 선정을 위한 지수를 제안하였고 설계, 가공 및 조립시의 주요사항을 기술하며 실험을 통하여 개발된 로봇의 성능을 검토하였다.

최근 로봇의 구동방식은 종전의 감속기를 이용한 DC 서보 방식과는 달리 감속기를 사용하지 않는 AC 서보형태의 직접구동방식이 많이 사용되고 있다. 직접구동방식은 모터와 링크사

이에 기어등의 감속기를 사용하지 않고 직접 연결되어 구동되는 형태로 감속기에 의한 동력 손실 및 불필요한 진동이 없으며 기계적인 마찰을 최소화한 구동방식으로 보수유지의 필요성이 없는 큰 장점을 가지고 있다. 1980년초에 이러한 직접구동방식을 이용한 로봇의 개념이 Asada에 의해 제안된 이래 1981년 CMU에서 최초로 직접 구동로봇(CMU DD ARM I)을 개발하였고 1985년 CMU DD ARM II가 개발되었다<sup>(1)</sup>. 그 이후 모터의 눈부신 발전과 함께 MIT의 모델 I-IV를 비롯하여<sup>(2)</sup> 상업용으로 Adent 로봇 (adept technology), Matsushita 로봇등 수 많은 기업, 연구소 및 학교에서 직접구동형 로봇을 연구개발하고 있다. 국내에서도 포항공대<sup>(3)</sup>, 삼성중합기술원<sup>(4)</sup> 및 금성산전<sup>(5)</sup> 등에서 많은 연구가 진행중에 있다.

이러한 직접구동 로봇은 고속, 정밀제어가 가능하다는 이외에 반도체 조립작업등의 클린룸에서의 사용이 용이하고, 축의 강성을 쉽게 조절할 수 있어 고급작업에 쉽게 이용될 수 있다는 장점이 있다. 본 글에서는 로봇 시스템의 설계중 제어기 설계보다는 주로 몸체설계과정을 다루고자 한다. 먼저 2장에서는 일반적인

로봇 설계시의 사양 및 설계 과정을 다루고 3 장에서는 포항공대 7자유도 직접 구동 로봇의 몸체설계 과정을 설명하고자 한다.

## 2. 로봇의 몸체설계

로봇을 설계하는 경우 그 적용분야가 무척 다양하기 때문에 모든 종류의 로봇에 적합한 설계를 한다는 것은 불가능하다. 따라서 로봇을 설계하는 경우는 먼저 그 로봇의 사용 목적 및 사양이 주어져야 한다. 주어지는 로봇의 사양은 크게 기능적인 면과 그 이외의 면으로 다음과 같이 나눌 수 있다<sup>6)</sup>.

### (1) 기능적 사양(functional specification)

- 가반하중(최대 무게)
- 정밀도(precision)
  - 절대 정밀도(absolute accuracy)
  - 재현성(repeatability)
  - 해상도(resolution)
- 속력(speed)
  - 끝점의 속도(velocity of the endpoint)
  - 사이클 타임(cycle-time)
  - 강성(stiffness)

### (2) 효용적 사양(usefulness specification)

- 기대수명(expected useful life)
- 고장발생 사이의 평균시간(mean time between failure)
- 수리시간(repair time)
- 사용 공간(space consumed)
- 무게(weight)
- 안전성(safety)
- 교육용이성[Trainability (ease of operation)]
- 비용(cost)
- 동력(power)
- 온도(temperature)

위의 두가지 사양은 동시에 만족되기 어려운 면이 있게 된다. 예를 들어 정밀함과 수명은 동시에 만족되기 어렵다. 주어진 작업에 맞

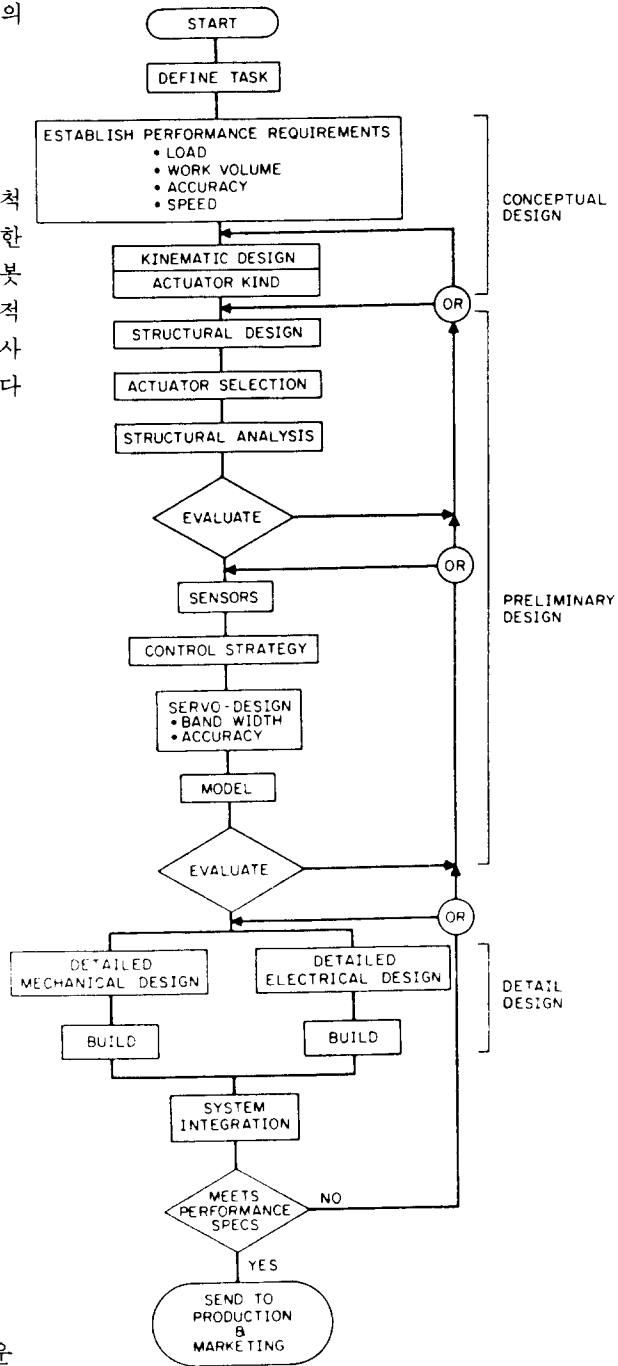


그림 1 로봇설계의 흐름도

도록 이와같은 사양이 주어지면 로봇시스템의 설계는 크게 다음의 4가지 설계단계로 구분된다.

- 1단계 : 기구설계 (kinematic design)
  - 자유도 선정
  - 조인트 및 링크의 형태
- 2단계 : 액츄에이터 및 센서선정
  - 액츄에이터 종류, 크기
  - 액츄에이터 위치
  - 카운터 밸런싱
  - 센서 선정
- 3단계 : 구조설계 및 해석 (structural design and analysis)
  - 강도계산
  - 주파수 해석, 구조물 고유진동수
- 4단계 : 제어 시스템 설계 (control and servo system)
  - 서보 대역폭
  - 최대 가속도
  - 서보 불안정성
  - 멀티 프로세서 통신
  - 실시간 운전시스템

이러한 설계단계의 흐름도를 그리면 그림 1과 같다.

### 3. 몸체설계

전장에서 다룬 일반적인 로봇의 설계과정에 기초하여 이 장에서는 포항공대 7자유도 직접구동로봇의 몸체설계에 대하여 기술하고자 한다. 7개의 자유도 가운데 4개는 손의 위치를 결정하며 3개는 자세 (orientation)를 주게된다. 이중 가장 중요한 부분은 평면 3 링크를 포함한 4개의 링크설계가 된다. 이 로봇의 경우, 주어진 설계사양은 다음과 같다<sup>(7)</sup>.

(1) 구동방식

AC 토크 링모터를 이용한 직접구동방식

(2) 형상

수평 3자유도계로 수평면에서의 여유자유도를 갖게 하고 수직회전 1축 및 손목부의 3자

유도를 가진 전체적으로는 수평다관절형로봇

(3) 작업공간

SCARA 형태의 로봇과 같이 최대의 팔길이 1330 mm, 수직거리 330 mm

(4) 속도

직접구동 조인트의 특성으로 첨단(tip)속도 약 5 m/sec

(5) 가반하중

그립퍼, 센서 무게포함 고속에서 약 3 kg

(6) 정밀도

16-bit 절대엔코더 사용

이러한 설계사양에 대하여 평면 3자유도 부분의 최적 링크길이를 작업공간, 조작성 및 조건값(condition number)을 매개변수로 하여 선정하고 설계사양, 기구학적 설계 및 몸체설계에 대하여 기술하고자 한다.

#### 3.1 링크 길이의 선정

위의 사양중 주어진 작업공간을 만족시키기 위하여 먼저 각 링크의 길이를 결정하여야 한다. 여유자유도를 가진 로봇에 대한 연구가 세계적으로 많이 수행되었음에도 불구하고 보편적으로 많이 사용되는 평면 3자유도계 로봇의 링크길이는 아직까지 어떤 기준이 없이 선정되어져 왔다. 참고로 현재까지의 연구논문에서

표 1 평면 3자유도 매니플레이터 링크 길이의 예

Case	1링크	2링크	3링크
1.	1	1	1
2.	1	0.5	0.5
3.	0.635	0.508	0.343
4.	0.67	0.432	0.15
5.	0.6	0.8	0.2
6.	7	4	1.5
7.	4	2	1
8.	1	1	0.5
9.	2.414	1.414	1

사용되어진 각 링크길이를 표 1에 나타내었다. 로봇의 기구학적 성능지수는 힘 또는 조작성을 최대로 하는 조건에 기본을 두어 여러가지로 제안되어 왔다<sup>(8)</sup>. 여유자유도 로봇의 Jacobian을  $J \in R^{m \times n} (n > m)$ 라고 할 때  $R^n$ 에서의 단위구  $\|\dot{\theta}\|^2 \leq 1$ 는

$$\dot{x}^T (J J^T)^{-1} \dot{x} \leq 1 \quad (1)$$

로 맵핑된다. 이 타원의 주축은  $J J^T$ 의 고유벡터와 일치하며 Yoshikawa<sup>(8)</sup>는 조작성(manipulability)을 다음과 같이 정의하였다.

$$W = \sqrt{\det(J J^T)} \quad (2)$$

$W$ 는 조작성타원체(manipulability ellipsoid)의 체적으로 표시되며 2링크 로봇의 경우  $W$ 는 링크의 길이가  $l_1 = l_2$ 일 때 최대가 된다. 이 조작성지수를 기준으로 하여 여유자유도 로봇의 링크 길이를 결정하여 보자.

평면 3링크 로봇의 모델은 그림 2와 같고 작업공간에서 주어진 직교좌표에 대하여 여유자유도를 가진 로봇이 취할 수 있는 무한한 형상(configuration)을 다음과 같이  $(x, y)$ 의 원점에서부터의 특성길이(characteristic length)와  $\theta_4$ 로 표현한다. 이때의 역기구학해는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} x' &= x - l_3 \cos \theta_4 \\ y' &= l_3 \sin \theta_4 - y \\ (x'^2 + y'^2 > l_1^2 + l_2^2 : \text{out of workspace}) \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \theta_2 &= -\cos^{-1} \left\{ \frac{x'^2 + y'^2 - l_1^2 - l_2^2}{2l_1 l_2} \right\} \\ \theta_1 &= \text{atan} \left( \frac{y'}{x'} \right) - \text{atan} \left\{ \frac{l_2 \sin \theta_2}{l_2 + l_2 \cos \theta_2} \right\} \end{aligned} \quad (4)$$

$$\theta_3 = -\theta_4 - \theta_2 - \theta_1$$

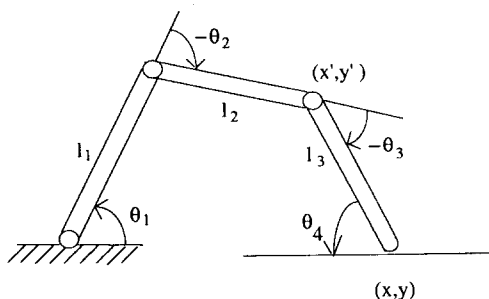


그림 2 평면 3링크 로봇 모델

첫번째 링크의 길이  $l_1$ 을 0.5로 정하고  $l_2 + l_3 = 0.5$ 로 구속한 뒤  $l_2$ 와  $l_3$ 의 최적비를 구하기 위하여 특성길이에 대하여  $\theta_4$ 를 0부터  $2\pi$ 까지 변화시켜가면서 구한 조작성지수의 최대값을 그림 3에 나타내었다. 이 결과를 보면  $l_2$ 가 작을수록 조작성지수가 커지며 이것은 물리적으로 당연한 결과이나 타당한 선택이라고 보기는 어렵다. 그 이유는 또 다른 조건, 즉 여유자유도 로봇이 취할 수 있는 자세의 범위, 즉 역기구학해가 존재하는 영역을 그려보면 그

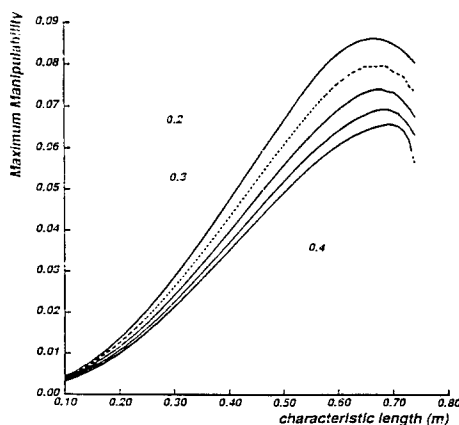


그림 3 최대 manipulability

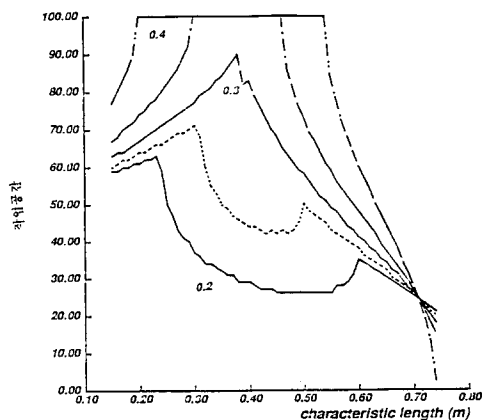


그림 4 링크 길이에 따른 작업공간

반대의 결과를 얻을 수 있기 때문이다.  $\theta_4$ 를 주어진 위치에서  $2\pi$ 까지 변하게 할 때 어떤 영역에서는 역기구확해가 존재하지 않게 되는데 이러한 영역을 뺀 작업공간의 영역을 그림 4에 나타내었다. 이 그림에서 알 수 있듯이  $l_2 \cong 0$ 일 때 작업공간에서 자유로이 임의의 자세를 취할 수 있는 영역이 제일 적음을 알 수 있다.

위의 결과를 종합해 보면 Yoshikawa가 제안한 조작성지수는 중진 링크길이에 대하여 가장 좋은 형상을 찾기 위해서는 좋은 지수가 되지만 여유자유도 로봇의 링크길이를 선정하기 위해서는 좋은 성능지수가 되지 못한다는 사실을 알 수 있다.

본 글에서는 링크의 길이를 정하기 위한 성능지수로 조건값(condition number)<sup>(9)</sup>를 택하여 해석하고자 한다. 조건값  $C$ 는

$$C = \text{Cond}(J J^T) = \frac{\lambda_{\max}}{\lambda_{\min}} \quad (5)$$

로 정의되며  $\lambda_{\min}$ ,  $\lambda_{\max}$ 는  $J J^T$ 의 최소, 최대 고유치이다. 이 조건값의 물리적인 의미는 타원체의 등방성을 나타내며 값이 1일 때 가장 좋은 형태로 해석할 수 있다. 전과같은 방법으로 조건값의 최대치를 주어진 특성길이에 대하여 구한 결과를 그림 5에 나타내었다. 이 그림에서 볼 수 있듯이 최대 조건값의 최소치는  $l_2$ 가 약 0.3~0.35일 때 임을 알 수 있다. 이 값은

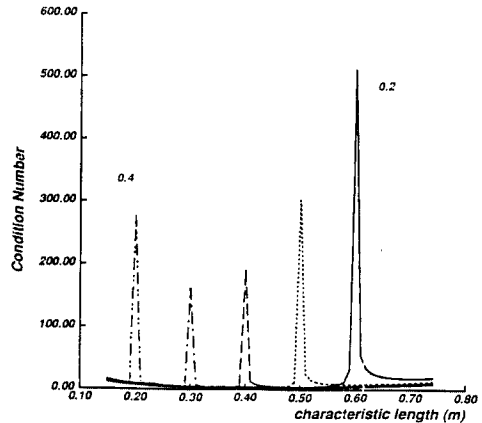


그림 5 링크 길이에 따른 조건값 (condition number)

최대 조건값의 상한치를 주며  $l_2=0.3-0.35$ 일 때 이와 다른 링크 길이의 조합인 경우에 비해 보다 등방성이라는 결론을 얻을 수 있다. 따라서 포항공대 7자유도 직접구동로봇의 경우  $l_2=0.3$ ,  $l_3=0.2$ 로 정하였다. 이 결과  $l_1:l_2:l_3=5:3:2$ 로 이 비율은 잘 알려진 "Fibonacci Sequency"를 따라간다<sup>(10)</sup>.  $l_1=l_2+l_3$ 로 고정되어 움직이는 경우 Yoshikawa의 조작성지수를 최대로 할 수 있다.

### 3.2 모터선정 및 하우징 설계

사용하고자 하는 모터는 무단자 AC 링토크

표 2 선정된 모터 사양

종 류	Cont. Torque (Nm)	Kt(Nm/A)	OD(mm)	길이(mm)	질량(kg)	토크/무게 (Nm/Kg)
조인트 1	25.00	5.69	177.8	102.6	12.1	2.1
조인트 2	16.40	4.28	177.8	76.2	9.6	1.7
조인트 3	11.40	2.85	177.8	51.0	6.9	1.7
조인트 4	16.40	4.28	177.8	76.2	9.6	1.7
조인트 5	2.00	1.14	40.6	51.0	1.5	1.3
조인트 5	2.00	1.14	40.6	51.0	1.5	1.3
조인트 7	0.81	0.22	60.4	48.5	0.6	1.4

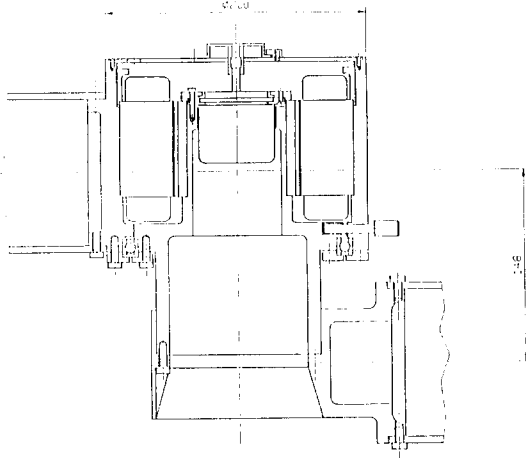


그림 6 설계된 모터 하우징

모터로 영구자석은 최근 많이 사용하고 있는 “neodymium-dysprosium-iron-boron composite”으로 고온에서도 강한 항자력을 가지고 있다. 링토크 모터는 보통의 무단자 AC 모터와는 달리 저속에서 큰 토크를 낼 수 있다는 점에서 유리하다. 주어진 최대속도 및 가속도를 만족하도록 모터용량의 정확한 계산을 위해서는 전산기를 이용하여 반복적으로 설계하여야 하나 간단한 방법으로 모터를 질점으로 단순화하여 이미 결정된 링크길이에 따라 반복적으로 최대 토크를 계산하여 용량을 결정한다. 조인트에 사용된 모터의 사양을 표 2에 수록하였다.

모터의 경우, 가장 중요한 부분은 모터의 하우징 부분으로 열을 빨리 발산시키는 것이 중요하게 된다. 이에 따라 주어지는 모터의 정류자와 하우징간의 가공오차가 중요하게 되며 이것이 적정오차를 넘게 가공되었을 경우 모터의 과열로 인한 성능감소가 생기게 된다<sup>(11)</sup>. 설계된 모터 하우징의 도면을 그림 6에 보였다.

### 3.3 설계시의 주의사항

포항공대 7자유도 직접구동 로봇의 각 부품을 제작할 때의 설계, 가공 및 조립시의 유의사항을 정리하면 다음과 같다.

- (1) 로봇몸체와 하우징은 주로 Al2024-T4 및 Al7075-T6를 사용하여 제작하였다.
- (2) 알루미늄 부분의 대응부분은 303 스테인리스강이나 황동을 사용
- (3) 엔코더는 로봇몸체와 절연되어야 함.
- (4) 몸체의 볼트체결은 “Helicoil Insert”를 사용함.
- (5) 링크 튜브를 몸체에 붙일 때 추후 처짐이 없도록 계산하여 체결한다.
- (7) 배선은 처음 설계단계부터 신중히 고려하여야 한다. 링크 튜브속의 날카로운 부분을 반드시 제거하여야 한다.
- (8) 로봇몸체도 전기적으로 접지되어야 한다.
- (9) 제어기의 오동작으로 인한 사고를 방지하기 위하여 기계적 정지장치를 설치한다. 그러나 다 자유도 로봇의 경우, 이러한 기계적 정지장치를 설치하면 작업공간이 줄어드는 경우가 있다.
- (10) 실험 및 각 축의 보정을 위하여 각 축에 원점(zero position)을 만들어 필요에 따라 고정시킬 수 있게 한다.
- (11) 모터 정류자를 하우징에 고정시킬 때, 벽면에 “Locktite” 등의 접착제를 사용한다. 이때 접착은 최종조립시 행한다. 고정시킬 때의 토크는 미끄럼이 일어나지 않도록 모터 용량에 맞추어서 고정시킨다. (1 축의

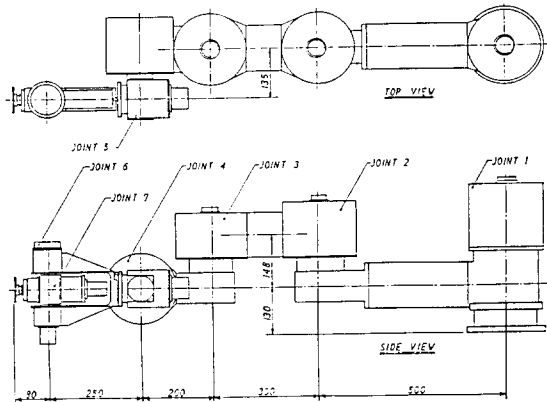


그림 7 설계된 로봇의 외형

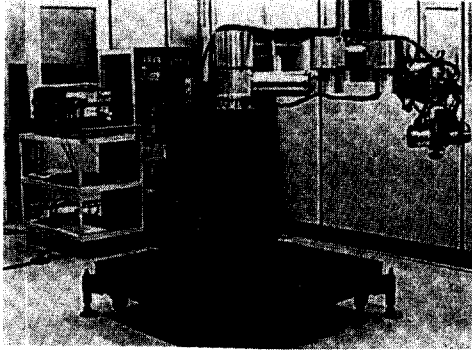


그림 8 포항공대 7자유도 직접구동로봇

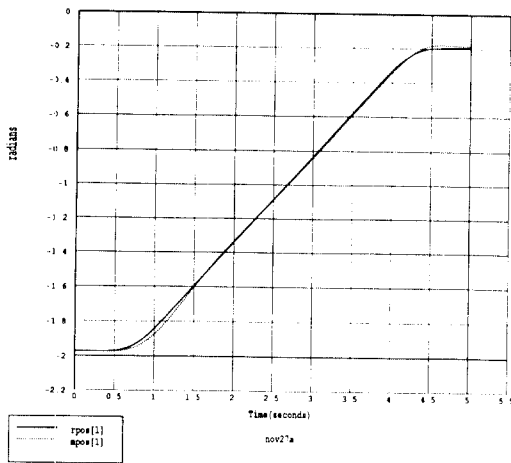


그림 9 경로 추적 성능

경우 : 150 N.m)

(12) 재 분해가 용이하도록 처음 설계시부터 충분히 고려한다.

도면은 CAD을 이용하여 각 부분의 질량, 질량중심 및 관성을 계산하여 추후 로봇의 실시간제어에 이용한다. 조인트 2, 3, 4에서는 1개의 베어링으로 지지하도록 하여 콤팩트한 설계를 하였으며 조인트 1에는 2개의 앵귤러컨택 베어링을 사용하였다. 설계, 제작된 로봇의 모양을 그림 7에 나타내었고, 사진을 그림 8에 보였다. 이 로봇은 Sun 3/160으로 실시간제어가 가능하며<sup>(12)</sup> (sampling rate: 1 Hz~1000

Hz) 주어진 운동 궤적에 대한 응답을 그림 9에 나타내었다.

#### 4. 맺음말

로봇의 설계시 고려하여야 하는 여러가지 면을 기술하였다. 평면 3자유도 링크의 경우 길이비를 “Fibonacci Sequence”를 따라가도록 결정하였으며 여유자유도를 갖는 직접구동로봇의 설계 및 제작시 유의하여야 할 사항을 정리하였다. 몸체설계후 POSTECH DD 로봇을 위한 실시간 제어환경이 구성되었으며 VME버스의 MC68020/68882 프로세서를 탑재한 “one board” 컴퓨터에서 모든 로봇제어 소프트웨어가 수행되었다.

#### 참 고 문 헌

- (1) Kanade, T. and Schmitz, D., 1985, “Development of CMU Direct Drive arm II”, The Robotics Institute, Carnegie-Mellon University, Technical report CMU-RI-TR 85-5
- (2) Asada, H. and Youcef-Toumi, K., 1987, “Direct Drive robots”, The MIT press
- (3) Jeong, K.W., Chung, W.K. and Youm, Y., 1990, “Development of POSTECH 7 DOF Direct Drive Robot”, 3rd ISRAM, British Columbia, Canada
- (4) 이종신, 이영우, 이관형, 1990, “SCARA형 직접구동방식 로봇의 개발에 관한 연구”, ‘90로봇틱스 및 자동화 연구회 workshop, KOEX, pp. 27~31.
- (5) 임계영, 이광남, 고광일, 1990, “직접구동 로봇의 가감속 시간 단축에 관한 연구”, ‘90 한국 자동제어 학술대회, KOEX, pp. 372~376
- (6) Andeen, G.B., 1988, “Robot Design Hand Book”, SRI Intemational, McGraw-Hill Book Co.
- (7) Youm, Y. et al., 1990 “POSTECH 7 DOF Direct Drive Robot”, Technical Report, POSTECH
- (8) Yoshikawa, T. 1984, “Analysis and Control of Robot Manipulators with Redundancy”, 1st Int. Symposium on Robotics Research, pp. 735~747.

- (9) Linear Algebra and its Applicaitons, Gilbert Strang, 3rd ed. HBJ Publishers, 1988
- (10) Kim, J.O., Khosla P.K. and Chung, W.K. 1989 "Static Behaviors of Redundant Manipulators", The Robotics Institute, Carnegie-Mellon University, Tecnical Report, CMU-RI-AML-89-01
- (11) User's Manual, CSR Company.
- (12) Stewart, D.B., Schmitz D.E. and Khosla, P.K. 1989, "CHIMERA: A Real Time UNIX-Compatible Multiprocessor Operating System for Sensor Based Control Applications", The Robotics InStitute, Carnegie-Mellon University, Technical Report, CMU-RI-TR-89-24

