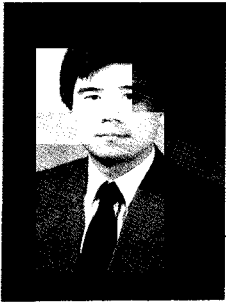


직접구동 로봇의 기구와 요소



김 영 탁

(중앙대학교 기계설계학과)

'79 중앙대학교 졸업
 '89 일본 Kyoto Univ. 공학박사
 현재 중앙대학교 기계설계학과 부교수
 대한기계학회, 일본기계학회, 일본 Robot학회,
 SICE회원



여 인 철

(인천전문대학 기계설계학과)

'79 중앙대학교 졸업
 '81 중앙대학교 대학원 졸업
 현재 인천전문대학 기계설계학과 부교수

1. 서 론

제어시스템의 제어성능의 향상은 하드웨어의 개선에 의한 방법과 소프트웨어의 개선에 의한 두가지 방법이 있을 수 있다. 그러나 많은 경우에, 기계설계자는 주로 시스템 요소의 강도와 기구의 운동모양에만 관심을 두고서 하드웨어를 설계하고, 제어전문가는 소프트웨어에만 의존하여 제어성능을 높이려고 애쓰게 된다. 결국 제어전문가는 정해진 하드웨어에 대하여 소프트웨어에만 의존한 제어성능의 개선에는 한계가 있음을 느끼게 되는 경우가 많다. 이에 대한 근본적인 대책은 역시 하드웨어의 설계단계에서부터 제어성능을 고려한 설계가 이루어져야 한다는 것이다.

본 원고에서는 로봇 시스템의 하드웨어 개선에 의한 제어성능 개선에 대하여 주로 언급하려 하는데 직접구동(Direct-Drive : 이하 DD로 생략함) 방식 로봇은 바로 로봇시스템의 하드웨어를 개선한 좋은 예중의 하나이다.

직접구동방식은 이미 널리 알려져 있는 바와 같이 모터와 부하 사이에 감속기와 같은 동력 전달기구를 생략하고 모터 축과 부하를 직결시킴으로서 전동기구로 부터 기인되는 마찰손실, 강성(剛性)의 저하 그리고 전달 토오크의 맥동등 많은 문제점을 극복할 수 있게 하였고 궁극적으로는 시스템의 고속, 정밀제어를 가능하게 하였다. 이와 같은 DD 방식의 장점을 로봇에 응용하려고 한 것이 DD 로봇의 발상이다.

로봇에 직접구동방식의 채용을 처음으로 제안한 것은 1980년대 초 Asada[1]이다. 그러나 실은 그 이전 부터 각종의 정밀기구나 가전기기 등에는 직접구동방식이 채용되고 있었다[2]. 예를 들면

대형 파라볼라 안테나, 테이프레코더, 컴퓨터 디스크드라이버, 공작기계 등인데 오랜동안 그 효과를 인정받고 있었다.

그런데 로봇에서는, 일반적인 로봇아암 구조가 開 루우프(Open loop) 형태이어서 선단부의 모터는 직접 기저부 모터의 부하가 되므로 가능한 한 소형의 모터를 사용하는 것이 상식으로 통용되었으며, 소형 모터의 작은 출력을 최대한으로 이용하기 위하여 부하와 모터의 임피던스 매칭용으로 감속기를 사용하였던 것이다. 그러나 앞서 언급한대로 감속기로 인한 여러가지 문제점이 지적되었으며 제어성능의 한계를 느끼게 하였다. 이를 해결하기 위한 적극적인 노력으로서 DD 방식의 채용을 시도한 것이다.

로봇의 DD화를 촉진한 요인은 역시 요소기술의 발전이라고 할 수 있다. 요소기술 중에서도 먼저, 높은 토오크-저속구동모터의 출현을 꼽을 수 있다. 그리고 분해능이 높은 센서의 개발도 한 몫을 담당했다고 볼 수 있다. 이러한 주변기술의 발달과 더불어 DD 로봇의 발전은 거듭되었고 실용화에 까지 이르게 되었으며 그 우수성도 인정되었다.

그런데 연구와 개발을 거듭하면서 DD 로봇이 지니게 되는 고유의 결점도 지적되었고 역시 새로운 기구의 출현과 요소기술의 더욱 앞선 발전 없이는 한계에 직면하게 됨을 인식하게 되었다. 본 원고에서는 기구와 요소기술의 발달과 더불어 DD 로봇이 발전하여온 과정을 살펴 보면서 향후 발전방향에 대하여 전망하여 본다.

2. 로봇의 기구

2.1 아암의 경량화

DD 로봇의 최초의 개발품인 CMU-DD Arm은 6자유도의 회전다관절형이었다. 회전다관절형 로봇에서는 손목을 구동하는 모터가 팔꿈치의 부하가 되고 다음에는 손목과 팔꿈치를 구동하는 모터가 모두 어깨를 구동하는 모터의 직접적인 부하로 작용하므로 손목쪽에서 어깨쪽으로 갈수록 모터의 크기가 기하급수적으로 커지게 되고 아

암의 중량 또한 커지게 된다. 따라서 이러한 급격한 중량증가를 방지하기 위해서는 아암의 재질을 강하고 가벼운 것으로 선택해야 되는 것은 물론이고 또 무엇보다 소형 경량의 고성능 모터의 개발이 선행되어야 한다. 그런데 초기개발 당시의 모터 제조기술에는 한계가 있었기 때문에, 최초의 시작품에서는 모터에 보통의 DC 토오크 모터를 이용하였다. 따라서 가반(可搬)중량이 매우 작았으며 기저부모터의 과열로 실용화와는 거리가 멀었다.

그래서 그 후 개선책으로 고려된 것은 로봇의 기구구성이다. 즉 선단의 모터나 아암 중량이 기저부 모터의 직접적인 부하가 되는 것을 방지하기 위한 기구구조인데 아암의 중량은 아암의 기구학적 구조에 크게 의존하기 때문에 기구학적 구조의 개선을 고려한 로봇의 설계는 중요한 의미를 가진다. 이 절에서는 이러한 기구학적 고려를 통하여 개발되었던 DD 로봇에 대하여 열거하고 간략하게 그 특징을 개설한다.

2.1.1 수평다관절형

수평다관절(SCARA : Selective Compliance Assembly Robot Arm)형은 네개의 관절을 가지도록 되어 있으며 직동관절인 선단부의 관절 하나를 제외하고는 회전 3관절축이 모두 수직방향으로써 중력부하를 받지 않게 되는 구조로 되어 있다. 중력부하가 제거되었다고 해도 선단부의 모터가 기저부의 모터에 관성부하로 작용하는 것은 마찬가지이나, 로봇이 정지시에는 거의 모터 토오크가 필요하지 않으므로 회전다관절형에 비해서는 현저한 부하감소의 효과를 얻을 수 있었다. DD 로봇의 상품화 1호기였던 Adept One[3]이 바로 이러한 구조로서 매우 높은 평가를 받았고 현재 상품화 된 DD 로봇의 상당수가 이러한 구조를 하고 있다. 그림 1은 Adept One의 외형이다.

2.1.2 중력평형형(gravity balanced type)

일본의 전자기술 종합연구소가 개발한 DD 로봇 ETA-II[4]에서는 제1, 2 관절이 수직관절구조를 하고 있고 그 이외의 관절에 대해서는 관절을 기준으로 아암이 중력평형을 이루도록 설계되어

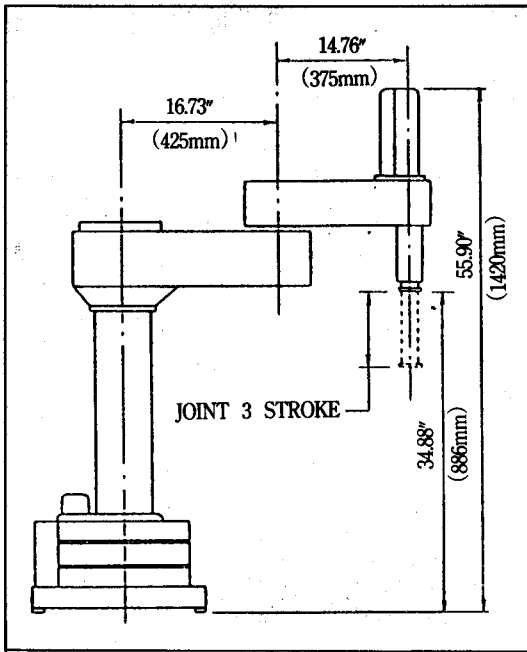


그림 1. Adept One

있다. 그림 2는 ETA-II의 외형을 나타낸다. 또 Minnesota 대학에서 개발한 Statically Balanced DD Manipulator 역시 제1관절이 수직으로 되어 있고 제2, 3 관절이 중력평형을 이루도록 설계되어 있다 [5]. 이러한 구조들에서는 정지시에 대부분의 관

절이 중력부하를 받지않게 되어 부하감소의 효과를 얻을 수 있었다.

2.1.3 병렬링크형

그림 3은 MIT Arm II로서 5링크구조를 이용한 병렬구동방식을 채용하여 경량화를 꾀하고 있다. 즉 2개의 모터를 Base에 고정하고 閉루우프 링크의 구조로서 2차원 운동을 시킨 것인데[6] 중력부하 뿐만아니라 관성부하까지를 감소시킨 예라 할 수 있다. 그림 4는 이 모델을 좀더 세련되게 재설계한 MIT Arm Model III이다.

이 MIT Arm Model III는 3개의 관절을 가지고 있으므로 공간운동은 가능하나 로봇 선단의 자세까지를 제어할 수는 없다. 그런데 단말효과기(End-Effector)가 자유공간내에서 임의의 위치와 자세를 취하기 위해서는 6자유도 이상이 필요하다. 일본 동북대학에서 개발한 HEXA는 6자유도 병렬링크 로봇으로써 6개의 관절 모터를 모두 기저부에 설치한 병렬기구의 예이다[7]. 이 병렬링크에서는 로봇 핸드가 임의의 위치와 자세를 취할 수 있으며 자체중량에 대한 가반중량의 비가 0.17에 달하고 있다. 일반적인 상용로봇에서의 자체중량에 대한 가반중량의 비가 0.01-0.068인 것에 비하면 획기적인 개선이라 할 수 있다. 특히 로봇을 차량과

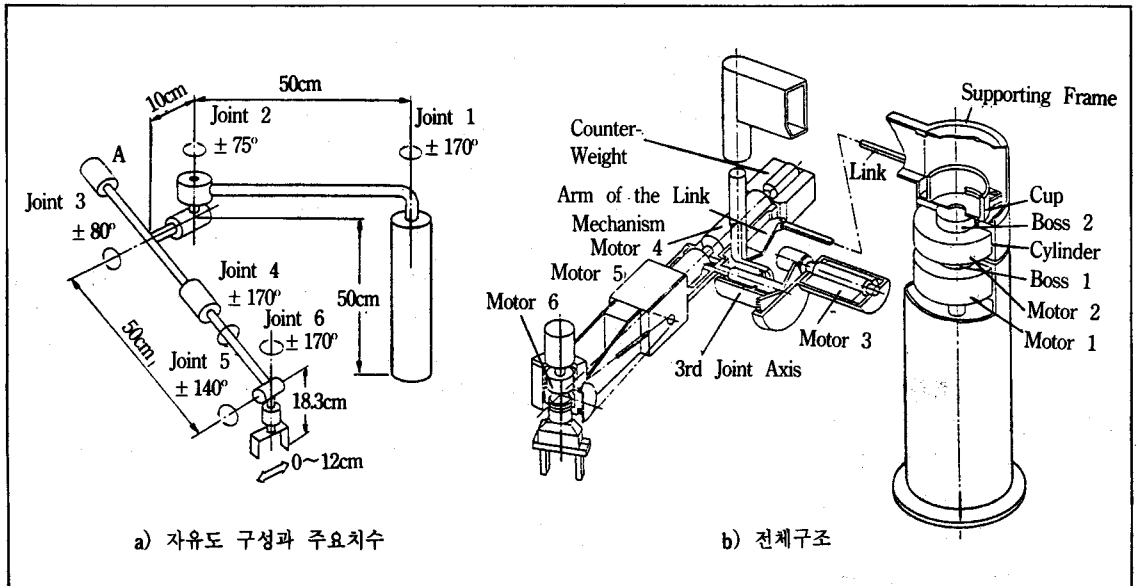


그림 2. ETA-II

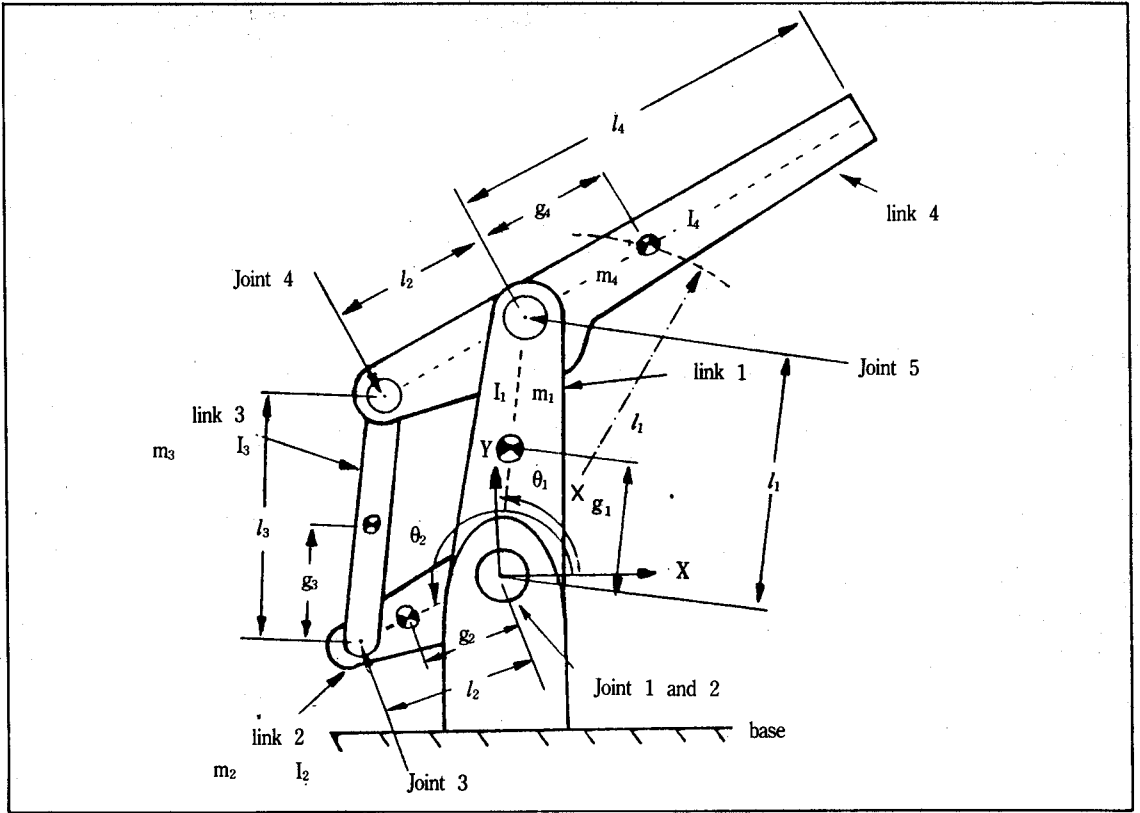


그림 3. MIT Arm II

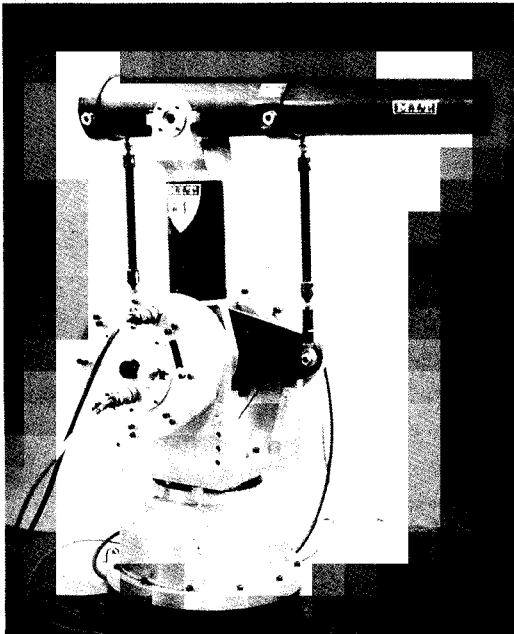


그림 4. MIT Arm Model III

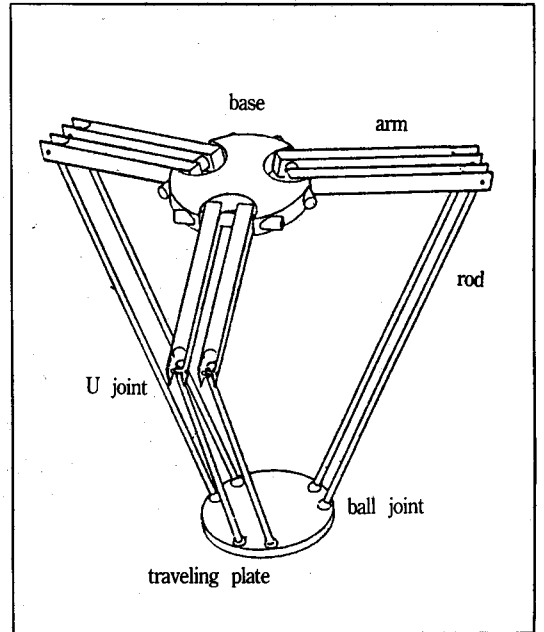


그림 5. HEXA

같은 이동물체에 장착하려 한다면 이같은 자체 중량의 경량화는 큰 장점이라 아니할 수 없다. 향후 DD 로봇 기구의 바람직한 하나의 발전방향으로서 더욱 활발한 연구 개발이 기대된다.

병렬링크는 앞서 언급한 장점을 가지는 반면에 단점도 가지게 된다. 따라서 로봇의 응용 목적에 따라 링크구조에 대한 신중한 검토가 필요하다. 여기서 병렬링크 로봇의 장단점을 일반적인 직렬링크 로봇과 몇가지 항목으로 비교하여 보면 표 1과 같다.

표 1. 병렬링크 로봇과 직렬링크 로봇의 비교

비교항목	병렬링크 로봇	직렬링크 로봇
Workspace	작 다	크 다
Direct Kinematics	복 잡	간 단
Inverse Kinematics	간 단	복 잡
Direct Statics	간 단	복 잡
Inverse Statics	복 잡	간 단
Positional Error	각 관절에서의 오차가 평균화 된다.	각 관절에서의 오차가 누적 된다.
Force Error	누적된다	평균화 된다
Output Power	전 액츄에이터의 출력이 가산된다	최소 액츄에이터에 의해 제한된다
Stiffness	높 다	낮 다
Dynamics	매우 복잡	복 잡
Inertia	작 다	크 다

2.2 동력학적 기구설계

로봇의 응용분야가 다양해지면서 고속운동의 필요성이 대두되게 되고, 고속운동을 하는 로봇에서는 로봇 각 관절간의 간섭력이나 비선형력이 크게되어 각 관절의 독립서어보로서는 원하는 제어정밀도를 확보하기 곤란한 경우가 생긴다. 특히 DD 로봇에서는 감속기가 없으므로 아암의

복잡한 다이내믹스가 직접 관절모터에 반영되어 고속일수록 제어정밀도의 문제가 심각해진다[8]. 따라서 동적인 제어의 필요성이 제기되었고 계산토크제어나 비선형제어 등이 제안되었다. 그러나 이러한 제어방법들은 방대한 제어연산을 필요로 하여 샘플링 타임을 길게 하므로 역시 고속운동의 제약이 된다. 또한 가공작업이나 조립작업과 같이 로봇이 작업대상과 기계적인 접촉을 이루는 작업에 있어서는 로봇과 작업대상 사이에 발생하는 접촉력의 시정수가 수 ms 이하로서 제어연산 부담이 더욱 중요한 문제가 된다.

로봇의 동적인 제어에 있어 제어연산의 부담은 로봇의 동역학 방정식의 복잡성으로부터 기인하고 동역학 방정식은 로봇의 기계적인 구조에 의해 좌우된다. 그러므로 제어계의 설계에만 의존하지 말고 기계구조의 설계단계에서부터 바람직한 동특성을 가지도록 기구나 질량분포를 개선할 필요가 있다. 이 절에서는 로봇 동역학 방정식을 단순화할 수 있는 로봇설계법에 대하여 설명한다. 일반적으로 로봇의 운동방정식은 i 번째의 모터 출력 토크를 τ_i , 외부로부터 작용하는 외력 토크를 τ_e , 회전각도를 θ_i 라고 하면

$$H_i \ddot{\theta}_i + \sum_{j=1}^n H_{ij} \dot{\theta}_j + \sum_{j=1}^n \frac{\partial H_{ik}}{\partial \theta_j} \dot{\theta}_j - \frac{1}{2} \frac{\partial H_{ik}}{\partial \theta_i} \dot{\theta}_i^2 + \tau_{wi} = \tau_i + \tau_e \quad (1)$$

와 같이 된다. 식의 좌변 첫번째 항 H_{ii} 은 i 번째 관절 모터에 걸리는 관성부하를 나타내고 제2항은 다른 관절로부터의 간섭토크를, 제3항은 코리올리력과 원심력이라 불리는 비선형력을, 제4항은 중력토크를 나타낸다.

MIT Arm Model II는 링크의 구조와 질량분포를 변화시킴으로써 아암 동특성의 선형화 및 비간섭화를 이룩한 좋은 예이다. 이른바 비간섭 일정관성 아암으로써 각 모터에 작용하는 부하는 아암의 자세에 의존하지 않고 항상 일정하게 되기 때문에 항상 일정한 안정성과 응답성이 유지된다. 더우기 제어대상을 단일 입력 단일 출력계로 취급할 수 있어서 제어연산량이 현저하게 감소 된다. 그러면 여기서 그 MIT Arm Model II의 설계사상에 대하여 좀 더 자세히 관찰하여 보자.

그림 3에 나타낸 바와 같은 평행링크기구의 아암에 있어서 질량 파라미터(질량 m_i , 관성모멘트 I_i , 질량중심의 위치 g_i)와 링크길이를 이용하면 그 관성행렬은 다음과 같다.

$$H = \begin{pmatrix} H_{11} & H_{12} \\ H_{12} & H_{22} \end{pmatrix} \quad (2)$$

여기에서

$$\begin{aligned} H_{11} &= I_1 + m_1 g_1^2 + I_3 + m_3 g_3^2 + m_4 l_1^2 \\ H_{12} &= (l_2 m_3 g_3 - l_1 m_4 g_4) \cos(\theta_1 - \theta_2) \\ H_{22} &= I_2 + m_2 g_2^2 + I_4 + m_4 g_4^2 + m_3 l_2^2 \end{aligned}$$

이다. 그런데 만약 H_{12} 가 0이 될 수 있다면 식(1)의 제2항이 0이 된다.

H_{12} 가 0이 될 수 있는 조건은 우선 $\theta_1 - \theta_2 = \pm 90^\circ$, 즉 2개의 링크가 직교하는 상태에서만인데 이것이 항상 만족되려면 아암이 자유롭게 움직일 수 없으므로 의미가 없다. 그래서 삼각함수의 계수 $(l_2 m_3 g_3 - l_1 m_4 g_4) = 0$ 이 되도록 하는 것을 생각해 보자. 즉

$$\frac{m_4}{m_3} \frac{g_4}{g_3} = \frac{l_2}{l_1} \quad (3)$$

이 되면 운동방정식의 제2항이 영이 된다. 더구나 이러한 구조에서는 관성행렬의 대각요소가 모두 관절 각도와는 무관하게 되므로 제3항도 영이 되어 운동방정식은 아암의 자세에도 무관하고 간섭력과 비선형력도 제거된 매우 간단한 형태가 된다. 즉 중력을 무시한다면 선형 1입력 1출력계로 볼 수 있어 각 관절의 독립서어보 만으로도 고속운동에서 제어정밀도를 확보할 수 있게 된다.

그런데 이 방법이 다자유도로 직접 확장되지는 못하고 있다. 즉 6자유도 이상의 로봇에 대하여 비간섭 일정관성을 가지는 로봇은 아직 연구되어 있지 않으며 단지 Yang[9]은 직렬 링크에서 동력학 방정식의 부분적인 선형화 및 단순화가 가능함을 보였다. 향후 다자유도 로봇에 대한 동력학 방정식을 보다 단순화 할 수 있는 기구구조의 연구가 요망된다.

2.3 Collocated 구조의 설계

2.2절에서는 DD 로봇의 약점을 보완할 수 있는 설계방법에 대하여 논하였다. 여기서는 DD 로봇의 장점을 확대할 수 있는 설계방법으로서 센서와 액츄에이터가 같은 곳에 설치될 수 있도록 한 이른바 Collocated 구조에 대하여 논한다.

제어시스템에 있어서 극과 영점의 수의 차(number of poles-number of zero)는 제어의 어려움을 나타내는 하나의 지수로서 그 수가 2보다 클 때는 루우프 이득을 높게 함에 따라 계가 불안정하여 질 우려가 있다. 그런데 극과 영점의 수의 차는 센서와 액츄에이터 사이에 탄성체의 존재 여부 그리고 액츄에이터 운동(회전 또는 병진)부의 질량(또는 관성모우멘트)의 크기에 의존한다[10]. 이른바 Collocated 구조인가 Non-Collocated 구조인가에 의존한다.

로봇 센서로서는 기본적으로 위치센서(관절각도 센서)가 쓰여지는데 흔히 아암 측에 설치하게 된다. 따라서 감속기를 사용하는 로봇에서는 모터축과 센서 사이에 존재하는 감속기가 탄성체 역할을 하여 Non-Collocated 구조가 된다. 이에 반하여 DD 로봇에서는 아암측에 위치센서를 설치한다 해도 모터축과 센서 사이에 탄성체가 존재하지 않으므로 Collocated 구조가 된다.

그런데 문제는 토오크센서와 같은 탄성체를 삽입시킬 경우이다. 최근 토오크센서를 이용한 고도의 제어방식이 제안되어 효과를 입증하고 있고 DD 모터의 경우 토오크 맥동(Ripple)을 해소하기 위한 목적으로 쓰여진 예도 있어 토오크센서의 이용도가 높아지고 있는데 토오크센서를 설치할 경우 DD 로봇이라 할지라도 Non-Collocated 구조가 될 수도 있다.

Asada는 탄성체(토오크센서)를 가능한 한 모터의 회전자 측에 가깝게 설치하면, 탄성체를 기준으로 회전자의 관성이 아암측의 관성에 비하여 무시할 수 있을 정도로 작게 설계될 수 있다고 했다. 이는 결국 Collocated 구조가 된다[10]. Asada는 이러한 구조를 계의 고유진동수 상승이라는 측면에서 설명하고 있다[11].

3. 모터

3.1 DD 모터로서 필요한 특성

일반적인 모터에 비하여 DD 모터에서는 특별히 다음과 같은 사양이 중요시 된다.

3.1.1 출력토크

DD 방식이 가능하기 위해서는 우선 발생토크가 커야 한다. 예를 들어 로봇의 구동에 이용하려면 보통의 감속기를 사용하는 서어보모터에 비해 50-100배 정도의 토크가 필요하다.

3.1.2 토크 맥동(Ripple)

DD 모터는 토크의 맥동이 적어야 한다. DD 방식에서는 모터 출력의 맥동이 직접 부하에 전달되므로 생각지 못한 진동이 발생하거나 제어성의 저하를 초래할 수 있다. 특히 토크의 맥동은 저속운동시의 속도불균일이나 토크제어시의 오차요인으로 작용하는 경우가 많다.

3.1.3 효율

단위량의 전력소비에 대하여 큰 출력 토크가

요구된다. 이른바 기계적인 임피던스 매칭이 이루어진 상태에서 사용되는 모터에 비하여 DD 모터는 파워효율이 나쁜 사용조건에서 구동된다. 따라서 부하에 비해 큰 모터가 필요한 경향이 있다. 이 약점을 개선하여 극복하는 기술이 DD 모터의 개발에 필수적이다.

3.1.4 직선성

속도와 토크의 선형성, 토크와 입력전류의 선형성은 제어의 용이함을 결정하는 중요한 특성이다. 모터자체의 특성은 비선형성이 크더라도 구동 앰프의 각종 보상에 의해 선형성을 개선하는 방법이 있으며, 모터의 구조를 개선하여 선형성을 향상시키는 방법도 있다.

3.1.5 (토크/중량)비

로봇등의 다자유도 시스템에 DD 모터를 응용하는 경우, 모터자체의 중량이 다음판질의 모터에 부하로 작용하므로 경량화가 절실히 요구된다.

3.2 각종 DD 모터의 원리와 특성비교

표 2는 각종의 DD 모터에 대한 원리와 특성을

표 2. 각종 DD 모터의 원리와 특성 비교

토크 발생원리	명 칭	특 징
전자력 형	DC 토크 모터	<ul style="list-style-type: none"> • 토크가 크다. • 직선성이 양호하다. • 토크 맥동이 적다. • 효율이 높다.
	영구자석식 동기모터 (Brushless DC 모터)	<ul style="list-style-type: none"> • 피크토크가 크다(정격의 3-5배) • 직선성이 좋다. • 토크 맥동이 적다. • 브러시 등의 보수가 불필요하다. • (토크/중량)이 크다.
VR형(Variable Reluctance Type)	Variable Reluctance 모터	<ul style="list-style-type: none"> • 연속토크가 크다. • 모터정수가 크다. • 저렴하다.(영구자석 불필요, Unipolar Power Amp) • 동손(銅損)이 적어 효율이 높다. • 브러시 등의 보수가 불필요하다. • 자기포화에 의한 토크맥동이 크다.
	Hybrid DD 모터	<ul style="list-style-type: none"> • 효율이 높다. • 연속토크가 크다. • 브러시 등의 보수가 불필요하다.
특수형	초음파 모터	<ul style="list-style-type: none"> • 소형이다. • 고정자와 회전자와는 마찰력을 발생시키기 위해 밀착하게 되므로 정지시의 브레이크가 불필요

비교한 것이다.

3.3 DD 모터의 상품화 사례

DD 모터의 상품화 사례는 미국, 일본에서 두드러지게 나타나고 있는데 원고작성을 위한 시간의 제약때문에 일본회사의 자료만을 중심으로 소개하게 되는 것을 안타깝게 생각하면서 독자들의 양해를 구한다.

3.3.1 메가토오크 모터

메가토오크모터는 일본의 日本精工(株)가 개발, 많은 판매실적을 가진 DD 구동용 모터로서 DD 로봇의 상품화 1호기인 Adept One이 이 모터를 사용하고 있다. 그림 6은 메가토오크 모터의 구조를 나타내는데 이 모터는 크게 나누어 모터부와 검출부로 구성되어 있다[12].

모터부는 VR형 스텝핑모터의 일종으로 고정자가 안쪽과 바깥쪽의 양쪽에 있고 그 사이를 링 형태의 회전자가 회전하는 구조로서 회전자의 안팎 양쪽에 토오크가 발생하여 높은 토오크가 얻어지게 되어 있다. 한편 회전제어는 통상의 AC 서보모터와 동일한 제어를 하게 된다.

검출부는 다극리졸버로 불리는 형으로서 모터의 고정자와 회전자의 적층판을 이용하여 값싸게 높은 분해능의 검출특성을 얻도록 되어 있다. 검출원리는 모터가 회전함에 따라 검출기 고정자쪽 이 와 회전자쪽 이 사이의 자기저항(Reluctance) 변화를 리졸버 제어회로에 의해 디지털화하여 위치신호로 사용하는 것이다. 리졸버 제어회로의 분해능은 614,400 p/rev 정도까지 달성 가능하며 이 위치신호는 모터 각상의 정류(commutation)에도 이용된다.

3.3.2 brushless DC 모터

brushless DC 모터는 일본의 新明和工業(株)와 多摩川精機(株)가 많은 실적을 가지고 있다. 양사 모두 영구자석동기형을 채용하고 있으며, 특히 新明和工業(株)의 brushless DC 모터는 MIT DD Arm 시리즈에 계속 사용되었다.

영구자석 동기기형 brushless DC 모터는 AC

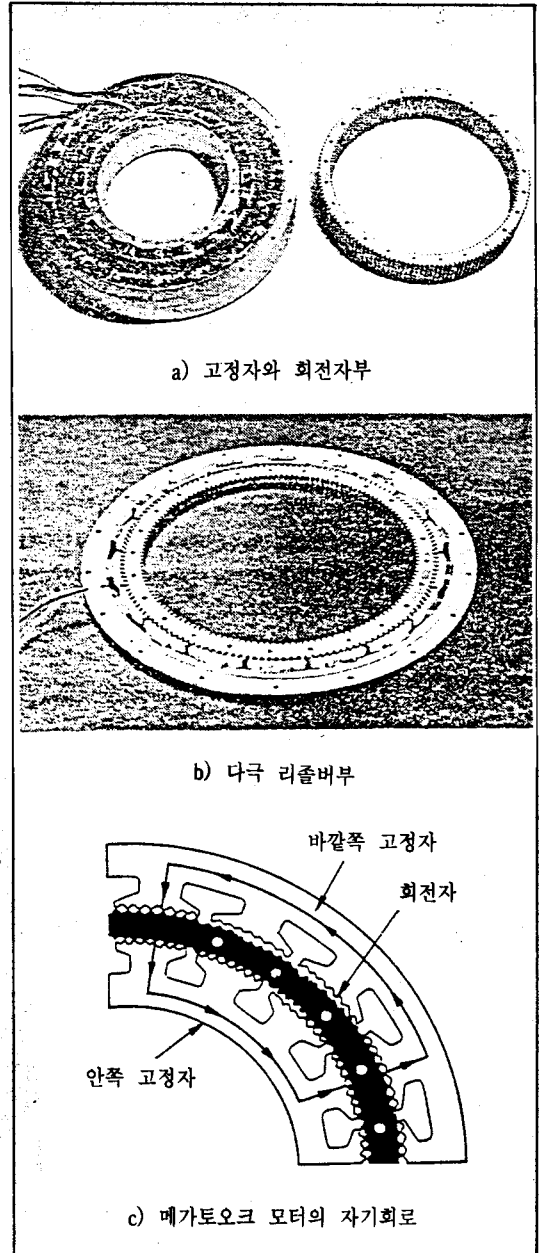


그림 6. 메가토오크 모터(日本精工)

모터이면서도 전류-토오크 특성이 DC 모터와 같이 직선적인 것으로 부터 brushless DC 모터라는 명칭이 유래되었으며, 전류-토오크 특성이 직선적이 되는 원리를 간단히 설명하면 다음과 같다. 회전자에는 여러극의 영구자석이 부착되어 있고 고정자에는 권선이 감겨져 있는 구조로 되어 있

는데 고정자 권선의 U, V, W상에 회전자의 위치에 대응시켜 3상 정현파전류 I_u, I_v, I_w 를 흘려 보낸다.

$$\begin{aligned} I_u &= I_m \sin \theta \\ I_v &= I_m \sin(\theta - 2\pi/3) \\ I_w &= I_m \sin(\theta - 4\pi/3) \end{aligned} \quad (4)$$

여기서 I_m 은 전류 지령값으로 각 상전류의 최대치이다. 이때 영구자석으로 부터 발생하여 3상의 각 권선 U, V, W에 직교하는 자속밀도는 각각

$$\begin{aligned} B_u &= B_m \sin \theta \\ B_v &= B_m \sin(\theta - 2\pi/3) \\ B_w &= B_m \sin(\theta - 4\pi/3) \end{aligned} \quad (5)$$

로 나타낼 수 있다. 여기서 B_m 은 영구자석의 세기에 따라 결정되는 자속밀도의 최대치이다. 이 때 발생하는 토오크는 전류와 자속밀도의 곱에 비례(비례상수는 k 라고 하자.)하고 각 상의 토오크 합이 모터의 전 토오크가 된다. 즉 전 토오크 T는

$$\begin{aligned} T &= k I_u B_u + k I_v B_v + k I_w B_w \\ &= k I_m B_m \{ \sin^2 \theta + \sin^2(\theta - 2\pi/3) + \sin^2(\theta - 4\pi/3) \} \\ &= (3/2) K_o I_m \end{aligned}$$

여기서 $K_o = k B_m$ 으로서 한 상의 토오크정수라고 불리운다. (6)식에서 알 수 있는 바와 같이 모터로부터 발생되는 토오크는 전기자 전류의 피크치 I_m 에 직선적으로 비례하고 회전자의 위치 θ 에는 의존하지 않는다. 즉 DC 모터와 등가이다.

그림 7은 新明和(株)의 brushless DC 모터인데 회전자에는 희토류(rare earth) 자석이 촘촘히 부착되어(즉 극수를 많게 하여) 저속에서도 유연한 회전을 하도록 궁리하고 있다. 이 모터는 위치센서와 결합되어 서보앰프로 제어된다[13].

3.3.3 DYNASERV

DYNASERV는 일본의 Yokogawa Precision(株)가 개발한 DD 모터시스템으로서 그림 8은 모터부 구성도이다. 하이브리드(hybrid) DD 모터의 일종

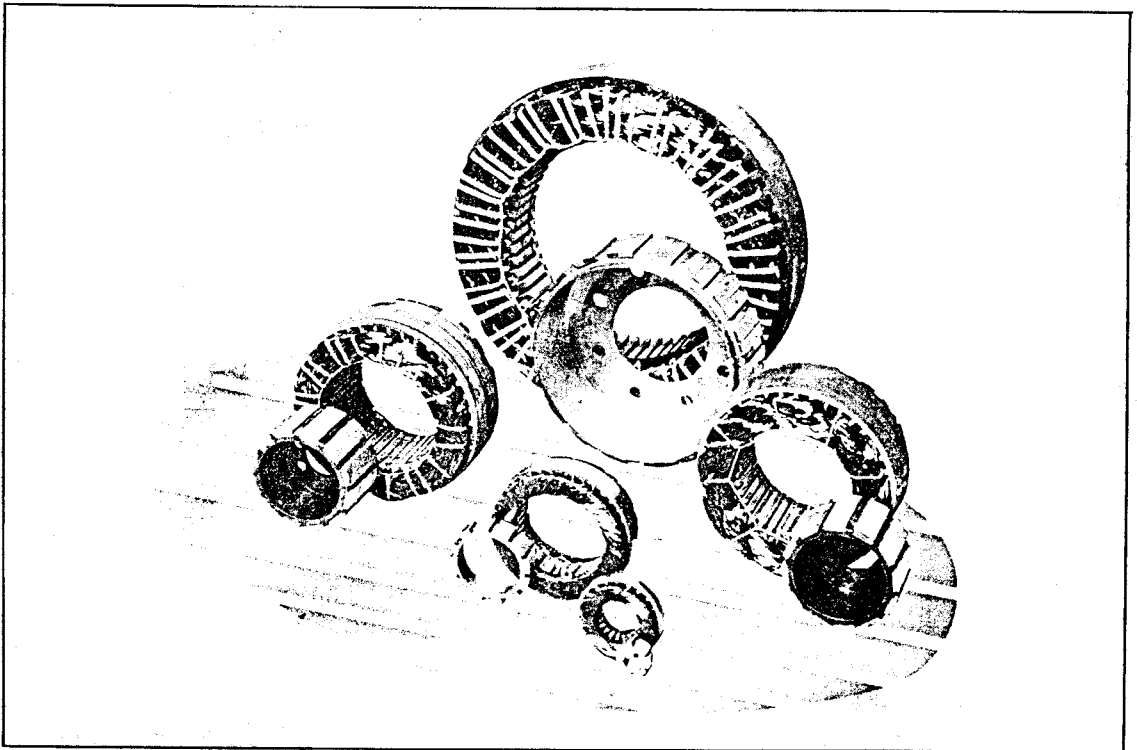


그림 7. 新明和(株)의 brushless DC 모터.

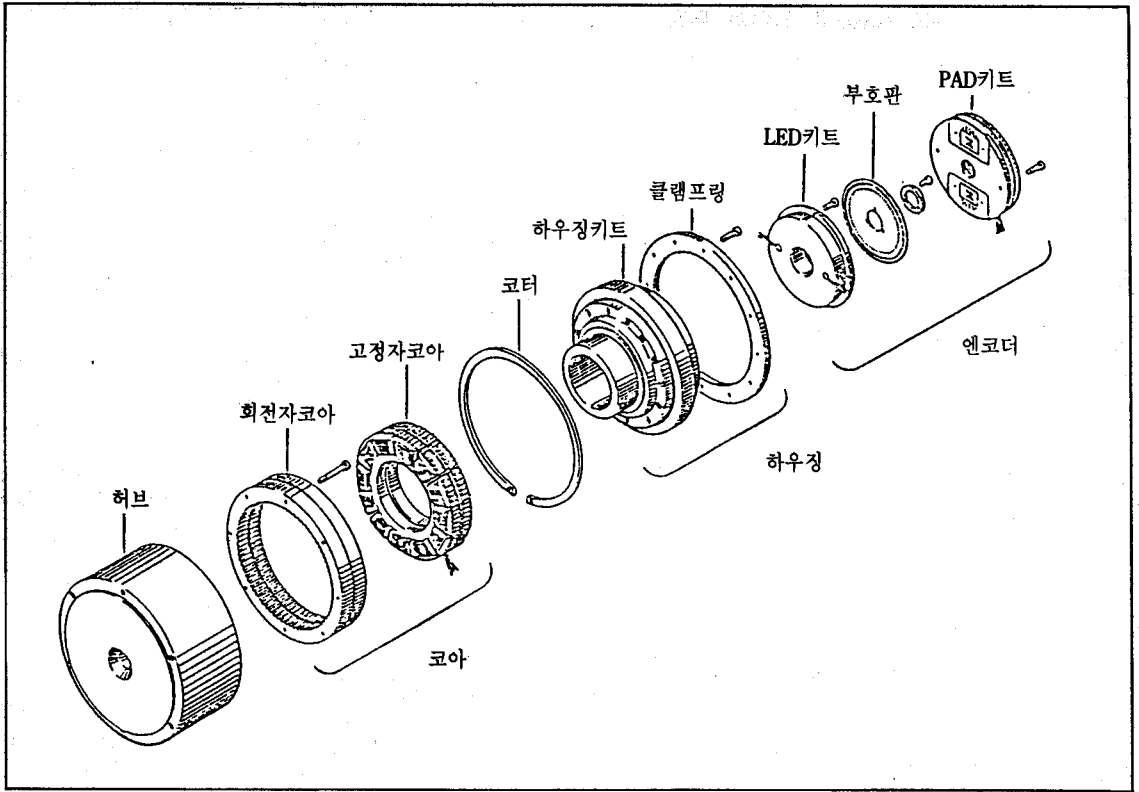


그림 8. DYNASERV 시스템의 모터 구성도

으로서 하우징에 고정된 고정자와 그 바깥 쪽을 회전하는 회전자로 구성된다. 회전자와 고정자에는 각각 이가 형성되어 있고 이수는 서로 다르며 이의 위치관계는 PM형의 3상 스텝모터와 같다. 그리고 특히 고정자에는 영구자석을 삽입한 자기 바이어스 방식을 채용하여 모터의 토크-전류 특성의 개선에 노력을 기울이고 있다.

3.3.4 초음파 모터

초음파모터의 원리는 압전 세라믹에 수십 kHz의 교류전압을 가하여 초음파 진동을 시키고 그 고체진동을 마찰력을 통하여 회전자를 회전시키는 것이다. 본래 얻어지는 초음파진동의 진동진폭은 수 μm 로 매우 작지만 진동주파수가 수십 kHz이기 때문에 그 진동속도는 수십 cm/sec 로 부터 1m/sec 정도까지도 되어 이것과 접촉하여 움직이는 회전자도 거의 같은 정도의 속도가 된다.

전기, 기계 에너지 변환소로서 초음파 발생용

진동자는 높은 변환효율 및 단위체적당 축적에너지 밀도가 높은 장점이 있다. 따라서 소형경량 이면서 큰 토크를 발생시킬 수 있고 효율이 높은 모터의 실현을 가능하게 하리라 기대되었다. 특히 저속-대 토크, 제어성 및 응답성의 양호 등 대부분 DD 모터가 갖추어야 할 조건들을 갖추고 있어 차세대의 DD 모터로서 기대되고 있다.

초음파 모터에서 가장 문제가 되는 것 중에 하나는 수명인데, 최근의 기술은 굴곡진동형의 경우 무부하상태에서 3000시간, 부하상태에서 500시간 까지 달성가능하다고 한다[14]. 500시간의 수명은 액츄에이터로서 간헐적으로 사용할 경우 10년의 사용가능 년수를 의미하여 일반적인 실용화에도 그리 멀지 않은 듯 하다.

표 3은 지금까지 실제 제작된 바 있는 초음파 모터들의 종류와 특징을 나타내고, 그림 9는 일본의 SINSEI가 개발한 진행파형 초음파 모터 사례를 나타낸다.

표 3. 초음파모터들의 종류와 특징

종 류	특 징
진동편형	구조가 간단, 비교적 고속구동 가능, 수명이 문제
진행과형	이상형, 소형화가 곤란, 선형 운동에 적합, 비교적 고속구동 가능
굴곡과형	회전운동 전용, 소형화 가능
비틀림 결합자형	회전형, 구조가 간단

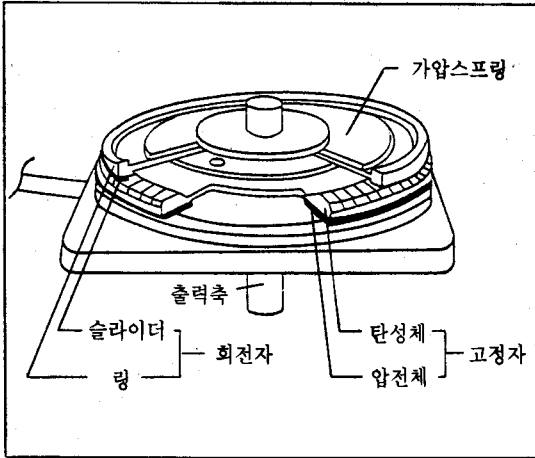


그림 9. 초음파모터의 구조(SINSEI)

3.3.5 다자유도 모터

로봇 제어에 역운동학의 해를 구하는 것은 필수적인 과정인데, 연속된 3개의 관절축이 한점에서 교차하여야 한다는 것이 역운동학을 해석적으로 풀기위한 기구구조 충분조건이다(Piper의 정리). 또한 로봇의 동력학 측면에서도 끝단 3개의 관절의 질량중심이 한곳에 모여 있다면 동력학 방정식을 단순화 시키는데 있어 큰 기여를 하게 된다[15]. 이러한 두 조건을 만족하는 모터로서 다자유도 모터가 생각될 수 있는데 Toyama[16]는 초음파를 이용한 3자유도 모터를 개발하였으며, Yano[17]는 동기기형의 3자유도 모터를 개발하였다. 그림 10은 Toyama가 제시한 다자유도 모터의 개념도이다.

아직은 초기 개발단계이지만 향후 DD 로봇의 손목관절로서 응용이 기대된다.

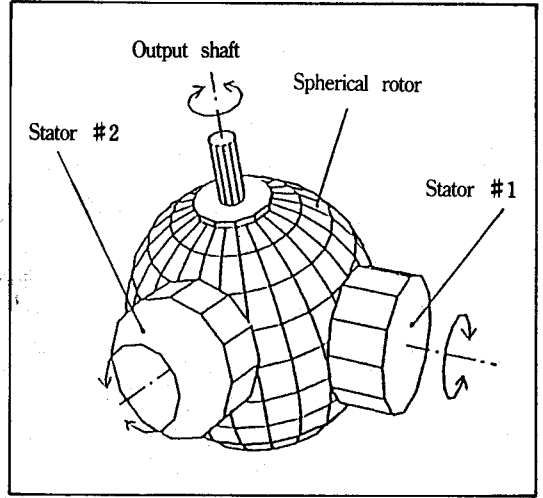


그림 10. 다자유도 모터의 개념도

4. 센서

높은 정밀도의 제어를 위해서는 높은 정밀도의 서어보 모터, 컨트롤러, 센서가 삼위일체가 되어야 한다. 특히 DD 로봇에서는 감속기를 사용하는 일반적인 로봇에 비해 감속비 배수 이상의 센서 정밀도가 요구된다. 예를 들어 감속비가 100인 감속기를 채용하는 일반적인 로봇에서 1000[pulse/rev.]의 관절각도 센서로서 만족하였다면 DD 로봇에서는 비슷한 정밀도를 유지하기 위하여 1000 × 100[pulse/rev.] 이상의 관절각도센서가 요구된다. 이 절에서는 각종 센서의 개발현황과 비교 그리고 동향에 대하여 기술한다.

4.1 위치센서

4.1.1 엔코더

엔코더는 원리에 따라 자기식(磁氣式)과 광학식이 있다. 자기식은 LED와 같은 전기소비 장치가 없으므로 저소비전력이며 구조가 간단하고 튼튼하다는 장점은 있으나 회전체(자기드럼)의 관성이 크고 높은 분해능이 곤란하여 광학식 엔코더에 비해 성능이 뒤떨어진다. 앞서 언급하였듯이 DD 모터용 엔코더는 높은 분해능이 요구되고 또 최근에는 엔코더 신호의 F/V 변환을 통하여 속도 신호로도 이용하는 경향이 많아 엔코더의 더욱

높은 분해능이 요구되는데 이러한 측면에서 광학식 엔코더가 각광을 받고 있다.

엔코더의 개발현황을 보면, 일본의 MICRO-TEC(株)이 32400 p/rev(직경 130mm)의 광학식 엔코더를 개발-판매하고 있으며[18] 松下電器(株)는 레이저를 이용하여 최고 1,152,000p/rev의 엔코더를 개발하였다[19].

4.1.2 리졸버

리졸버는 아날로그 검출이기 때문에 높은 분해능을 얻을 수 있고 광학식 엔코더 등에 비하여 충격이나 고온 등 악환경에 강하다는 특징이 있다. 그러나 신호처리가 복잡하여 비용이 비싸게 되는 문제점이 있어 특별한 목적을 제외하고는 차츰 엔코더에게 그 자리를 빼앗기고 있는 것이 현실이다.

4.2 속도센서

속도센서로서 일반적인 것이 DC 타코미터제네레이터(tachometer generator : 이하 TG로 생략함)이다. TG는 아날로그 전압으로서 속도검출신호를 출력하므로 정밀한 신호를 얻기 위해서는 회전부의 관성이 작고 브러시로 인한 접촉을 제거하는 것이 바람직하다. 즉 비접촉식인 브러시 없는 TG의 개발이 요구되고 있으나 최근에는 높은 분해능의 엔코더나 리졸버의 발전으로 엔코더 신호의 F/V 변환이나 리졸버 신호의 R/D변환에 의한 속도검출이 일반화 되어 가고 있다.

4.3 토오크센서

DD 로봇의 고도한 제어를 위해 토오크센서를 이용한 제어가 효과적임이 입증되었으며[20], [21] 토오크센서를 내장한 모터가 YASUKAWA(株)로부터 상품화된 예도 있다[22].

YASUKAWA(株)의 토오크센서 모터에서, 토오크센서는 회전자 축을 중공(中空)축으로 하여 그 안에 출력축을 삽입하고 출력축과 회전자축 간에는 토션바(torsion bar)로 연결한 구조이다. 이 토션바의 비틀림에 의한 회전자 축과 출력축 사

이의 비틀림 각도를 전자회로에 의해 픽업하여 토오크를 검출하도록 되어 있다. 그런데 이 경우 토션바에 의한 강성의 저하가 진동의 원인으로 작용할 우려가 있다. 이것에 대한 대책은 앞서 동력학적 설계에서 언급한 바 있다.

5. 맺음말

DD 방식은 산업로봇 구동의 이상형이라고 할 수 있다. 특히 섬세한 작업, 접촉력 제어가 필요한 고도의 작업에 매우 적합한 구동방식으로 평가 받고 있는데 아직은 해결하여야 할 많은 문제점도 안고 있는 것이 사실이다. 본 원고에서는 DD 로봇의 기구와 요소 즉 하드웨어 측면에서 발전해온 현황을 살펴보고 향후 발전해 가야 할 방향을 전망하여 보았다. 최근의 눈부신 주변 요소기술의 발전에 힘입어 DD 로봇이 또 한번 도약의 기회를 맞이하게 될 것을 기대한다.

참 고 문 헌

- 1) H. Asada, T. Kanade, et al., "Design Concept of Direct-Drive Manipulators Using Rare-Earth DC Torque Motors", Proc. of 11th ISIR, 629-636, 1981.
- 2) 山田, 精密小モータの基礎と應用, 綜合電子出版社, 1975.
- 3) R. Curran and G. Mayer, "The Architecture of the ADEPT One Direct-Drive Robot", Proc. of 1985 American Control Conference, pp. 716-721, Boston, 1985.
- 4) 高瀬, "直接駆動及び低比率減速駆動方式を併用したトルク制御マニピュレータ", 第22回計測自動制御學會學術講演會豫告集, pp. 121-122, 1983.
- 5) H. Kazerooni, "Statically Balanced Direct Drive Manipulator for Constrained Maneuvers", IEEE International Workshop on Intelligent Robots and Systems Programs, October 1988, Japan, pp. 579-584, 1988.
- 6) H. Asada and K. Youcef-Toumi, Analysis and Design of a Direct-Drive Arm with a Five-Bar-Link

- Parallel Drive Mechanism, ASME Journal of a Dynamic Systems, Measurement and Control, Vol. 106, No. 3, 225-230, 1984.
- 7) フランソワ・ピエロ, 内山 勝, ピエル。ドシエ, アラン・フルニエ, “6自由度パラレルロボットの新設計”, 機械の研究, Vol. 44, No. 2, pp. 281-288, 1992.
 - 8) H. Asada and K. Youcef-Toumi, Direct-Drive Robots, The MIT Press, 1987.
 - 9) D. C. H. Yang and S. W. Tzeng, “Simplification and Linearization of Manipulator Dynamics by the Design of Inertia Distribution”, The International Journal of Robotics Research, Vol. 5, No. 3, pp. 120-128, 1986.
 - 10) 金寧鐸, H. Asada, “力制御ロボットの動特性解析とコロケトな システムの設計”, 第32回システムと制御研究発表講演會 豫告集, pp. 381-382, 1988.
 - 11) Asada, H. and Lim, S. K., “Design of Joint Torque Sensors and Torque Feedback Control for Direct-Drive Arms”, Proceedings of the 1985 ASME Winter Annual Meeting, Robotics and Manufacturing Automation Symposium, pp. 277-284, 1985.
 - 12) Tadao Inomata, Kazuhiro Kagita, “メガトルクモータのFAにおける使い方と應用例”, 機械設計, Vol. 31, No. 13, pp. 58-66, 1987.
 - 13) 山本裕敏, “ブラシレスDCモータの特性とDDモータへの適用”, 機械設計, Vol. 31, No. 13, pp. 46-52, 1987.
 - 14) 秋山勇治, “超音波モータの特性とDDモータへの應用”, 機械設計, Vol. 31, No. 13, pp. 53-57, 1987.
 - 15) 이종원, 김영탁, 권영용, 한경, “3자유도 집중관절을 갖는 로봇트 매니플레이터의 동력학적 해석”, 중앙대학교 생산공학연구소 논문집, Vol. 1, No. 1, pp. 1-26, 1992.
 - 16) S. Toyama, S. Hatae, S. Saga, “超音波モータによるロボット用アクチュエータの開発”, 第9回日本ロボット學會學術講演會豫告集, pp. 39-40, 1991.
 - 17) T. Yano, Y. Yoshida, “回轉中心を同一とする多自由度アクチュエータ”, 第9回日本ロボット學會學術講演會豫告集, pp. 411-412, 1991.
 - 18) MICROTECH LABORATORY INC. 카탈로그
 - 19) 松下電器産業(株) 技術資料, 1992. 5. 11.
 - 20) 金寧鐸, H. Asada, “光學式トルクセンサーを内蔵したダイレクトドライブロボットの動的コンプライアンス制御”, 日本 Robot 學會誌, Vol. 7, No. 2, pp. 3-12, 1989.
 - 21) K. Kosuge, H. Takeuchi and K. Furuta, “Control of Robot Arms using Joint Torque Sensors”, Proceedings of SICE'87, pp. 359-360, 1987(in Japanese).
 - 22) YASKAWA NEWS, No. 211, pp. 12, 1983.