

産業用 로봇의 制御 및 關聯技術과 研究課題

卞增男*, 徐一弘*, 黃承浩

韓國科學技術院 電氣 및 電子工學科 (工博)*

I. 머리말

약 20년전에 소개된 산업용 로봇이 점용접 기능을 갖는 로봇으로부터 출발하여 오늘날의 조립용 로봇이 있기까지의 발달 과정을 검토해 보면 여러 가지 관련 기술중에서도 특히 제어 기술이 가장 중심적인 역할을 하고 있음을 알 수 있다.

초기의 단순기능로봇은 시퀀셜 오픈 루우프 컨트롤 방식을 이용한 전용 자동 기계 장치에 가까운 것이었으나 플레이백 컨트롤의 개념이 도입되어 점용접은 물론 기계가공, 열처리 작업 등에서 로봇화 작업의 종류가 확대되었다. 기술적으로는 다관절형 로봇의 조작기술과 소프트웨어를 통한 디지털 서어보 제어 기술, 로봇용 언어의 개발, 또는 대상 작업의 패턴화에 대한 과학적 조직적 연구를 통하여 아크용접 또는 도장용 로봇의 성능이 개선되고 조립용 로봇의 출현이 가능하게 되었으며 시각 및 촉각의 감지 및 리얼타임 신호처리 기술 발달과 함께 클로즈드 루우프 컨트롤의 실현성이 높아지고 있다. 산업용 로봇의 제어장치를 중심으로 광의로 해석하여 제어 기능을 조사해 보면,

- i) 오퍼레이팅 패널 신호 처리 기능
- ii) 로봇 소프트웨어 프로그램의 편집 기능
- iii) 동작 시퀀스 제어 기능
- iv) 서어보 시스템의 제어 기능
- v) 지령치 연산 기능

등이 포함된다. 그러나 본문에서는 가장 어려운 문제로 되어 있는 지령치 연산 및 서보제어 문제를 중심으로 조사한 연구 결과의 동향등을 소개하고자 한다.

II. 로봇트 머니플레이터의 카이네마틱스와 다이내믹스

로봇트 머니플레이터가 공간상에서 하여야 하는 동

작을 기술하고 또 이동작을 제어하기 위하여는 운동 (motion)의 기하학적 구조 즉 카이네마틱스와 힘 또는 토크에 의한 모션의 발전에 관한 관련수학 즉 다이나믹스를 알아야 제어이론의 적용 개발이 가능하다.

1) 카이네마틱스

여러 조인트를 갖는 로봇트 머니플레이터의 엔드에 팩트를 원하는 위치 및 방향으로 옮기고 싶을 때 쉽게 측정 및 제어할 수 있는 것은 실제로 각 조인트 베리아블이므로, 우리는 우선 엔드 에팩트의 위치 및 방향과 각 조인트 베리아블들 사이의 기하학적 관계를 알 필요성이 있다.

이와 같은 관계식은 로봇트 머니플레이터의 기하학적 구조에 따라 달라지며, 이를 유도하는 방법으로서는 기하학을 이용하는 방법⁽¹⁾과 코디네이트 트랜스퍼메이션 방법⁽²⁾이 있다.

기하학을 이용하는 방법은 코디네이트 트랜스퍼메이션 방법에 비해서 간단하나 일반적으로 많은 조인트를 갖는 로봇트 머니플레이터에는 적용하기가 어렵다. 이에 반하여 코디네이트 트랜스퍼메이션 방법은 많은 조인트 베리아블을 갖는 일반적 로봇트 머니플레이터에 적용 가능하기 때문에 흔히 사용된다. 본 방법의 개념을 간단히 서술하면 다음과 같다.

한 좌표계와 그에 이웃한 좌표계를 연관시키고자 할 때는 코디네이트 트랜스퍼메이션을 하여야 하는데, 이때 트랜스퍼메이션은 3×3 로테이션 매트릭스와 3×1 오프셋 쿼텨 벡터로서 표시된다. 그러므로 전체 트랜스퍼메이션 매트릭스는 3×4 매트릭스가 되는데 이것은 수학적으로 다루기가 어려우므로 $\{0001\}$ 의 로우 벡터를 마지막 로우로 하는 4×4 매트릭스를 트랜스퍼메이션 매트릭스로 사용한다. 그림 1에 도시되어 있는 조인트 메카니즘의 두 좌표계를 생각하자. 여기서 j좌표계를 기준으로한 공간상의 한점의 위치는

컬럼 벡터 $j_p = [x, y, z, 1]^T$ 로 표시하고, $(j+1)$ 좌표계를 기준으로한 같은 점의 위치를 $j+1_p = [x, y, z, 1]^T_{j+1}$ 라고 할 때 J_p 와 $J+1_p$ 의 관계는 다음과 같다.

$$j_p = [jA_{j+1}] j+1_p \quad (1)$$

여기서

$$\begin{bmatrix} \cos\theta_j & -\cos\alpha_j \sin\theta_j & \sin\alpha_j \sin\theta_j & a_j \cos\theta_j \\ \sin\theta_j & \cos\alpha_j \cos\theta_j & -\sin\alpha_j \cos\theta_j & a_j \sin\theta_j \\ 0 & \sin\alpha_j & \cos\alpha_j & s_j \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

식(2)에서 상 좌측의 3×3 파티션은 j 좌표계를 기준으로한 $(j+1)$ 좌표계의 로테이션 매트릭스이고 상 우측의 3×1 컬럼벡터는 j 좌표계를 기준으로한 $(j+1)$ 좌표계의 오프셋를 나타낸다.

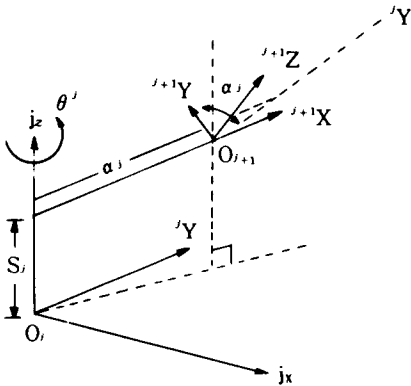


그림 1. 두 좌표계 파라미터 관계

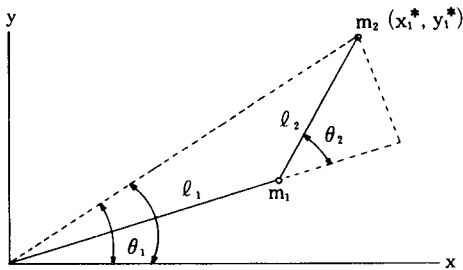


그림 2. 기하학을 이용한 카이네마틱스 유도 방법

같은 방법으로 여러개의 조인트가 있는 경우 각각의 섹시브 코디네이트 시스템과 관련되는 매트릭스 A가 존재하며 이와 같은 매트릭스들의 체인 프로덕트를 취함으로써 베이스 코디네이트에 의한 엔드 에펙터의 포지션 및 오리엔테이션을 나타낼 수 있다. 즉,

$$AEQ_j \cong {}^1A_2 \cdot {}^2A_3 \cdots {}^{j-1}A_j, \quad \text{for } j=2, 3, \dots, N$$

이라고 하면 AEQ_j의 상 좌측의 3×3 파티션은 1 좌표계를 기준으로한 J좌표계의 오리엔테이션을, 상 우측의 3×1 파티션은 좌표계 1에서 본 좌표계 J의 오리진까지의 포지션 벡터가 된다. 이렇게 구한 AEQ_j는 다음과 같이 이용될 수 있다.

$$X = AEQ_j \cdot q$$

여기서 x는 베이스 좌표계에서의 포지션 벡터 q는 j 좌표계에서의 포지션 벡터인데 보통 사람이 코맨드로 주는 양은 x로 나타내는 것이 쉽다. 이때 실제로 서보가 구동해야 하는 물리량을 윗식으로 부터 구하게 된다. 간단한 예를 들어 보자.

[예 1] 2차원 공간에서 질점 m_2 가 기준좌표계에 대한 위치를 (x_1^*, y_1^*) 이라 하고, 실제 서보가 구동해야 하는 양을 (θ_1, θ_2) 로 하자. 또 간단히 하기 위해 hand (m_2)의 오리엔테이션을 고려하지 않도록 한다. 그러면 AEQ는 다음과 같이 구해진다. 그림 2에서 호모지니어스 트랜스퍼메이션 AEQ는

$$AEQ = {}^1A_2 \cdot {}^2A_3$$

$$= \begin{bmatrix} \cos\theta_1 & -\sin\theta_1 & l_1 \cos\theta_1 \\ \sin\theta_1 & \cos\theta_1 & l_1 \sin\theta_1 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos(\theta_1 + \theta_2) & -\sin(\theta_1 + \theta_2) & l_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) \\ \sin(\theta_1 + \theta_2) & \cos(\theta_1 + \theta_2) & l_2 \sin(\theta_1 + \theta_2) \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$= \begin{bmatrix} \cos(\theta_1 + \theta_2) - \sin(\theta_1 + \theta_2) & l_1 \cos\theta_1 + l_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) \\ \sin(\theta_1 + \theta_2) & \cos(\theta_1 + \theta_2) & l_1 \sin\theta_1 + l_2 \sin(\theta_1 + \theta_2) \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

로서 구할 수 있다. 이제 위치 목표점을 link 2의 끝점으로 하면 이는 좌표계 3의 원점이 되어 다음과 같은 식을 얻는다.

$$\begin{bmatrix} x_1^* \\ y_1^* \\ 1 \end{bmatrix} = AEQ \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}$$

따라서,

$$x_1^* = l_1 \cos\theta_1 + l_2 \cos(\theta_1 + \theta_2)$$

$$y_1^* = l_1 \sin\theta_1 + l_2 \sin(\theta_1 + \theta_2)$$

가 되며, 주어진 x_1^*, y_1^* 에 대한 실제 이동 물리량 θ_1, θ_2 는 다음과 같은 관계를 갖는다.

$$\begin{cases} \tan\theta_2 = \frac{-l_2 \sin\theta_1 x_1^* + (l_1 + l_2 \cos\theta_1) y_1^*}{l_2 \sin\theta_1 y_1^* + (l_1 + l_2 \cos\theta_1) x_1^*} \\ \cos\theta_2 = \frac{(x_1^2 + y_1^2) - (l_1^2 + l_2^2)}{2 l_1 l_2} \end{cases}$$

일반적으로 호모지니어스 트랜스퍼메이션을 다음과 같은 벡터식으로 표시할 수 있다. 즉,

$$X=f(q) \quad (3)$$

여기서 x 는 베이스 코디네이트를 기준으로한 벡터이고 q 는 각 조인트 베리어블의 실제 디스플레이먼트를 나타내는 벡터이다. 식(3)은 위치에 대한 변환 공식으로 생각할 수 있는데 경우에 따라서는 위치 보다도 오히려 속도에 대한 변환 공식이 더욱 요구되는 경우도 있다. 이를 위하여 기준 좌표계에 대한 속도 dx/dt 와 각 조인트들의 속도 dq/dt 와의 관계를 구하여 본다. 먼저 식(3)을 시간에 대하여 미분하면 다음과 같다.

$$dx/dt \triangleq \dot{x} = df(q)/dt = [\partial f(q)/\partial q] [dq/dt] = [\partial f(q)/\partial q] \cdot \dot{q} \quad (4)$$

여기서 Jacobian matrix $\partial f/\partial q$ 를

$$J \triangleq \partial f/\partial q$$

라고 정의하면 J 의 ij -번째 엘리먼트 J_{ij} 는 다음과 같다.

$$J_{ij} = \partial f_i / \partial q_j \quad (5)$$

이제 식(4)로부터

$$\dot{x} = J(q) \dot{q}$$

인데 주어진 속도 입력 \dot{x} 에 대한 각 조인트의 속도 \dot{q} 는

$$\dot{q} = J^{-1}(q) \dot{x}$$

로 구할 수 있다(단, 여기서 편의상 J 는 인버터블하다고 가정하였음). 그러나 이와같은 Jacobian matrix는 위에서 보았듯이 식(5)로부터 구하기가 어렵다. 왜냐하면 식(3)으로부터 주어진 식은 초월함수를 포함하여, 식(5)에서 각 엘리먼트가 너무 복잡하고 실제 계산이 어려워 보통은 [15]에서와 같이 공간 기하학을 이용하여 구한다.

2) 다이내믹스

머니플레이터 다이내믹스는 로봇트 머니플레이터의 운동방정식을 구하는 것으로서 머니플레이터의 카이네마틱스 및 머니플레이터의 각 링크에 대한 관성등에 따라서 결정되며, 다이내믹스의 유도과정에 대한 어려움 및 복잡성은 거의 머니플레이터의 degree of freedom에 달려 있다. 실제 운동 방정식을 구하는 데에는 흔히 Lagrangian(혹은 kinetic potential)을 사용하며⁽⁴⁾ Newton-Euler formulation을 이용하기도 한다⁽⁵⁾

일반적으로 멀티조인트 머니플레이터의 운동 방정식은 논리니어 디퍼렌셜 이쿠에이션으로 표시된다. 다음은 6-degree of freedom을 갖는 머니플레이터의 일반적인 운동 방정식이다⁽⁶⁾. (그림 3 참조)

$$I(q)\ddot{q} + V\dot{q} + F(q, \dot{q}) - G(q) = T \quad (6)$$

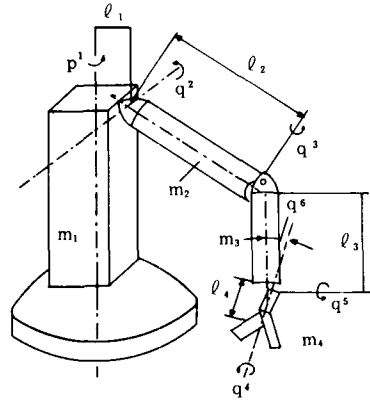


그림 3. 6 자유도의 머니플레이터의 예

식(6)에서 q 는 6개의 조인트에서의 실제 디스플레이먼트를 나타내는 6차원 벡터이며, \dot{q} 및 \ddot{q} 은 q 의 시간에 대한 1계, 2계 미분을 나타낸다. 또한 $I(q)$ 는 6×6 inertia matrix로서 머니플레이터의 컨퍼규레이션에 따라 바뀌므로 q 의 함수로 표시되고, v 는 6×6 다이아고널 비스코스 브릭션 매트릭스로서 각 조인트에 대한 자기 자신의 속도에만 비례하는 항이다.

$F(q, \dot{q})$ 는 coriolis' force와 센트리퓨갈포오스 텀을 나타내는 6×1 벡터인데 이것은 각 조인트 간에 작용하는 논리니어 컵플링 효과를 준다. 속도가 작을수록 이 항은 다른 항에 비해 줄어들지만 속도가 커지면서도 미널트한 항으로 나타날 수 있어 다음장에서 기술할 컨트롤에 어려운 문제를 주게 된다.

$G(q)$ 는 중력에 의한 항을 나타내는 6×1 벡터이며, T 는 인풋제네랄라이즈드 포오스를 나타내는 6×1 벡터이다. 이제 식(7)의 컬럼 벡터 T 의 각 엘리먼트에 대해 다시 풀어 쓰면 다음과 같다.

$$T_i = \sum_{k=1}^n I_{ik}(q) \ddot{q}_k + \sum_{k=1}^n \sum_{l=1}^n C_{ikl}(q) \dot{q}_l \dot{q}_k + q_i(q) \quad (7)$$

예를 들어 그림 2에 주어진 투 링크 머니플레이터의 운동방정식은 카이네마틱 릴레이션을 이용하고 Lagrangian equation을 풀면

$$\begin{aligned} T_1 = & \text{Torque at joint 1} \\ = & [(m_1+m_2)l_1^2 + m_2l_2^2 + 2m_2l_1l_2 \cos\theta_2] \ddot{\theta}_1 \\ & + [m_1l_1^2 + m_2l_1l_2 \cos\theta_2] \ddot{\theta}_2 \\ & - 2m_2l_1l_2 \sin(\theta_2) \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 - m_2l_1l_2 \sin(\theta_2) \theta_2^2 \\ & + (m_1+m_2)gl_1 \sin\theta_1 + m_2gl_2 \sin(\theta_1+\theta_2) \end{aligned}$$

$$T_2 = \text{Torque at joint 2}$$

$$= [m_1 \ell_1^2 + m_2 \ell_1 \ell_2 \cos(\theta_2)] \ddot{\theta}_1 + m_2 \ell_2^2 \ddot{\theta}_2 - 2 m_2 \ell_1 \ell_2 \sin(\theta_2) \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 - m_2 \ell_2 \ell_1 \sin(\theta_2) \dot{\theta}_1^2 + m_2 g \ell_2 \sin(\theta_1 + \theta_2)$$

III. 로봇트 머니퓰레이터에 대한 제어 방법

로봇트 머니퓰레이터 컨트롤은 매순간 순간의 시간마다 머니퓰레이터의 위치와 방향을 규정한, 주어진 리퍼런스 모션 트라젝토리를 따라가도록 하는 머니퓰레이터의 액추에이터(예 : DC서보 모터)를 위한 인풋 시그널 $u(t)$ 를 만들어 내는 것을 말한다. 이에는 조인트 모션의 직접적 컨트롤을 위한 서보메카니즘 레벨 컨트롤 스트레테지나 머니퓰레이터 레벨 컨트롤로 나누어 생각할 수 있다. 특히 후자를 위하여는 먼저 매 시간간격마다 베이스 코디네이트(기준 좌표계)를 기준으로 주어진 리퍼런스 모션 트라젝토리에 대응하는 머니퓰레이터의 각 조인트 베리아블의 위치나 속도 혹은 가속도를 구하여야 한다. 이들을 구하는 방법으로는 위치(q_d)일 경우에는 전장에서 언급한 바와 같

은 코디네이트 트랜스퍼메이션을, 속도(\dot{q}_d)일 경우에는 [5]의 리솔브드 모션 레이트(RMR) 방법을, 가속도(\ddot{q}_d)일 경우에는 [7]의 리솔브드 모션 액셀러레이션(RMA) 방법을 이용할 수 있다. 이들 각각에 대한 개념을 그림 4에 도시하였다. 이 그림에서 $f(q)$ 는 식 (3)에, $J(q)$ 는 식 (5)에 있으며, 그림 4의 (c)는 $\dot{x} = J(q) \dot{q}$ 을 한번 미분함으로써 얻은식, 즉 $\ddot{x} = [\partial J(q)/\partial t] \dot{q} + J(q) \ddot{q}$ 으로부터 구해진 것이다. 이와같이 구한 q_d , \dot{q}_d 및 \ddot{q}_d 이 각 조인트의 리퍼런스 코멘드 시그널로서 주어졌을 때, 앞에서 언급한 로봇트 머니퓰레이터 다이나믹 시스템이 이들 리퍼런스 커멘드 시그널을 효율적으로 따라가도록 하는 컨트롤 펌크션 $u(t)$ 를 구하는 것이 본 분야의 문제이다.

이에는 다음과 같은 테크닉이 있다.

1. Simple Linear Servo Control

페인팅이나 웰딩 등 머니퓰레이터의 속도가 그다지 빠르지 않은 경우에 사용하는 방법으로서 현재까지도 자주 이용된다. 이 컨트롤 방법은 로봇트 머니퓰레이터가 저속으로 움직일때는 각 조인트 마다의 컨트롤드 서보시스템들의 상호 간섭 작용이 무시될 만큼 작아서는 비선형 한 머니퓰레이터 및 액추에이터의 다이나믹스를 각각의 조인트 마다의 독립된 리니어 컨트롤드 서보시스템으로 생각할 수 있다는 것에 착안을 둔 것이다. 즉, 각 조인트마다의 컨트롤드 서보시스템의 컨트롤 인풋은 컨트롤드 서보시스템의 스테이트 베리아블들의 리니어 컴비네이션으로 주어진 소위, 스테이트 피이드백으로 결정하거나, 이와 더불어 스테디 스테이트 오프셋을 없애기 위하여 인테그랄 액션을 첨가하기도 한다.^[8] 이상과 같은 리니어 컨트롤 방법은 공작기계의 뉴메리칼 컨트롤에도 많이 사용한다.^[9]

2. Computed Torque Method

위에서 언급한 리니어 서보 컨트롤은 실제 로봇트 머니퓰레이터의 요구되어지는 속도가 클 때는 적용하기 어렵다. 그 이유는 전장에서도 언급 하였듯이 머니퓰레이터 다이나믹스가 매우 비선형적이기 때문이다. 즉,

- i) 관성의 이펙티브 모멘트가 상수가 아니라 조인트의 위치의 함수이며,
- ii) 각 조인트 마다의 토크 커플링이 심하며,
- iii) 각 조인트 속도의 급들에 비례하는 coriolis force가 존재한다는 사실 때문이다.

예를 들어, 어떤 위치에서의 고정된 관성을 기준으

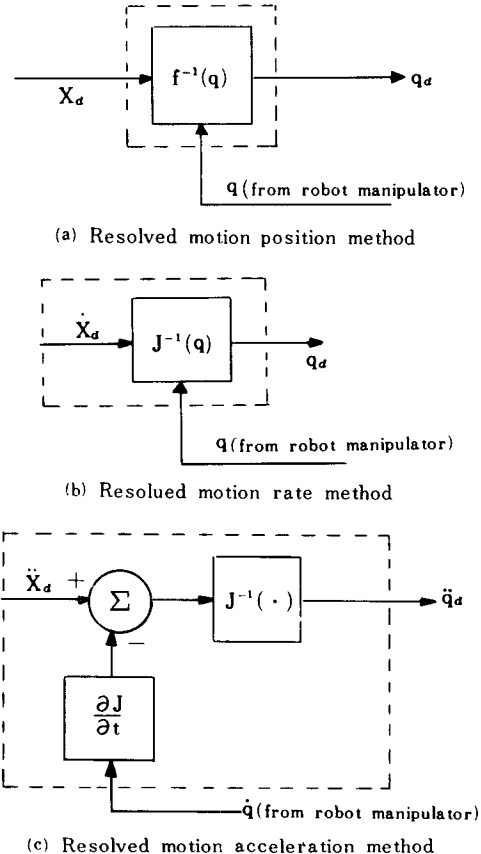


그림 4. 조인트 베리아블 계산 방법들

로 리니어 컨트롤러의 계인을 조정했다면, 이 컨트롤러는 다른 위치에서의 관성에 대해서도 좋은 컨트롤을 기대하기 어렵다.

또한 리니어 컨트롤은 식 (7)의 각 조인트 토크 T_i 안에 존재하는 크로스 커플링을 고려치 않았으며, 매우 큰 스피드에서의 coriolis force가 관성이나 그래비테이션 포오스 보다 커지게 되는 현상을 고려치 않은 것이어서, 좋은 다이내믹스 출력 특성을 기대하기가 어려우며, 심지어는 오버럴 시스템이 불안정하게 될 수가 있다. 이와 같이 리니어 컨트롤 방법이 일반적으로 로봇 머니플레이터 컨트롤에 적용하기 어려워 고안해낸 것이 컴퓨터드 토크 컨트롤 방법이다. 이들은 [10]-[15]에서 제시된 방법으로서, 기본 개념은 주어진 머니플레이터 다이내믹스 시스템의 수학적 모델에 매순간 순간마다 원하는 trajectory(예: $q_d, \dot{q}_d, \ddot{q}_d$)를 대입하여 이에 해당하는 토크 T 를 구하는 것으로서 그림 5에 도시된 바와 같이 인버스 컴퓨터이션 시스템을 이용하는 개념이다.

그림 5에서는 인버스 계산에 필요한 상태변수인 q, \dot{q} 및 \ddot{q} 를 계산에 의하여 구한 $q_d, \dot{q}_d, \ddot{q}_d$ 을 이용하거나 인버스 계산을 위한 모델과 실제 시스템과의 차이에서 발생하는 에러를 효율적으로 다루기 위해서는 원하는 상태 변수를 사용하기 보다는 실제 시스템의 상태 변수를 측정하여 이용하는 것이 바람직하다.

이에는 다음과 같은 2 가지 방법이 있다.

i) 인버스 시스템의 3 가지 입력(q, \dot{q}, \ddot{q}) 중에서 속도(\dot{q})를 구하고 가속도(\ddot{q})는 \dot{q} 를 미분하여 구하여, 위치(q)는 실제 시스템의 위치 출력을 측정하여 인가하는 방법

ii) 인버스 시스템의 3 가지 입력중 가속도(\ddot{q})를 계산에 의하여 구하고, 속도(\dot{q})와 위치(q)는 실제 시스템의 출력을 측정하여 인가하는 방법

다음 절들에서는 위의 2 가지 인버스 계산 방법에 의거한 제어 방법들의 특징을 살펴보기로 한다.

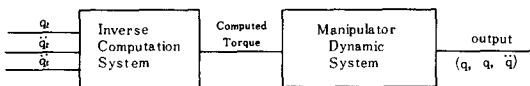


그림 5. 컴퓨터드 토크 컨트롤 방법의 개념도

1) RMRC (Resolved Motion Rate Control)

이 방법은 위치 에러가 발생할 경우에는 인버스 모델의 새 입력중 \dot{q}_t 를 $(x_d - x_a)$ 로 하였으므로, 반드시

q_t 이 존재하게 되어 위치 에러가 0으로 수렴할 때까지 머니플레이터를 움직이게 하므로 원하는 위치 제어를 할 수 있는 것에 근거를 둔 것이다.^[10]

그렇지만 이 방법은 Jacobian matrix (J)의 역변환을 해야 하므로 J의 역변환이 존재할때만 성립한다.

이와 같은 이유로 실제로는 J의 역변환이 존재하는 자유도가 6개인 로봇에만 사용되었다. 사실 자유도가 6개보다 많은 경우에는 J의 pseudo inverse를 이용하기도 하나 이를 구하는 계산이 복잡하여 실시간(real time) 계산이 어렵다.^[10]

2) RMAC (Resolved Motion Acceleration Control)

본 방법은 머니플레이터 다이내믹스 시스템의 압력 토크를 계산하기 위해 앞에서 언급한 (b)의 방법을 이용한다. 구체적으로 인버스 시스템의 3 가지 입력중 가속도 \ddot{q}_d 를 RMA 계산에 의하여 구한 가속도 원하는 \ddot{q}_a 즉 $\dot{x} = J(q) \ddot{q}$ 으로부터,

$$\ddot{q}_a = J^{-1}(q) (\ddot{x}_d - (\partial J(q)/\partial t) \dot{q}_d) \quad (8)$$

과, 원하는 위치 q_a 와 실제위치 q 의 차이 및 원하는 속도 \dot{q}_d 와 실제속도 \dot{q} 의 차이의 선형 조합을 합한 것으로 이를 수식적으로 표현하면,

$$\ddot{q}_t = \ddot{q}_a + k_v(\dot{q}_d - \dot{q}) + k_p(q_d - q) \quad (9)$$

과 같다. 이 제어 방법을 도시한 것이 그림 6이다.

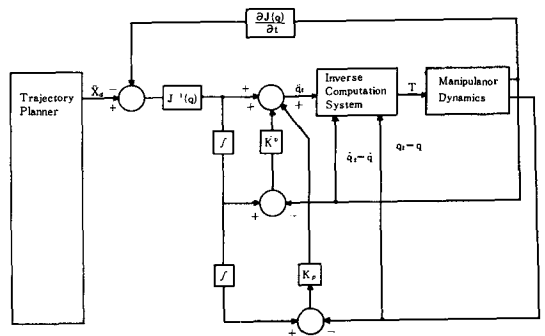


그림 6. RMAC의 블록선도

여기서 특기할 것은 이 제어 방법은 RMRC와는 달리, 다이내믹스 계산에 쓰는 모델과 실제 로봇 머니플레이터 다이내믹스가 완전히 일치할 경우에는, 입력위치 q_a 및 출력위치 q 와의 전달함수는 모든 각 조인트가 서로 상호작용이 없는 선형 2차 시스템이 되어, 식 (8)의 컨트롤러 k_v 및 k_p 를 조정함으로써 원하는 다이내믹 특성을 얻을 수 있다.

이를 보기 위해 먼저 II. 2절의 식(6) 및 (7)로 주어진 머니플레이터 다이내믹스를 생각한다.

$$I(q)\dot{q} + V\dot{q} + F(q, \dot{q}) + G(q) = T \quad (10)$$

한편 식(10)의 토크를 계산하기 위한 인버스 모델의 다이내믹스는

$$I(q_t)\ddot{q}_t + V\dot{q}_t + F(q_t, \dot{q}_t) + G(q_t) = T \quad (11)$$

로서 주어진다.

이제 RMAC를 적용하기 위하여 먼저 $q_t = q, \dot{q}_t = \dot{q}$ 으로 하고, 식(8)의 \ddot{q}_t 를 식(11)에 대입한 후, 식(10)과 합하여 정리하면,

$$I(q)\left[\ddot{q}_a + k_v(\dot{q}_a - \dot{q}) + k_p(q_a - q)\right] = I(q)\ddot{q}$$

을 구할 수 있다. 여기서 \ddot{q}_a 은 $J^{-1}(\ddot{x}_a - \frac{\partial J}{\partial t} \dot{q})$ 이다.

이제 위치 에러 q_e 를 $q_e \triangleq q_a - q$ 로 정의하면 에러 다이내믹스는

$$\ddot{q}_e + k_v\dot{q}_e + k_p q_e = 0$$

로서 주어지므로 k_v 와 k_p 를 조정함으로써 원하는 에러 다이내믹 특성을 갖도록 할 수 있다.

이와같은 RMAC방법은 RMRC와 마찬가지로 Jacobian matrix의 역변환을 행해야 하므로 대개는 6개의 자유도를 갖는 로봇에 응용되어 왔다. 또한, RMRC에 비해 에러 다이내믹 특성을 쉽게 제어할 수 있는 반면에 Jacobian matrix의 시간에 대한 미분값을 구해야 하는 계산상의 번거로움이 있다.

3) Modified RMAC

이 방법은 RMAC의 방법중 인버스 시스템 계산을 줄이기 위하여, 인버스 시스템의 입력의 하나인 \dot{q}_t 에 RMAC와 같이 완전히 계산에 의한 정보만을 인가하는 것이 아니라 실제 시스템의 출력으로부터 가속도 \ddot{q} 을 측정하여 계산에 의한 정보와 함께 인가하는 방식이다.¹¹⁾ 구체적으로 설명하면, 식(11)에서 \ddot{q}_t 에 관련된 항인 $I(q_t)\ddot{q}_t$ 을

$$I(q_t)\ddot{q}_t = I_{aa}(q_t^*)\ddot{q}_a^* + I_{off}(q_t)\ddot{q}_t \quad (12)$$

과 같이 inertia matrix $I(q_t)$ 를 diagonal성분과 off-diagonal성분으로 나누고, 각각의 항에

$$q_t^* = q_a, \quad \ddot{q}_t^* = \ddot{q}_a + k_v\dot{q}_e + k_p q_e \quad (13)$$

$$\dot{q}_t = \dot{q}, \quad \ddot{q}_t = \ddot{q} \quad (14)$$

를 인가하는 개념의 방법이다. 그렇지만 이 방법을 적용했을 때 전 폐회로 시스템의 안정도 및 동적 특성을 수학적으로 엄격하게 보장한 것은 아니다.¹¹⁾

4) RMFC (Resolved Motion Force Control)

앞서 기술한 RMRC 그리고 RMAC는 모두 $J(q)$ 의 inverse를 요구하는데 이는 특히 자유도가 6을 넘으면서 부터는 계산상에 커다란 어려움을 주게 된다. 이와 같은 문제를 해결하기¹⁰⁾ 위해서는 J 의 인버스를 쓰지 않고 terminal link static forces F_n 과 static joint torques F_t 사이의 관계식

$$F_t = J^T(q)F_n$$

을 이용하여 종래의 조인트 컨트롤 대신 cartesian force와 cartesian position을 바로 제어하는 방법을 제안하였다.

이와같이 할 경우 컨피규레이션의 변화, 중력에 의한 부하 그리고 내부의 마찰력이 자동적으로 보상되고, Jacobian matrix의 트랜스포즈만 사용하게 되므로 자유도가 6개 이상인 시스템에도 쉽게 적용할 수 있다.

5) Configuration Space Control

앞절에서 기술한 RMRC 및 RMAC는 기본적으로 인버스 시스템 계산을 실시간에서 행하여야 하는 바 자유도가 늘어날수록 머니플레이터 다이내믹스가 복잡해져 많은 양의 계산을 행해야 하므로 실제 적용키가 어려울지도 모른다. 이와같은 동기에서¹²⁾ 등에서는 온라인 계산을 빠른 시간내에 행할 수 있는 계산 방법을 연구하였다.

한편 [13]에서는 식(9)로서 주어지는 모델에서 $J(q)$ 와 $v, f(q, \dot{q})$ 및 $q(q)$ 를 매 순간순간마다 계산으로 구하는 것이 아니라, 각 위치 및 속도에 대응하는 (즉, 컨피규레이션) 이들의 매트릭스 값들을 미리 컴퓨터의 메모리내에 저장시켜 놓고, torque 계산시에 memory look-up table을 찾아서 대입하는 소위 컨피규레이션 스페이스 방법을 제시하였다.

이와같이 하므로써 토크 계산에 많은 시간을 줄일 수 있으므로 실제 RMAC와 같은 제어 방법을 적용할 수 있다.

3. Adaptive Control

앞에서 언급한 컴퓨터드 토크 제어방법은 모델과 제어 대상 시스템과의 에러가 없음을 전제로 한 것이다. 그렇지만 실제에 있어서는 6자유도 이상의 경우는 모델을 구하기가 어려우며, 구한다 하더라도, 기계적 마찰 등에 의한 마모등의 이유로 모델링 에러가 존재하므로, RMAC를 사용한 폐회로 제어 시스템조차도, 동적 특성을 예측하기 어려우며, 경우에 따라서는 안정도를 보장할 수가 없다. 그러므로 이 경우에는 다시 모델 파라미터와 컨트롤러 계인상수 등을 재조정하여야 한다. 왜냐하면, 재 조정하지 않을 경우 시스템의 동적 특성이 현저히 떨어질 수 있으며, 심한 경우에는 불안

정하게 된다. 또한 일정 기간마다 일일이 시스템 파라미터를 측정하여 컨트롤러의 계인을 변경시키는 것도 큰 작업이다. 이와같은 결점을 보완키 위해 제시된 컨트롤 방법이 바로 어댑티브 컨트롤^[17]로서 로봇트 머니플레이터 콘트롤에 응용한 예는 [18], [19] 및 [20] 등에서 볼 수 있다.

4. Fine Motion Control^[4, 21, 22, 23]

Small clearance를 갖는 두 물체를 자동 조립하고자 할 때, accuracy의 positioning이 요구되어진다. 그러므로 로봇트 머니플레이터를 gross motion control에 의해 정확하게 initial positioning을 해주어야 한다. 그렇지만, 대형의 메카니칼 다바이스들의 연결로서 이루어지는 로봇트 머니플레이터는 백래쉬, 시스템 모델링 에러 등의 원인으로 수십내지 수백 마이크로스의 이니셜 포지셔닝 에러를 유발시키는 것이 보통이다. 이 경우 아주 작은 (보통 20마이크론이내) 클리어란스를 갖는 물체들의 조립이 불가능하다. 이를 해결하기 위하여 제시된 것이 파인 포지셔닝을 가능하게 하는 소위 force feedback control로서 이는 로봇트 머니플레이터의 엔드 이펙터에 있는 조립물체와 작업장에 놓여 있는 조립 대상 물체 사이의 마찰의 영향으로 엔드 이펙터의 각 degree of freedom에 발생하는 제비털라이즈드 포오스(force, torque)를 포오스 센서를 이용하여 측정하고 이를 피이드백하여 원하는 컨트롤 시그널을 얻는 제어 방법을 말한다. 이제 포오스 피이드백을 이용한 조립공정의 두가지 알고리즘을 기술하기로 한다.

1) Loose Fit Peg-into Hole Algorithm^[4]

이 알고리즘은 두 조립 대상 물체 사이의 톨러란스가 로봇트의 포지셔닝 애큐러시에 비하여 클 때 사용하는 것으로 이것을 정량적으로 살펴보면 다음과 같다. 만일 X, Y축의 포지셔닝 에러가 $e/2$ 라고 하면 로봇트 핸드는 리퍼런스 포인트를 중심으로 $e * e$ 의 사각형내에 중심점을 갖게 된다. 이때 만일 조립 대상 물체의 톨러란스가 직경방향으로 "C"라고 하면

$$C > e\sqrt{2}$$

의 경우에는 톨러란스의 원이 오차 사각형을 완전히 커버하게 되어 초기의 위치로부터 아무 변경없이 조립이 가능하게 되는데 이 경우를 루우즈 피트로 생각한다. 그림 7과 같이 머니플레이터의 엔드 이펙터가 잡고 있는 실린드릭할 홀에 X-Y 테이블에 놓여있는 페그(shaft)을 끼워넣는 공정을 예로들어 설명하면 다음과 같다. 단, 엔드 이펙터는 실린드릭할 홀의 중심축과 아암의 z-축이 일치되어 있다고 가정한다.

i) 페그를 +x방향으로 움직여 페그와 홀의 중심

위치를 미스시킨다.

ii) 엔드 이펙터를 페그와 홀사이에 컨택트 포오스가 이미 정하여 준 양이 될 때까지 -Z방향으로 움직인다.

iii) 엔드 이펙터의 Z-축 상의 포오스가 거의 제로 일때까지나, 혹은 홀의 안쪽벽과 페그의 부딪침이 감지될 때까지(부딪침으로써 X-축 상에 포오스가 발생하므로 X-축상의 포오스가 감지될 때까지를 의미함) 페그를 네가티브 X-축쪽으로 움직인다.

iv) 단계 iii)이 끝나면, 페그와 홀이 부분적으로 삽입되어 있으므로, 페그와 홀의 센터를 일치시켜야 한다. 이를 위하여 먼저 페그를 페그의 중심을 기준으로 +Y 및 -Y방향으로 움직여서, 페그중심을 기준으로 Y방향을 잇는 홀의 양끝 중심에, 페그의 중심이 위치하게 한다.

v) X축 방향으로 iv) 단계를 수행한다.

vi) v) 단계후에는 홀의 중심과 페그의 중심이 일치하게 되므로, 엔드 이펙터를 Z축 방향으로 움직여 Z-축상의 포오스가 감지될 때까지 홀에 페그를 삽입시킨다. 여기서 주목할 점은 엔드 이펙터의 Z코오디네이트만을 컨트롤하여서는 페그가 틸트되어 있을지도 모르기 때문에 페그의 구멍삽입 공정을 수행하기 어렵지만 포오스 피이드백을 이용하여 위에서 기술한 알고리즘을 사용할 경우 페그의 구멍 삽입 공정을 쉽게 수행할 수 있다는 것이다.

2) Close Fit Peg-into Hole Algorithm^[4]

이 알고리즘은 두 조립 대상 물체의 톨러란스가 포지션 어큐러시에 비해 작을 때 즉, $C < \text{SQRT}(2) * e$ 일때 사용하는 것으로서 그림 15의 비어링 실린더 조립 공정을 예로들어 설명하면 다음과 같다.

i) 엔드 이펙터를 +Z축으로 움직인다.

ii) 엔드 이펙터를 틸트시킨 후 비어링 샤프트를 X축 방향의 포오스가 센스될 때까지 -X방향으로 움직인다.

iii) 엔드 이펙터를 -Z방향으로 Z축상의 포오스가 감지될 때까지 움직인다.

iv) 엔드 이펙터 원래의 위치로 로테이트시킨다.

v) Bearing shaft가 실린더내에 삽입되어 있으나 중심이 틀려 있을 수 있기 때문에 'loose fit peg-into-hole' 알고리즘의 (4)와 (5)단계에서와 같이 중심을 찾아 일치시킨다.

vi) X 방향의 포오스가 감지될 때까지 비어링 샤프트를 -X축으로 진행시켜 조립을 완료시킨다.

이상과 같이 포오스 피이드백을 이용한 파인 모션

컨트론클은 조립 공정에 흔히 쓰이는 방법으로, 미국의 MIT 공대⁽⁴⁾, 일본의 히다치중앙연구소⁽²⁴⁾ 및 벨지움 등의 유럽 국가에서는 상당히 활발히 연구되어 왔으며, 앞으로 더욱 많은 연구가 진행될 것으로 사료된다.

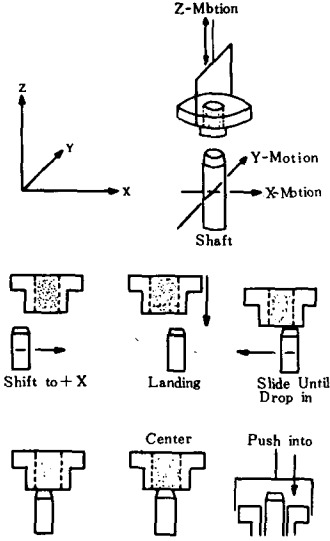


그림 7. 루우즈 피트 조립 공정의 예

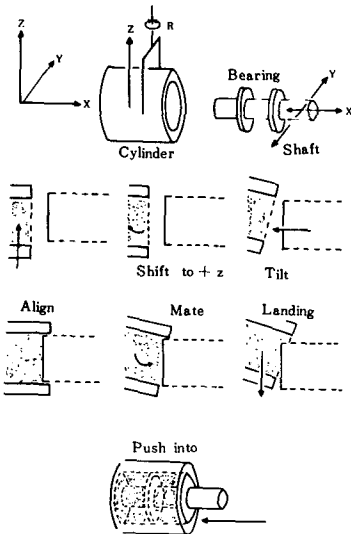


그림 8. 크로우스 피트 조립 공정의 예

IV. 연구문제

신문이나 TV를 통해서 “놀라운 産業用 로봇”에 대한 기사가 심심하지 않게 보도되고 있다. 국내 학술

잡지에서도 로봇에 대한 역사, 개발현황, 도입상황 동향 등에 대해 자주 다루고 있다. 이런식으로 점차 많은 사람들이 로봇을 알게 되고 관심을 갖게 되면 우리나라도 곧 로봇 産業혁명에 참가하기 어렵지 않을 것이다.

그런데 이들의 로봇 스토리를 통하여 얻은 인상과는 달리 현재의 산업용 로봇이 기술적으로는 그다지 놀랍지 않다는 것이 專門家들의 의견임을 상기시키고자 한다. 사실 현재 개발 응용되고 있는 산업용 로봇이 상업적으로는 매우 성공적인 인기를 끌고 있으나, 기술적으로는 “집어서 놓는 작업(pick and place)” 등의 단순 작업용 로봇으로서 약간의 범용성이 가미된 자동 기계를 예전에는 자동화하지 않던 작업의 자동화에 이용했다는 아이디어로써 붐을 일으키게 된 것이라고 본다.

로봇을 \$50,000을 주고 機械下人이라고 보면, 400kg 이상의 몸집을 갖고서 1/10밖에 안 되는 40kg 짜리 load를 운반하는 것을 힘들어 하며, 운반 속도도 매우 느리며 계획대로 정돈되어 있지 않거나 약간의 주위 상황 변동이 있으면 전혀 일을 못하는 낙제급 인이다.

로봇을 기술적인 측면에서보다, 코스트 이펙티브하고 신뢰성있게 개발할 필요가 있다. 과학적인 관점에서 감지 기능을 갖는 지능 로봇을 발명하여 비구조적이고 비협조적인 환경하에서까지도 움직여 작업을 완수할 수 있도록 하는 연구가 요청된다.

특히, 지금까지의 로봇 연구 개발이 응용 측면에서 요구되고 주도되어 왔지만, 차후의 발전을 위해 어떤 quantum jump가 요청된다면, 과학적 이론적 측면에서 보다 근본적인 문제를 연구함이 병행내지는 우선 되어야 한다고 본다. 본 장에서는 robotics 분야에서 전문가들이 어떤 문제들을 연구 테마로 생각하고 연구를 추진하는 가를 개략적으로 설명하고자 한다!²⁶⁻³¹

1. 기계지능(Machine Intelligence)부여 문제

현재의 로봇은 일종의 반사식 로봇(reflex robot)로서 일정한 일련의 Cue가 주어지는데에 따라 동작한다. 이러한 로봇은 잘 정돈되고 정확하게 계획된 특수 제작 공정에서는 생존했으나 경험으로 배운다거나, 판단으로 예기치 않던 상황에 대처할 수 있는 지적 능력이 없어 보다 복잡한 환경에서 작업할 수 없다.

궁극적으로는 시각, 촉각, 청각 등의 감각기능을 갖는 sensory-interactive intelligent robot를 설계하여

이를 해결하여야 될 것이다. 현재 이 지능 로봇의 실현을 위하여 다음과 같은 문제들을 연구 과제로 삼고 있다.

- 1) 문제해결 (problem solving) 및 계획 (planning)
인간으로부터 주어지는 작업(일) 명령을 실행하기 위한 계획을 로봇이 독자적으로 발견, 수립하는 문제
- 2) 환경의 이해 (environment analysis)
주위의 상황을 시각, 촉각, 청각 등의 감각정보로써 外界 모델을 作成하는 문제, 특히 기하학적 모델링 문제가 매우 급하다.
- 3) 지식의 표현 (knowledge representation)
일하는 환경의 상태나 법칙, 자기경험 등의 지식을 사용하기 쉽게 기억하고 자유로 활용하는 방법에 대한 연구
- 4) 자연 언어 처리
국어나 영어와 같은 자연언어의 의미를 이해하고 사람과 정보를 교환한다.

- iii) Redundant axis manipulator 제어
- iv) 시각을 이용한 서보메카니즘
- v) Fault-tolerant system design
- vi) Force/position control
- vii) Operation in moving frame

3. 머니플레이션 문제

어떻게 하면 로봇이 머니플레이트를 잘 할 것인가 하는 문제를 Kinematic design의 관점 또는 strategy of manipulation 관점에서 검토할 수 있으며 현재 중요한 연구 과제로 언급되고 있는 것은 다음과 같다.

- i) 타스크의 정의 및 퍼포먼스 리콤파이먼트의 수량적 정의
- ii) 기하학적 실현 문제: 자유도, 타입에러, 마테리얼 스케일 등을 고려한 설계 문제임
- iii) Safety 문제

4. 센서 (Sensor) 문제

로봇은 자기가 하는 일을 스스로 이해하기 위해서는 자기의 내부상태와 그 주위를 감지하여야 한다. 로봇은 센서로서는 마이크로스위치와 같은 기초적인 것 외에 성능 개선이 요구되는

- i) Visual sensor (TV camera)
- ii) Range sensor
- iii) Touch and force/torque sensor
- iv) Acoustic sensor
- v) Temperature sensor

등이 있으며 이들을 어떻게 신빙성있게, 빠르고 저렴한 가격으로 로봇이 부착하여 지능을 얻도록 하느냐 하는 연구가 되어져야 한다고 믿고 있다.

5. 기타

상기한 토픽외에 로코모션 로봇에 대한 연구, 맨-머신 혹은 맨-머신간의 커뮤니케이션 관계 문제들이 활발히 논의 연구되고 있다.

V. 맺는 말

제 1차 산업혁명에서 스팀 엔진의 발명과 전기의 발견으로 人間 근육의 힘을 기계의 힘으로 대체하여 상품 생산에 막대한 변화를 일으킨 역사적 사실을 상기 하자. 현재 일등국, 강대국 또는 선진국이라 불리우는 서구 여러 나라와 일본등은 일차 산업혁명 대열에 있었던 나라들이었다. 그 당시 뒷전에서 전쟁이나 내분이나 채국정책으로 만전만 피우던 나라들은 오늘

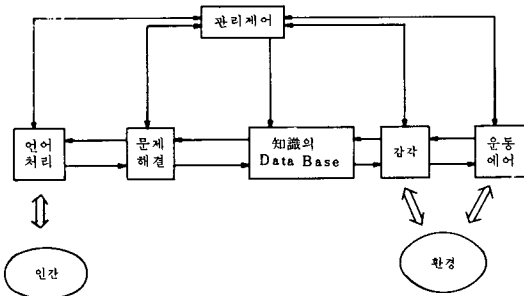


그림 9. 로봇 연구 과제들의 상호 연관 개념도

2. 로봇 제어문제

로봇 제어 문제에 관한 다음과 같은 사실이 우선 언급되어야 하겠다.

- 1) 로봇은 고도의 비선형 다변수 시스템이다.
- 2) 제어 명령이 계층적으로 구성되어야 리얼타임 제어가 효과적이다.
- 3) 적응 제어 개념이 요청된다.
- 4) 맨-머신 인터랙션이 매우 복잡하다.

이들 각 사항과 관련하여 여러 가지 연구가 활발하게 진행되고 있고 또 로봇 제어론이 발전하기 위하여 많은 노력이 필요함을 간접적으로 시사하고 있다. 본 제어 영역에서 연구되는 과제중 특히 관심을 끌고 있는 문제들은 다음과 같다.

- i) 多重 팔의 코퍼레이티브 머니플레이션
- ii) 센서리 피드백을 이용한 플렉시블 아암의 제어

날 아무도 선진국에 끼질 못하고 있다. 전문가들은 이 구동성으로 지금 컴퓨터와 로봇의 콤비를 통하여 기계와 산업공정을 제어하는 데 있어서 우리 인간의 두뇌력을 계산력으로 대치하는 제 2차 산업혁명이 형성되고 있다고 한다. 우리는 200년전 역사를 교훈삼아 이번에는 늦지 않게 혁명대열에 뛰어 들 것인가, 아니면 제 3차 혁명이 일어날 200년(?) 뒤에까지 개발도상국이던 재산을 후세에게 남길 것인가?

Robotics의 연구는 마치 미지의 세계에로의 우주탐험여행과 같다. 最高의 두뇌와 많은 인력이 필요하여, 많은 돈과 노력이 연구에 투입되어야 하고, 막대한 새로운 공장과 시설을 위한 자본이 있어야 한다. 우리나라와 같이 작은 규모의 나라에서는 매우 어려운 투자가 될 것이다. 그러나 장기적 안목에서 컴퓨터 및 로봇 산업을 토착화 시키는 것은 우리나라의 死活의 문제로 보고 열심히 추진하여야 할 것이라고 믿는다.

參 考 文 獻

[1] I. Kato and Y. Hasegawa, *State of Arts of Robotics*. Preprints of the 8th IFAC World Congress, Kyoto, Japan, pp. 21-23, 1981.

[2] J. Birk and R. Kelley (organizers), *Workshop on the Research Needed to Advance the State of Knowledge in Robotics*, NSF Report 800223, April 1980.

[3] T. B. Sheridan, *Computer Control and Alienation*. Technology Review, pp. 61-73, Oct. 1980.

[4] P. H. Winston and R. H. Brown, *Artificial Intelligence: An MIT Perspective*. vol. 2, MIT Press, Cambridge, 1979.

[5] D. E. Whitney, "The mathematics of coordinated control of prosthetic arms and manipulators," *ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control*, vol. 94, pp. 303-309, 1972.

[6] R. C. Paul, *Robot Manipulators: Mathematics, Programming and Control*. MIT Press, 1981.

[7] J. Y. S. Luh, M. W. Walker, and R. P. C. Paul, "Resolved-acceleration control of mechanical manipulators," *IEEE Trans. Automat. Control*, vol. AC-25, pp. 468-474, 1980.

[8] J. S. Albus, *Brains, Behavior & Robotics*. McGraw Hill, 1981.

[9] Y. Koren, "Cross-couple biaxial computer control for manufacturing system", *ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control*, vol. 102, pp. 265-272, June 1981.

[10] C. H. Wu and R. P. Paul, "Resolved motion force control of robot manipulators," *IEEE Trans. Syst., Man and Cybern.*, vol. SMC-12, no. 3, pp. 266-275, 1982.

[11] P. Jakubik and J. Marton, "Improved gross-motion control for robot arms," *Preprints of the 8th IFAC World Congress*, Kyoto, Japan, vol. 14, pp. 91-96, 1981.

[12] J. M. Hollerbach, "A recursive lagrangian formulation of manipulator dynamics and a comparative study of dynamics formulation complexity," *IEEE Trans. Syst., Man, Cybern.*, vol. 10, no. 11, Nov. 1980.

[13] B. K. P. Horn, M. H. Raibert, *Configuration Space Control*. Industrial Robots, pp. 69-73, June 1978.

[14] M. Takegaki and S. Arimoto, "A new feedback method for dynamic control of manipulators," *ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control*, vol. 102, pp. 108-118, June 1981.

[15] M. Vukobratovic and D. Stokic, "One engineering concept of dynamic control of manipulators," *ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control*, vol. 102, pp. 108-118, June 1981.

[16] *Control of Manipulation Robots*. Springer-Verlag, 1982.

[17] Y. D. Landau, *Adaptive Control: The Model Reference Approach*. Marcel Dekker, New York, 1979.

[18] T. Yoshimura and M. Tomizuka, "Application of model reference adaptive techniques to a class of nonlinear systems," *ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control*, vol. 102, pp. 158-163, June 1982.

[19] S. Arimoto and M. Takegaki, "An adaptive method for trajectory control of manipulators," *Preprints of the 8th IFAC World Congress*, Kyoto, Japan, vol. 14, pp. 72-77, 1981.

- [20] M. Le Borgne, J. M. Ibarra and B. Espiau, *Adaptive Control of High Velocity Manipulators*. Proceedings of 11th International Symposium on Industrial Robots, Tokyo, Japan, pp. 227-236, 1981.
- [21] H. Van Brussel et al., *Further Developments of the Active Adaptive Compliant Wrist(AACW) for Robot Assembly*. Proceeding of 11th International Symposium on Industrial Robots, Tokyo, Japan, pp. 377-384, 1981.
- [22] M. H. Raibert and J. J. Craig, "Hybrid position/force control of manipulators," *ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control*, vol. 102, pp. 126-133, June 1981.
- [23] Daniel E. Whitney, "Force feedback control of manipulator fine motions," *Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control*, pp. 97-99, June 1977.
- [24] T. Goto, K. Takeyasu, and T. Inoyama, "Control algorithm for precision insert operation robot," *IEEE Trans., Syst., Man, Cybern.*, vol. 10, no. 1, pp. 19-25, 1980.
- [25] A. Isidori, A. J. Krener, C. Gori-Giorgi and S. Monaco, "Nonlinear decoupling via feedback: a differential geometric approach," *IEEE Trans. Automat. Contr.*, vol. 26, no. 2, pp. 331-345, 1981.
- [26] 日本산업용로봇트공협회編, "産業用 로봇트의 應用," 1979.
- [27] 日本산업용로봇트공협회編, "産業用 로봇트의 技術," 1979.
- [28] 戸田日出夫外, "産業用 로봇트," 日本電子통신학회지, 4月 1982.
- [29] 이봉진外, "로봇트 개발을 위한 기초 조사 연구," KIST 연구보고서, 12月 1978.
- [30] 변증남, 송상섭, "산업용 로봇트 驅動을 위한 서어보장치 설계," 대한전자공학회 잡지 제 7권 제 3호, 9. 1980.
- [31] 辻三郎, "Robotics의 최근의 진보," 일본전자통신학회지, 4月 1982.

◆ 用語解説 ◆

Protocol: A procedure for synchronization so that the receiver knows when a bit starts and ends so that it can be sampled, similarly for character synchronization so that the receiver can determine which bit belongs to a character, and similarly for message synchronization so that the receiver can recognize a special character sequence that delineates messages. Typical protocols include the blocking of transmission in the messages, employing start-of-text and end-of-text or other markers, and a positive or negative acknowledgement procedure.

Real Time:

1. Pertaining to the actual time during which a physical process occurs.
2. Pertaining to the performance of a computation during the actual time that the related physical process occurs, in order that results of the computation can be used in guiding the physical process.

Reliability: The characteristic of equipment, software, or systems that relates to the integrity of the system against failure. Reliability is usually measured in terms of mean-time-to-repair, the statistical measure of the interval between successive failures of the system under consideration.

Remote Job Entry (RJE): Submission of jobs (i.e., computer production tasks) through an input unit (terminal) that has access to a computer through data communication facilities.

Reverse-channel: A feature of certain modems which allows simultaneous transmission (usually of control or parity information) from the receiver to the transmitter over a half-duplex data link. Generally the reverse channel is a low speed channel.

RS232 Interface: The interface between a modem and the associated data terminal, as defined by the Electronics Industries Association Standard RS232.