

로보틱스 이론

全 洪 兌

(正 會 員)

中央大學校 工科大學 電子工學科 助教授(工博)

I. 서 론

생산 공정의 자동화(automation)로 생산성(productivity) 향상을 도모하고자 하는 노력이 최근 큰 관심을 모으고 있다. 로봇 시스템은 CAD 및 CAM과 함께 그 영역이 어디까지 확장될지 예측할 수 없으나 앞으로 도래할 산업 자동화의 물결 속에서 중심적인 역할을 할 것이다.

로봇이라는 용어는 1921년 체코슬로바키아 극작가 Karel Capeck의 희곡 작품 "Rossum's Universal Robots"에서 그 어원을 찾을 수 있으며 그동안 과학 기술의 놀라운 발전으로 1960년경 최초의 상업적인 로봇이 출현하였다. 일반적으로 로봇은 응용 용도에 따라 여러 가지 형태 및 기능들을 갖는다. 그러나 가장 주목을 끌고 있는 로봇의 형태는 산업 자동화에서 광범위하게 이용되는 기계적 매니플레이터의 산업용 로봇이다. 따라서 본 논문에서는 산업용 로봇의 기본적인 개념과 이론만을 기술한다.

산업용 로봇은 고정형 자동화(fixed automation), 프로그래머블 자동화(programmable automation) 그리고 플렉서블 자동화(flexible automation)로 분류되는 자동화 방법들중 프로그래머블 자동화에 가장 근접하며 RIA(Robotic Industries Association)에 의해 다음과 같이 정의된다.

"산업용 로봇은 여러가지 프로그램된 동작을 통해 다양한 임무를 수행하도록 설계된 다기능의 재 프로그래머블한 기계적 매니플레이터이다."

산업용 로봇은 기저부(base)에 고착된 몸체(body)와 몸체에 연결된 팔(arm), 그리고 팔 말미의 손목(wrist)으로 구성되며 인간의 손에 해당하는 end-effector가 손목에 부착된다(그림 1 참조). 이들 사이

의 상대적인 운동은 일련의 조인트(joint) 움직임들에 의해 이루어지며 조인트 움직임들은 회전운동(revolute motion)과 미끄럼운동(prismatic motion)으로 구분된다.

크기, 모양 그리고 구성면에서 다양한 형태를 갖고 있는 산업용 로봇은 다음과 같은 기본 형태를 갖는다(그림2 참조).

- Polar 형
- Cylindrical 형
- 직교 좌표계 형
- Jointed-arm 형

상기 4 가지 형의 로봇들은 그들의 기구학적 구조로 인해 고유한 장점을 갖는다. 한 예로 운동반복도(repeatability)에서는 직교 좌표계 형의 로봇이,

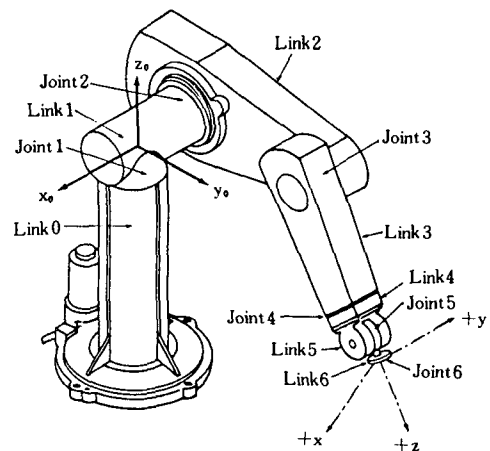


그림 1. PUMA 형 산업용 로봇

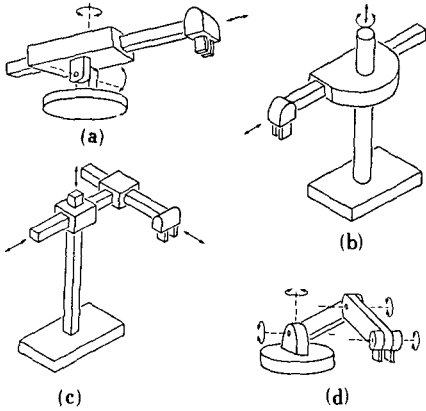


그림 2. 산업용 로봇의 기본형들:
 (a) polar 형, (b) cylindrical 형,
 (c) 직교 좌표계 형, 그리고
 (d) jointed-arm 형

그리고 도달(reach)면에서는 polar 형과 jointed-armed 형이 우수한 능력을 갖는다. 또한 cylindrical 형 로봇은 운송 물체의 승강 작업에 많은 잇점을 갖는다.

산업용 로봇에 관련된 학문적인 연구 분야는 기구학(kinematics), 동력학(dynamics), 궤도생성(trajctory generation), 제어이론(control theory), 프로그래밍 언어 등 여러 분야가 있으나 본 논문에서는 몇 가지 주요 분야들에 관한 개념과 이론만을 고찰한다.

II. 매니플레이터 기구학

매니플레이터 임무는 직교 좌표계(cartesian coordinate)에서 손의 위치(position)와 방위(orientation)로 지정된다. 손의 위치는 로봇트 기저부(base)에 설정된 기준 좌표계와 손에 설정된 좌표계 사이의 위치 벡터로 규정된다. 방위 표현에는 Euler-angle 방식, roll-pitch-yaw 방식 등 여러 방식들이 있으나 3×3 행렬표시 방법을 보편적으로 사용한다.

매니플레이터 손은 각 조인트의 구동기들에 의해 동작되기 때문에, 손의 위치 벡터 $p(t)$ 와 방위 벡터 $\phi(t)$ (Euler-angle 방식)는 조인트 변위 θ_i ($i=1, 2, \dots, n$)들과 다음 관계를 갖는다.

$$[p(t)^T \phi^T(t)] = f[\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_n] \quad (1)$$

식 (1)에서 벡터함수 $f(\cdot)$ 는 정방향기구 방정식(forward kinematic equation)이고 비선형 특성을 갖는다. $f(\cdot)$ 를 이용해 조인트 변위들로부터 직교 좌표계에서 손의 위치와 자세를 얻는다. 역으로 손의 위치와

자세가 주어져 있을 때 역기구 방정식(inverse kinematic equation) $f^{-1}(\cdot)$ 을 이용해 대응되는 조인트 변위들을 구한다.

기구학적 면에서 보면 매니플레이터는 여러개의 링크(link)들과 이웃 링크들을 연결하는 조인트들의 조합체이다. 따라서 정방향 기구 방정식을 얻는 데는 각 링크에의 좌표계 설정, 링크 파라미터 정의 그리고 이웃 링크들의 좌표계들을 연결하는 변환 방정식(transformation equation)들이 필요하다. 그림 3이 매니플레이터의 링크 $i-1$ 과 링크 i 에 설정된 좌표계들과 정의된 파라미터들을 보여준다. 여기에서 a_{i-1} 은 \hat{X}_{i-1} 를 따라 측정된 \hat{Z}_{i-1} 에서 \hat{Z}_i 까지의 거리, α_{i-1} 은 \hat{X}_{i-1} 주위로 측정된 \hat{Z}_{i-1} 에서 \hat{Z}_i 사이의 각도, d_i 는 \hat{Z}_i 를 따라 측정된 \hat{X}_{i-1} 에서 \hat{X}_i 까지 거리, 그리고 θ_i 는 \hat{Z}_i 주위로 측정된 \hat{X}_{i-1} 과 \hat{X}_i 사이의 각도를 나타내는 파라미터들이다. 이 파라미터들을 이용해 기구계를 정의하는 방법을 흔히 Denavit-Hartenberg 표시법이라 한다. 링크 파라미터들을 이용해 좌표계 $\{i\}$ 에서 정의한 임의의 벡터를 좌표계 $\{i-1\}$ 에서의 표시로 변환하는 방정식은 다음과 같다.

$${}^{i-1}T = Rot(\hat{X}_{i-1}, \alpha_{i-1}) Trans(\hat{X}_{i-1}, a_{i-1}) Rot(\hat{Z}_i, \theta_i) Trans(\hat{Z}_i, d_i) \quad (2)$$

$$= \begin{bmatrix} c\theta_i c & -s\theta_i & 0 & a_{i-1} \\ s\theta_i c a_{i-1} & c\theta_i c a_{i-1} & -s a_{i-1} & -s a_{i-1} d_i \\ s\theta_i s a_{i-1} & c\theta_i s a_{i-1} & c a_{i-1} & c a_{i-1} d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

매니플레이터의 정 방향 방정식은 변환식 (3)을 링크 0에서 링크 n까지 적용해 얻어진다.

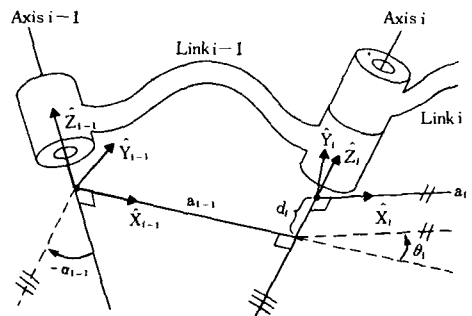


그림 3. 링크 파라미터들과 좌표계

$${}^nT = {}^1T \ ; {}^2T \ ; {}^3T \ \dots \ ; {}^{n-1}T \quad (4)$$

한편 조인트 속도와 손의 속도와의 관계를 나타내는 식은 다음과 같다.

$$\dot{X} = [\dot{p}^T \ \dot{\phi}^T]^T = J(\theta) [\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_n]^T \quad (5)$$

위 식에서 $J(\theta)$ 는 Jacobian 행렬식이고 그 열(row) 수는 직각 좌표계의 자유도 수 그리고 행(column) 수는 조인트 수와 일치한다. 식 (5)를 이용해 손의 속도로부터 대응하는 조인트 속도를 얻는다. 그러나 $J^{-1}(\theta)$ 가 항상 존재하지는 않는다. 이런 경우의 매니퓰레이터 위치를 특이성(singularity)이라 부르며 모든 매니퓰레이터는 작업 공간 경계면이나 그 내부에 특이성을 갖는다.

III. 매니퓰레이터 동력학

로봇 매니퓰레이터가 작업 공간 상에 주어진 궤적을 수행하기 위해서는 각 조인트에 있는 모터들에 힘/토크들을 입력해야 한다(힘은 조인트의 미끄럼 운동 그리고 토크는 조인트의 회전 운동을 위한 구동력임). 필요한 힘/토크들을 계산하기 위해서는 매니퓰레이터의 동적 특성이 일련의 수학적인 방정식으로 정식화(formulation)되어야 한다. 여러가지 정식화 방법들이 현존하나 Lagrangian 방식과 Newton-Euler 방식이 광범위하게 통용된다.

1. Lagrangian 방정식

Lagrangian 방식을 이용하여 얻어진 n 조인트 매니퓰레이터의 운동 방정식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \tau_i = & \sum_{j=1}^n \left(\sum_{k=1}^j t_r [u_{jk} J_j (u_{j1})^T] \ddot{\theta}_k \right) \\ & + \sum_{j=1}^n \left(\sum_{k=1}^j \sum_{m=1}^j t_r [u_{jkm} J_j (u_{j1})^T] \dot{\theta}_m \dot{\theta}_k \right) \\ & - \sum_{j=1}^n m_j \hat{g}^T u_{j1} \hat{r}_j \quad \text{for } i=1, 2, \dots, n \quad (6) \end{aligned}$$

위 식에서,

$t_r =$ trace 연산자

$\tau_i =$ 조인트 i 의 입력 힘/토크

$m_j =$ 링크 j 의 무게

$\hat{r}_j =$ j 번째 좌표계로 표시한 링크 j 의 무게 중심의 위치 벡터

$\hat{g} = [0, 0, 9.8 \text{ m/s}^2, 0]^T$ 인 중력 가속도 벡터

$J_j =$ 링크 j 의 관성 행렬

식 (6)을 이용해 매니퓰레이터의 궤적정보($\theta, \dot{\theta}$

그리고 $\ddot{\theta}$)들로부터 각 조인트의 입력 힘/토크를 구한다. 이 과정을 역 동력학 (inverse dynamics)이라 한다. 역으로 힘/토크를 조인트에 입력하였을 때 발생하는 조인트의 위치, 속도 그리고 가속도를 구하는 과정을 정 동력학(direct dynamics)이라 하며 흔히 매니퓰레이터의 모의 실험에 사용한다.

계산 측면에서 Lagrangian 방정식을 살펴보면, 한 조인트의 힘/토크 τ_i 를 계산하는데 $n(n+1)(2n+1)/6 + n^2(n+1)^2/4$ 개의 행렬 곱들이 필요하다. 이러한 계산량의 과다로 Lagrangian 방정식은 on-line 상에서의 응용이 어렵다. 따라서 많은 연구자들은 그 계산량을 감소시키는 방법들을 제안하였다. Paul⁽⁹⁾은 속도 성분과 관련된 coriolis/centrifugal 항을 생략해 계산량을 감소하였고 Raibert와 Horn⁽¹⁰⁾은 table look-up 방식으로 컴퓨터 상에서의 계산량을 감소하였다. 그러나 Paul의 방식은 매니퓰레이터의 동작 범위를 저속도로 제한하는 단점을, 그리고 table look-up 방식은 과다한 기억용량을 필요로 하는 단점을 각각 갖는다. 이에 Water⁽¹²⁾와 Hollerbach⁽⁴⁾는 순환(recursive)형 방식을 제안하여 계산량을 감소하였다. Water의 Lagrangian 방정식은 backward recursive 형태를, Hollerbach 방정식은 forward 형태를 갖는다.

2. Newton-Euler 방정식

Lagrangian 방정식의 과다한 계산량으로 연구자들은 d'Alembert's principle과 Newton의 제 2법칙을 이용해 새로운 N-E(Newton-Euler) 방정식을 제안하였다. 이 방정식은 일련의 정방향 및 역방향 순환방정식들로 구성되어 있고 간단한 연산만을 필요로 한다. 정 방향 순환방정식(forward recursive equation)은 기저부에서 손까지 각 링크의 기구학 정보들인 선형 속도, 선형가속도, 각속도와 각 가속도를, 그리고 역 방향 방정식은 역으로 손에서 기저부까지 각 링크의 힘과 토크를 계산한다.

순환 과정에서 모든 관성 항들과 기하학적 파라미터들은 기저부에 설정된 기준 좌표계 혹은 각 링크의 좌표계로 표시된다. 그러나 기저부의 기준 좌표계로 표시할 경우 매니퓰레이터 주행시 파라미터 표현들이 변경되기 때문에 각 링크 좌표계에 의한 표현을 선호한다. N-E 방정식의 가장 큰 잇점은 계산 시간의 감소로 실시간 제어에 적용할 수 있다는 점이다. 자세한 N-E 방정식 설명은 문헌을 참고하길 바란다.

3. 직교 좌표계에서 운동 방정식

일반적으로 Lagrangian 방정식과 N-E 방정식은 조

인트 공간에서 표현된다. 그러나 매니플레이터의 임무가 직교 좌표계에서 규정되기 때문에 운동 방정식을 직교 좌표계로 표현해야 할 필요성이 흔히 있다. 직교 좌표계로 표시된 매니플레이터 운동 방정식이 다음과 같다.

$$\mathbf{X} = \mathbf{D}_x(\theta) \dot{\mathbf{X}} + \mathbf{C}_x(\theta, \dot{\theta}) + \mathbf{G}_x(\theta) \quad (7)$$

식 (7)에서 τ_x 는 손에 작용하는 힘/토크 벡터, \mathbf{X} 는 손의 위치와 방향을 나타내는 직교 좌표계 벡터, $\mathbf{D}_x(\theta)$ 는 직교 좌표 질량 행렬, $\mathbf{C}_x(\theta, \dot{\theta})$ 는 직교 좌표계에서의 속도 벡터, 그리고 $\mathbf{G}_x(\theta)$ 는 직교 좌표계에서의 중력 벡터이다. 식 (7)의 각 항들과 조인트 위치와 속도, 그리고 가속도와의 관계는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \mathbf{D}_x(\theta) &= \mathbf{J}^{-1}(\theta) \mathbf{D}(\theta) \mathbf{J}^{-1}(\theta) \\ \mathbf{C}_x(\theta, \dot{\theta}) &= \mathbf{J}^{-1}(\theta) \{ \mathbf{C}(\theta, \dot{\theta}) - \mathbf{D}(\theta) \mathbf{J}^{-1}(\theta) \mathbf{J}(\theta) \dot{\theta} \} \\ \mathbf{G}_x(\theta) &= \mathbf{J}^{-1}(\theta) \mathbf{G}(\theta) \end{aligned} \quad (8)$$

IV. 궤적생성

매니플레이터 궤적 (trajectory)은 각 자유도에 대한 위치, 속도 그리고 가속도의 time-history로 정의하며 손의 공간상의 자취인 경로 (path)와 구분된다. 궤적은 조인트 공간 혹은 직교 좌표계에서 생성되며 가급적 다음 항목들을 만족해야 한다.

- 계산과 실행의 용이성
- 용이한 예측과 정확성
- 유연한 (smooth)한 시간 함수
- 실제 구동 가능성

1. 조인트 궤적 생성

매니플레이터의 기본 경로는 직교 좌표계에서 출발점과 도착점으로 지정되며 더 미세한 운동에는 그 점들 사이에 일련의 경유점 (via point)들을 설정한다 (경유점은 로봇의 통과점을 의미함). 조인트 궤적은 그 경로점들의 변환된 조인트 값들을 이용해 얻어진 시간 함수로 구성된다. 이 궤적 생성 방법은 경로점들 사이에서 손의 경로 모양을 예측할 수 없으나 조인트 공간과 직교 좌표계의 연속적인 대응 관계가 필요없고, 특이성 문제를 효율적으로 해결할 수 있는 잇점들을 갖는다.

일반적으로 두 경로점 사이의 조인트 궤적 생성에는 여러 종류의 함수들이 기저 함수로 사용될 수 있

으나, 이미 언급한 궤적 조건들로 인해 다항식 (polynomial)이 널리 이용된다. 다항식의 차수는 출발점과 도착점에서의 경계 조건들과 경유점에서의 연속 조건들도 결정한다.

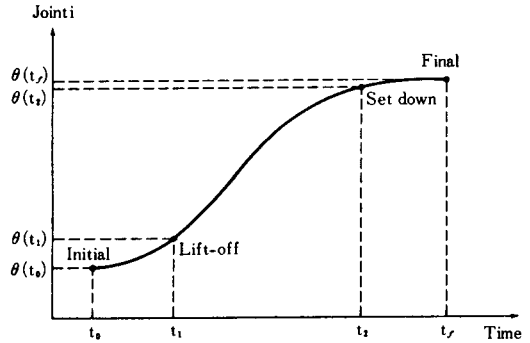


그림 4. 2 개의 경유점을 포함한 조인트궤적

그림 4는 2 개의 경유점 (lift off점과 set down점)들을 포함한 조인트 궤적을 보여준다. 7차 다항식의 조인트 함수는 주어진 궤적의 모든 제한 조건들을 충분히 만족한다. 그러나 이미 언급한 궤적 생성 조건들을 고려할 때 고차 함수보다는 낮은 차수의 함수가 바람직스럽다. 다음에 낮은 차수의 다항식들로 재 구성한 여러 조인트 궤적들이 주어진다.

4-3-4 궤적: $t_0 \leq t < t_1$ 에 4차, $t_1 \leq t < t_2$ 에 3차 그리고 $t_2 \leq t \leq t_f$ 에 4차 다항식

3-5-3 궤적: $t_0 \leq t < t_1$ 에 3차, $t_1 \leq t < t_2$ 에 5차 그리고 $t_2 \leq t \leq t_f$ 에 3차 다항식

5-cubic 궤적: $t_0 \leq t \leq t_1$ 과 $t_2 \leq t \leq t_f$ 에 2 개의 보조점들을 설정해 cubic spline 함수 적용

2. 직교 좌표계 궤적 생성

이 방법에서는 매니플레이터 경로가 직교 좌표계의 명백한 analytic 함수로 표시되며 조인트 궤적과는 달리 위치와 속도, 그리고 가속도에 관한 제한조건들의 엄격성이 크게 약화된다. 일반적으로 공간상 두점 사이에서의 로봇 경로로는 많으나 다음 이유들로 직선경로 (straight line path)가 주요연구 대상으로 등장한다.

- 예측과 가시화의 용이성
- 광범위한 응용성
- 두점 사이에서의 가장 짧은 거리제공
- 적은 관성력

상기 잇점들을 갖는 직선 경로에 관한 제적 생성은 용이하지 않다. 이에 연구자들은 직선운동의 근사화(approximation)를 위한 방법들을 제안하였다. Whitney¹³⁾는 RMRC(resolved motion rate control)로 불리는 차등 직선운동 방식을 제안하였다. RMRC에서는 손의 속도와 조인트 속도의 Jacobian 관계를 이용해 근사화된 직선 운동이 이루어진다. Paul⁸⁾은 손의 균일한 위치 이동과 비 균일한 방위 운동을 갖는 cartesian path control 방식을 제안하였다. 그러나 Whitney와 Paul의 방식은 조인트제한 조건들을 제적생성시 고려할 수 없는 중대한 문제점들을 갖는다. 이 어려움을 극복하기 위해 Taylor¹¹⁾는 BDP(bounded deviation paths)방식을 제안 하였다. BDP에서는 직선 경로의 중계점(inter mediate point)들이 먼저 결정된 후 그점들이 조인트 공간에서 선형적으로 보간(interpolation)된다. 이때 선형보간으로 생기는 손의 위치 및 방위 오차는 규정 허용 오차내에 머물게 되며, 각 구간 사이에서 속도들의 불연속성(discontinuity)은 변위구간(transition segment)에 2차함수 제적을 설정하여 해결한다. 한편 BDP에서는 3×3 방위 행렬표현 대신 quaternion 방위 표현 방식을 사용한다. Lin⁶⁾은 직선 경로에 충분한 경로점들을 설정해 조인트 공간에서 그 점들을 cubic spline 함수로 보간한 새로운 조인트 제적을 제안하였다. 이 제적은 조인트 위치와 속도, 그리고 가속도에서의 제한 조건들을 충분히 충족시킨다.

V. 매니플레이터 제어

1. 위치 제어

요구하는 조인트 운동을 매니플레이터가 실행하기 위해서는 구동기(actuator)에 힘/토크 명령을 전달하는 제어시스템이 필요하다. 매니플레이터 제어시스템은 조인트의 센서로부터 오는 제한(feedback) 신호를 이용해 명령 힘/토크를 연속적 혹은 간헐적으로 계산한다.

본질적으로 매니플레이터의 운동 특성은 highly nonlinear coupled 되어 있기 때문에 제어 시스템의 설계는 용이하지 않다. 최근 많은 연구자들이 여러가지 제어 알고리즘을 제안하였다.

1) Joint motion controls

- Joint servomechanism
- Computed torque technique
- Variable structure control
- Nonlinear decoupled control

2) Resolved motion control

- Resolved motion rate control
- Resolved motion acceleration control

3) Adaptive control

- Model-referenced adaptive control
- Self-tuning adaptive control
- Resolved motion adaptive control

모든 매니플레이터의 동적 모델들은 실제 상당한 불확실성(uncertainty)을 갖는다. 예를들어 링크의 길이, 무게, 관성력, 부하하중 그리고 치차 뒤틀림(gear backlash) 등의 모델 파라미터들은 정확한 파악이 불가능하고 예측할 수 없는 파라미터들이다. 이러한 파라미터들의 영향을 보상할 수 있는 대표적인 방법은 적응제어 기법을 이용한 제어기 설계이다. 따라서 본 논문에서는 몇몇 대표적인 적응제어 알고리즘들 간략히 기술한다. 참고로 효율적인 제어 시스템은 다음 특징을 갖는다.

- 파라미터 가변성에 대한 insensitivity
- 부하 하중의 변화에 대한 insensitivity
- 디커플링(decoupling)한 조인트 응답
- On-line 응용을 위한 적은 계산량

(1) 모델기준 적응제어

여러 적응제어 기법들중 모델기준 적응제어(model-referenced adaptive control)는 가장 널리 이용되고 구현이 용이한 잇점을 갖는다. 이 적응 시스템은 적합한 기준 모델과 구동 시스템의(모델과 실제 매니플레이터사이의) 오차를 감소시키기 위해 제한 이득을 조정하는 적응 메카니즘(adaptive mechanism)으로 구성된다(그림 5 참조).

일반적으로 기준 모델은 안정도를 만족하는 선형

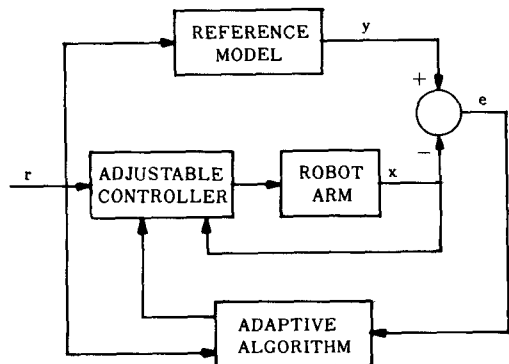


그림 5. 모델 기준 적응 제어방식

시불변 디커플된 시스템 (linear time-invariant decoupled system)으로 선정하며 적응 메카니즘은 다음 안정도 조건들을 이용해 설계한다.

○ Lyapunov stability criterion

○ Hyperstability criterion

(2) 자기동조 적응제어

모델 기준적응 제어방식과 더불어 매니퓰레이터 제어시스템 설계에 빈번히 이용되는 적응 기법은 자기동조 적응제어 (self-tuning adaptive control) 방식이다 (그림 6 참조). 자기 동조 방식에서는 매니퓰레이터 모델이 선형 이산시간 시스템 (linear discrete time system)으로 가정되어 제어 시스템이 구성되기 때문에 모델 기준적응 방식보다 디지털 제어에 더 적합한 것으로 알려져 있다.

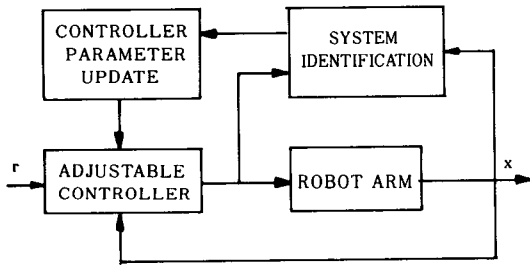


그림 6. 자기동조 제어방식

일반적으로 자기동조 적응제어 시스템의 설계과정은 다음과 같이 요약된다.

첫째, 매니퓰레이터 선형 이산시간 모델을 이용한 제어시스템 설계

둘째, on-line상에서 샘플된 입출력 정보를 이용해 실제 매니퓰레이터의 파라미터들을 추정 (estimation) 하고 그 파라미터를 이용해 새로운 제어입력을 결정함.

위 과정의 제어시스템 설계에서는 pole placement 기법을, 파라미터 추정에는 주로 least square estimation 알고리즘을 이용한다.

2. 힘 제어

매니퓰레이터가 공간상에서 단순히 주행할 경우에는 위치 제어가 적당하다. 그러나 매니퓰레이터가 주위 환경과 접촉해 주행할 경우에는 접촉면에서의 힘

의 감시와 제어가 필요하다. 부품 조립시 손의 접촉 힘을 측정하고 제어할 능력이 있으면 매니퓰레이터의 신뢰성과 정밀도는 크게 증대된다.

매니퓰레이터와 주변 환경과의 접촉시 발생하는 힘을 측정하기 위해 스트레인 게이지 (strain gauge) 라는 힘 측정 센서를 이용한다. 이 게이지는 부착된 금속의 변형에 비례하는 출력을 발생한다. 보통 이 센서는 조인트 구동기, 손과 마지막 링크 사이 혹은 finger 끝에 부착된다.

일반적으로 매니퓰레이터 작업은 손과 작업환경과의 접촉에 의해 정의되는 여러개의 소작업 (subtask)으로 나누어진다. 이 소작업에는 작업 형상의 기계적 혹은 기하학적 특성에 기인되는 자연적 제한조건 (natural constraints)들과 원하는 운동을 시키거나 힘을 작용시키기 위한 인위적 제한조건 (artificial constraints)들이 존재한다. 따라서 이 소작업을 수행하기 위해서는 복합 위치/힘제어 (hybrid position/force control) 방법을 고려해야 한다. 그림 7은 복합 위치/힘 제어를 위한 간단한 hybrid 제어기를 보여준다.

3. 최적제어

매니퓰레이터의 최적제어 시스템 (optimal control system) 개발은 생산성 향상을 위한 주요 노력중의 하나이다. 즉 시간과 에너지 면에서의 최적 제어를

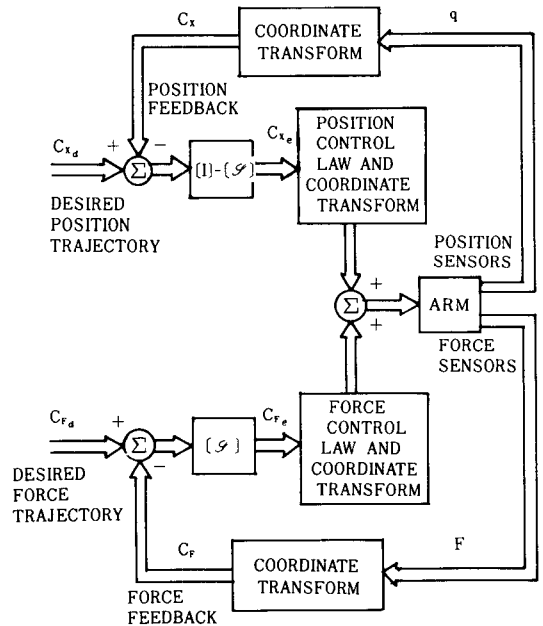


그림 7. Hybrid 제어기의 구성

통해 적은 비용으로 생산성을 증대시키려 한다. 그러나 최적 제어는 매니퓰레이터의 복잡한 운동특성, 기구학적 제한조건과 동력학적 제한 조건 그리고 실제 작업 환경에서의 제한 조건 등으로 어려운 난제로 알려져 있다.

최적 제어에 관한 최근의 연구는 크게 두 방향으로 나누어 진다.

첫째, 매니퓰레이터 운동 특성의 근사화를 통한 준 최적 제어기(sub-optimal controller) 설계

둘째, off-line 상에서의 최적 시간/에너지 궤적(optimal time/trajectory) 구성

첫번째 연구에서는 coriolis 및 centrifugal 항이 생략된 운동 방정식과 고전적인 최적제어이론(즉 maximum principle)을 이용해 준 최적제어기를 구성한다. 비록 이 결과가 closed한 형태의 제어기를 제공하나 그 효율성이 장애물이 없는 자유 공간으로 제한되는 단점이 있다. 이와 반면 장애물이 존재하여 주행 경로가 미리 설정된 경우에는 두번째 연구 방향이 적합하다. 이 방식에서는 최적시간/에너지 문제가 궤적 생성시에 고려된다. 일반적으로 최적시간/에너지 궤적 생성과정은 다음 단계들로 요약된다.

- 1) 주어진 경로의 파라미터화
- 2) 특정 성능 지수에 대한 파라미터의 최적화

VI. 결 론


최근 공장 자동화의 핵심인 산업용 로봇에 대한 관심이 국내외적으로 크게 증대하고 있다. 본 논문에서는 산업용 로봇에 관한 기초적인 이론과 현재까지의 연구 결과들을 개략적으로 기술하였다.

그러나 현대 과학의 급속한 발전과 로봇 응용분야의 확대로 단순 로봇에서 고도의 지능형 로봇로의 변화가 요구된다. 미국과 일본을 비롯한 로봇 선진기술 국가들에서는 이미 지능형 로봇 연구 개발에 국가적인 노력을 경주하고 있다. 그러나 국내에서는 그 노력이 아직 미진한 실정이다. 따라서 2000년대의 로봇 산업의 선진화를 추구하는 우리 실정에서는 로보틱스의 기초 이론 연구와 지능화를 위한 연구 노력에 국가적 차원의 지원이 요망된다.

參 考 文 獻

[1] M. Brady, *Robot Motion*, MIT Press, Cam-

bridge, MA, 1982.

- [2] J.J. Craig, *Introduction to Robotics : Mechanics and Control*, Addison-Wesley Publishing Co., Reading, Mass, 1986.
- [3] K.S. Fu, R.C. Gonzalez and C.S.G. Lee, *Robotics: Control, Sensing, Vision, and Intelligence*, McGraw-Hill Inc., NY, 1987.
- [4] J.M. Hollerbach, A recursive formulation of Lagrangian manipulator dynamics, *IEEE Trans. Syst. Man, Cybern.*, vol. SMC-10, pp. 730-736, 1980.
- [5] T.C. Hsia, Adaptive control of robot manipulators-A Review, 1986. *IEEE Int. Conf. Robotics and Auto.*, vol. 1, pp. 183-189, 1986.
- [6] C.S. Lin, P.R. Chang and J.Y.S. Luh, Formulation and optimization of cubic polynomial joint trajectories for industrial robots, *IEEE Trans. Auto. Contr.*, vol. AC-28, pp. 1066-1074, 1982.
- [7] J.Y.S. Luh, An anatomy of industrial robots and their controls, *IEEE Trans. Auto. Contr.* vol. AC-28, pp. 133-153, 1983.
- [8] R.P. Paul, Manipulator Cartesian Path Control, *IEEE Trans. Syst., Man, Cyben.*, vol. SMC-9, no. 11, pp. 702-711, 1979.
- [9] R.P. Paul, Modeling, Trajectory Calculation and Servoing of a Computer Controlled Arm, Purdue Univ., West Lafayette, IN., 1981.
- [10] M.H. Raibert and B.K.P. Horn, Manipulator control using the configuration space method, *Ind. Robot*, vol. 5, pp. 69-73, 1978.
- [11] R.H. Taylor, Planning and execution of straight line manipulator trajectories, *IBM J. Res. and Develop.*, vol. 23, pp. 424-436, 1979.
- [12] R.C. Waters, Mechanical Arm Control, MIT AI Lab., Memo 549, 1979.
- [13] D.E. Whitney, The mathematics of coordinated control of prosthetic arms and manipulators, *ASME Trans. J. Dynam. Syst., Meas, Contr.*, vol. 99, pp. 91-97, 1977. 

筆者紹介**全 洪 兌**

1955年 11月 27日生

1976年 서울대학교 전자공학과
(학사)1982年 미국 New York주립대학
(석사)1986年 미국 New York주립대학
(박사)

1976年~1979年 국방과학연구소 연구원

1979年~1981年 한국전자통신연구소 연구원

1986年~현재 중앙대학교 전자공학과 조교수